



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION
EN CIENCIAS AGRICOLAS

CAMPUS MONTECILLO

EDAFOLOGÍA

**PAJA DE TRIGO COMO SUSTRATO EN EL
CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI**

FIDEL RENÉ DÍAZ SERRANO

T E S I S

Volumen I

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2011

(PAGS 1-268)

La presente tesis titulada: **Paja de trigo como sustrato en el crecimiento de plántulas de brócoli**, realizada por el alumno **Fidel René Díaz Serrano**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS
EDAFOLOGÍA**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO: _____

DR. PROMETEO SÁNCHEZ GARCÍA

ASESOR: _____

DR. MANUEL SANDOVAL VILLA

ASESOR: _____

DR. ROBERTO QUINTERO LIZAOLA

ASESOR: _____

DR. R. MARCOS SOTO HERNÁNDEZ

ASESOR: _____

DR. E. GABRIEL ALCÁNTAR GONZÁLEZ

Montecillo, Texcoco, México, julio de 2011

PAJA DE TRIGO COMO SUSTRATO EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI

Fidel René Díaz Serrano, Dr.

Colegio de Postgraduados, 2011

Con el objetivo de utilizar la paja de trigo como sustrato en el crecimiento de plántulas de brócoli se hicieron varios experimentos. En el primero se evaluaron 3 sustratos de paja de trigo con extracción de fenólicos con agua común. Las plántulas de brócoli presentaron porcentajes de inhibición entre 54.92 y 57.40 % en la parte aérea y entre 38.31 y 44.78 % en raíces con respecto al testigo. En el segundo se identificaron por cromatografía de capa fina y se cuantificaron por cromatografía líquida de alta resolución los ácidos *p*-cumárico y ferúlico como probables compuestos inhibidores del crecimiento. Los porcentajes de recuperación de estos ácidos fueron muy bajos con respecto a la concentración de fenólicos solubles totales (CFST) cuantificados por colorimetría, fluctuando entre 0.17 y 3.06 %, indicando que probablemente estos ácidos no son los compuestos fenólicos más importantes en la inhibición del crecimiento. Se evaluaron 20 extractantes de los fenólicos en paja de trigo y se evaluaron los seis mejores para elaborar sustratos de paja de trigo. El mejor crecimiento de las plántulas en un sustrato de paja de trigo alcanzó solamente el 79.50 % del peso seco de la parte aérea obtenido en la mejor turba comercial. El incremento en el peso de la parte aérea con respecto al peso obtenido en el primer experimento indicó que la granulometría del sustrato fue muy importante en el crecimiento de las plántulas. Se evaluaron 6 sustratos de paja de trigo con extracción de fenólicos con agua común y diferentes granulometrías en el crecimiento de plántulas de brócoli. Los sustratos de paja de trigo con granulometrías 90-10, 80-20, 70-30 y 60-40 produjeron plántulas con valores estadísticamente iguales en las variables longitud de vástagos, diámetro de tallo, peso de materia seca de raíces y peso de materia seca de vástagos a los obtenidos en las plántulas que crecieron en los sustratos con turbas importadas. Se evaluaron 9 sustratos de paja de trigo en el crecimiento de plántulas de brócoli, derivados de la degradación biológica parcial de paja de trigo por compostaje y vermicompostaje. Al menos en dos sustratos de paja con degradación biológica, las plántulas de brócoli presentaron crecimientos similares a los de las plántulas que crecieron en las dos turbas comerciales y pueden ser utilizados como sustratos para el crecimiento de plántulas de brócoli.

Palabras clave: *paja de trigo, sustratos, fenólicos, plántulas, brócoli.*

WHEAT STRAW AS SUBSTRATE IN THE GROWING OF BROCCOLI SEEDLINGS

Fidel René Díaz Serrano, Ph. D.

Postgraduate College, 2011

With the aim to use wheat straw as substrate for broccoli seedling growth they were carried out various experiments. In the first experiment three wheat straw substrates were used with phenolic compounds extraction with tap water. The broccoli seedlings showed inhibition among 54.92 and 57.40 % in shoots and among 38.31 and 44.78 % in roots in relationship to control. In the second experiment they were identified by fine chromatography and quantified by high performance liquid chromatography the *p*-coumaric and ferulic acids as probably the main inhibitors of plant growth. The recovery percentages of these acids in relationship to the total soluble phenolics concentration (TSPC) quantified by colorimetric method were very low, ranging among 0.17 and 3.06 %, showing that probably these acids are not the main phenolic compounds that act as plant growth inhibitors. They were evaluated 20 extractants of phenolic compounds and they were evaluated the best six extractants to elaborate substrates of wheat straw for the growing of broccoli seedlings. The best growth of broccoli seedlings on a wheat straw substrate just reached the 79.50 % of the dry weight obtained in the best peat moss commercial as control. The increase in shoots weight in relationship to the weight obtained in the first experiment indicates that particle size in the substrate is very important in the growing of seedlings. They were evaluated six substrates with extraction of phenolic compounds with tap water and different particle sizes in the growing of broccoli seedlings. The substrates of wheat straw with particle sizes of 90-10, 80-20, 70-30 and 60-40 produced seedlings with values statistically equal to that obtained in the control (imported commercial peat moss) in the variables shoot length, diameter width, root dry weight and shoot dry weight. They were evaluated 9 wheat straw substrates in the growing of broccoli seedlings, elaborated from the partial biological decomposition of wheat straw by composting and vermicomposting. At least two wheat straw substrates with biological transformation showed broccoli seedlings with statistically similar growth to that obtained in broccoli seedlings growing in the best commercial peat moss substrate. The above suggest that wheat straw with partial biological transformation could be used for broccoli seedling production instead of imported peat moss substrates.

Key words: *wheat straw, substrates, phenolics, seedlings, broccoli.*

DEDICATORIAS

Dedico esta tesis a mis padres Fidel y María Auxilio ya fallecidos. Especialmente a mi padre que me mostró el sendero del conocimiento común y científico y fue mi guía hasta el último día de su vida.

A mis segundos padres Don Pepe y Doña Mina ya fallecidos.

A mis hijos Karla Renata, Joel René, Cecilia Eréndira y Alejandro.

A mi compañera de vida Lucina Serafin Pacheco, gracias por su gran apoyo.

A mi compañero y hermano de alegrías y penurias durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados JOSÉ LUIS RUIZ ESQUEDA (†).

A mis compañeros y amigos Ramón, Lalo, Basilio y Yolanda.

A mi hermana Frida y a mis hermanos de crianza Nena, Pepe, Luis, Tita y Chacho.

A todos mis profesores en el Colegio de Postgraduados quienes me enseñaron el camino del conocimiento científico, especialmente el MC. David Pájaro Huertas.

A mis profesores de seminario de Investigación la Dra. Ma. del Carmen Gutiérrez Castorena y al Dr. David Espinoza Victoria, por sus consejos y discusiones que hicieron realidad la elaboración de este trabajo de investigación.

A los integrantes de mi consejo particular: Dr. Prometeo Sánchez García, Dr. Manuel Sandoval Villa, Dr. Roberto Quintero Lizaola, Dr. R. Marcos Soto Hernández, Dr. E. Gabriel Alcántar González y al Dr. José Ángel Garza (†), por su contribución en la elaboración del proyecto de investigación, seguimiento y finalización de este trabajo de investigación.

Al Dr. Arturo Galvis Espíndola y a Tere por su sincera y desinteresada amistad.

A los compañeros del Laboratorio de Nutrición Vegetal: Laurita, Wenceslao, Manuel, Jaime y Gonzalo quienes me brindaron su amistad y su ayuda durante mi estancia en este Colegio.

AGRADECIMIENTOS

A la División de Ciencias de la Vida de la Universidad de Guanajuato por haberme permitido prepararme a nivel postgrado.

Al CONACYT por haber financiado mis estudios de postgrado en el Colegio de Postgraduados en el campus Montecillo, Texcoco, Edo. de México, durante mis estudios de maestría y doctorado.

A todos aquellos autores de los artículos científicos y otras fuentes relacionadas con esta tesis, que sin su valiosa información no hubiera sido posible llevar a cabo este trabajo de investigación.

A mis compañeros de trabajo de la División de Ciencias de la Vida, Universidad de Guanajuato.

A los Doctores Víctor Volke Haller y David Espinosa Victoria por haber aceptado formar parte de mi jurado examinador como sinodales.

A todos mis profesores durante mi estancia en el Colegio de Postgraduados mi gratitud.

A la Srta. Lorena Díaz por su gran ayuda en los trámites para la presentación de ésta tesis doctoral.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN GENERAL-----	1
OBJETIVO GENERAL-----	2
Objetivos Específicos-----	3
HIPÓTESIS GENERAL-----	3
Hipótesis específicas-----	3
CAPITULO I	
RESUMEN. SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO, MEZCLAS DE PAJA CON TURBA, PAJA CON VERMICOMPOSTA Y VERMICOMPOSTA EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI-----	5
SUMMARY. WHEAT STRAW SUBSTRATES, MIXTURES OF WHEAT STRAW WITH PEAT MOSS AND VERMICOMPOST AND VERMICOMPOST ON THE BROCCOLI SEEDLING GROWTH-----	6
1.1 INTRODUCCIÓN-----	7
1.2 MATERIALES Y MÉTODOS-----	10
1.2.1 Acondicionamiento de la paja de trigo y elaboración de los sustratos-----	10
1.2.2 Propiedades químicas iniciales de los sustratos-----	11
1.2.2.1 pH y conductividad eléctrica-----	11
1.2.2.2 Concentración de fenólicos solubles totales-----	12
1.2.3 Siembra-----	13
1.2.4 Solución nutritiva y riegos-----	14
1.2.5 Número de plántulas emergidas a los diez días después de la siembra-----	16
1.2.6 Propiedades químicas de los sustratos a los 18 DDS-----	17
1.2.6.1 pH y conductividad eléctrica-----	17
1.2.6.2 Concentración de fenólicos solubles totales-----	17
1.2.7 Variables evaluadas a los 24 DDS (Colecta de las plántulas)-----	18
1.2.7.1 En sustratos-----	18

1.2.7.1.1	pH y conductividad eléctrica-----	18
1.2.7.1.2	Concentración de fenólicos solubles totales-----	18
1.2.7.1.3	Degradación microbiológica de los sustratos-----	18
1.2.7.2	En plántulas-----	19
1.2.7.2.1	En vástagos-----	19
1.2.7.2.2	En raíces-----	19
1.2.7.2.2.1	Color de raíces-----	19
1.2.7.2.2.2	Facilidad de extracción del cepellón-----	19
1.2.7.2.2.3	Densidad de pelos radicales-----	20
1.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN-----	21
1.3.1	Propiedades químicas de los sustratos-----	21
1.3.1.1	pH-----	22
1.3.1.2	Conductividad eléctrica-----	23
1.3.1.3	Concentración de fenólicos solubles totales-----	24
1.3.2	Porcentaje de plántulas emergidas a los diez días después de la siembra-----	28
1.3.3	Propiedades químicas evaluadas en los sustratos a los 18 DDS-----	31
1.3.3.1	pH-----	31
1.3.3.2	Conductividad eléctrica-----	32
1.3.3.3	Concentración de fenólicos solubles totales-----	33
1.3.4	Variables evaluadas a los 24 días después de la siembra (Colecta de las plántulas)-----	34
1.3.4.1	En sustratos-----	34
1.3.4.1.1	Propiedades químicas-----	34
1.3.4.1.1.1	pH-----	35
1.3.4.1.1.2	Conductividad eléctrica-----	37
1.3.4.1.1.3	Concentración de fenólicos solubles totales-----	37
1.3.4.2	Variables de crecimiento evaluadas en plántulas a los 24 DDS-----	39
1.3.4.2.1	En los vástagos-----	39

1.3.4.2.1.1 Longitud de vástagos-----	39
1.3.4.2.1.2 Diámetro de tallo-----	41
1.3.4.2.1.3 Peso de materia seca de vástagos-----	42
1.3.4.2.2 En las raíces-----	43
1.3.4.2.2.1 Peso de materia seca de raíces-----	43
1.3.4.2.2.2 Relación peso de materia seca de raíces/peso de materia seca de vástagos-----	44
1.3.4.3 Variables cualitativas en los sustratos, las raíces y el cepellón a los 24 DDS-----	45
1.3.4.3.1 Degradación microbiológica de los sustratos-----	46
1.3.4.3.2 Color de raíz y densidad de pelos radicales-----	47
1.3.4.3.3 Facilidad para extraer el cepellón-----	49
1.4. CONCLUSIONES-----	51
1.5 LITERATURA CITADA-----	52
CAPITULO II	
RESUMEN. IDENTIFICACIÓN DE ÁCIDOS FENÓLICOS EN PAJA DE TRIGO POR CROMATOGRAFÍA DE CAPA FINA, E IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN POR CROMATOGRAFÍA LÍQUIDA DE ALTA RESOLUCIÓN-----	57
SUMMARY: WHEAT STRAW PHENOLIC ACIDS IDENTIFICATION BY THIN LAYER CHROMATOGRAPHY AND IDENTIFICATION AND QUANTIFICATION BY HIGH PERFORMANCE LIQUID CHROMATOGRAPHY-----	58
2.1 INTRODUCCIÓN-----	59
2.2 MATERIALES Y MÉTODOS-----	60
2.2.1 Identificación de ácidos fenólicos por cromatografía de capa fina----	60
2.2.1.1 Preparación de los vidrios para las placas-----	61
2.2.1.2 Colocación de los vidrios en el porta vidrios-----	61
2.2.1.3 Preparación de la sílica gel y elaboración de las placas cromatográficas-----	61

2.2.1.4 Extracción de fenólicos de la paja de trigo-----	62
2.2.1.5 Identificación de ácidos fenólicos-----	63
2.2.2 Identificación y cuantificación de ácidos fenólicos por cromatografía líquida de alta resolución-----	65
2.2.2.1 Extracción de compuestos fenólicos-----	65
2.2.2.2 Identificación y cuantificación de ácidos fenólicos-----	66
2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN-----	67
2.3.1 Identificación de ácidos fenólicos en paja de trigo por cromatografía de capa fina-----	67
2.3.1.1 Extracto con agua común-----	67
2.3.1.2 Extracto con agua a 60 °C-----	70
2.3.1.3 Extracto con agua a pH 5.5-----	70
2.3.1.4 Extracto con NaOH al 2 %-----	73
2.3.1.5 Extracto con KOH al 2 %-----	75
2.3.1.6 Extracto con urea al 2 %-----	77
2.3.2 Identificación y cuantificación de ácidos fenólicos por cromatografía líquida de alta resolución (CLAR)-----	79
2.4 CONCLUSIONES-----	90
2.5 LITERATURA CITADA-----	93
CAPITULO III	
RESUMEN. CAPACIDAD DE EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS DE VEINTE EXTRACTANTES EN PAJA DE TRIGO-----	95
SUMMARY. EXTRACTION CAPACITY OF PHENOLICS COMPOUNDS OF TWENTY EXTRACTANTS IN WHEAT STRAW-----	96
3.1 INTRODUCCIÓN-----	97
3.2 MATERIALES Y MÉTODOS-----	98
3.2.1 Extractantes-----	98
3.2.2 Capacidad de extracción de fenólicos solubles totales de 20 extractantes en paja de trigo-----	98
3.2.3 Concentración de fenólicos en los extractos de paja de trigo después de la primera extracción, enjuague tres veces y secado	

(segunda extracción)-----	101
3.2.4 Determinación del peso de los compuestos solubles de la paja de trigo por efecto del tratamiento con los extractantes-----	102
3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN-----	103
3.3.1 Capacidad de extracción de fenólicos solubles en paja de trigo de 20 extractantes (primera extracción)-----	103
3.3.2 Concentración de fenólicos solubles totales en paja de trigo después de la extracción, enjuague y secado (segunda extracción)-	110
3.3.3 Cuantificación de la concentración de compuestos solubles en paja de trigo por efecto del tratamiento con los 20 extractantes (primera extracción)-----	113
3.4 CONCLUSIONES-----	118
3.5 LITERATURA CITADA-----	119
CAPITULO IV	
RESUMEN. EVALUACIÓN DE SEIS SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO Y DOS TURBAS COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI-----	121
SUMMARY. EVALUATION OF SIX WHEAT STRAW SUBSTRATES AND TWO COMMERCIAL PEAT MOSS IN THE GROWING OF BROCCOLI SEEDLINGS-----	122
4.1 INTRODUCCIÓN-----	123
4.2 MATERIALES Y MÉTODOS-----	124
4.2.1 Extractantes de fenólicos en la paja de trigo-----	124
4.2.2 Acondicionamiento de la paja de trigo y elaboración de los sustratos-----	124
4.2.3 Sustratos evaluados-----	125
4.2.4 Llenado de charolas y siembra-----	126
4.2.5 Propiedades químicas iniciales en los sustratos-----	126
4.2.5.1 pH, conductividad eléctrica y concentración de fenólicos solubles totales-----	126
4.2.5.2 Materia orgánica de los sustratos-----	127

4.2.6 Solución nutritiva-----	128
4.2.7 Número de plántulas emergidas a los nueve días después de la siembra-----	130
4.2.8 Propiedades químicas de los sustratos a los 15 y 22 días después de la siembra-----	131
4.2.8.1 pH y conductividad eléctrica-----	131
4.2.8.2 Concentración de fenólicos solubles totales-----	131
4.2.9 Densidad de pelos radicales a los 15 y 22 días después de la siembra-----	131
4.2.10 Variables evaluadas a los 30 días después de la siembra (colecta de las plántulas)-----	132
4.2.10.1 En sustratos-----	132
4.2.10.1.1 pH y conductividad eléctrica-----	132
4.2.10.1.2 Concentración de fenólicos solubles totales-----	132
4.2.10.1.3 Degradación microbiológica-----	132
4.2.10.1.4 Materia orgánica y bioestabilidad-----	133
4.2.10.2 En plántulas-----	133
4.2.10.2.1 En vástagos-----	133
4.2.10.2.1.1 Lecturas SPAD-----	133
4.2.10.2.1.2 Longitud de vástagos-----	133
4.2.10.2.1.3 Diámetro de tallo-----	134
4.2.10.2.1.4 Peso de materia seca de vástagos-----	134
4.2.10.2.1.5 Deficiencias nutrimentales-----	134
4.2.10.2.2 En raíces-----	134
4.2.10.2.2.1 Color de raíces-----	134
4.2.10.2.2.2 Facilidad para extraer el cepellón-----	135
4.2.10.2.2.3 Densidad de pelos radicales-----	135
4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN-----	135
4.3.1 Propiedades químicas iniciales-----	135
4.3.1.1 pH-----	135
4.3.1.2 Conductividad eléctrica-----	136

4.3.1.3	Concentración inicial de fenólicos solubles totales en los sustratos de paja de trigo-----	137
4.3.1.4	Materia orgánica-----	138
4.3.2	Porcentaje de plántulas emergidas-----	138
4.3.3	Propiedades químicas de los sustratos durante el experimento-----	139
4.3.3.1	pH-----	139
4.3.3.2	Conductividad eléctrica-----	141
4.3.3.3	Concentración de fenólicos solubles totales-----	143
4.3.4	Propiedades químicas de los sustratos a los 30 DDS-----	144
4.3.4.1	pH-----	144
4.3.4.2	Conductividad eléctrica-----	145
4.3.4.3	Concentración de fenólicos solubles totales-----	146
4.3.4.4	Materia orgánica-----	146
4.3.5	Variables evaluadas en la parte aérea de las plántulas de brócoli a los 30 días después de la siembra (DDS)-----	150
4.3.5.1	Longitud de vástagos-----	150
4.3.5.2	Diámetro de plántulas-----	154
4.3.5.3	Peso de materia seca-----	154
4.3.5.4	Lecturas SPAD-----	157
4.3.6	Variables cualitativas evaluadas en los sustratos en que crecieron las plántulas de brócoli, en las raíces de las plántulas y en el cepellón, a los 30 días después de la siembra-----	160
4.3.6.1	Degradación microbiológica-----	160
4.3.6.2	Color de raíces-----	161
4.3.6.3	Densidad de pelos radicales-----	161
4.3.6.4	Facilidad para extraer el cepellón-----	162
4.4	CONCLUSIONES-----	162
4.5	LITERATURA CITADA-----	165

CAPITULO V

RESUMEN. SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO CON DIFERENTE GRANULOMETRÍA Y DOS TURBAS COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI-----	168
SUMMARY. WHEAT STRAW SUBSTRATES WITH DIFFERENT PARTICLE SIZE AND TWO COMMERCIAL PEAT MOSSES IN THE GROWING OF BROCCOLI SEEDLINGS-----	169
5.1 INTRODUCCIÓN-----	170
5.2 MATERIALES Y MÉTODOS-----	173
5.2.1 Acondicionamiento de la paja de trigo y elaboración de los sustratos-----	173
5.2.2 Sustratos evaluados-----	174
5.2.3 Propiedades físicas iniciales de los sustratos-----	174
5.2.3.1 Densidad aparente-----	174
5.2.3.2 Densidad real-----	175
5.2.3.3 Porosidad total-----	176
5.2.3.4 Propiedades físicas determinadas en embudos de succión y columnas colgantes-----	177
5.2.3.5 Propiedades físicas determinadas en charola aplicando presión-----	180
5.2.4 Llenado de charolas y siembra-----	181
5.2.5 Propiedades químicas iniciales en los sustratos-----	181
5.2.5.1 pH, conductividad eléctrica y concentración de fenólicos solubles totales-----	181
5.2.5.2 Materia orgánica-----	182
5.2.5.3 Capacidad de intercambio catiónico-----	183
5.2.6 Solución nutritiva-----	184
5.2.7 Porcentaje de plántulas emergidas a los nueve días después de la siembra-----	185
5.2.8 Propiedades químicas en los sustratos a los 10, 13, 15, 23 y 27 DDS-----	185

5.2.8.1	pH y conductividad eléctrica-----	185
5.2.8.2	Concentración de fenólicos solubles totales-----	186
5.2.9	Densidad de pelos radicales a los 10, 13, 15, 23 y 27 DDS-----	186
5.2.10	Variables evaluadas en los sustratos a los 30 días después de la siembra (colecta de las plántulas)-----	186
5.2.10.1	Propiedades químicas en los sustratos-----	187
5.2.10.1.1	pH y conductividad eléctrica-----	187
5.2.10.1.2	Concentración de fenólicos solubles totales-----	187
5.2.10.1.3	Materia orgánica-----	187
5.2.10.2	En vástagos-----	187
5.2.10.2.1	Deficiencias nutrimentales-----	187
5.2.10.2.2	Lecturas SPAD-----	188
5.2.10.2.3	Longitud de vástagos-----	188
5.2.10.2.4	Diámetro de tallo-----	188
5.2.10.2.5	Peso de materia seca de vástagos-----	188
5.2.10.2.6	Relación peso de materia seca de vástagos/ longitud de vástagos-----	189
5.2.10.2.7	Análisis químico de vástagos-----	189
5.2.10.3	En raíces-----	190
5.2.10.3.1	Peso de materia seca de raíces-----	190
5.2.10.3.2	Relación peso de materia seca de vástagos/ peso de materia seca de raíces-----	190
5.2.10.4	En sustratos-----	190
5.2.10.4.1	Degradación microbiológica-----	190
5.2.10.4.2	Color de raíces-----	191
5.2.10.4.3	Facilidad para extraer el cepellón-----	191
5.2.10.4.4	Densidad de pelos radicales-----	192
5.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN-----	192
5.3.1	Propiedades físicas iniciales de los sustratos-----	192
5.3.1.1	Densidad aparente, densidad real y porosidad total-----	192

5.3.1.2 Propiedades físicas utilizando embudos de succión con columnas colgantes-----	196
5.3.1.2.1 Porosidad total-----	196
5.3.1.2.2 Espacio sólido-----	197
5.3.1.2.3 Porosidad de aire-----	197
5.3.1.2.4 Agua fácilmente disponible-----	202
5.3.1.2.5 Agua de reserva-----	203
5.3.1.2.6 Agua total disponible-----	204
5.3.1.2.7 Agua difícilmente disponible-----	205
5.3.1.2.8 Porosidad de agua-----	207
5.3.1.3 Propiedades físicas determinadas en charolas-----	207
5.3.1.3.1 Porosidad total-----	207
5.3.1.3.2 Espacio sólido-----	209
5.3.1.3.3 Porosidad de aire-----	210
5.3.1.3.4 Porosidad de agua-----	211
5.3.2 Propiedades químicas iniciales de los sustratos-----	212
5.3.2.1 pH y conductividad eléctrica-----	212
5.3.2.2 Concentración de fenólicos solubles totales-----	213
5.3.2.3 Materia orgánica-----	214
5.3.2.4 Capacidad de intercambio catiónico-----	214
5.3.3 Porcentaje de plántulas emergidas-----	216
5.3.4 Propiedades químicas de los sustratos durante el experimento--	217
5.3.4.1 pH-----	217
5.3.4.2 Conductividad eléctrica-----	218
5.3.5 Propiedades químicas de los sustratos a los 30 DDS-----	221
5.3.5.1 pH-----	221
5.3.5.2 Conductividad eléctrica-----	222
5.3.5.3 Concentración de fenólicos solubles totales-----	223
5.3.5.4 Materia orgánica-----	224
5.3.6 Variables evaluadas en vástagos y raíces de plántulas de brócoli a los 30 DDS-----	227

5.3.6.1 Longitud de vástagos-----	227
5.3.6.2 Diámetro de tallo-----	231
5.3.6.3 Lecturas SPAD-----	231
5.3.6.4 Peso de materia seca de vástagos-----	233
5.3.6.5 Porcentaje relativo de peso de materia seca de vástagos-	234
5.3.6.6 Peso de materia seca de raíces-----	235
5.3.6.7 Relación peso de materia seca de vástagos/ peso de materia seca de raíces-----	237
5.3.6.8 Relación peso de materia seca de vástagos/ longitud de vástagos-----	238
5.3.7 Variables cualitativas en los sustratos y cepellones a los 30 DDS-----	239
5.3.7.1 Degradación microbiológica-----	239
5.3.7.2 Color de raíces-----	240
5.3.7.3 Densidad de pelos radicales-----	240
5.3.7.4 Facilidad para extraer el cepellón-----	244
5.3.8 Análisis químico de los vástagos de plántulas de brócoli recolectadas a los 30 DDS-----	244
5.3.8.1 Nitrógeno-----	244
5.3.8.2 Fósforo-----	246
5.3.8.3 Potasio-----	247
5.3.8.4 Calcio-----	248
5.3.8.5 Magnesio-----	250
5.3.8.6 Hierro-----	251
5.3.8.7 Manganeso-----	253
5.3.8.8 Cobre-----	254
5.3.8.9 Zinc-----	256
5.3.8.10 Boro-----	257
5.4 CONCLUSIONES-----	258
5.5 LITERATURA CITADA-----	264

CAPITULO VI

RESUMEN. TRANSFORMACIÓN BIOLÓGICA DE COMPUESTOS FENÓLICOS EN PAJA DE TRIGO-----	269
SUMMARY. BIOLOGICAL TRANSFORMATION OF PHENOLIC COMPOUNDS IN WHEAT STRAW-----	270
6.1 INTRODUCCIÓN-----	271
6.2 MATERIALES Y MÉTODOS-----	273
6.2.1 Tratamientos evaluados-----	273
6.2.2 Aireación de la paja de trigo-----	276
6.2.3 Temperatura del ambiente-----	277
6.2.4 Temperatura en las pajas de trigo-----	277
6.2.5 Variables evaluadas en los materiales de paja de trigo a los 0, 15, 30, 45, 60 y 90 días después del inicio del experimento-----	277
6.2.5.1 Concentración de fenólicos solubles totales, pH y conductividad eléctrica-----	277
6.2.5.2 Materia orgánica-----	278
6.2.5.3 Contenido de C, N y relación C: N a los 90 días después del inicio del experimento-----	279
6.2.5.4 Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina a los 90 días del inicio del experimento-----	279
6.2.5.5 Degradación física de paja de trigo en los tratamientos biológicos evaluados a los 90 días del inicio del experimento-----	279
6.2.5.6 Color de los materiales transformados a los 90 días después del inicio del experimento-----	280
6.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN-----	280
6.3.1 Temperatura ambiental y de los materiales de paja de trigo-----	280
6.3.1.1 Temperatura ambiental-----	280
6.3.1.2 Temperatura de las pajas de trigo-----	280
6.3.2 Concentración de fenólicos solubles totales-----	280
6.3.2.1 Concentración de fenólicos solubles totales al inicio del	

experimento-----	281
6.3.2.2 Concentración de fenólicos solubles totales a los 15 días después del inicio del experimento-----	282
6.3.2.3 Concentración de fenólicos solubles totales a los 30 DDIE-----	284
6.3.2.4 Concentración de fenólicos solubles totales a los 45 DDIE-----	286
6.3.2.5 Concentración de fenólicos solubles totales a los 60 DDIE-----	287
6.3.2.6 Concentración de fenólicos solubles totales a los 90 DDIE-----	288
6.3.3 pH-----	293
6.3.4 Conductividad eléctrica-----	296
6.3.5 Materia orgánica-----	298
6.3.6 Materia orgánica, C, N y relación C: N después de tamizar los materiales de paja de trigo-----	303
6.3.6.1 Materia orgánica-----	303
6.3.6.2 Carbono-----	305
6.3.6.3 Nitrógeno-----	305
6.3.6.4 Relación C: N-----	306
6.3.7 Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina-----	309
6.3.8 Degradación física de las pajas de trigo-----	311
6.3.9 Color de los materiales de acuerdo con la notación de Munsell--	311
6.4 CONCLUSIONES-----	312
6.5 LITERATURA CITADA-----	317
CAPITULO VII	
RESUMEN. SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO CON DEGRADACION BIOLÓGICA PARCIAL Y DOS TURBAS COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI-----	322

SUMMARY. WHEAT STRAW SUBSTRATES WITH PARTIAL BIOLOGICAL DEGRADATION AND TWO COMMERCIAL PEAT MOSSES IN THE GROWING OF BROCCOLI SEEDLINGS-----	323
7.1 INTRODUCCIÓN-----	324
7.2 MATERIALES Y MÉTODOS-----	326
7.2.1 Sustratos evaluados-----	326
7.2.2 Propiedades físicas iniciales de los sustratos-----	328
7.2.2.1 Densidad aparente-----	328
7.2.2.2 Densidad real-----	328
7.2.2.3 Porosidad total-----	329
7.2.2.4 Propiedades físicas determinadas en embudos de succión y columnas colgantes-----	329
7.2.3 Llenado de charolas y siembra-----	329
7.2.4 Propiedades químicas iniciales de los sustratos-----	330
7.2.4.1 Mojabilidad-----	330
7.2.4.1.1 Mojabilidad sin agitación-----	331
7.2.4.1.2 Mojabilidad con agitación-----	331
7.2.4.2 Concentración inicial de nutrimentos solubles-----	331
7.2.4.3 pH, conductividad eléctrica y concentración de fenólicos solubles totales-----	332
7.2.4.4 Materia orgánica-----	332
7.2.4.5 Capacidad de intercambio catiónico-----	333
7.2.4.6 Contenido de C, N y relación C: N-----	333
7.2.5 Porcentaje de plántulas emergidas a los seis días después de la siembra-----	333
7.2.6 Solución nutritiva-----	334
7.2.7 Propiedades químicas de los sustratos a los 10, 20 y 25 DDS---	334
7.2.8 Densidad de pelos radicales a los 15, 20 y 25 DDS-----	335
7.2.9 Variables evaluadas a los 30 días después de la siembra (colecta de las plántulas)-----	335
7.2.9.1 Propiedades químicas de los sustratos-----	335

7.2.9.1.1	pH y conductividad eléctrica-----	335
7.2.9.1.2	Concentración de fenólicos solubles totales-----	335
7.2.9.1.3	Materia orgánica y bioestabilidad-----	336
7.2.9.1.4	Capacidad de amortiguamiento del pH de los sustratos 5 y 8 de paja de trigo parcialmente degradada-----	336
7.2.9.2	Variables evaluadas en vástagos-----	337
7.2.9.2.1	Deficiencias nutrimentales-----	337
7.2.9.2.2	Lecturas SPAD-----	337
7.2.9.2.3	Longitud de vástagos-----	337
7.2.9.2.4	Longitud de la base a las hojas embrionarias-----	337
7.2.9.2.5	Longitud de la base a la primera hoja verdadera---	338
7.2.9.2.6	Diámetro de tallo-----	338
7.2.9.2.7	Peso de materia seca de vástagos-----	339
7.2.9.3	Variables evaluadas en raíces-----	339
7.2.9.3.1	Volumen de raíces-----	339
7.2.9.3.2	Peso de materia seca de raíces-----	340
7.2.9.3.3	Relación peso de materia seca de vástagos/ peso de materia seca de raíces-----	340
7.2.10	Variables cualitativas determinadas en raíces y en sustratos a los 30 DDS-----	341
7.2.10.1	En raíces-----	341
7.2.10.1.1	Color de raíces-----	341
7.2.10.1.2	Densidad de pelos radicales-----	341
7.2.10.1.3	Facilidad para extraer el cepellón-----	341
7.2.10.2	En sustratos-----	342
7.2.10.2.1	Degradación microbiológica-----	342
7.2.11	Análisis químico de vástagos-----	342
7.3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN-----	343
7.3.1	Propiedades físicas iniciales de los sustratos-----	343

7.3.1.1 Densidad aparente, densidad real y porosidad total-----	343
7.3.1.2 Propiedades físicas iniciales determinadas en los sustratos utilizando embudos de succión y columnas colgantes-----	346
7.3.1.2.1 Porosidad total-----	346
7.3.1.2.2 Espacio sólido-----	348
7.3.1.2.3 Porosidad de aire-----	349
7.3.1.2.4 Agua fácilmente disponible-----	353
7.3.1.2.5 Agua de reserva-----	354
7.3.1.2.6 Agua total disponible-----	355
7.3.1.2.7 Agua difícilmente disponible-----	355
7.3.1.2.8 Porosidad de agua-----	357
7.3.2 Propiedades químicas iniciales de los sustratos-----	357
7.3.2.1 Mojabilidad-----	357
7.3.2.1.1 Mojabilidad sin agitación-----	358
7.3.2.1.2 Mojabilidad con agitación-----	361
7.3.2.2 Concentración inicial de nutrientes solubles-----	363
7.3.2.2.1 Fósforo-----	363
7.3.2.2.2 Potasio-----	366
7.3.2.2.3 Calcio-----	368
7.3.2.2.4 Magnesio-----	370
7.3.2.2.5 Sodio-----	371
7.3.2.2.6 Hierro-----	373
7.3.2.2.7 Manganeso-----	374
7.3.2.2.8 Cobre-----	375
7.3.2.2.9 Zinc-----	377
7.3.2.2.10 Boro-----	378
7.3.2.2.11 Resolución de la posible problemática de altas concentraciones de algunos nutrientes en los sustratos-----	379
7.3.2.3 pH y conductividad eléctrica-----	380
7.3.2.4 Concentración inicial de fenólicos solubles totales-----	380

7.3.2.5 Materia orgánica-----	382
7.3.2.6 Capacidad de intercambio catiónico-----	384
7.3.2.7 Contenido de C, N, y relación C: N-----	386
7.3.2.7.1 Contenido de carbono-----	386
7.3.2.7.2 Concentración de nitrógeno-----	386
7.3.2.7.3 Relación C: N-----	388
7.3.3 Porcentaje de plántulas emergidas a los seis días después de la siembra-----	390
7.3.4 Propiedades químicas de los sustratos a los 10, 20 y 25 días después de la siembra-----	392
7.3.4.1 pH-----	392
7.3.4.2 Conductividad eléctrica-----	394
7.3.4.3 Concentración de fenólicos solubles totales-----	396
7.3.5 Propiedades químicas de los sustratos a los 30 DDS-----	399
7.3.5.1 pH-----	399
7.3.5.2 Conductividad eléctrica-----	400
7.3.5.3 Concentración de fenólicos solubles totales-----	400
7.3.5.4 Materia orgánica-----	401
7.3.5.5 Capacidad de amortiguamiento del pH de los sustratos 5 y 8 de paja de trigo parcialmente degradada-----	406
7.3.6 Variables evaluadas en vástagos y raíces de plántulas de brócoli a los 30 DDS-----	410
7.3.6.1 Deficiencias nutrimentales-----	410
7.3.6.2 Lecturas SPAD-----	410
7.3.6.3 Longitud de vástagos-----	411
7.3.6.4 Longitud de la base a las hojas embrionarias y longitud de la base a la primera hoja verdadera-----	412
7.3.6.5 Diámetro de tallo-----	413
7.3.6.6 Peso de materia seca de vástagos-----	414
7.3.6.7 Volumen de raíz-----	415
7.3.6.8 Peso de materia seca de raíces-----	416

7.3.6.9 Relación peso de materia seca de vástagos/ peso de materia seca de raíces-----	418
7.3.7 Variables cualitativas evaluadas en raíces y sustratos a los 30 días después de la siembra-----	418
7.3.7.1 Color de raíces-----	418
7.3.7.2 Densidad de pelos radicales-----	418
7.3.7.3 Facilidad para extraer el cepellón-----	421
7.3.7.4 Degradación microbiológica-----	422
7.3.8 Análisis químico de los vástagos de las plántulas de brócoli colectadas a los 30 DDS-----	422
7.3.8.1 Nitrógeno-----	423
7.3.8.2 Fósforo-----	424
7.3.8.3 Potasio-----	425
7.3.8.4 Calcio-----	425
7.3.8.5 Magnesio-----	426
7.3.8.6 Hierro-----	426
7.3.8.7 Manganeso-----	427
7.3.8.8 Cobre-----	428
7.3.8.9 Zinc-----	429
7.3.8.10 Boro-----	430
7.4 CONCLUSIONES-----	431
7.5 LITERATURA CITADA-----	435
7.6 CONCLUSIONES GENERALES-----	439
APÉNDICE A-----	442
APÉNDICE B-----	449
APÉNDICE C-----	453
APÉNDICE D-----	456
APÉNDICE E-----	460

LISTA DE CUADROS

	Pág
CAPITULO I SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO, MEZCLAS DE PAJA CON TURBA, PAJA CON VERMICOMPOSTA Y VERMICOMPOSTA EN EL CRECIMIENTO DE PLANTULAS DE BRÓCOLI	
Cuadro 1. Descripción de los sustratos, proporciones de las mezclas y granulometría de los diez sustratos evaluados-----	11
Cuadro 2. Concentración de nutrimentos en la solución nutritiva al 200 %	15
Cuadro 3. Especificaciones para la preparación de la solución nutritiva con macronutrimentos-----	15
Cuadro 4. Especificaciones para la preparación de la solución nutritiva con micronutrimentos-----	16
Cuadro 5. Propiedades químicas de los sustratos evaluados durante el experimento-----	21
Cuadro 6. Porcentaje de plántulas emergidas a los diez días después de la siembra y variables de crecimiento evaluadas en plántulas de brócoli cv. Green Bell, en diez sustratos, 24 días después de la siembra-----	40
Cuadro 7. Variables cualitativas registradas en los sustratos, en las raíces de las plántulas y en el cepellón, a los 24 DDS-----	46
CAPITULO II IDENTIFICACIÓN DE ÁCIDOS FENÓLICOS EN PAJA DE TRIGO E IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN POR CROMATOGRAFÍA LÍQUIDA DE ALTA RESOLUCIÓN	
Cuadro 1. Características registradas en la placa cromatográfica, ácidos fenólicos identificados y no identificados utilizando agua común como extractante. Las bandas se presentan en orden ascendente en la placa-----	68
Cuadro 2. Características registradas en la placa cromatográfica, ácidos fenólicos identificados y no identificados utilizando agua común a 60 °C como extractante. Las bandas se presentan en orden ascendente en la placa-----	71
Cuadro 3. Características registradas en la placa cromatográfica y ácidos fenólicos identificados utilizando agua a pH 5.5 como extractante. Las bandas se presentan en orden ascendente en la placa-----	72
Cuadro 4. Características registradas en la placa cromatográfica, ácidos fenólicos identificados y no identificados utilizando NaOH al 2 % como extractante. Las bandas se presentan en orden ascendente en la placa-----	74
Cuadro 5. Características registradas en la placa cromatográfica y ácidos fenólicos identificados utilizando KOH al 2 % como extractante. Las bandas se presentan en orden ascendente en la placa-----	76

Cuadro 6.	Características registradas en la placa cromatográfica, ácidos fenólicos identificados utilizando urea al 2 % como extractante. Las bandas se presentan en orden ascendente en la placa-----	78
Cuadro 7.	Características de los picos correspondientes a los ácidos fenólicos identificados y sus concentraciones en el extracto de agua común-----	79
Cuadro 8.	Características de los picos correspondientes a los ácidos fenólicos identificados y sus concentraciones en el extracto de agua común a 60 °C-----	80
Cuadro 9.	Características de los picos correspondientes a los ácidos fenólicos identificados y sus concentraciones en el extracto de agua común a pH 5.5-----	80
Cuadro 10.	Características de los picos correspondientes a los ácidos fenólicos identificados y sus concentraciones en el extracto con NaOH al 0.5 %-----	81
Cuadro 11.	Características de los picos correspondientes a los ácidos fenólicos identificados y sus concentraciones en el extracto con KOH al 0.5 %-----	81
Cuadro 12.	Características de los picos correspondientes a los ácidos fenólicos identificados y sus concentraciones en el extracto con urea al 0.5 %-----	82
Cuadro 13.	Porcentaje de recuperación de ácidos fenólicos (ácidos <i>p</i> -cumárico + ferúlico) cuantificados por CLAR, con respecto a la concentración de fenólicos solubles totales cuantificados en los extractos iniciales-----	85
Cuadro 14.	Concentraciones de fenólicos solubles totales iniciales con seis extractantes, concentraciones de fenólicos en los extractos metanólicos, por CLAR y porcentajes de recuperación-----	86
Cuadro 15.	Contenido de ácido <i>p</i> -cumárico, ácido ferúlico y la suma de los dos ácidos en paja de trigo variedad Saturno, expresada en mg kg ⁻¹ de MS-----	89
Cuadro 16.	Concentraciones de fenólicos solubles totales en los extractos de paja de trigo y concentración con base en peso seco-----	90
CAPÍTULO III CAPACIDAD DE EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS DE VEINTE EXTRACTANTES EN PAJA DE TRIGO		
Cuadro 1.	Extractantes utilizados para la extracción de los fenólicos solubles en paja de trigo-----	99
Cuadro 2.	Comparación entre la concentración de fenol y ácido <i>p</i> -cumárico en solución y absorbancia a una longitud de onda de 725 nm, para la elaboración de las curvas patrón-----	101
Cuadro 3.	Comparación de las concentraciones de fenólicos solubles totales en paja de trigo extraídos con 20 extractantes, incremento de concentración con respecto al agua común y porcentaje de fenólicos solubles totales con base en peso seco-----	104

Cuadro 4.	Concentración de fenólicos solubles totales en la segunda extracción y disminución de las CFST con respecto a las CFST iniciales-----	111
Cuadro 5.	Pérdida de compuestos principalmente orgánicos en el tratamiento de paja de trigo con 20 extractantes y porcentaje de fenólicos solubles totales en relación con el porcentaje total de orgánicos extraídos-----	114

CAPÍTULO IV EVALUACIÓN DE SEIS SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO Y DOS TURBAS COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI

Cuadro 1.	Sustratos evaluados en el experimento y extractantes de fenólicos solubles totales utilizados-----	125
Cuadro 2.	Concentración de nutrimentos en la solución al 100 %-----	129
Cuadro 3.	Especificaciones para la preparación de la solución nutritiva al 100%-----	129
Cuadro 4.	Fuentes de micronutrimentos, preparación de la solución madre y concentración en la solución nutritiva final suministrada a las plántulas de brócoli-----	130
Cuadro 5.	Propiedades químicas iniciales de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot-----	136
Cuadro 6.	Porcentaje de plántulas emergidas en ocho sustratos a los nueve DDS-----	139
Cuadro 7.	Propiedades químicas de los sustratos a los 30 días después de la siembra-----	145
Cuadro 8.	Propiedades de la materia orgánica de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot a los 30 DDS-----	147
Cuadro 9.	Variables evaluadas en la parte aérea de plántulas de brócoli cv. Patriot a los 30 días después de la siembra (DDS)-----	151
Cuadro 10.	Análisis de regresión múltiple entre las variables independientes pH, CE y CFST a los 15, 22 y 30 DDS, y la variable respuesta longitud de vástagos de plántula en ocho sustratos evaluados-----	152
Cuadro 11.	Regresión múltiple entre las variables independientes pH, CE y CFST a los 15, 22 y 30 DDS y la variable respuesta peso de materia seca de vástagos en dos turbas comerciales-----	155
Cuadro 12.	Regresión múltiple entre las variables independientes pH, CE y CFST a los 15, 22 y 30 DDS y la variable respuesta peso de materia seca de vástagos en ocho sustratos-----	156
Cuadro 13.	Variables independientes que influyeron en la variable lecturas SPAD-----	159
Cuadro 14.	Variables cualitativas registradas en los sustratos, en las raíces de las plántulas de brócoli cv. Patriot y en el cepellón a los 30 días después de la siembra (DDS)-----	160

CAPÍTULO V SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO CON DIFERENTE

GRANULOMETRÍA Y DOS TURBAS COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO DE PLANTULAS DE BRÓCOLI

Cuadro 1.	Sustratos evaluados en el experimento de granulometrías-----	174
Cuadro 2.	Densidad aparente, densidad real y porosidad total de los sustratos evaluados-----	193
Cuadro 3.	Propiedades físicas de los sustratos evaluados determinadas en embudos de succión con columnas colgantes-----	198
Cuadro 4.	Propiedades físicas de ocho sustratos cuantificadas en charolas----	208
Cuadro 5.	Propiedades químicas iniciales de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot-----	212
Cuadro 6.	Porcentaje de plántulas emergidas en ocho sustratos a los nueve días después de la siembra-----	217
Cuadro 7.	Propiedades químicas de los sustratos a los 30 días después de la siembra-----	222
Cuadro 8.	Propiedades de la materia orgánica de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot a los 30 DDS-----	225
Cuadro 9.	Variables evaluadas en vástagos y raíces de plántulas de brócoli cv. Patriot a los 30 DDS-----	229
Cuadro 10.	Valores de regresión múltiple entre la variable independiente pH, a los 0, 10, 13, 15, 23, 27 y 30 DDS y la variable respuesta longitud de vástagos de plántulas en las dos turbas evaluadas como testigos-----	230
Cuadro 11.	Regresión múltiple entre la variable independiente pH, a los 0, 10, 13, 15, 23, 27 y 30 DDS y la variable respuesta peso de materia seca de raíces en plántulas de brócoli que crecieron en las dos turbas evaluadas como testigos-----	237
Cuadro 12.	Variables cualitativas registradas en los sustratos, en las raíces de las plántulas de brócoli cv. Patriot, y en el cepellón, a los 30 días después de la siembra-----	239

CAPÍTULO VI TRANSFORMACIÓN BIOLÓGICA DE COMPUESTOS FENÓLICOS EN PAJA DE TRIGO

Cuadro 1.	Tratamientos evaluados en la transformación biológica de paja de trigo variedad Saturno-----	274
Cuadro 2.	Resultados del análisis de varianza de las regresiones entre el pH como variable dependiente y la CFST como variable independiente-----	295
Cuadro 3.	Disminución de materia orgánica durante 90 días en seis tratamientos de degradación biológica-----	300
Cuadro 4.	Coefficientes de determinación (R^2) y ecuaciones de regresión obtenidas entre las variables materia orgánica (variable dependiente) y CFST en las diversas fechas de muestreo-----	302
Cuadro 5.	Características químicas de la materia orgánica en seis tratamientos de paja de trigo con 90 días de degradación microbiológica y después de ser tamizados-----	304
Cuadro 6.	Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en paja de trigo	

	sin degradar y paja de trigo con 90 días de degradación en dos tratamientos-----	310
Cuadro 7.	Algunas características físicas de los tratamientos de paja de trigo evaluados en su degradación por los procesos de compostaje y vermicompostaje parciales-----	312
CAPITULO VII SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO CON DEGRADACIÓN BIOLÓGICA PARCIAL Y DOS TURBAS COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI		
Cuadro 1.	Sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot-----	327
Cuadro 2.	Densidad aparente, densidad real y porosidad total de 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot-----	344
Cuadro 3.	Propiedades físicas de 13 sustratos, obtenidas en embudos de succión y columnas colgantes. Experimento de crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot-----	347
Cuadro 4.	Mojabilidad de 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot-----	359
Cuadro 5.	Nutrimientos solubles en paja de trigo sin tratamiento previo de extracción de fenólicos solubles ni degradación biológica, en un extracto con relación 1: 2 (sustrato: agua destilada)-----	363
Cuadro 6.	Interpretación de niveles de nutrimentos obtenidos por el método holandés en una relación de extracción 1: 1.5 (Ansorena, 1994)-----	365
Cuadro 7.	Propiedades químicas iniciales de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot-----	381
Cuadro 8.	Concentraciones iniciales de C, N y relaciones C: N de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot-----	387
Cuadro 9.	Porcentaje de emergencia de plántulas en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot, seis días después de la siembra-----	391
Cuadro 10.	Disminución o aumento de las concentraciones de fenólicos solubles totales en trece sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot-----	398
Cuadro 11.	Propiedades químicas de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot, a los 30 DDS---	401
Cuadro 12.	Materia orgánica, pérdida de materia orgánica, bioestabilidad y categoría de bioestabilidad de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot, a los 30 DDS---	402
Cuadro 13.	Lecturas SPAD y algunas variables de crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot a los 30 DDS-----	411
Cuadro 14.	Variables de crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot a los 30 DDS-----	415
Cuadro 15.	Variables cualitativas en los sustratos, en las raíces de las plántulas de brócoli cv. Patriot y en el cepellón, a los 30 DDS--	419

Cuadro 16.	Concentración de macronutrientos en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot que crecieron en trece sustratos-----	424
Cuadro 17.	Concentración de micronutrientos en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot que crecieron en trece sustratos-----	427

APÉNDICES

APÉNDICE B

	Pág.	
Cuadro 1.	pH de los sustratos evaluados durante las diferentes fechas de toma de muestras-----	450
Cuadro 2.	Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹) de los sustratos evaluados durante las diferentes fechas de toma de muestras-----	451
Cuadro 3.	Concentración de fenólicos solubles totales (mg L ⁻¹) los sustratos evaluados durante las diferentes fechas de toma de muestras-----	452

APÉNDICE C

	Pág.	
Cuadro 1.	Concentración de fenólicos solubles totales (mg L ⁻¹) registradas durante el proceso de transformación biológica de paja de trigo variedad Saturno-----	454
Cuadro 2.	pH registrados durante el proceso de transformación biológica de paja de trigo variedad Saturno-----	454
Cuadro 3.	Conductividades eléctricas (dS m ⁻¹) registradas durante el proceso de transformación biológica de paja de trigo variedad Saturno-----	455
Cuadro 4.	Contenidos de materia orgánica (%) registrados durante el proceso de transformación biológica de paja de trigo variedad Saturno-----	455

APÉNDICE D

	Pág.	
Cuadro 1.	pH de los sustratos evaluados en las diferentes fechas de muestreo-----	457
Cuadro2.	Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹) de los sustratos evaluados en las diferentes fechas de muestreo-----	458
Cuadro3.	Concentración de fenólicos solubles totales (mg L ⁻¹) de los sustratos evaluados en las diferentes fechas de muestreo-----	459

APÉNDICE E

Pág

Cuadro 1.	Características generales de los sustratos testigos y los dos mejores sustratos derivados de paja de trigo con degradación parcial, que proporcionaron un adecuado crecimiento en plántulas de brócoli cv. Patriot. (Sakata Seeds)-----	461
Cuadro 2.	Concentrado de propiedades físicas de los sustratos testigos y los dos mejores sustratos derivados de paja de trigo con degradación parcial, que proporcionaron un adecuado crecimiento en plántulas de brócoli cv. Patriot. (Sakata Seeds)-	462
Cuadro 2.	Concentrado de propiedades físicas de los sustratos testigos y los dos mejores sustratos derivados de paja de trigo con degradación parcial, que proporcionaron un adecuado crecimiento en plántulas de brócoli cv. Patriot. (Sakata Seeds). (Continuación)-----	463
Cuadro 3.	Concentrado de propiedades químicas de los sustratos testigos y los dos mejores sustratos derivados de paja de trigo con degradación parcial, que proporcionaron un adecuado crecimiento en plántulas de brócoli cv. Patriot. (Sakata Seeds)-	464
Cuadro 4.	Aditivos en los sustratos testigos y los dos mejores sustratos derivados de paja de trigo con degradación parcial, que proporcionaron un adecuado crecimiento en plántulas de brócoli cv. Patriot. (Sakata Seeds)-----	465
Cuadro 5.	Concentrado de propiedades biológicas de los sustratos testigos y los dos mejores sustratos de paja de trigo con degradación parcial, que proporcionaron un adecuado crecimiento en plántulas de brócoli cv. Patriot (Sakata Seeds)--	466

LISTA DE FIGURAS

	Pág
CAPITULO I SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO, MEZCLAS DE PAJA CON TURBA, PAJA CON VERMICOMPOSTA Y VERMICOMPOSTA EN EL CRECIMIENTO DE PLANTULAS DE BRÓCOLI	
Figura 1. Isomería <i>cis</i> , <i>trans</i> en los ácidos hidroxicinámicos por el doble enlace C=C, con sus cadenas de carbono iguales, difiriendo los sustituyentes del anillo bencénico-----	73
CAPÍTULO IV EVALUACIÓN DE SEIS SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO Y DOS TURBAS COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI	
Figura 1. pH de los sustratos durante el experimento-----	141
Figura 2. Conductividad eléctrica (CE) en los sustratos durante el experimento-----	142
Figura 3. Concentración de fenólicos solubles totales (CFST) en los sustratos durante el experimento-----	144
CAPITULO V SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO CON DIFERENTE GRANULOMETRÍA Y DOS TURBAS COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI	
Figura 1. pH de los sustratos durante el experimento-----	218

Figura 2. Conductividad eléctrica (CE) en los sustratos durante el experimento-----	219
Figura 3. Concentración de fenólicos solubles totales (CFST) en los sustratos durante el experimento-----	221
Figura 4. Concentración de N (g kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra--	245
Figura 5. Concentración de P (g kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra--	247
Figura 6. Concentración de K (g kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra--	248
Figura 7. Concentración de Ca (g kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra--	249
Figura 8. Concentración de Mg (g kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra--	251
Figura 9. Concentración de Fe (mg kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra--	252

Figura 10.	Concentración de Mn (mg kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra--	253
Figura 11.	Concentración de Cu (mg kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra--	255
Figura 12.	Concentración de Zn (mg kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra--	257
Figura 13.	Concentración de B (mg kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra--	258
CAPITULO VI TRANSFORMACIÓN BIOLÓGICA DE COMPUESTOS FENÓLICOS EN PAJA DE TRIGO		
Figura 1.	Dinámica de la transformación biológica de compuestos fenólicos de materiales de paja de trigo composteados y vermicomposteados parcialmente-----	282
Figura 2.	Dinámica del pH de materiales de paja de trigo composteados y vermicomposteados parcialmente-----	293
Figura 3.	Dinámica de la conductividad eléctrica (CE) de materiales de paja de trigo composteados y vermicomposteados parcialmente-----	296
Figura 4.	Dinámica del porcentaje de materia orgánica de materiales de paja de trigo composteados y vermicomposteados parcialmente-----	299
Figura 5.	Relación entre materia orgánica (%) y CFST en el tratamiento 1, durante el proceso de transformación biológica de los compuestos fenólicos-----	302
CAPITULO VII. SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO CON DEGRADACIÓN BIOLÓGICA PARCIAL Y DOS TURBAS COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI		
Figura 1.	Concentración inicial de P (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 491.73 mg L^{-1} -----	364
Figura 2.	Concentración inicial de K (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = $1,392.1 \text{ mg L}^{-1}$ -----	367
Figura 3.	Concentración inicial de Ca (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0019$; DHS = 379.81 mg L^{-1} -----	368
Figura 4.	Concentración inicial de Mg (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 195.08 mg L^{-1} -----	370

Figura 5.	Concentración inicial de Na (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 242.24 mg L^{-1} -----	371
Figura 6.	Concentración inicial de Fe (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 9.68 mg L^{-1} -----	373
Figura 7.	Concentración inicial de Mn (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 1.44 mg L^{-1} -----	374
Figura 8.	Concentración inicial de Cu (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 4.06 mg L^{-1} -----	376
Figura 9.	Concentración inicial de Zn (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 6.21 -----	377
Figura 10.	Concentración inicial de B (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.1328$; DHS = 6.03 -----	378
Figura 11.	Dinámica del pH en los sustratos 1-6 durante el experimento---	393
Figura 12.	Dinámica del pH en los sustratos 7-13 durante el experimento--	393
Figura 13.	Conductividad eléctrica (dS m^{-1}) en los sustratos 1-6 durante el experimento-----	395
Figura 14.	Conductividad eléctrica (dS m^{-1}) en los sustratos 7-13 durante el experimento-----	395
Figura 15.	Dinámica de la concentración de fenólicos solubles totales (mg L^{-1}) en los sustratos 1-6 durante el experimento-----	396
Figura 16.	Dinámica de la concentración de fenólicos solubles totales (mg L^{-1}) en los sustratos 7-13 durante el experimento-----	397
Figura 17.	Curvas de amortiguamiento del pH en los sustratos 5 y 8 de paja de trigo, a las dos y doce horas después de su inicio-----	407
Figura 18.	Cambio de pH del sustrato 80-20 de paja de trigo y paja pura. pH inicial del agua desionizada = 5.37 y 5.10 respectivamente-	408
Figura 19.	Curva de amortiguamiento del pH del agua corriente del Laboratorio de Nutrición Vegetal. pH inicial = 7.35-----	409

APÉNDICES

APÉNDICE A

	Pág.
Figura 1. Cromatograma del extracto metanólico obtenido del extracto de agua común y corriente-----	443
Figura 2. Cromatograma del extracto metanólico obtenido del extracto de agua común a 60 °C-----	444
Figura 3. Cromatograma del extracto metanólico obtenido del extracto de agua a pH 5.5-----	445
Figura 4. Cromatograma del extracto metanólico obtenido del extracto de NaOH al 0.5 %-----	446
Figura 5. Cromatograma del extracto metanólico obtenido del extracto de KOH al 0.5 %-----	447
Figura 6. Cromatograma del extracto metanólico obtenido del extracto de urea al 0.5 %-----	448

INTRODUCCIÓN GENERAL

Los sustratos o medios de crecimiento más utilizados en México para la producción de plántulas de hortalizas para trasplante se preparan con base en turba proveniente de la degradación parcial de restos de musgos del género *Sphagnum* y se importan a nuestro país principalmente de Canadá. Las turbas son utilizadas como sustratos en la producción de plántulas por poseer una alta resistencia a la degradación microbiológica a través del tiempo (bioestabilidad) y por sus buenas características físicas de aireación y retención de humedad, y propiedades químicas adecuadas para el crecimiento de las raíces y la parte aérea de las plántulas.

La turba es un producto orgánico fósil que ha sido usado como sustrato por su bioestabilidad, pero con la finalidad de conservar las fuentes de turba y proteger el ambiente otros materiales renovables han sido investigados: residuos urbanos, agrícolas, forestales, pesqueros, desperdicios de la industria de la madera y lodos residuales, entre otros (Lemaire, 1997).

Entre las hortalizas más importantes en México por su superficie cosechada se encuentra el brócoli.

En el estado de Guanajuato se cultivan anualmente entre 10,000 y 15,000 ha de brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica* L.). En el año de 2009 se reportó una superficie cosechada de 15,950 ha de este cultivo, siendo la hortaliza de mayor importancia en el estado (SIAP, 2010).

El sistema de producción de esta hortaliza requiere en su totalidad del trasplante, debido principalmente a que se utiliza semilla híbrida de alto costo, por lo que es necesario producir plántulas que crecen tradicionalmente en sustratos importados con base en turbas. La importación a México de estos sustratos hace a las compañías o productores particulares de brócoli dependientes tecnológicamente de este insumo.

De lo anterior, se desprende la necesidad de realizar investigación enfocada a la producción de sustratos nacionales, y más específicamente en sustratos regionales mediante el uso de materiales vegetales residuales.

La paja de trigo es un residuo vegetal abundante en el estado de Guanajuato que puede ser utilizada como base para la elaboración de sustratos para el crecimiento de plántulas de brócoli, entre otras hortalizas. En el año 2009 en este estado se reporta una superficie cosechada de trigo de 111,194 ha (SIAP, 2010).

Si en promedio la producción de paja de trigo por ha es de 8 Mg (Gómez y Grajeda, S/F), se dispondría anualmente de 889,552 Mg de ésta, pudiendo utilizar una parte de este residuo para la producción de sustratos.

La presente investigación se enfocó a la utilización de paja de trigo como sustrato para el crecimiento de plántulas de brócoli, partiendo por un lado del hecho favorable, que la paja de trigo es un material lignocelulósico difícil de biodegradar y por otro, el hecho desfavorable que contiene fenólicos, compuestos químicos relativamente solubles en agua que afectan la germinación y el desarrollo de las plantas (alelopatía).

En este trabajo de investigación, se planteó solucionar este último inconveniente a través de: 1) extracción de los compuestos fenólicos de la paja (sin degradación microbiológica) con agua común, y mezclando esta paja con turba o con vermicomposta; 2) mediante el uso de otros extractantes, seleccionando el mejor desde el punto de vista químico y económico, para acondicionar la paja sin degradar (paja con bajas concentraciones de compuestos fenólicos) y 3) por medio de la transformación biológica de la paja a través de los procesos de compostaje y vermicompostaje parciales. Todos los materiales de paja de trigo derivados de los tratamientos mencionados se evaluaron como sustratos para el crecimiento de plántulas de la especie mencionada.

OBJETIVO GENERAL

Evaluar la paja de trigo con extracción de fenólicos, sola, en mezclas con turba o composta, con extracción de compuestos solubles usando varios extractantes, con varias granulometrías, o con transformación biológica (compostaje y vermicompostaje parciales) en el crecimiento de plántulas de brócoli.

Objetivos específicos

1. Evaluar paja de trigo molida, con extracción de compuestos fenólicos y enjuague tres veces, sola o en mezclas con turba y vermicomposta, y la vermicomposta, como sustratos en el crecimiento de plántulas de brócoli.
2. Identificar los ácidos fenólicos presentes en la paja de trigo variedad Saturno, por cromatografía de capa fina, e identificarlos y cuantificarlos por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).
3. Evaluar varios extractantes de los compuestos fenólicos en paja de trigo.
4. Ensayar varias granulometrías de paja de trigo con extracción de compuestos fenólicos y enjuague tres veces en el crecimiento de plántulas de brócoli.
5. Evaluar paja de trigo composteada y vermicomposteada parcialmente en el crecimiento de plántulas de brócoli.

HIPÓTESIS GENERAL

Alguno o algunos de los tratamientos de paja de trigo sola, en mezclas con turba y composta, con extracción de fenólicos con varios extractantes, con diferentes granulometrías y/o a través de la transformación biológica parcial de esta, constituyen un sustrato o sustratos que proporcionen las condiciones adecuadas a las plántulas de brócoli para su crecimiento, y que este sea comparable al de plántulas de brócoli que crecen en sustratos con base en turba (sustratos testigos).

Hipótesis específicas

1. La paja de trigo molida con extracción de fenólicos y enjuague tres veces, sola o

en mezclas con turba o con composta, o la vermicomposta sola, son sustratos comparables a las turbas comerciales en el crecimiento de plántulas de brócoli.

2. Los ácidos fenólicos presentes en la paja de trigo variedad Saturno son los mismos y se encuentran en concentraciones similares a las reportadas por otros autores en otras variedades de trigo.

3. Existen diferencias estadísticamente significativas en la capacidad para extraer los compuestos fenólicos de la paja de trigo entre los diferentes extractantes evaluados.

4. Existe efecto de las condiciones físicas proporcionadas por el tamaño de las partículas de la paja de trigo utilizada como sustrato en el crecimiento de plántulas de brócoli.

5. Los procesos de compostaje o vermicompostaje parciales por 90 días son mejores para disminuir y/o eliminar los efectos de inhibición de los fenólicos solubles presentes en la paja de trigo utilizada como sustrato en el crecimiento de plántulas de brócoli, en comparación con el procedimiento de extracción de fenólicos solubles totales de la paja de trigo con el mejor de los extractantes.

CAPÍTULO I

SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO, MEZCLAS DE PAJA CON TURBA, PAJA CON VERMICOMPOSTA Y VERMICOMPOSTA EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI

SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO, MEZCLAS DE PAJA CON TURBA, PAJA CON VERMICOMPOSTA Y VERMICOMPOSTA EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI

Fidel René Díaz Serrano, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2011

La producción comercial de plántulas de brócoli para trasplante en charolas, depende casi exclusivamente del uso de sustratos importados con base en turbas de musgos del género *Sphagnum* (peat moss). Se evaluaron mezclas de paja de trigo con turba Sunshine 3 y con vermicomposta, paja de trigo sola y tres turbas comerciales (Sunshine 3, Fafard 1 VM y Sunshine sin aditivos) como sustratos en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Green Bell en charolas con cavidades de 13.1 mL. La paja de trigo molida de los sustratos se remojó con agua común por 24 h para extraer los compuestos fenólicos (aleloquímicos) presentes en la paja y disminuir su concentración. Se determinaron las concentraciones de fenólicos solubles totales (CFST) utilizando el reactivo de Folin y Ciocalteu al inicio del experimento y a los 18 y 24 días después de la siembra. Las CFST iniciales en los sustratos conteniendo paja de trigo no inhibieron los porcentajes de emergencia de plántulas a los 10 días después de la siembra. Los mayores porcentajes de inhibición del crecimiento de las plántulas se presentaron en los tres sustratos de sólo paja de trigo con 54.92 %, 57.40 % y 57.40 % en la variable peso de materia seca de 20 vástagos, y 38.31 %, 44.78 % y 41.80 % en el peso seco de 20 raíces con respecto a los valores de estas variables en el mejor sustrato testigo. Se concluye que probablemente esta inhibición es debida al efecto de las CFST a las que estuvieron expuestas las raíces de las plántulas de brócoli durante los 24 días del experimento.

Palabras clave: *sustratos, paja de trigo, crecimiento, fenólicos, plántulas de brócoli.*

WHEAT STRAW SUBSTRATES, MIXTURES OF WHEAT STRAW WITH PEAT
MOSS AND VERMICOMPOST, AND VERMICOMPOST ON THE BROCCOLI
SEEDLING GROWTH

Fidel René Díaz Serrano, Ph. D.
Postgraduate College, 2011

In Mexico the commercial production of broccoli seedlings using trays depends almost exclusively of the use of imported substrates based on *Sphagnum* peat moss. Mixtures of wheat straw with peat moss Sunshine 3 and vermicompost, wheat straw alone and three commercial peat mosses as controls (Sunshine 3, Fafard 1 VM and Sunshine with no additives) were evaluated as substrates in the growing of broccoli seedlings cv. Green Bell using trays with holes of 13.1 mL. Milled wheat straw used in the substrates was firstly soaked in common water for 24 h for phenolic compounds (allelochemicals) extraction in order to reduce its concentration. It was quantified the total soluble phenolics concentration (TSPC) using the Folin and Ciocalteu's reactive at the beginning, at 18 and 24 days after seeding. The TSPC in the substrates with wheat straw did not inhibit the emergence of seedlings percentage at 10 days after seeding. At harvest time, the highest percentages of inhibition of seedling growth were recorded in the three substrates with only wheat straw with 54.92 %, 57.40 % y 57.40 % for dry weight of 20 shoots and 38.31 %, 44.78 % and 41.80 % in the dry weight of 20 roots in relationship to the values of these variables obtained in the best control. It is concluded that probably the inhibition of broccoli seedlings growth was due to the effect of TSPC at which the roots of broccoli seedlings were exposed throughout the 24 days of the experiment.

Key words: *substrates, wheat straw, growth, phenolics, broccoli seedlings.*

1.1 INTRODUCCIÓN

La producción de plántulas de brócoli para trasplante generalmente se realiza en condiciones relativamente controladas en invernadero. Los sustratos más comúnmente utilizados para el llenado de las charolas y el crecimiento de las plántulas tienen como base fundamental un material orgánico conocido como turba, el cual es un producto natural de la descomposición parcial de musgos, principalmente del género *Sphagnum*, en condiciones anaerobias. Este tipo de sustrato se importa a México principalmente de Canadá, trayendo como consecuencia la fuga de divisas y la dependencia tecnológica de las compañías y productores independientes dedicados a esta actividad.

En condiciones comerciales, después de la siembra de la semilla, las charolas se trasladan a un cuarto de germinación en el que se puede ajustar la temperatura entre 20 °C y 25 °C y la humedad relativa entre 85 % y 90 %, o bien las charolas se trasladan a un lugar específico para este fin, se acomodan una sobre otra y se tapan con un plástico para conservar la temperatura y la humedad. Una vez que las semillas han germinado y antes de que las plántulas emerjan sobre la superficie del sustrato, las charolas se trasladan al invernadero definitivo en donde las plántulas de brócoli crecerán por un tiempo aproximado de 25 días.

Las funciones principales de un sustrato en el crecimiento de una planta son: a) servir de material de anclaje para las raíces, b) proporcionar agua y nutrimentos y c) suministrar oxígeno a las raíces para la respiración.

Las condiciones físicas, químicas y biológicas de un sustrato antes y durante el desarrollo de una planta son factores decisivos en el crecimiento y desarrollo de la misma (Ansorena, 1994), por lo que es muy importante que antes de utilizar un material como sustrato para el crecimiento de plántulas es necesario caracterizarlo en sus propiedades físicas, químicas y biológicas, de tal manera que sea posible decidir si un sustrato específico es adecuado o no para el crecimiento y desarrollo de cierta especie.

No se encontró información oficial sobre los volúmenes de sustrato importado para la producción de plántulas de hortalizas, y menos aún, para la producción

específica de plántulas de brócoli. A falta de esta información, se puede realizar un cálculo aproximado de dicho volumen con base en la superficie cultivada de brócoli.

En el estado de Guanajuato en el año 2009 se reporta una superficie cosechada de brócoli de 15,950 ha (SIAP, 2010), con una densidad promedio de 70,000 plantas ha^{-1} , se necesitan aproximadamente 38,947.67 bultos de 3.8 pies cúbicos (107.54 L = 215 L cuando se descomprime) equivalente a 8,373,750 L de sustrato (58,373.75 m^3), tomando como base que se llenan con sustrato aproximadamente 7.5 mL de la cavidad de 8.5 mL de capacidad de esta; el mL restante se llena con vermiculita de tamaño mediano para cubrir la semilla después de la siembra. Considerando un costo promedio de \$ 250.00 pesos por bulto, el precio por la importación de este volumen de sustrato asciende a \$ 9,736,917.50 pesos, equivalente a 846,688.47 dólares (tipo de cambio 11.5 pesos por dólar).

La paja de trigo es un residuo vegetal abundante en el estado de Guanajuato que puede ser utilizado como base para la elaboración de sustratos para el crecimiento de plántulas de brócoli, entre otras hortalizas. En el año 2009 en este estado se reportó una superficie cosechada de trigo de 111,194 ha (SIAP, 2010).

Asimismo, se menciona que en Guanajuato se producen en promedio 8 Mg de paja ha^{-1} y que los residuos provenientes de este cultivo son manejados en forma inadecuada a través de la quema (Gómez y Grajeda, S/F), lo que ha dado como resultado la Norma Técnica Ambiental NTA_IEG_005/2000 en el acuerdo No. 195, incluida en la Ley de Protección y Preservación del Ambiente del estado de Guanajuato (2000), en donde se estipula que queda estrictamente prohibida la quema de esquilmos.

Actualmente, al prohibir la quema de los esquilmos, estos se tienen que empacar o bien incorporar al suelo. Algunos agricultores están optando por empacar la paja, sin embargo tienen el problema de su uso posterior, porque no disponen de información sobre otros usos a los tradicionales y debido también a un exceso de oferta.

Existen evidencias del efecto negativo de los compuestos fenólicos de la paja de trigo sobre el crecimiento y rendimiento del próximo cultivo (alelopatía), cuando

esta se deja sobre la superficie del suelo o se incorpora al mismo (Elliot *et al.*, 1978; Lodhi *et al.*, 1987; Narwal *et al.*, 1997; Opoku *et al.*, 1997), lo que en principio hace inviable su uso directo como sustrato para el crecimiento de plántulas.

El objetivo del presente experimento fue evaluar el crecimiento de plántulas de brócoli en sustratos de paja de trigo, en mezclas de paja de trigo con una turba comercial, en mezclas de paja de trigo con vermicomposta y la vermicomposta sola, y compararlo con el crecimiento de plántulas de la misma especie en tres turbas comerciales.

Los supuestos sobre los que se fundamentó este trabajo experimental fueron:

1. El tratamiento de extracción de compuestos solubles de la paja de trigo y enjuague tres veces con agua común, disminuye significativamente la concentración de compuestos fenólicos.
2. La paja de trigo después del tratamiento de extracción de fenólicos contiene concentraciones de fenólicos solubles más bajas, las cuales no afectan el crecimiento de las raíces y de los vástagos de plántulas de brócoli.
3. La paja de trigo utilizada como sustrato en las condiciones en las que se desarrollan las plántulas de brócoli y en un periodo de tiempo no mayor a 30 días, no sufre degradación biológica apreciable, aún a pesar de adicionar fuentes de N biológicamente disponibles a través de la solución nutritiva.
4. La escasa degradación biológica en la paja de trigo utilizada como sustrato en el desarrollo de plántulas de brócoli durante 30 días, no contribuye apreciablemente en el incremento de la concentración de fenólicos solubles en los sustratos con paja de trigo.

1.2 MATERIALES Y MÉTODOS

1.2.1 Acondicionamiento de la paja de trigo y elaboración de los sustratos

El experimento se realizó en un invernadero que estuvo a cargo del Área de Nutrición Vegetal del Colegio de Postgraduados, ubicado en Lomas de San Esteban, Texcoco, Edo. de México en el periodo comprendido del 19 de agosto al 12 de septiembre del año 2000.

Paja de trigo variedad Saturno, sin degradar, se trituroó en un molino de martillos, y se sometió a un proceso de extracción de compuestos fenólicos solubles en agua común por 24 h, en cubetas de plástico de 20 L, en una relación 1: 2.5, paja: agua, con base en volumen. Después de transcurrido este tiempo, el agua de la extracción se decantó y se agregó agua nuevamente para enjuagarla. Este último proceso se repitió tres veces. Posteriormente, la paja se secó exponiéndola al sol. La paja seca con extracción de fenólicos, y la vermicomposta se tamizaron manualmente durante diez minutos, utilizando tamices con aberturas de 2.00 mm, 1.00 mm y 0.50 mm. Los sustratos de paja y las mezclas de paja con turba (Sunshine 3) o vermicomposta, y la vermicomposta, evaluados en este experimento fueron seleccionados tomando en consideración los resultados de los análisis de varianza de variables como altura de vástago, diámetro de tallo, peso fresco y seco de cinco plántulas de brócoli híbrido cv. Green Bell de un experimento anterior en donde se evaluaron 40 sustratos.

Las turbas evaluadas como testigos fueron Sunshine 3, Fafard 1 VM y Sunshine (sin aditivos). La descripción de cada uno de los sustratos evaluados, las proporciones en porcentaje de los componentes de las mezclas con base en volumen y su granulometría, se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Descripción de los sustratos, proporciones de las mezclas y granulometría de los diez sustratos evaluados.

Sustrato	Descripción del sustrato	Proporciones	Granulometría
		% (volumen)	
1	Turba Sunshine 3 TM (testigo)	100	20-30-50 ¹
2	Turba Fafard 1 VM TM (testigo)	100	40-20-40 ¹
3	Turba Sunshine TM (testigo)	100	43-20-37 ¹
4	Mezcla de paja de trigo con turba Sunshine 3	60-40	2.00–1.00 mm y turba Sunshine 3 ²
5	Mezcla de paja de trigo con turba Sunshine 3	90-10	2.00–1.00 mm y turba Sunshine 3 ²
6	Mezcla de paja de trigo con vermicomposta	70-30	2.00–1.00 mm y 1.00-0.50 mm ²
7	Vermicomposta	100	1.00-0.50 mm ²
8	Paja de trigo	100	50-10-40 ²
9	Paja de trigo	100	50-20-30 ²
10	Paja de trigo	100	40-30-30 ²

¹De izquierda a derecha: proporciones en porcentaje con base en peso de partículas menores de 2.00 mm e iguales a 1.00 mm, menores de 1.00 mm e iguales a 0.50 mm, y menores de 0.50 mm. ²De izquierda a derecha: lo mismo que para los sustratos testigos, pero las proporciones se realizaron con base en volumen. En los sustratos testigos los valores de granulometría son el promedio de tres repeticiones.

1.2.2 Propiedades químicas iniciales de los sustratos

1.2.2.1 pH y conductividad eléctrica

Para la cuantificación de estas propiedades en el laboratorio, se hizo una mezcla sustrato: agua destilada en una relación 1: 1.5 (13 mL: 19.5 mL-v/v) en un frasco de vidrio (Sonneveld *et al.*, 1974). Se dejó reposar por una hora, se filtró con papel, y las mediciones se hicieron directamente en la solución utilizando un equipo Conductronic modelo 20.

La cuantificación de estas propiedades y las demás propiedades químicas iniciales

en los sustratos, se hicieron por triplicado.

Para disminuir el pH de los tres sustratos de sólo paja que resultaron menos ácidos, se les agregaron 2 g L^{-1} de yeso (CaSO_4) en polvo. Asimismo, al sustrato Sunshine que presentó un pH muy ácido, se le adicionó CaCO_3 en dosis de 3 g L^{-1} para incrementar un poco su pH y mantenerlo entre 5.5 y 6.5 (pruebas previas).

1.2.2.2 Concentración de fenólicos solubles totales

Después de cuantificar el pH y la CE en el extracto anterior, este se filtró con papel filtro y del filtrado se tomaron 2.1 mL. La cuantificación de la concentración de fenólicos solubles totales en los sustratos se hizo de acuerdo con lo reportado por Swain y Hillis (1959), y se describe a continuación:

- 1) Adicione 0.7 mL de su muestra en un tubo eppendorf de 1.5 mL.
- 2) Adicione 50 μL de reactivo de Folin y Ciocalteu (Sigma).
- 3) Mezcle y deje reposar por tres minutos.
- 4) Adicione 100 μL de carbonato de sodio saturado (Na_2CO_3).
- 5) Adicione 150 μL de agua destilada, mezcle bien y permita reposar por 10-20 minutos.
- 6) Un color azul debe desarrollarse si Ud. tiene fenoles. Los blancos no deben tener color. Si Ud. ve precipitado ponga las muestras en una microcentrífuga y centrifuge por tres minutos y lea la absorbancia inmediatamente.
- 7) Transfiera 0.8 mL a la celda y lea absorbancia a una longitud de onda de 725 nm.
- 8) Prepare los estándares con fenol en el siguiente rango ($0\text{-}20 \mu\text{g mL}^{-1}$).
- 9) La curva estándar debe ser lineal hasta que el color azul se sature.

La determinación de la concentración de estos compuestos se realizó por colorimetría con un equipo Espectronic 20⁺ marca Milton Roy.

Curva estándar	
Concentración de fenol ($\mu\text{g mL}^{-1}$)	Absorbancia (725 nm)
0.000	0.000
0.375	0.033
0.750	0.065
1.500	0.131
3.125	0.262
6.250	0.538
12.50	0.990
25.00	1.560

Para poder implementar esta técnica a las condiciones del equipo mencionado, que estaba disponible en el Laboratorio de Nutrición Vegetal, la técnica original propuesta por los autores (micro ensayo) se modificó, incrementando tres veces los volúmenes del extracto y de los reactivos para poder realizar las lecturas.

En la técnica original el volumen de la celda de lectura es de 1 mL, en el caso de la celda para el equipo que se utilizó se necesitaron tres mL. La cuantificación se hizo utilizando la siguiente ecuación de regresión: $Y = -0.68 + 15.35 X$, ($Y =$ Concentración en $\mu\text{g mL}^{-1}$; $X =$ absorbancia), elaborada a partir de los datos presentados anteriormente. Se tomaron como base los datos presentados porque experimentalmente se prepararon las concentraciones de fenol señaladas para la elaboración de la curva estándar y los valores de absorbancia en 725 nm, fueron muy similares. Los datos de las propiedades químicas iniciales de los sustratos se analizaron por medio de un análisis de varianza de un diseño experimental completamente al azar y las comparaciones entre medias se realizaron por medio de la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

1.2.3 Siembra

Para la siembra, los sustratos se humedecieron ligeramente con agua común para

un mejor manejo en el llenado de las charolas. Las charolas utilizadas fueron de plástico reciclado termo formado de color negro de 200 celdas cuadradas con una configuración de 10 X 20, de 2.38 cm de lado y 3.81 cm de profundidad, con un volumen de 13.11 cm³ por celda (TLC, Polyform, Inc., S/F). Las charolas se llenaron manualmente y se presionaron ligeramente con la parte inferior de otra charola para obtener mayor uniformidad en el llenado de las celdas. Se dejó aproximadamente un cm entre la parte superior de la charola y la superficie del sustrato, con el fin de hacer la siembra lo más uniforme posible.

Se sembraron 90 celdas por repetición (dos repeticiones por charola) con dos semillas por celda, dejando dos hileras de espacio libre entre tratamientos en cada charola. La semilla se tapó con el mismo sustrato hasta llenar la charola. El experimento se estableció en un diseño de bloques completos al azar con diez tratamientos y cuatro repeticiones.

Los sustratos con la semilla, se regaron inicialmente con agua común (\cong pH 7.5) hasta la emergencia de las plántulas. Posteriormente se dejó una plántula por celda a los tres días después de la emergencia.

1.2.4 Solución nutritiva y riegos

Los nutrimentos para las plántulas se suministraron después de la emergencia de las plántulas, con una solución nutritiva con una concentración de 200 % y se aplicó con un pH de 5.5 (Steiner, 1961). La solución se seleccionó de acuerdo a los resultados de un experimento anterior. La composición nutrimental en meq L⁻¹ de la solución al 200 % se describe en el Cuadro 2.

La solución nutritiva se preparó partiendo de soluciones madre (1 Normal, 1N) ó 0.5 N) con fertilizantes grado reactivo.

Las especificaciones para la elaboración de la solución nutritiva con macronutrimentos se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 2. Concentración de nutrimentos en la solución nutritiva al 200 %.

Aniones meq L ⁻¹			Cationes meq L ⁻¹			
NO ₃	H ₂ PO ₄	SO ₄	K	Ca	Mg	NH ₄
16.8	2	21.2	14	10.80	8.0	7.2
meq aniones = 40			meq cationes = 40			

mM = 60; PO = 0.144 Mpa; CE = 4.70 dS m⁻¹

meq L⁻¹ = mili equivalentes por litro. mM = mili moles totales; PO = Presión osmótica (Mpa-megapascuales). Se adicionaron 1 mL L⁻¹ de micronutrimentos y 0.5 mL L⁻¹ de Fe-EDTA con una concentración de 5.6 mg L⁻¹ por litro de solución nutritiva final.

Cuadro 3. Especificaciones para la preparación de la solución nutritiva con macronutrimentos.

Fertilizante	PE	Solución 1 N	Volumen adicionado a la solución nutritiva final	Concentración en la solución nutritiva final
	g	g L ⁻¹	mL L ⁻¹	meq L ⁻¹
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	118.04	118.04	10.8	10.8
KNO ₃	101.10	101.10	6.0	6.0
K ₂ SO ₄ *	87.13	87.13*	12.0	6.0
MgSO ₄ · 7H ₂ O	123.18	123.18	8.0	8.0
KH ₂ PO ₄	136.09	136.09	2.0	2.0
(NH ₄) ₂ SO ₄	66.07	66.07	7.2	7.2

PE = peso equivalente; N = normalidad; Solución preparada al 0.5 N debido a su baja solubilidad, se agregaron 12 mL L⁻¹.

Los micronutrimentos se prepararon también a partir de compuestos grado reactivo analítico (Hewitt, 1966) de acuerdo a lo que se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Especificaciones para la preparación de la solución nutritiva con micronutrientes.

Compuesto químico	Micronutrientes en la solución madre*	Concentración del nutriente en la solución madre	Concentración del nutriente en la solución nutritiva final
	g L ⁻¹	g L ⁻¹	mg L ⁻¹
H ₃ BO ₃	2.88	0.50	0.50
MnCl ₂ . 4H ₂ O	1.81	0.50	0.50
ZnSO ₄ . 7H ₂ O	0.22	0.05	0.05
CuSO ₄ . 5H ₂ O	0.18	0.045	0.045
H ₂ MoO ₄ . H ₂ O	0.02	0.01	0.01
Total	5.11		

*Todos estos compuestos en conjunto se disolvieron en un L de agua destilada y se adicionó 1 mL de esta solución de micronutrientes por L de solución final.

El Fe como micronutriente se preparó por separado con FeSO₄ . 7H₂O y sal disódica del ácido etilendiaminotetracético (Na₂-EDTA), con una concentración de 5.6 g L⁻¹. De esta solución se tomaron 0.5 mL L⁻¹ para la solución nutritiva final de riego, suministrando una concentración de 2.8 mg de Fe-EDTA L⁻¹.

El número de riegos diario con solución nutritiva varió de dos a tres, según las condiciones ambientales y en algunas ocasiones se regó únicamente con agua acidulada para controlar la conductividad eléctrica en los sustratos. Los riegos se proporcionaron a las plántulas en forma abundante con una aspersora manual.

1.2.5 Número de plántulas emergidas a los diez días después de la siembra

Se contó el número de plántulas emergidas en el sustrato a los diez días después de la siembra (DDS). Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza para un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

1.2.6 Propiedades químicas de los sustratos a los 18 DDS

Con el objetivo de cuantificar los posibles cambios de las propiedades químicas iniciales de los sustratos durante el experimento, se cuantificaron las mismas propiedades químicas en los sustratos determinadas al inicio del experimento, a los 18 DDS en los diez tratamientos, por cuadruplicado.

1.2.6.1 pH y conductividad eléctrica

Para la cuantificación de estas propiedades, a cada una de tres celdas por tratamiento con plántulas tomadas al azar en las charolas, se les agregaron 7.5 mL de agua destilada (método de vertido) y los lixiviados se recolectaron en una bolsita de plástico transparente previamente identificada, haciendo una muestra compuesta de las tres celdas. Posteriormente en el laboratorio se determinaron el pH y la conductividad eléctrica (dS m^{-1}), con el equipo mencionado con anterioridad.

1.2.6.2 Concentración de fenólicos solubles totales

Después de cuantificar las propiedades anteriores, se tomaron 2.1 mL del extracto restante y se cuantificó la concentración de fenólicos solubles totales de acuerdo con el procedimiento ya señalado para esta propiedad. La medición se hizo por cuadruplicado en cada tratamiento.

Los datos de las propiedades químicas determinadas a los 18 DDS se procesaron por medio de un análisis de varianza correspondiente a un diseño de bloques al azar con diez tratamientos y cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

1.2.7 Variables evaluadas a los 24 DDS (colecta de las plántulas)

1.2.7.1 En sustratos

1.2.7.1.1 pH y conductividad eléctrica

Procedimiento similar al señalado para la cuantificación de estas propiedades a los 18 DDS (cuatro repeticiones).

1.2.7.1.2 Concentración de fenólicos solubles totales

Procedimiento similar al señalado para la cuantificación de estas propiedades a los 18 DDS (cuatro repeticiones).

1.2.7.1.3 Degradación microbiológica de los sustratos

Para la cuantificación de esta variable, se tomaron tres cepellones por repetición en cada tratamiento, los cuales se secaron en una estufa a 60 °C; una vez secos, los cepellones se abrieron con los dedos por uno de sus lados y se desmenuzaron, evitando que el sustrato llevara raíces secas de las plántulas y se mezclaron para obtener una muestra homogénea. Se tomó una muestra de 0.1 g de sustrato, y se distribuyó primeramente en el campo visual del estereoscopio en el aumento de menor magnitud y posteriormente se observó con los de mayor magnitud. La evaluación de esta variable se realizó con la siguiente escala visual:

1) degradación poco apreciable (1-10 %), 2) degradación muy moderada (11-25 %), 3) degradación moderada (26-50 %), 4) degradación intensa (51-75 %), 5) degradación muy intensa (>75 %), y se estimó sobre el área total de los tejidos de las partículas del sustrato, tomando como patrón los mismos materiales sin degradar.

1.2.7.2 En plántulas

Se colectaron veinte plántulas al azar de la parte central de cada bloque, de las cuales se separó el cepellón del vástago con unas tijeras, y se cuantificaron las siguientes variables de la plántula en vástagos y en raíces.

1.2.7.2.1 En vástagos

Longitud de vástagos

Diámetro de tallo

Peso de materia seca

Deficiencias nutrimentales (observación visual)

1.2.7.2.2 En raíces

Peso de materia seca de raíces

Relación peso de materia seca de raíces/peso de materia seca de vástagos

1.2.7.2.2.1 Color de raíces

Esta variable se calificó visualmente por medio de la extracción manual de cinco plántulas extras a las 20 utilizadas para evaluar el desarrollo de las plántulas, de acuerdo con la siguiente escala:

1) blancas, 2) ligeramente amarillas, 3) café-amarillento.

1.2.7.2.2.2 Facilidad de extracción del cepellón

Esta variable se calificó también en las cinco plantas tomadas para evaluar la variable anterior, utilizando la siguiente escala:

- 1) fácil de extraer, 2) moderadamente fácil de extraer y 3) difícil de extraer. Esta variable se registró después de un riego con agua común y corriente.

1.2.7.2.2.3 Densidad de pelos radicales

Después de extraer los cepellones de las cinco plántulas anteriores, se llevaron a un estereoscopio para observar la densidad de pelos radicales presentes en las raíces que crecieron en los sustratos evaluados de acuerdo con la siguiente escala visual:

- 1) alta, 2) moderada, 3) baja y 4) nula.

Las variables cuantitativas determinadas en las plántulas a los 24 DDS, se procesaron por medio de un análisis de varianza correspondiente a un diseño de bloques al azar; para la comparación de medias entre tratamientos se utilizó la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

Las variables cualitativas únicamente se reportan de acuerdo a la calificación asignada en la escala utilizada.

1.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1.3.1. Propiedades químicas de los sustratos

Las propiedades químicas iniciales de los sustratos evaluados en el experimento se presentan en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Propiedades químicas de los sustratos evaluados durante el experimento.

Sustrato	Inicio			18 DDS			24 DDS		
	pH	CE	CFST	pH	CE	CFST	pH	CE	CFST
		dS m ⁻¹	mg L ⁻¹		dS m ⁻¹	mg L ⁻¹		dS m ⁻¹	mg L ⁻¹
1. Sunshine 3 TM	5.61 e	0.45 c	44.66 cd	5.80 a	3.95 a	21.50 c	6.07cd	2.12 a	12.40 bcd
2. Fafard 1 VM TM	5.83 d	1.14 b	27.31 e	4.89 b	4.24 a	18.89 de	5.68 d	2.27 a	10.79 cd
3. Sunshine TM	3.89 f	0.07 e	47.73 cd	4.96 b	3.70 abc	22.50 abc	4.54 e	0.91 ef	15.24 b
4. Paja-Sunshine 3 (60-40)	5.92 d	0.31 d	41.51 d	6.58 a	1.99 ed	21.21 cd	6.51 bc	1.41 cde	10.10 d
5. Paja-Sunshine 3 (90-10)	6.25 c	0.24 d	34.60 de	6.08 a	2.69 bcde	21.65 c	7.51 a	1.49 cd	10.21 d
6. Paja-vermicomposta (70-30)	7.28 a	1.22 b	55.58 bc	6.55 a	1.38 e	18.83 e	6.37 bc	1.60 bc	8.91 d
7. Vermicomposta	7.41 a	3.18 a	44.58 cd	6.50 a	4.38 a	24.60 a	6.77 b	2.12 ab	20.04 a
8. Paja (50-10-40)	6.39 c	0.26 d	90.71 a	6.15 a	3.19 abcd	20.64 cd	6.60 b	0.97 def	10.48 cd
9. Paja (50-20-30)	6.33 c	0.27 d	65.64 b	6.37 a	2.48 bcde	21.06 cd	5.65 d	0.68 f	11.67 bcd
10. Paja (40-30-30)	6.57 b	0.24 d	86.61 a	6.44 a	2.35 cde	24.00 ab	6.54 b	0.75 f	14.66 bc
P>F	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
DHS	0.15	0.10	13.24	0.82	1.53	2.36	0.48	0.52	4.24

DDS = días después de la siembra; CE = conductividad eléctrica; CFST = concentración de fenólicos solubles totales. Valores con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente. DHS = diferencia honesta significativa.

1.3.1.1 pH

El pH inicial de los sustratos fluctuó entre 3.89 en el sustrato Sunshine y 7.41 en la vermicomposta. Con excepción del Sunshine, la mezcla de paja con vermicomposta y la vermicomposta, todos los demás sustratos presentaron valores de pH dentro de los límites en los cuales se pueden desarrollar la mayoría de las plantas, aunque estadísticamente varios valores de pH fueron diferentes entre sí.

Bunt (1988), señala que el pH óptimo para el crecimiento de plantas en sustratos orgánicos se encuentra entre 5.0 y 5.5, sin embargo, señala que no se excluye que puedan desarrollarse satisfactoriamente fuera de este intervalo. Por otro lado, Escudero (1993), indica que el intervalo óptimo de pH para el desarrollo de hortalizas en cultivo sin suelo es entre 5.5 y 6.8. El pH inicial del sustrato Sunshine (3.89) se consideró que podría inhibir la germinación de las semillas de brócoli y el crecimiento de las plántulas, por lo que fue necesario agregar CaCO_3 en dosis de tres g L^{-1} (pruebas previas).

Se puede observar también que en la mezcla de paja de trigo con Sunshine 3 en proporción 60-40 y en proporción 90-10, la turba contribuyó a la disminución del pH de la paja de trigo, tomando como referencia los pH de los sustratos 50-10-40, 50-20-30 y 40-30-30, elaborados únicamente con paja de trigo (pH 6.39, 6.33 y 6.57 respectivamente). En el caso de la proporción 60-40, el pH fue estadísticamente diferente a los sustratos elaborados únicamente con paja de trigo, mientras que para caso de la proporción 90-10 el pH fue estadísticamente igual.

En la mezcla 70-30 de paja de trigo con vermicomposta, se observa que la proporción de esta última, incrementó el pH de la paja (7.28), tomando también como referencia los pH de los sustratos elaborados únicamente con paja de trigo.

1.3.1.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) inicial en los sustratos evaluados varió entre 0.07 dS m⁻¹ en el Sunshine sin aditivos hasta 3.18 dS m⁻¹ en la vermicomposta. Con excepción de la vermicomposta, todos los demás sustratos se encuentran en el intervalo propuesto por varios autores para no afectar la germinación de la semilla, el crecimiento y desarrollo de las plantas. Los valores de CE que tuvieron la mayoría de los sustratos se pueden considerar muy bajos tomando como referencia el valor de 0.75 dS m⁻¹ (extracto de saturación) señalado como límite para considerarse una CE muy baja y el intervalo entre 0.75 dS m⁻¹ y 1.99 dS m⁻¹ señalado como apropiado para la germinación de las semillas y el crecimiento de las plántulas (Bunt, 1988).

Las turbas Sunshine 3 y Fafard 1 VM, presentaron una CE superior a la de la turba Sunshine, debido a que las dos primeras contienen macronutrientes y micronutrientes, además de dolomita y vermiculita, confiriendo a estas la denominación de mezclas profesionales (Sun Gro Horticulture. S/F; Fafard peat moss Co. S/F). Las turbas en su estado natural contienen muy pocos nutrientes (Canadian Sphagnum Peat Moss Association, 1996; Burés, 1998). En las mezclas de paja con turba, en proporción 60-40, la proporción de turba incrementó ligeramente la CE de aproximadamente 0.27 dS m⁻¹ en las pajas de trigo a 0.31 dS m⁻¹, resultando estadísticamente iguales. En el caso de la mezcla de paja con vermicomposta 70-30, también la proporción de la vermicomposta en la paja incrementó la CE de un valor de 0.27 dS m⁻¹ hasta 1.22 dS m⁻¹, resultando estadísticamente diferentes.

Los sustratos con base en paja de trigo, presentaron también CE muy bajas, debido a que la paja utilizada para la elaboración de estos sustratos fue remojada, y enjuagada tres veces con agua común. La CE promedio inicial de la paja de trigo sin extracción previa, en una relación de 1: 2 (paja: agua) con base en volumen, fue de 3.71 dS m⁻¹. Los valores de pH y CE obtenidos por el método holandés (relación 1: 1.5 sustrato: agua v/v), son sin duda diferentes a los que se hubieran obtenido utilizando el método de saturación, por lo que la utilización de los valores

obtenidos por el primer método y presentados en la literatura, deben de utilizarse con cierta precaución. Los valores de pH y CE determinados por el método holandés hubieran sido ligeramente más altos para el caso del pH y menores para el caso de la CE (efecto de dilución en ambos casos).

1.3.1.3 Concentración de fenólicos solubles totales

La concentración inicial de fenólicos solubles totales (CFST) en los sustratos evaluados en el experimento varió entre 27.31 mg L⁻¹ en el sustrato Fafard 1 VM hasta 90.71 mg L⁻¹ (equivalente a 0.55 mM de ácido *p*-cumárico) en el sustrato 50-10-40 de paja de trigo. Los sustratos 50-10-40 y 40-30-30 de paja de trigo presentaron las mayores CFST (aún a pesar de haberse extraído compuestos fenólicos a través del remojo y enjuague de la paja) siendo estadísticamente iguales entre sí, y estadísticamente diferentes a los demás sustratos, incluyendo al sustrato 50-20-30 de paja de trigo. Como punto de comparación, la CFST inicial en paja de trigo variedad Saturno sin previa extracción, en una relación 1: 2 (paja: agua), fue de 417.69 mg L⁻¹, pudiendo señalar que las CFST iniciales en los sustratos de paja de trigo disminuyeron sustancialmente después de la extracción y enjuague, en relación con la CFST en la paja sin extracción, aún a pesar de que las proporciones para la extracción y cuantificación de estos compuestos fueron ligeramente diferentes.

Se ha reconocido que los ácidos fenólicos presentes en la paja de trigo son el ferúlico, *p*-cumárico, *p*-hidroxibenzoico, siríngico y vainílico (Lodhi *et al.*, 1987; Guenzi y McCalla, 1966) y que su presencia en conjunto en los extractos acuosos ya sea fríos o calientes inhiben la germinación de las semillas (Guenzi *et al.*, 1967; Lodhi *et al.*, 1987; Rambakudzibga, 1991; Yonq-Qing y Hua-Qing, 1995; Opoku *et al.*, 1997; y el crecimiento de las plantas (Lodhi *et al.*, 1987; Narwal *et al.*, 1997; Opoku *et al.*, 1997).

Sin embargo en todas estas investigaciones, no se cuantificaron las concentraciones de compuestos fenólicos naturales a las que se exponen las semillas, plántulas y/o plantas, por lo que su información y aplicación en estudios

de alelopatía es muy limitada. Por el contrario, existen muchos trabajos de investigación relacionados con el efecto de los “ácidos fenólicos” puros adquiridos de varios laboratorios comerciales (por ejemplo Sigma), sobre la inhibición de la germinación y el crecimiento de las plantas.

Concentraciones de 0.1 mM, 0.5 mM y 1.0 mM de los ácidos ferúlico (19.419 mg L⁻¹, 97.095 mg L⁻¹ y 194.19 mg L⁻¹), vainílico (16.815 mg L⁻¹, 84.075 mg L⁻¹, y 168.15 mg L⁻¹), *p*-cumárico (16.416 mg L⁻¹, 82.08 mg L⁻¹, y 164.16 mg L⁻¹) y *p*-hidroxibenzoico (12.221 mg L⁻¹, 61.10 mg L⁻¹, y 122.21 mg L⁻¹) inhibieron el crecimiento de plántulas de chícharo. Todos los ácidos fenólicos y en las tres dosis evaluadas inhibieron el crecimiento de la parte aérea e influyeron en la morfología de la raíz. La proporción de inhibición estuvo en relación con la dosis evaluada, esto es a mayor dosis, mayor inhibición. Los ácidos ferúlico y vainílico fueron los que mostraron mayor inhibición en el crecimiento de la parte aérea y de la raíz en la concentración de 1.0 mM. Las dosis de 1.0 mM, 0.5 mM y 0.1 mM L⁻¹ de ácido *p*-cumárico inhibieron el peso fresco de la parte aérea de la planta en 15 %, 12.70 % y 6.35 %; el peso fresco de la raíz en 56.72 %, 28.36 %, y promovió el crecimiento en 1.01 %; e inhibieron la longitud de la raíz principal en 67 %, 25.72 % y 0 % respectivamente (Vaughan y Ord, 1990).

Por otro lado, se encontró que el ácido *p*-cumárico es el que se presenta en mayor concentración entre cinco ácidos fenólicos cuantificados en paja de trigo, utilizando varios extractantes (etanol: agua, 80: 20; NaOH 2 N, NaOH 2 N y en autoclave 45 minutos y HCl 2 N). La concentración total de ácidos fenólicos en el extracto de etanol: agua por 4 h y tratado posteriormente con NaOH 2 N por 4 h a temperatura ambiente fue de 439 mg L⁻¹ de los cuales 238 mg L⁻¹ (54.21 %) correspondieron en primer lugar al ácido *p*-cumárico y 120 mg L⁻¹ (27.33 %) al ácido vainílico en el segundo. Asimismo, en otro extracto también con etanol: agua pero tratado con HCl 2 N y con reflujo en un Soxhlet por 4 h, la concentración total de ácidos fenólicos fue de 126 mg L⁻¹, de los cuales 32 mg L⁻¹ (25.39 %) fueron de *p*-cumárico, 40 mg L⁻¹ (31.74 %) de siríngico, 50 mg L⁻¹ (39.68 %) de vainílico y 4 mg L⁻¹ (3.17 %) de *p*-hidroxibenzoico. La concentración de ácidos fenólicos totales en el extracto con NaOH 2 N directamente sobre la paja

de trigo después de que los ácidos fenólicos se extrajeron con etanol: agua fue de 2,610 mg L⁻¹, de los cuales 2,410 mg L⁻¹ (92.33 %) fueron de ácido *p*-cumárico (Guenzi y McCalla, 1966).

De acuerdo con lo expuesto anteriormente, se supuso, que las concentraciones iniciales de fenólicos cuantificadas en los sustratos de paja de trigo y probablemente también, pero con menor intensidad en las mezclas de paja con Sunshine 3 y con vermicomposta, podrían inhibir la germinación de las semillas y el crecimiento posterior de las plántulas de brócoli una vez sembradas en las charolas y regadas.

Para el caso de las turbas, presentaron CFST relativamente altas, en relación con las CFST más bajas (0.1 mM) reportadas por Vaughan y Ord (1990), las cuales inhibieron en cierto porcentaje el crecimiento de la parte aérea de las plántulas de chícharo. Sin embargo, se conoce por experiencia que estos sustratos no inhiben la germinación de las semillas y/o el crecimiento y desarrollo de las plántulas o plantas. Esta falta de inhibición de la germinación y el crecimiento de las plántulas a pesar de contener compuestos fenólicos, puede ser atribuido a que los compuestos fenólicos presentes en las turbas son compuestos orgánicos más complejos que los que se encuentran presentes en la paja de trigo (fenólicos simples o derivados del ácido cinámico), y representan sustancias húmicas polifenólicas (Morita, 1980; Morita, 1981; Kuiters y Denneman, 1987) con altos pesos moleculares.

La razón por la cual estos compuestos fenólicos complejos presentes en las turbas no inhiben el desarrollo de las plántulas que crecen en su presencia, podría explicarse en función del tamaño de sus moléculas y su relación con el tamaño de los poros en las paredes celulares de las células de la raíz. Se ha estimado que el tamaño de los poros de la pared celular de los pelos radicales de rábano, puede variar en promedio entre 3.5 nm a 3.8 nm, con un máximo de 5 nm (Carpita *et al.*, 1979). El tamaño de una molécula de un ácido fenólico simple o un derivado del ácido cinámico si se encuentra unida a un azúcar (p. ej. ácido clorogénico), puede tener un tamaño similar de 1.0 nm reportado para la sucrosa (Marschner, 1995), sugiriendo que estos compuestos fenólicos simples pueden penetrar a través de la

pared celular e interaccionar con la membrana celular más interior, despolarizándola (Glass, 1973; Glass y Dunlop, 1974).

En contraste a los nutrimentos minerales y solutos orgánicos de bajo peso molecular, los solutos de alto peso molecular (metales quelatados, ácidos fúlvicos y toxinas) o virus y otros patógenos son severamente restringidos por el diámetro de los poros de la pared celular para entrar en el espacio libre de las células de la raíz (Marschner, 1995).

Los compuestos fenólicos tienden a ser solubles en agua, debido a que frecuentemente se presentan combinados con un azúcar como glucósidos y generalmente se encuentran localizados en las vacuolas de las células (Harborne, 1984).

El ácido *p*-cumárico es ligeramente soluble en agua fría, muy soluble en alcohol; el ferúlico es soluble en agua caliente, el vainílico es difícilmente soluble en agua (860 ppm en agua), muy soluble en alcohol, el caféico es parcamente soluble en agua fría, soluble en agua caliente y alcohol frío (Merck, 1996). Cabe mencionar que el método para cuantificar fenólicos no es específico para este grupo de compuestos fenólicos simples, sino que detecta o da reacción positiva con cualquier compuesto que tenga un anillo fenólico (Swain y Hillis, 1959).

También es importante indicar que de acuerdo con la literatura los compuestos fenólicos solubles en agua que se encuentran presentes en la paja de trigo pueden estar unidos a una molécula de un azúcar (Harborne, 1984), por lo que es probable que estos compuestos al encontrarse como glucósidos no inhiban de la misma manera el crecimiento y el desarrollo de una planta que cuando se presentan en su forma libre como ácidos, siendo en esta última forma como se han realizado la gran mayoría de las investigaciones para evaluar la fitotoxicidad de estos compuestos, por lo que una comparación entre las concentraciones evaluadas con ácidos fenólicos específicos en concentraciones conocidas podría no ser muy útil para tomarla como fundamento para el trabajo que aquí se realizó. No se encontró información relacionada con pruebas de fitotoxicidad de los extractos de la paja de trigo, tomando como base concentraciones conocidas de fenólicos totales en los extractos. Además, es conveniente señalar que los ácidos

fenólicos están químicamente considerados como ácidos débiles, por lo que la mayoría de sus moléculas en la solución se encuentran en forma no dissociada.

La información un poco más relacionada con lo que se realizó en este trabajo es lo encontrado por Guenzi *et al.*, 1967, quienes evaluaron la fitotoxicidad de los extractos acuosos de nueve variedades de trigo en la germinación y crecimiento de plántulas de trigo. Los extractos se obtuvieron con 10 gramos de paja de trigo y 150 mL de agua con agitación por dos h a 25 °C. La evaluación se realizó a las 72 h después de iniciado el experimento. Los porcentajes de inhibición de la germinación variaron entre 2 % y 11 %, la inhibición en el crecimiento de la raíz entre 9 % y 21 % y la inhibición del crecimiento de brotes varió entre 11 % y 36 %. A este respecto, es probable que el efecto inhibitorio atribuido por estos autores a los compuestos fenólicos no sea debido completamente a ellos por sí mismos, sino que sea debido en parte a la CE relativamente alta que presentan los extractos de paja de trigo (no reportados). En las determinaciones iniciales de la concentración de compuestos fenólicos en este trabajo se cuantificó también la CE del extracto, obteniendo valores entre 3.47 dS m⁻¹ y 4.54 dS m⁻¹, cuando el extracto se hizo con una relación paja: agua de 1: 2, pudiendo incrementarse estos valores cuando esta relación disminuye.

1.3.2 Porcentaje de plántulas emergidas a los diez días después de la siembra

El porcentaje de plántulas emergidas (PPE) en los sustratos evaluados a los diez días después de la siembra (DDS), se presenta en el Cuadro 6.

Con excepción de la vermicomposta, todos los demás sustratos presentaron un alto porcentaje de plántulas emergidas e iguales estadísticamente, variando entre 97.22 % en el Sunshine 3 y 93.05 % en el Sunshine.

La vermicomposta, presentó un porcentaje de emergencia de plántulas de sólo 74.44 %, observándose un efecto negativo de este sustrato sobre la emergencia de las plántulas de brócoli. Este efecto de inhibición se puede atribuir con bastante probabilidad a la CE relativamente alta, que este sustrato presentó al inicio del

experimento (Cuadro 5). Aunque inicialmente se consideró el posible efecto de la concentración de las sales disueltas sobre la inhibición de la germinación, se decidió no dar riegos muy pesados para lixiviar el exceso de sales en el sustrato; se consideró que con poco drenaje en este sustrato la concentración de sales disminuiría hasta una concentración que no causara inhibición en la germinación (por ejemplo 1.5 dS m^{-1}), sin embargo no sucedió así. Además, también se consideró que si se proporcionaban riegos más pesados en este sustrato se lixiviarían las sales, pero también se lixiviarían las sustancias húmicas, de tal manera que el sustrato quedaría con pocas sustancias húmicas las cuales poseen altas capacidades de intercambio catiónico, lo que alteraría la “fertilidad” de la composta. Sin embargo, después de observar y registrar el bajo porcentaje de emergencia de las plántulas en la vermicomposta, se aplicó agua acidulada suficiente, para lixiviar el exceso de sales, hasta alcanzar una CE de 1.0 dS m^{-1} .

Es importante comentar que el valor promedio inicial de CE en los sustratos se realizó en una relación sustrato: agua de 1: 1.5 con base en volumen, sin embargo, en condiciones de una cavidad en una charola, esta proporción es menor, de tal manera que la cantidad de iones disueltos en la solución puede concentrarse en un volumen menor de agua por lo cual la CE del extracto puede ser mayor al valor de 3.18 dS m^{-1} , afectando la germinación de las semillas y posteriormente la emergencia de las plántulas en este sustrato.

De acuerdo con los resultados de PPE de brócoli registradas a los diez DDS, y con la ayuda del análisis de varianza de la regresión, se puede señalar que ni el pH ($R^2 = 0.05$), ni las concentraciones de fenólicos solubles totales ($R^2 = -0.1153$) en los sustratos al inicio del experimento, inhibieron significativamente (NS) la germinación y como consecuencia la emergencia de las mismas. Es importante señalar que el comportamiento de estas variables en los sustratos no es estático sino dinámico, por lo que los valores registrados son indicadores relativos de las condiciones dinámicas del sistema charola-sustrato-solución nutritiva-plántula.

En el caso del Sunshine es importante recordar que aunque inicialmente se registró un pH muy ácido (3.89), antes de la siembra de la semilla de brócoli, se adicionaron 2 g de CaCO_3 , para aumentar el pH del mismo, por lo que es probable

que el efecto del pH tan ácido sobre la germinación y emergencia de las plántulas de brócoli, no fue tan marcado después de la adición de CaCO_3 , presentando un porcentaje de plántulas emergidas estadísticamente igual a los porcentajes de plántulas emergidas en las dos turbas restantes y en las mezclas de paja con Sunshine 3 y con vermicomposta, los cuales presentaron pH más alcalinos.

El análisis de varianza de la regresión entre la CE y el porcentaje de plántulas emergidas en los diez sustratos al inicio del experimento mostró alta significancia ($p > F = 0.0009$) indicando que al menos un tratamiento influye de manera diferente en la emergencia de las plántulas de brócoli y una $R^2 = 0.74$, indicando que existe relativamente una alta asociación entre el porcentaje de plántulas de brócoli emergidas y la CE. El único sustrato que contribuyó para la significancia cuando se realizó el análisis de regresión entre estas dos variables fue la composta. Cuando se realizó el respectivo análisis solamente con nueve tratamientos, excluyendo a la composta el análisis de varianza de la regresión no fue significativo ($P > F = 0.8678$) y con una $R^2 = -0.13$.

Los sustratos de sólo paja de trigo, aunque inicialmente tuvieron las CFST más altas, presentaron un PPE a los diez DDS muy similar y estadísticamente igual al PPE que presentaron los sustratos testigo con base en turba.

También, es necesario considerar que aunque no se determinaron las concentraciones de compuestos fenólicos en el momento de tomar los datos del número de plántulas emergidas a los diez DDS, se puede suponer que la concentración de estos compuestos en los sustratos no permaneció estática, sino que fueron disminuyendo debido principalmente al arrastre y lixiviación por el drenaje ocurrido como consecuencia de los riegos realizados sobre los sustratos, de la misma manera como se presentó con las concentraciones de compuestos fenólicos determinadas a los 18 y 24 DDS (Cuadro 5), además de suponer que la concentración de dichos compuestos es menor en la parte superior de los sustratos, debido también al transporte de estos compuestos hacia la parte inferior de los mismos.

1.3.3 Propiedades químicas evaluadas en los sustratos a los 18 DDS

Los resultados, la P>F en los análisis de varianza y la comparación entre medias de las propiedades químicas evaluadas a los 18 DDS se presentan también en el Cuadro 5.

1.3.3.1 pH

Con excepción de los sustratos Fafard 1 VM y Sunshine todos los demás sustratos presentaron valores de pH estadísticamente iguales y se encuentran en el intervalo en el que las plantas tienen un crecimiento y desarrollo adecuados (Bunt, 1988; Escudero, 1993), por lo que puede considerarse que el pH determinado en los sustratos a los 18 DDS no afectó el crecimiento de las plántulas en estos sustratos.

Se observa que el sustrato Sunshine incrementó ligeramente su pH, debido a la adición que se hizo inicialmente de CaCO_3 , sin embargo no se presentó el aumento esperado en el pH en el mismo (5.5-6.5). También se puede considerar que dicho incremento en el valor de pH en este sustrato pudo haber sido consecuencia de la presencia de iones HCO_3^- , y OH^- en la solución contenida en el sustrato como resultado de la absorción de más aniones (NO_3^-) que de cationes de la solución nutritiva por las raíces de las plántulas (Dinev y Stancheva, 1995; Lea-Cox *et al.*, 1999). La excreción de estos iones en la rizósfera, influye más en el pH de un sustrato que en el suelo, debido a su volumen reducido en relación con el volumen de un suelo.

El sustrato Fafard 1 VM, disminuyó su pH debido probablemente a que la dolomita (CaMgCO_3) que contiene disminuyó su capacidad para neutralizar la adición de la solución nutritiva aplicada a pH de 5.5, o bien es un dato erróneo, si consideramos el pH de este mismo sustrato a los 24 DDS, y fue mayor al que se presentó a los 18 DDS y similar al pH inicial de este sustrato. Los sustratos de paja de trigo y sus mezclas con Sunshine 3 o con vermicomposta presentaron pH entre 6.08 y 6.58, todos dentro del intervalo considerado como óptimo para el desarrollo de las

plantas (Bunt, 1988; Escudero, 1993). Aunque los sustratos Fafard 1 VM y Sunshine presentaron pH bastante ácidos, el crecimiento observado de las plántulas de brócoli en estos dos sustratos fue “normal” y muy similar al que se presentó en el sustrato Sunshine 3 con un pH de 5.80, valor dentro del intervalo señalado por varios autores como adecuado para el crecimiento de plantas, ya señalado con anterioridad.

1.3.3.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE) de los sustratos a los 18 DDS en dS m^{-1} , mostró un comportamiento muy variable y presentó valores relativamente altos en la mayoría de ellos, lo anterior fue consecuencia de la aplicación de la solución nutritiva a la concentración de 200 %, con una CE de 4.70 dS m^{-1} . En general la CE de los sustratos se incrementó con respecto a la CE determinada inicialmente en los sustratos, con excepción de la mezcla elaborada con paja y vermicomposta en la cual se conservó aproximadamente la misma CE inicial, aunque los métodos para la determinación de esta variable no fueron iguales al inicio y a los 18 DDS (método holandés y método de vertido respectivamente). No se observaron síntomas del efecto de la alta concentración de sales disueltas en los sustratos sobre las plántulas de brócoli (escasez de agua por efecto osmótico), los sustratos testigos presentaron las CE más altas. Después de la cuantificación de esta variable se decidió dar un riego con agua acidulada con el propósito de disminuir la CE de los sustratos, la cual podría influir negativamente en el crecimiento de las plántulas de brócoli.

Los sustratos de solo paja de trigo, las mezclas con Sunshine 3 o con vermicomposta presentaron valores de CE más bajos que los de las turbas, debido probablemente a que la paja de trigo es un sustrato orgánico relativamente fácil de descomponer por los microorganismos presentes en la paja una vez que se ha adicionado N, además de que las plántulas que crecieron en estos sustratos en general presentaron un menor crecimiento que las plántulas que se desarrollaron en los sustratos con base en turba.

Cabe señalar que a los 18 DDS se extrajeron de las cavidades plántulas con un poco de raíz (lo que se había desarrollado) en los sustratos de paja de trigo, para verificar la degradación de la paja en un estereoscopio, sin embargo, esta no fue detectada; las partículas de paja de trigo no habían sido degradadas biológicamente. Lo anterior nos hace pensar que probablemente los nutrientes de la solución nutritiva suministrada conteniendo N (más nitratos que amonio) fueron utilizados por los microorganismos como fuente nitrogenada para la degradación de los fenólicos solubles totales y otros compuestos con carbono presentes en la solución de los sustratos (Kuwatsuka y Shindo, 1973; Martín y Haider, 1976), o bien una parte del N se perdió por desnitrificación (Volkita *et al.*, 1996a; Volkita *et al.*, 1996b; Soares y Abeliovich, 1998); lo cual trajo como consecuencia una disminución en la CE de los sustratos y en la disponibilidad de estos nutrientes para el crecimiento de las plántulas de brócoli. La desnitrificación se lleva a cabo en condiciones de anaerobiosis (Havlin *et al.*, 1999). Es probable que en las cavidades de las charolas con los sustratos de paja de trigo sola o en mezclas con Sunshine 3 o vermicomposta se hayan presentado condiciones de anaerobiosis, debido a que dichos sustratos permanecieron en algunas ocasiones cerca de la saturación con solución nutritiva, durante el crecimiento de las plántulas.

Lo anterior aunado al hecho de que varios de los compuestos fenólicos (antioxidantes) pueden reaccionar con el oxígeno disuelto en el agua (Kikuzaki *et al.*, 2002), de tal manera que las células de las raíces pierden su capacidad para respirar y obtener energía para la absorción de nutrientes.

Por otro lado, el aumento de la concentración de nutrientes (CE) de la solución nutritiva no disminuyó por sí misma el efecto atribuido a los compuestos fenólicos sobre el crecimiento de las plántulas de brócoli como lo mencionan Vaughan y Ord, 1990 y Stowe y Osborn, 1980.

1.3.3.3 Concentración de fenólicos solubles totales

Como puede apreciarse en el Cuadro 5, hubo diferencias altamente significativas

entre los sustratos en esta variable. Las CFST disminuyeron en todos los sustratos con respecto a las concentraciones iniciales, siendo más notorio en los sustratos de solo paja de trigo, los que disminuyeron sus concentraciones iniciales hasta llegar a 20.64 mg L⁻¹, 21.06 mg L⁻¹ y 24.00 mg L⁻¹ (correspondientes al 77.25 %, 64.92 % y 72.29 % de su concentración inicial respectivamente), mientras que en las turbas la disminución de la CFST fue menos pronunciada (51.86 %, 30.84 % y 48.55 % para los sustratos 1, 2 y 3 respectivamente).

La disminución de las CFST en los sustratos, se puede atribuir principalmente, a la pérdida de estos compuestos por lixiviación (solución oscura) causada por los riegos aplicados a los sustratos desde el inicio del experimento hasta los 18 DDS, o a la probable transformación biológica de estos compuestos en solución en los sustratos (Kuwatzuka y Shindo, 1973; Martin y Haider, 1976; Bollag *et al.*, 1982; Blum y Shafer, 1988; Waetcher-Kristensen *et al.*, 1994; Blum, 1998), a la vez que desaparece la fitotoxicidad (Shindo y Kuwatzuka, 1975).

La CFST en los sustratos a los 18 DDS varió entre 24.60 mg L⁻¹ en la vermicomposta y 18.83 mg L⁻¹ en la mezcla de paja con vermicomposta con relación 70-30. Aunque en este momento del experimento no se cuantificaron variables como longitud de plántula o peso de materia seca de plántulas para establecer diferencias en el crecimiento de las plántulas, visualmente, se observó una diferencia importante entre el buen desarrollo alcanzado por las plántulas que crecieron en los sustratos de turba y los demás sustratos en donde se observó que el crecimiento de estas fue inferior, principalmente en los sustratos de sólo paja de trigo.

1.3.4 Variables evaluadas a los 24 días después de la siembra (Colecta de las plántulas)

1.3.4.1 En sustratos

1.3.4.1.1 Propiedades químicas

Las propiedades químicas evaluadas a los 24 DDS, la $p > F$ de los análisis de varianza y las comparaciones entre medias se muestran también en el Cuadro 5.

1.3.4.1.1.1 pH

El análisis de varianza detectó diferencias altamente significativas entre los sustratos en esta variable. Aunque la comparación de medias establece diferencias entre los valores de pH de los sustratos, con excepción de los sustratos Sunshine, la mezcla de paja y Sunshine 3 en proporción 90-10 y el sustrato de paja de trigo 40-30-30, todos los demás sustratos se encuentran en el intervalo indicado como óptimo para un buen desarrollo ya señalado en apartados anteriores para esta propiedad química. Es importante indicar que en general el sustrato Sunshine 3 permaneció en el intervalo de pH entre 5.9 y 6.2 desde el inicio hasta el final del experimento, el cual señalan los productores de este sustrato como el intervalo que este sustrato puede presentar al utilizarse para la producción de plántulas (Sun Gro Horticulture, S/F).

El sustrato Fafard 1 VM, disminuyó su valor de pH a los 18 DDS (probable dato erróneo), pero se incrementó nuevamente a un valor de 5.68 a los 24 DDS, mostrando también su capacidad para mantener el pH dentro del intervalo de 5.5-6.5, señalado también por la compañía que lo elabora como dentro del intervalo que debe presentar este sustrato cuando crecen plántulas en él (Fafard Peat Moss Co. S/F).

El sustrato Sunshine incrementó su pH con la adición de CaCO_3 de un pH inicial de 3.89 a 4.96 registrado a los 18 DDS y al final del experimento conservó aproximadamente el pH que tuvo a los 18 DDS, mostrando su capacidad de amortiguar el pH, aunque no en el intervalo previsto. Lo anterior pudo haberse debido a que la forma de CaCO_3 que se le aplicó en este sustrato fue en polvo y es probable que cierta parte de este se haya perdido por arrastre con los riegos aplicados con la solución nutritiva. La presentación más común para aplicar esta enmienda es la granular, para evitar pérdidas por arrastre de las partículas con los riegos.

Por otro lado, el incremento registrado en el pH de este sustrato a los 18 DDS y a los 24 DDS se pudo haber debido también a la excreción de iones HCO_3 y/u OH por las raíces de las plántulas de brócoli al absorber mayor cantidad de aniones que de cationes (Marschner, 1995; Lara, 1998).

El sustrato de la mezcla de paja-Sunshine 3 en proporción 60-40 registró un incremento en su pH a los 18 DDS. Esta mezcla se comportó en forma similar a la turba Sunshine 3, siendo capaz de amortiguar el pH al adicionar solución nutritiva a pH 5.5 y presentando un pH al final del experimento de 6.51, el cual se encuentra dentro del intervalo señalado por la compañía que produce este sustrato como el límite superior de pH óptimo para el crecimiento de las plántulas (Sun Gro Horticulture, S/F) y es relativamente similar al pH presentado a los 18 DDS.

La mezcla de paja con Sunshine 3 en proporción 90-10, presentó inicialmente un pH de 6.25, a los 18 DDS tuvo un pH de 6.08 mostrando capacidad de amortiguamiento como se señaló para el caso del sustrato anterior, sin embargo al final del experimento presentó un pH de 7.51. Este valor de pH no es lógico, siguiendo la lógica indicada para el caso del sustrato anterior, por lo que se puede pensar que es un dato erróneo.

La mezcla de paja de trigo con vermicomposta en proporción 70-30 y la vermicomposta inicialmente tuvieron un pH ligeramente alcalino, a los 18 DDS el pH se acidificó por efecto del pH de la solución nutritiva (desplazamiento de iones alcalinos de los sitios de intercambio, adsorción de iones H en los coloides orgánicos y equilibrio con la solución del medio) y al final del experimento conservaron aproximadamente el mismo pH registrado a los 18 DDS (capacidad de amortiguamiento). Es conocido que las vermicompostas contienen sustancias húmicas las cuales confieren a estos materiales capacidad para amortiguar los cambios de pH y una alta capacidad de intercambio de cationes (Brady y Weil, 1999).

Los sustratos de sólo paja de trigo mostraron la misma tendencia de amortiguamiento del pH señalada para los sustratos constituidos de la mezcla de paja con vermicomposta en proporción 70-30 y la vermicomposta. De acuerdo a

los resultados de pH presentados en el Cuadro 5, la adición de yeso (CaSO_4) en polvo a estos sustratos no ayudó a acidificar suficiente el pH. Es muy probable que también se haya perdido en el drenaje por arrastre y de manera más fácil que en el caso del CaCO_3 , porque estos sustratos mostraron mayor capacidad de drenaje que en el caso del sustrato Sunshine.

1.3.4.1.1.2 Conductividad eléctrica

El análisis de varianza de esta propiedad química se muestra también en el Cuadro 5, en donde se observa que hubo diferencia altamente significativa entre los sustratos evaluados. La CE de los sustratos al final del experimento varió entre 0.68 dS m^{-1} en el sustrato 50-20-30 de paja y 2.27 dS m^{-1} en el sustrato Fafard 1 VM. En general las turbas Sunshine 3 y Fafard 1 VM con granulometría fina tuvieron las mayores CE, siendo un poco menor la CE en la turba Sunshine de granulometría más gruesa (mayor drenaje). Es probable también que la alta capacidad de intercambio de cationes que poseen las turbas haya influido en las altas CE que presentaron al final del experimento.

Los sustratos de paja de trigo presentaron las CE más bajas. Cabe señalar que el último riego se proporcionó con agua acidulada solamente, por lo que se puede sugerir que las CE de todos los sustratos disminuyeron por efecto de dilución y por la lixiviación de los nutrimentos.

En general haciendo un análisis del comportamiento de esta propiedad química en el transcurso del experimento se puede observar que tuvo una amplia variación, especialmente después de aplicar la solución nutritiva con una CE de 4.70 dS m^{-1} , situación que podría influir en el crecimiento de las plántulas de brócoli.

1.3.4.1.1.3 Concentración de fenólicos solubles totales

El análisis de varianza de esta propiedad química en los sustratos muestra que hubo diferencias altamente significativas (Cuadro 5). Las concentraciones de fenólicos solubles totales (CFST) en los sustratos variaron entre 20.04 mg L^{-1} en la

vermicomposta y 8.91 mg L^{-1} en el sustrato de la mezcla 70-30 de paja con vermicomposta. La comparación de medias utilizando la prueba de Tukey ($\alpha=0.05$) indica que la CFST en la vermicomposta fue estadísticamente diferente a todos los demás sustratos evaluados, lo que indica que contiene aún una alta concentración de compuestos fenólicos solubles como parte del humus que se produjo en el proceso de transformación biológica. Los sustratos de paja de trigo 50-10-40 y 50-20-30 tuvieron CFST estadísticamente iguales a las concentraciones de estos compuestos presentadas por las turbas Sunshine 3 y Fafard 1 VM y las mezclas de paja con turba y con vermicomposta.

Analizando las CFST durante el experimento, aunque solamente se muestran datos de tres momentos del experimento que tuvo una duración de 24 días, se puede observar que las concentraciones fueron disminuyendo a través del tiempo. La primera cuantificación de la CFST se hizo cuando los sustratos estaban secos con una relación 1: 1.5, sustrato: agua, en tanto que los sustratos en las charolas (18 y 24 DDS) estaban húmedos y la relación para obtener el extracto fue de 1: 0.5 sustrato: agua destilada.

Considerando lo anterior se puede establecer que si la cuantificación de las CFST en los sustratos en las charolas se hubieran realizado con mayor proporción de agua (por ejemplo 1: 1.5), las concentraciones de estos compuestos hubieran sido inferiores a las que se reportan en el Cuadro 5, por efecto de dilución. De la misma manera si se hubiera utilizado una relación de 1: 0.5 para el caso de los sustratos secos al inicio del experimento, no se hubiera obtenido extracto, sino que solamente el sustrato se hubiera humedecido, o si se hubiera utilizado una relación 1: 1 es probable que la concentración de estos compuestos hubiera sido mayor a la que se muestra en el Cuadro 5.

Por otro lado, como se partió del supuesto que al disminuir las CFST en los sustratos, el efecto de estos sobre el crecimiento de las plántulas también disminuye, y aunque en general se observa que en todos los sustratos hubo una disminución de los compuestos fenólicos, se indican solamente las disminuciones en porcentaje para el caso de los sustratos de paja de trigo, porque se observa que en estos sustratos la disminución fue más pronunciada. Las CFST a los 24

DDS disminuyeron en los sustratos 50-10-40, 50-20-30 y 40-30-30 de paja de trigo de la siguiente manera: de 90.71 mg L⁻¹ a 10.48 mg L⁻¹ (88.45 %), de 65.64 mg L⁻¹ a 11.67 mg L⁻¹ (82.23%) y de 86.61 mg L⁻¹ a 14.66 mg L⁻¹ (83.06 %) respectivamente.

1.3.4.2 Variables de crecimiento evaluadas en plántulas a los 24 DDS

1.3.4.2.1 En los vástagos

Los valores de la $p > F$ de los análisis de varianza y la comparación de medias (Tukey $\alpha = 0.05$) de las variables de crecimiento de los vástagos de las plántulas de brócoli se presentan en el Cuadro 6.

1.3.4.2.1.1 Longitud de vástagos

Los mejores medios de crecimiento para que las plántulas de brócoli tuvieran las mayores longitudes de vástago fueron los testigos Sunshine 3, Fafard 1 VM y Sunshine, y la vermicomposta, los que por comparación entre medias fueron estadísticamente iguales entre sí.

El segundo lugar lo ocuparon los sustratos de paja con turba en proporción 60-40 y paja con turba en proporción 90-10, los que fueron estadísticamente iguales entre sí. La mayor proporción de turba en la primera mezcla no ayudó significativamente a las plántulas de brócoli a disminuir el efecto de los compuestos fenólicos sobre esta variable, conteniendo estas mezclas la misma CFST a los 24 DDS.

El último grupo, los que tuvieron la menor longitud de los vástagos y que fueron estadísticamente iguales entre sí, fueron los sustratos 50-10-40, 50-20-30 y 40-30-30 de paja de trigo y la mezcla 70-30 de paja de trigo con vermicomposta.

Cuadro 6. Porcentaje de plántulas emergidas a los diez días después de la siembra y variables de crecimiento evaluadas en plántulas de brócoli cv. Green Bell, en diez sustratos, 24 días después de la siembra.

Sustrato	PE	LV	DT	PMSV	PMSR	PMSR/PMSV
	%	cm	mm	g	g	
1. Sunshine 3	97.22 a	15.38 a	1.91 a	2.84 a	0.59 abc	0.21 a
2. Fafard 1 VM	96.94 a	13.45 ab	1.86 ab	2.49 ab	0.67 a	0.27 a
3. Sunshine	93.05 ab	14.87 a	1.62 c	2.33 ab	0.66 a	0.29 a
4. Paja - Sunshine 3 (60-40)	96.94 a	11.63 bc	1.72 bc	1.64 cd	0.47 bcd	0.32 a
5. Paja - Sunshine 3 (90-10)	95.27 ab	11.29 bcd	1.71 bc	1.68 cd	0.40 c	0.24 a
6. Paja –vermicompost (70-30)	93.99 ab	10.04 cd	1.85 ab	1.34 cd	0.47 bcd	0.36 a
7. Vermicomposta	74.44 b	13.97 a	1.85 ab	1.99 bc	0.61 ab	0.34 a
8. Paja (50-10-40)	93.88 ab	9.19 d	1.68 c	1.28 d	0.41 cd	0.35 a
9. Paja (50-20-30)	95.55 ab	9.67 cd	1.70 bc	1.21 d	0.37 d	0.38 a
10. Paja (40-30-30)	96.66 a	9.02 d	1.63 c	1.21 d	0.39 d	0.33 a
P>F	0.02	0.001	0.001	0.001	0.001	NS
DHS	21.55	2.29	0.16	0.64	0.18	0.22

PE = plántulas emergidas; LV = longitud de vástagos; DT = diámetro de tallo; PMSV = peso de materia seca de vástagos; PMSR = peso de materia seca de raíz; PMSR/PMSV = relación entre las dos variables; DHS = diferencia honesta significativa.

Tomando la longitud promedio de los vástagos del sustrato Sunshine 3 como el 100 %, se observa que los sustratos Fafard 1 VM y Sunshine mostraron una diferencia en longitud de los vástagos de 12.54 % y 3.31 % respectivamente. Para el caso de las mezclas de paja con Sunshine 3 en proporciones 60-40 y 90-10 los porcentajes de inhibición fueron de 24.38 % y 26.59 % respectivamente.

En la mezcla de paja de trigo con vermicomposta 70-30 y la vermicomposta, los porcentajes de inhibición fueron de 34.72 % y 9.16 %, mientras que para los sustratos de paja de trigo 50-10-40, 50-20-30 y 40-30-30 los porcentajes de inhibición fueron 40.24 %, 37.12 % y 41.35 % respectivamente.

1.3.4.2.1.2 Diámetro de tallo

Con excepción del sustrato Sunshine, los otros dos sustratos testigos fueron los que tuvieron plántulas con los mayores diámetros de tallo, siendo también estadísticamente iguales a los sustratos de la mezcla 70-30 de paja trigo con vermicomposta y a la vermicomposta (Cuadro 6). Las plántulas que crecieron en las dos mezclas de paja con Sunshine 3 presentaron diámetros de tallo iguales al diámetro de las plántulas que crecieron en el sustrato Fafard 1 VM, y las plántulas que crecieron en los sustratos 50-10-40, 50-20-30, 40-30-30 de paja de trigo fueron los que tuvieron el menor diámetro de tallo.

Por otro lado, es importante señalar que el diámetro de tallo de las plántulas que crecieron en el Sunshine fue estadísticamente igual a los diámetros de tallo que presentaron las plántulas que crecieron en los sustratos de solo paja de trigo. Es muy probable que el pH ácido, que soportaron las raíces de las plántulas durante el experimento (entre 3.89 y 4.96) haya inhibido el crecimiento del diámetro de tallo, aunque en las otras variables de crecimiento evaluadas los sustratos con base en turba fueron estadísticamente iguales.

Tomando como 100 % el valor del diámetro de tallo de las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine 3, las reducciones en esta variable en los demás sustratos (Cuadro 6) fueron de 2.76 %, 15.18 %, 9.94 %, 10.47 %, 3.14 %, 3.14 %, 12.04 %, 10.99 % y 14.65 % para los sustratos Fafard 1 VM, Sunshine, mezcla paja-

Sunshine 60-40; mezcla paja-Sunshine 90-10, mezcla paja-vermicomposta 70-30, vermicomposta y las pajas 50-10-40, 50-20-30 y 40-30-30 respectivamente.

Excluyendo al Sunshine, todos los demás sustratos presentaron disminuciones en % en el diámetro de tallo menores que las disminuciones encontradas para el caso de la longitud de los vástagos. En general el crecimiento en el diámetro de tallo fue inhibido con menor intensidad que la longitud de los vástagos y se atribuye a las CFST en los sustratos con paja de trigo.

1.3.4.2.1.3 Peso de materia seca de vástagos

El mayor peso de materia seca de 20 vástagos de plántulas de brócoli se registró en el sustrato Sunshine 3 (Cuadro 6), siendo igual estadísticamente al peso de materia seca de vástagos (PMSV) obtenido en los otros dos sustratos testigos. El PMSV de plántulas que crecieron en la vermicomposta fue estadísticamente igual al que presentaron los sustratos Fafard 1 VM y Sunshine con base en turba.

En todos los demás sustratos se obtuvieron PMSV inferiores a los presentados por los sustratos de turba. Las mezclas de turba Sunshine 3 y paja de trigo en proporciones 60-40 y 90-10 presentaron estadísticamente el mismo PMSV, indicando que aunque la segunda mezcla se elaboró con solamente un 10 % de paja de trigo, el efecto de los compuestos fenólicos sobre la inhibición del crecimiento fue similar al efecto de inhibición que se presentó en el sustrato con la proporción de 40 % de paja de trigo. Asimismo, de acuerdo con los datos registrados a los 18 DDS y 24 DDS, las CFST en estos dos sustratos fueron iguales estadísticamente.

Si tomamos como 100 % el PMSV de las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine 3, las turbas Fafard 1 VM y Sunshine mostraron una disminución en esta variable de 12.33 % y 17.96 %, aunque estadísticamente fueron iguales. Con respecto a las mezclas de paja de trigo con Sunshine 3 en las proporciones 60-40 y 90-10, se presentó una disminución del PMSV de 42.46 % y 40.85 % respectivamente. Las plántulas de brócoli que crecieron en la mezcla de paja con vermicomposta presentaron una diferencia en el PMSV de 52.82 % y las que

crecieron en vermicomposta tuvieron una diferencia de 29.93 %. Los PMSV obtenidos de plántulas que crecieron en los sustratos de solo paja de trigo presentaron los menores PMSV, disminuyendo 54.92 %, 57.40 % y 57.40 % en los sustratos 50-10-40, 50-20-30 y 40-30-30 respectivamente, con respecto al PMSV del mejor sustrato testigo (Sunshine 3).

1.3.4.2.2 En las raíces

1.3.4.2.2.1 Peso de materia seca de raíces

De manera similar a la variable anterior, las plántulas que crecieron en los sustratos con base de turba fueron los que presentaron el mayor peso de materia seca de raíces (PMSR) (Cuadro 6), y fueron también estadísticamente iguales al peso que presentaron las raíces de las plántulas que crecieron en la vermicomposta. El PMSR obtenido en las plántulas que crecieron en los demás sustratos fue menor que el que presentaron los testigos y la vermicomposta. Adicionalmente, no se observaron pelos radicales en los sustratos de solo paja de trigo y se observaron en menor proporción en las mezclas de paja de trigo con Sunshine 3 o con vermicomposta, en relación con los que presentaron los sustratos con base en turba.

Si consideramos en este caso como el 100 % el PMSR de los vástagos que crecieron en el sustrato Fafard 1 VM, la disminución en esta variable para el Sunshine 3 y el Sunshine fueron de 11.95 % y 1.5 % respectivamente. Con respecto a las mezclas de paja de trigo con Sunshine 3 en las proporciones 60-40 y 90-10, se presentó una diferencia de PMSR de 29.86 % y 40.30 % respectivamente. La mezcla de paja con vermicomposta presentó una diferencia en el PMSR de 29.86 % y la vermicomposta una diferencia de 8.96 %. Los PMSR obtenidos de 20 plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo tuvieron las mayores diferencias con respecto al mejor testigo, siendo estas de 38.31 %, 44.78 % y 41.80 % para los sustratos 50-10-40, 50-20-30 y 40-30-30 respectivamente.

Los porcentajes de inhibición del crecimiento sobre la acumulación de materia seca en 20 raíces fueron menores que los porcentajes de inhibición que se presentaron en los 20 vástagos, indicando que el efecto de los compuestos fenólicos fue superior sobre el crecimiento de la parte aérea que en las raíces de las plántulas. Lo anterior concuerda con lo señalado por Guenzi *et al.*, 1967, quienes señalan que en general el efecto de los extractos acuosos de seis variedades de trigo fue ligeramente mayor en el crecimiento de la parte aérea (entre 11 y 36 %) que en la raíz (entre 9 y 21 %).

1.3.4.2.2 Relación peso de materia seca de raíces/peso de materia seca de vástagos

De acuerdo con el análisis de varianza para esta relación entre variables no hubo diferencias significativas entre los sustratos; señalando que estadísticamente conservaron la misma relación entre el peso de materia seca de raíces/peso de materia seca de vástagos, la cual varió entre 0.21 y 0.38, lo que indica que el PMSR representó entre el 21 % y el 38 % del peso de la materia seca de los vástagos.

Aunque las relaciones fueron estadísticamente iguales, se puede observar que las relaciones entre estas dos variables en los sustratos de paja de trigo o de sus mezclas con Sunshine 3 o con vermicomposta fueron superiores a las relaciones que presentaron los sustratos testigos. Lo anterior muestra que el crecimiento de las raíces en estos sustratos fue superior al crecimiento que tuvieron las raíces en los sustratos testigos con relación al crecimiento de los vástagos. Lo anterior concuerda relativamente con lo que señalan Stowe y Osborn (1980), que bajo concentraciones bajas de nutrimentos, los fenólicos causan que las plantas sean más pequeñas y que tengan una gran proporción de su peso seco en las raíces en comparación con las plantas control, sin embargo, esta situación es diferente en relación con este experimento, en que aquí las concentraciones de nutrimentos fueron altas (200 %) y aún así se presentaron crecimientos importantes en las raíces de las plántulas que crecieron en los sustratos conteniendo fenólicos.

La diferencia en los valores de PMSV de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos, se puede atribuir esencialmente a la presencia de compuestos fenólicos. Se puede señalar también, que aunque en el Cuadro 5 se observa que las CFST disminuyen con el tiempo, es de suponer que el efecto más drástico de estos compuestos se presentó durante los primeros días después de que las plántulas de brócoli emergieron, cuando las CFST fueron altas, en comparación con las CFST cuantificadas a los 18 DDS y 24 DDS, sin descartar el hecho de que las concentraciones posteriores a los 18 DDS también hayan contribuido en la inhibición del crecimiento de los vástagos de las plántulas de brócoli, pero en menor intensidad.

Otro factor que pudo haber contribuido en cierta proporción en la inhibición del crecimiento de las plántulas es la probable falta de disponibilidad de oxígeno para la respiración de las raíces, debido a la baja porosidad de aire disponible en los sustratos (no determinada), detectada por largos periodos de tiempo durante el día en que los sustratos de solo paja de trigo o con alguna proporción de esta en las mezclas, estuvieron en condiciones cercanas a la saturación con agua debido principalmente a la pérdida de volumen por asentamiento de las partículas causado por los riegos (shrinkage), y a la moderada degradación biológica de la paja de trigo atribuida a microorganismos (falta de bioestabilidad).

En los sustratos testigos (turbas) el ciclo de humectación-secado después del riego se presentó entre dos a tres veces diarias, mientras que en los sustratos de paja de trigo o en alguna de las mezclas de paja con Sunshine 3 o vermicomposta el proceso de secado fue más tardado.

1.3.4.3 Variables cualitativas en los sustratos, las raíces y el cepellón a los 24 DDS

En el Cuadro 7, se muestran los resultados obtenidos en las variables cualitativas determinadas en los sustratos, en las raíces y en los cepellones de las plántulas de brócoli.

1.3.4.3.1 Degradación microbiológica de los sustratos

Como se puede apreciar en el Cuadro 7, únicamente los sustratos elaborados con solo paja de trigo presentaron visiblemente una degradación microbiológica moderada (entre 11 %-25 %, tendiendo más hacia 11 %) de acuerdo con la escala utilizada. Lo anterior muestra que los microorganismos presentes en la paja de trigo probablemente utilizaron una parte del N que se adicionó como NO_3 y/o NH_4 en la solución nutritiva, para la transformación de una parte de la materia orgánica sólida de la paja de trigo, sin descartar la posibilidad de que también parte de este N pudo haberse utilizado para la degradación de los compuestos orgánicos solubles; por ejemplo los compuestos fenólicos en la solución del sustrato, o bien se haya perdido por desnitrificación.

Cuadro 7. Variables cualitativas registradas en los sustratos, en las raíces de las plántulas y en el cepellón, a los 24 DDS.

Sustrato	DM	CR	DPR	FEC
1. Sunshine 3	1	2	1	1
2. Fafard 1 VM	1	1	1	1
3. Sunshine	1	1	1	1
4. Paja-Sunshine 3 (60-40)	1	2	2	1
5. Paja-Sunshine 3 (90-10)	1	2	2	1
6. Paja-vermicomposta (70-30)	1	3	2	1
7. Vermicomposta	1	3	2	3
8. Paja (50-10-40)	2	2	3	2
9. Paja (50-20-30)	2	2	3	2
10. Paja (40-30-30)	2	2	3	2

DDS = días después de la siembra; DM = degradación microbiológica; CR = color de raíz; DPR = densidad de pelos radicales; FEC = facilidad para extraer el cepellón.

Asimismo, las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de sólo paja de trigo presentaron clorosis general en sus hojas, síntoma típico de deficiencia de N. Cabe hacer mención que las deficiencias de este nutriente se presentaron marcadamente durante la última semana de crecimiento de las plántulas, lo que

indica probablemente que la degradación de la paja de trigo fue más pronunciada durante este periodo de tiempo, teniendo las raíces de las plántulas de brócoli menos disponibilidad de este nutrimento en el sustrato, causa por la cual las plántulas presentaron dicha deficiencia, aún a pesar de que la solución nutritiva aplicada contenía altas concentraciones de N (Cuadro 3).

Adicionalmente, se observó también una disminución en el volumen del sustrato, presentando la superficie de estos sustratos un nivel de aproximadamente un cm abajo de la superficie superior de la charola. La disminución del volumen del sustrato también pudo haber contribuido a la disminución de la concentración de oxígeno en los poros de estos sustratos y como consecuencia una disminución en la capacidad de las raíces para absorber nutrimentos. Lo anterior muestra evidencias de que la paja de trigo en las condiciones específicas de este experimento, puede considerarse como un material poco bioestable en el periodo de 24 días.

De acuerdo con Lemaire (1995), las consecuencias de falta de bioestabilidad son: pérdida de volumen permitiendo la compactación, disminución de la porosidad, bajo contenido de aire, y contenido de agua a pF1 (10 cm de columna de agua), alteración del tamaño de partículas, cambio en la composición de la fase gaseosa debido a la producción de CO₂, incremento en el pH y C.E, salinidad debida a la mineralización, nueva síntesis de compuestos orgánicos con efectos fitotóxicos o estimulantes.

De aquí, se desprende el hecho de que un material no bioestable, al menos en el tiempo en el que la plántula permanece en el sustrato, no puede utilizarse como sustrato, debido a las consecuencias que trae su descomposición.

1.3.4.3.2 Color de raíz y densidad de pelos radicales

Como se muestra en el Cuadro 7, solamente los sustratos Fafard 1 VM y Sunshine mostraron sus raíces de color completamente blanco y con una alta densidad de pelos radicales, indicando buena capacidad de aireación del sustrato.

Las raíces de las plántulas de brócoli en el Sunshine 3, presentaron una

coloración ligeramente amarilla, una alta densidad de pelos radicales bien desarrollados pero ligeramente amarillos, lo que pudo haberse debido a las sustancias fenólicas de tipo complejo contenidas en este (Morita, 1980; Morita, 1981; Kuiters y Denneman, 1987), y no debido a compuestos fenólicos “simples” similares a los contenidos en la paja de trigo, de acuerdo a lo que se propuso en una escala de coloración de raíces en donde se relacionan el contenido de compuestos fenólicos “simples” con la coloración de las raíces de las plántulas de brócoli, en la cual la coloración ligeramente amarilla se atribuye al efecto de la CFST.

En experimentos en caña de azúcar en agua se encontró que esta fue severamente dañada por los ácidos fenólicos; *su sistema radical se tornó café, sin crecimiento, desprovista de pelos radicales*, la punta de las hojas se tornó amarilla y la planta entera no creció (Wang *et al.*, 1967).

Por otro lado, es conocido que las raíces de las plantas que crecen en medios deficientes de oxígeno desarrollan raíces con coloración café oscura (Wang *et al.*, 1967). En el caso del sustrato Sunshine 3, no existió relación entre el color de la raíz y el desarrollo de la plántula.

Las plántulas que crecieron en la mezcla de paja de trigo y Sunshine 3 en proporción 60-40, al final del experimento presentaron un buen sistema radicular de color blanco y con alta densidad de pelos radicales. La otra mezcla de paja de trigo con Sunshine 3 en proporción 90-10, presentó también un buen sistema radical, sin embargo su color fue café-amarillento y con menor densidad de pelos radicales.

En la mezcla de paja de trigo con vermicomposta, las raíces de las plántulas presentaron una coloración café-amarillenta (3 en la escala propuesta) con pocos pelos radicales (3 en la escala). Los sustratos de paja de trigo 50-20-30 y 40-30-30, presentaron sistemas radicales mas bien de color blanco (1 en la escala), sin embargo no presentaron pelos radicales (4 en la escala) y el sustrato 50-10-40 de paja de trigo presentó el peor sistema radical de los sustratos de paja de trigo teniendo raíces de color ligeramente amarillentas (2 en la escala propuesta) y con baja densidad de pelos radicales (3 en la escala propuesta).

1.3.4.3.3 Facilidad para extraer el cepellón

En la producción de plántulas para trasplante es muy importante que cuando se extraen las plántulas de sus cavidades en la charola, las raíces de estas se encuentren bien desarrolladas a través del sustrato, para que puedan ser extraídas con la totalidad o casi la totalidad del mismo. Plántulas con sistemas radicales desarrollados a la mitad o en una cuarta parte de la profundidad que ocupa el sustrato, al extraer manualmente las plántulas de sus cavidades para el trasplante, la mitad del sustrato o tres cuartas partes del sustrato permanecen en la cavidad, circunstancia que conlleva a tener plántulas con poco sistema radical, trayendo como consecuencia una mayor dificultad para adaptarse a las condiciones de estrés (absorción de agua y nutrimentos) cuando se trasplantan a campo.

Generalmente las charolas fabricadas con poliestireno (hielo seco-unicel), poseen poros sobre las paredes de la cavidad, situación que conduce a que las raíces de las plántulas se introduzcan en busca de nutrimentos y aire y se desarrollen ahí, por lo que cuando las plántulas son extraídas manualmente de sus cavidades, parte de su sistema radical se queda adherido a dichos poros, disminuyendo el volumen radical original, teniendo como consecuencia una mayor dificultad para su adaptación a las condiciones de campo, además de que las plántulas son más propensas a ser atacadas por enfermedades al producirse heridas.

En este experimento, el tipo de charola no influyó en esta variable debido a que las charolas que se utilizaron fueron totalmente lisas en sus paredes, de tal manera que la facilidad para extraer el cepellón estuvo relacionada directamente con el desarrollo del sistema radical a través del sustrato contenido en la cavidad de la misma.

En el Cuadro 7, se muestra que las plántulas que se desarrollaron en los sustratos testigos y en las mezclas de paja con turba o con vermicomposta, sus raíces presentaron suficiente crecimiento para alcanzar la parte inferior del sustrato y desarrollar un buen cepellón (1 en la escala) a los 24 DDS. Lo anterior indica también que en este momento y quizás un poco antes, no hubo efecto de

inhibición significativo de las CFST presentes en estos sustratos, sobre el crecimiento de las raíces de las plántulas.

Por otro lado, las raíces de las plántulas que se desarrollaron en los sustratos de solamente paja de trigo, no se pudieron extraer con la totalidad del sustrato contenido en las cavidades de las charolas, lo cual fue consecuencia de un pobre desarrollo radical, quedando en la cavidad de la charola por lo menos una tercera parte del sustrato, situación que no es recomendable para plántulas que se utilizarán para ser trasplantadas en campo, las cuales sufrirán mayor estrés por la mayor dificultad que presentarán para absorber agua y nutrimentos del ambiente del suelo por tener menor volumen radical.

Para el caso de las plántulas que crecieron en la vermicomposta, al momento de la extracción de las mismas se observó que se extrajeron con la totalidad de las raíces, sin embargo, también se observó que las partículas de vermicomposta comenzaron a desprenderse de las raíces de las plántulas, quedando “casi desnudas”, sin sustrato, por lo que fueron calificadas con 3 en la escala propuesta. Este hecho tampoco es recomendable; las plántulas para trasplante deben de tener raíces bien desarrolladas y deben conservar el sustrato como un medio para retener humedad y mantener turgentes las raíces en el intervalo de tiempo entre la extracción de las plántulas de las charolas y el trasplante en el suelo.

En general, se puede considerar que la disminución del crecimiento de la parte aérea y de las raíces de las plántulas desarrolladas en los sustratos de solo paja de trigo o alguna proporción de esta con Sunshine o vermicomposta, se puede atribuir principalmente al efecto de los compuestos fenólicos sobre los sistemas radicales de las plántulas, sin embargo, el efecto de estos compuestos químicos fue mayor para la parte aérea que para las raíces, aunque no se puede descartar la posibilidad de que parte de esta inhibición del crecimiento pudiera haberse debido a falta de aire en los sustratos y por consecuencia falta de oxígeno para la respiración de las raíces, debido en primer lugar a la utilización del O_2 por los microorganismos que estuvieron transformando la paja, y por otro lado a la falta de intercambio gaseoso entre el sustrato y la atmósfera debido a la permanencia de agua en estos sustratos y a la compactación de los mismos (se observaron

características cualitativas que lo sustentan, sin embargo no se tienen elementos cuantitativos para soportarlo).

1.4 CONCLUSIONES

1. Las propiedades químicas iniciales de los sustratos no influyeron significativamente en el porcentaje de plántulas emergidas en los diez sustratos evaluados.

2. El pH y la conductividad eléctrica de los sustratos durante el experimento no influyeron significativamente en las variables de crecimiento de las plántulas de brócoli en los sustratos evaluados.

3. La inhibición del crecimiento en las plántulas de brócoli que crecieron en las mezclas de turba con paja de trigo o con vermicomposta y en los sustratos de sólo paja de trigo, se atribuyen principalmente al efecto de los compuestos fenólicos solubles en la paja de trigo, sin descartar la posibilidad de que el crecimiento también haya sido inhibido por la falta de O₂ principalmente en los sustratos de sólo paja de trigo.

4. Los mejores sustratos para el crecimiento de plántulas de brócoli fueron los sustratos testigos (Sunshine 3, Fafard 1 VM y Sunshine).

5. Los sustratos de sólo paja de trigo presentaron una degradación importante, entre 11 % y 25 %, caracterizándolos como poco bioestables.

6. El peso de materia seca de raíces (PMSR) de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos testigos y en la composta fue mayor y estadísticamente diferente a los PMSR de las plántulas de brócoli que crecieron en las mezclas de turba con paja de trigo o con vermicomposta, o paja de trigo sola.

7. Las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de solo paja de trigo presentaron crecimientos de raíces insuficientes para poder ser extraídos fácilmente de las celdas de las charolas con la mayoría del volumen del sustrato.

1.5 LITERATURA CITADA

Ansorena M, J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Editorial Mundi-Prensa. Bilbao, España.

Blum U., and S. R. Shafer. 1988. Microbial populations and phenolic acids in soil. *Soil Biol. Biochem.* 20: 793-800.

Blum, U. 1998. Effects of microbial utilization of phenolic acids and their phenolic acid breakdown products on allelopathic interactions. *J. of Chem. Ecol.* 24: 685-708.

Bollag, J. M., S. Y, Liu., and R. D. Minard. 1982. Enzymatic oligomerization of vanillic acid. *Soil Biol. Biochem.* 14: 157-163.

Brady, N. C. and R. R. Weil (1999). *The nature and properties of soils*. Ed. Prentice Hall. New Jersey. USA.

Bunt, A. C. 1988. *Media and mixes for container grown plants*. Unwin Hyman Ltd. London. UK.

Burés, P. S. 1998. Aplicación a la producción viverística ornamental, hortícola y forestal. *En: Tecnología de sustratos*. Edicions de la Universitat de Lleida. Lleida, España.

Carpita, N., D. Sabularse., D. Montezinos., and D. P. Delmer. 1979. Determination of the pore size of cell walls of living plant cells. *Science.* 205: 1144-1147.

Canadian Sphagnum Peat Moss Association. 1996. *A Horticultural Teaching Plan*. (Disponible en línea en <http://www.peatmoss.com/hortprog1.php>). (Revisado el 8 de noviembre de 2003).

Dinev, N., and I. Stancheva. 1995. Response of wheat and maize to different nitrogen sources: I. Plant growth and biomass accumulation. *J. of Plant Nutr.* 18: 1273-1280.

Elliot, L. F., T. M. McCalla., and A. Waiss. 1978. Phytotoxicity associated with residue management. pp. 131-146. *In: Crop Residue Management Systems*. American Society of Agronomy. Special publication No. 31. Madison, WI, USA.

- Escudero, J. 1993. Cultivo hidropónico de tomate. pp. 261-297. *En*: F. Cánovas y J. R. Díaz. (eds.). Curso superior de especialización sobre cultivos sin suelo. I. E. A./ F.I.A.P.A. Almería, España.
- Fafard Peat Moss Co. S/F. Folleto promocional.
- Glass, A. D. M. 1973. Influence of phenolic acids on ion uptake. I. Inhibition of phosphate uptake. *Plant Physiol.* 51: 1037-1041.
- Glass, A. D. M., and J. Dunlop. 1974. Influence of phenolic acids on ion uptake. IV. Depolarization of membrane potentials. *Plant Physiol.* 54: 855-858.
- Gobierno del estado de Guanajuato. 2000. Ley de Protección y Preservación del ambiente del estado de Guanajuato.
- Gómez, V. P., y O. Grajeda C. S/F. Cuestionarios. (investigación de campo). INIFAP. CEBAJ. Celaya, Gto.
- Guenzi, W. D., and T. M. McCalla. 1966. Phenolic acids in oats, wheat, sorghum, and corn residues and their phytotoxicity. *Agron. J.* 58: 303-304.
- Guenzi, W. D., T. M. McCalla., and F. A. Norstadt. 1967. Presence and persistence of phytotoxic substances in wheat, oat, corn, and sorghum residues. *Agron. J.* 59: 163-165.
- Harborne, J. B. 1984. Phenolic compounds. pp. 37-99. *In*: *Phytochemical Methods: A guide to modern techniques in plant analysis.* 2nd. Ed. Chapman & Hall. London, UK.
- Havlin, J. L., J. D. Beaton., S. L. Tisdale., and W. L. Nelson. 1999. Soil fertility and fertilizers. An introduction to nutrient management. Sixth. Ed. Prentice Hall. New Jersey, USA.
- Hewitt, E. J. 1966. Sand and water culture methods. CAB. Technical Communication No. 22. London. UK.
- Kikuzaki, H., M. Hisamoto., K. Hirose., K. Akiyama., and H. Yaniguchi. 2002. Antioxidant properties of ferulic acid and its related compounds. *J. Agric. Food Chem.* 50: 2161-2168.
- Kuiters, A. T., and C. A. J. Denneman. 1987. Water soluble phenolic substances in soil under several coniferous and deciduous tree species. *Soil Biol. Bioch.* 19: 765-769.
- Kuwatzuka, S., and H. Shindo. 1973. Behavior of phenolic substances in the decaying process of plants. I. Identification and quantitative determination of phenolic acids in rice straw and its decayed products by gas chromatography.

- Soil Sci. Plant Nutr. 19: 219-227.
- Lara H, A. 1998. Soluciones nutritivas para cuatro etapas fenológicas del jitomate. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. México.
- Lemaire, F. 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. *Acta Horticulturae*. 396: 273-284.
- Lea-Cox, J. D., G. W. Stitte., W. L. Berry., and R. M. Wheeler. 1999. Nutrient dynamics and pH/charge-balance relationships in hydroponic solutions. *Proceedings of the International Symposium of Growing Media and Hydroponics*. Volume 1. International Society of Horticultural Science. Ed. A. P. Papadopoulos. 241-249.
- Lodhi, M. A. K., R. Bilal., and K. A. Malik. 1987. Allelopathy in agroecosystems: wheat phytotoxicity and its possible roles in crop rotation. *J. of Chem. Ecol.* 13 : 1881-1891.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Second Edition. Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Martin, J. P., and K. Haider. 1976. Decomposition of specifically carbon-14 labelled ferulic acid: free and linked into model humic acid-type polymers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 377-380.
- Merck, 1996. The Merck Index. Merck Research Laboratory. Merck & Co. Inc. Twelfth Edition. New York. USA.
- Morita, M. 1980. Total phenolic content in the pyrophosphate extracts of two peat soil profiles. *Can. J. Soil Sci.* 60: 291-297.
- Morita, H. 1981. Changes in phenolic composition of a peat soil due to cultivation. *Soil Science*. 131: 30-33.
- Narwal, S. S., M. K. Sarmah., and D. P. S. Nandal. 1997. Allelopathic effects of wheat residues on growth and yield of fodder crops. *Allelopathy Journal*. 4: 111-120.
- Opoku, G., T. J. Vyn., and R. P. Voroney. 1997. Wheat straw placement effects on total phenolic compounds in soil and corn seedling growth. *Can. J. Plant Sci.* 77: 301-305.
- Rambakudzibga, A. M. 1991. Allelopathic effects of aqueous wheat (*Triticum aestivum* L.) straw extracts on the germination of eight arable weeds commonly found in Zimbabwe. *Zimbabwe Journal of Agricultural Research*. 29: 77-79.

- Shindo, H., and S. Kuwatzuka. 1975. Behavior of phenolic substances in the decaying process of plants. III. Degradation pathway of phenolic acids. *Soil Sci. Plant Nutr.* 21: 227-238.
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) 2010. Anuario estadístico de la producción agrícola. (Disponible en línea en http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=351 (Revisado el 15 de junio de 2011)).
- Soares, M. I. M., and A. Abeilovich. 1998. Wheat straw as substrate for water denitrification. *Wat. Res.* 32: 3790-3794.
- Sonneveld, C., J. Van den Ende., and P. A. Van Dijk. 1974. Analysis of growing media by means of a 1: 1.5 volume extract. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 5: 183-202.
- Steiner, A. A. 1961. A universal method for preparing nutrient solutions of a certain desired composition. *Plant and Soil.* 15: 134-154.
- Stowe, L. G., and A. Osborn. 1980. The influence of nitrogen and phosphorus levels on the phytotoxicity of phenolic compounds. *Can. J. Bot.* 58: 1149-1153.
- Sun Gro Horticulture. S/F. Folleto promocional.
- Swain, T., and W. E. Hillis. 1959. The phenolic content of *Prunus domestica*. *J. Sci. Food Agric.* 10: 63-68.
- TLC Polyform, Inc. S/F. Contenedores y charolas ecológicas para la horticultura de plástico reciclado. Folleto promocional.
- Vaughan, D., and B. Ord. 1990. Influence of phenolic acids on morphological changes in roots of *Pisum sativum*. *J. Sci. Food Agric.* 52: 289-299.
- Volokita, M., A. Abeilovich., and M. I. M. Soares. 1996a. Denitrification of groundwater using cotton as energy source. *Water Sci. Technol.* 34: 379-385.
- Volokita, M., S. Belkin., A. Abeilovich., and M. I. M. Soares. 1996b. Biological denitrification of drinking water using newspaper. *Water Res.* 30: 965-971.
- Waechter-Kristensen, B.; P. Sundin., and P. Jensen. 1994. Degradation of phenolic acids by bacteria isolated from hydroponic tomato culture with circulating nutrient solution. *Acta Horticulturae.* 381: 611-614.
- Wang, T. S. C., T. K. Yang., and T. T. Chuang. 1967. Soil phenolic acids as plant growth inhibitors. *Soil Science.* 103: 239-246.

Yong, Q. M., and H. H. Qing. 1995. Effect of wheat straw mulching on the growth, development and yield of maize. *Acta Agriculturae Boreali Sinica*. 10: 106-110.

CAPÍTULO II

**IDENTIFICACIÓN DE ÁCIDOS FENÓLICOS EN PAJA DE TRIGO POR
CROMATOGRFÍA DE CAPA FINA, E IDENTIFICACIÓN Y
CUANTIFICACIÓN POR CROMATOGRFÍA LÍQUIDA DE ALTA RESOLUCIÓN**

IDENTIFICACIÓN DE ÁCIDOS FENÓLICOS EN PAJA DE TRIGO POR CROMATOGRAFÍA DE CAPA FINA, E IDENTIFICACIÓN Y CUANTIFICACIÓN POR CROMATOGRAFÍA LÍQUIDA DE ALTA RESOLUCIÓN

Fidel René Díaz Serrano, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2011

La paja de trigo contiene compuestos fenólicos que tienen acción alelopática sobre su misma especie y/o sobre otras especies. Los ácidos fenólicos derivados de sus respectivos compuestos conjugados con azúcares en los extractos dependieron del tipo de extractante. En el extracto con agua común y por cromatografía de capa fina se identificaron los ácidos caféico, gentísico, *p*-cumárico (*trans* y *cis*), ferúlico (*trans* y *cis*), siríngico y vainílico y se encontraron dos ácidos más que no pudieron ser identificados, mientras que en el extracto con urea al 2 % se identificaron únicamente los ácidos *p*-cumárico y ferúlico con sus isómeros *trans* y *cis*. Los principales ácidos fenólicos identificados por cromatografía líquida de alta resolución (CLAR) en todos los extractantes fueron los ácidos *p*-cumárico y ferúlico con sus isómeros *trans* y *cis*. Las concentraciones de los ácidos *p*-cumárico y ferúlico (*trans* y *cis*) determinadas por HPLC fueron muy bajas en relación con las concentraciones de fenólicos solubles totales determinadas en los extractos utilizando los diferentes extractantes. Los porcentajes de recuperación de los ácidos fenólicos en relación con las concentraciones iniciales de fenólicos en los extractos variaron entre 0.17 % en el extracto con NaOH al 0.5 % y 3.06 % en el extracto con KOH al 0.5 % cuantificados por CLAR. Los bajos porcentajes de recuperación de los ácidos *p*-cumárico y ferúlico por CLAR en relación con las concentraciones de fenólicos solubles totales sugiere que la gran mayoría de los compuestos fenólicos presentes en la paja de trigo no son los ácidos *p*-cumárico y ferúlico como es mencionado por varios autores, sugiriendo también que probablemente estos ácidos fenólicos no son los principales compuestos alelopáticos presentes en la paja de trigo.

Palabras clave: *paja de trigo, ácido fenólicos, identificación y cuantificación.*

WHEAT STRAW PHENOLIC ACIDS IDENTIFICATION BY THIN LAYER CHROMATOGRAPHY AND IDENTIFICATION AND QUANTIFICATION BY HIGH PERFORMANCE LIQUID CHROMATOGRAPHY

Fidel René Díaz Serrano, Ph. D.

Postgraduate College, 2011

It is well known that wheat straw has phenolic compounds that interfere with the growing of plants of the same specie or different specie (alelopathy). The kind of phenolic acids contained in wheat straw depended of the type of extractant solution. In the tap water extract the identified phenolics were caffeic, gentisic, *p*-coumaric (*trans* and *cis*), syringic and vanillic acids and were found other two phenolic acids that were not possible to identified them, while in the urea 2 % extract were only identified *p*-coumaric and ferulic acids with their respective *trans* and *cis* isomers. The main identified phenolic acids by high performance liquid chromatography (HPLC) in all the extractants were *p*-coumaric and ferulic acids with their respective *trans* and *cis* isomers.

The concentrations of *p*-coumaric and ferulic acids (*trans* and *cis*) determined by HPLC were very low in relationship to the total concentration of phenolics determined with the extractants used. The percentages of recuperation of phenolic acids in relationship to the initial concentrations of phenolics in the extracts varied among 0.17 % in the NaOH 0.5 % extract and 3.06 % in the KOH 0.5 % extract. The very low percentajes of *p*-coumaric and ferulic acids determined by HPLC in relationship to the total phenolic concentrations suggest that the main phenolic compounds found in wheat straw are not *p*-coumaric and ferulic acids as it is mentioned by various autors, and suggests that probably these phenolic acids are not the main allelopathic compounds.

Key words: wheat straw, phenolic acids, identification and quantification.

2.1 INTRODUCCIÓN

Es ampliamente conocido que la paja de trigo posee compuestos fenólicos que inhiben el crecimiento de la raíz y el tallo de plantas de su misma especie u otras especies (Guenzi y McCalla, 1966; Elliot *et al.*, 1978; Lodhi *et al.*, 1987; Narwal *et al.*, 1997; Opoku *et al.*, 1997). Los compuestos fenólicos identificados en las pajas de trigo son los ácidos fenólicos: *p*-cumárico, ferúlico, *p*-hidroxibenzoico y vainílico principalmente (Guenzi y McCalla, 1966). Los compuestos aleloquímicos identificados en la paja de trigo y en los suelos asociados fueron los ácidos ferúlico, *p*-cumárico, *p*-hidroxibenzoico, siríngico y vainílico (Lodhi *et al.*, 1987).

Sin embargo, en la gran mayoría de los trabajos de investigación en donde se trata de demostrar el efecto de inhibición de algunos compuestos solubles de la paja de trigo, no se han cuantificado las concentraciones de fenólicos solubles totales para hacer relaciones entre estas últimas y las respuestas de las plantas, simplemente los trabajos señalan que los extractos fríos o calientes inhiben el crecimiento (Lodhi *et al.*, 1987; Narwal *et al.*, 1997; Opoku *et al.*, 1997; Rambakudzibga, 1991) o bien simplemente se evalúa la fitotoxicidad de los extractos acuosos en diferentes diluciones (Al Hamdi *et al.*, 2001) en condiciones de laboratorio sin cuantificar las concentraciones de estos compuestos.

Los compuestos fenólicos identificados en la paja de trigo han sido el resultado de la extracción con algún extractante, hidrólisis, separación e identificación por cromatografía en papel, y cuantificación por medio de un densitómetro (Guenzi y McCalla, 1966).

La gran mayoría de los trabajos de extracción de los compuestos fenólicos con fines de estudios de identificación de los compuestos que inhiben el crecimiento se han realizado con extractantes diferentes al agua (Waterman y Mole, 1994), aunque se pueden hacer extracciones con mezclas de agua con metanol, etanol o acetona; se aconseja que la extracción se haga con 50 % de agua y 50 % de metanol (Waterman y Mole, 1994), aunque generalmente el solvente o vehículo en donde se encuentran los compuestos alelopáticos en condiciones naturales o en sistemas agrícolas es el agua.

Por otro lado, se sabe que los ácidos hidroxicinámicos y sus derivados son capaces de existir en formas *cis* y *trans* (debido al doble enlace C=C en la cadena lateral). Existe evidencia de que todas las formas naturales de los ácidos hidroxicinámicos se encuentran en forma *trans*; la isomerización inevitable ocurre durante la extracción, y mezclas de isómeros se aíslan siempre (Harborne, 1980).

Los objetivos del presente trabajo fueron:

1. Identificar por cromatografía de capa fina los ácidos fenólicos presentes en la paja de trigo variedad Saturno, en los extractos de agua común, agua común a 60 °C, agua a pH 5.5, NaOH al 2 %, KOH al 2 % y urea al 2 %.
2. Identificar y cuantificar por cromatografía líquida de alta resolución los ácidos fenólicos más importantes en los extractos de agua común, agua común a 60 °C, agua con pH 5.5, NaOH al 0.5 %, KOH al 0.5 % y urea al 0.5 %.

2.2 MATERIALES Y MÉTODOS

2.2.1 Identificación de ácidos fenólicos por cromatografía de capa fina

El trabajo de identificación de ácidos fenólicos por cromatografía de capa fina se realizó en el Laboratorio de Fitoquímica, Programa de Botánica, Instituto de Recursos Naturales (IRENAT) del Colegio de Posgraduados, ubicado en Montecillo, Texcoco, Edo. de México, y se llevó a cabo en el periodo comprendido del 26 de junio al 2 de agosto de 2002.

Se adquirieron los estándares de los siguientes ácidos fenólicos: ácido vainílico (V 2,250 -- 5 g), ácido siríngico (S 6,081--1 g), ácido caféico (C 0625--2 g), ácido ferúlico (F 3,500--5 g) y ácido *p*-cumárico (C 9,008--1 g), todos de la marca SIGMA (Número de catálogo-peso). La selección de estos estándares se hizo de acuerdo con lo reportado principalmente por Guenzi y McCalla (1966).

2.2.1.1 Preparación de los vidrios para las placas

Se cortaron vidrios de 20 cm X 20 cm X 0.3 cm exactamente a 90° en una vidriería. En el laboratorio, los vidrios se lavaron con agua y jabón comunes por los dos lados. Se dejaron escurrir sobre una mesa y se secaron con papel higiénico.

2.2.1.2 Colocación de los vidrios en el porta vidrios

Los vidrios limpios y secos se colocaron sobre una base plana de plástico de color negro (porta vidrios). Se tuvo cuidado de que los vidrios quedaran lo más homogéneos posible. Para incrementar la fijación de los vidrios sobre la base plana, se puso primeramente agua en la base con una pizeta y después se colocó la parte inferior del mismo sobre las gotas de agua que se adicionaron a la base plana. Se colocaron cinco vidrios sobre la base.

2.2.1.3 Preparación de la sílica gel y elaboración de las placas cromatográficas

Se pesaron exactamente 45 g de sílica gel (C: C. F. 60 G F₂₅₄ (5-40 μm) 7730 TA 963230 Sigma-Merk) y se pusieron en un matraz erlenmeyer de 250 mL. En la campana de extracción, se agregaron 90 mL de agua desionizada y se mezcló con la ayuda de una varilla de vidrio. Los vidrios colocados sobre la base se limpiaron con metanol, rociando un poco de este sobre la superficie superior de los vidrios y limpiándola con un papel higiénico, y se dejó evaporar hasta sequedad.

Una vez bien mezclada, la sílica gel con el agua, se vació sobre el carro y este se corrió sobre los vidrios para impregnarlos con una capa delgada de sílica gel y obtener las placas cromatográficas. Estas se dejaron secar en el porta vidrios entre 30 y 60 minutos. Posteriormente, sobre las placas de sílica gel, se marcaron cuatro líneas en los extremos, midiendo dos cm en cada uno de los lados y señalando levemente con la punta de un lápiz una línea en cada uno de los lados de la placa. Se guardaron en un porta placas hasta su posterior uso (comunicación

personal Sr. Jorge Rodríguez, auxiliar del Laboratorio de Fitoquímica).

2.2.1.4 Extracción de fenólicos de la paja de trigo

Se pesaron 5 g de paja de trigo (\cong 50 mL) con una granulometría de 50 % de partículas entre < 2.00 mm y ≥ 1.00 mm y 50 % de partículas > 1.00 mm y ≤ 0.5 mm, y se colocaron en cada uno de seis vasos de precipitados de 500 mL y se les adicionaron 100 mL de los siguientes extractantes: agua común, agua a 60 °C, agua con pH 5.5, solución de NaOH al 2 %, solución de KOH al 2 % y solución de urea al 2 % (relación 1: 2 paja: extractante v/v) y se dejaron reposar por 1 h, al término de la misma se siguió la metodología señalada por Guenzi y McCalla (1966), con algunas modificaciones, que a continuación se detallan.

Los extractos se filtraron con papel filtro y embudos de vidrio; la paja remanente se exprimió y se desechó. Los filtrados se recibieron en vasos de precipitados de 250 mL. A los extractos (exceptuando el NaOH al 2 % y el KOH al 2 %) se les adicionó NaOH 2 N hasta un pH de 12 y se dejaron reposar por 30 minutos, posteriormente se les agregó HCl 2 N hasta un pH de 2.0. Los extractos acidificados se traspasaron a un embudo de separación y se les adicionaron primeramente 20 mL de acetato de etilo, se mezclaron y se dejaron reposar hasta que se observó la separación entre la fase orgánica y la fase acuosa. La fase orgánica se separó (fase superior menos densa) de la acuosa y se recibieron en vasos de precipitados de 100 mL.

La fase acuosa se volvió a transferir al embudo de separación y se agregaron 10 mL de acetato de etilo. Los líquidos se mezclaron con agitación y se dejaron reposar nuevamente hasta la separación de las fases en el embudo. La fase orgánica (fase superior) se recogió en el mismo vaso de precipitados de 100 mL en el cual se recogió la fase orgánica de la primera separación. A la fase orgánica se le agregó NaHCO₃ al 5 % hasta alcanzar un pH de 8.5, después se agregó HCl 2 N hasta alcanzar un pH de 2.0.

El contenido del vaso de precipitados se transfirió a un embudo de separación limpio y se agregaron nuevamente 20 mL de acetato de etilo, se mezclaron las

fases y se dejó reposar hasta la separación de las mismas. Se rescató la fase orgánica y la fase acuosa se retornó al embudo de separación y se le agregaron 10 mL de acetato de etilo, dejando reposar hasta la separación de las fases. Se rescató la fase orgánica en el vaso de precipitados en donde se recibió la fase orgánica anterior.

A la fase orgánica total se le agregó una pizca de $\text{Na}_2(\text{SO}_4)$ anhidro para extraer el agua remanente para tener únicamente la fase orgánica. La fase orgánica con acetato de etilo se transfirió a un rotavapor y se evaporó hasta sequedad. Los sólidos remanentes en el matraz bola del rotavapor se disolvieron en 2 mL de metanol y se transfirieron a vasos de precipitados de 5 mL con la ayuda de pipetas Pasteur y posteriormente se transfirieron a frascos pequeños color ámbar con tapa, previamente identificados. Por otro lado, los ácidos fenólicos utilizados como estándares se disolvieron en metanol (3 mg del estándar en dos mL de metanol- $1,500 \text{ mg L}^{-1}$) también y se transfirieron a frascos pequeños de color ámbar. Todos los frascos ámbar se guardaron en una gaveta en la oscuridad.

2.2.1.5 Identificación de ácidos fenólicos

Para la identificación de los ácidos fenólicos extraídos de la paja de trigo con cada uno de los extractantes señalados, se sacaron las placas del porta placas y se colocaron sobre una mesa.

Se sacaron de la gaveta los extractos metanólicos concentrados de cada uno de los extractos obtenidos y los estándares. Sobre la línea inferior de una placa, los estándares se aplicaron de izquierda a derecha con la ayuda de un tubo capilar en bandas de 1 cm de ancho (un tubo capilar para cada uno de los estándares y para cada extracto metanólico), dejando un cm libre entre cada cm de banda de los estándares con la finalidad de diferenciarlos unos de otros. El orden de aplicación de ácidos fenólicos utilizados como estándares de izquierda a derecha en cada placa fue: ácido vainílico, ácido siríngico, ácido *p*-cumárico, ácido ferúlico, ácido caféico.

Después de la aplicación de los estándares en la placa se observaron con luz

ultravioleta en una cámara oscura (Cole Palmer 9818 Series Darkrooms, Cole Palmer Instruments, Chicago) con la finalidad de exponerlas a la misma e inducir la formación de isómeros *cis* y *trans*. Posteriormente se aplicó el extracto metanólico de cada muestra, teniendo en total 6 placas. También se dejó un cm entre el final de la banda del último estándar (ácido caféico) y el inicio de la banda correspondiente a cada extracto metanólico. El ancho de la banda de aplicación de cada extracto metanólico fue de seis cm.

En una cámara para placas cromatográficas se adicionaron 120 mL de la mezcla cloroformo-ácido acético glacial en relación 9: 1 (Harborne, 1984), se niveló y se tapó, dejando reposar por 15 minutos. Después de la aplicación de los estándares y los extractos metanólicos de las muestras en las placas, estas se introdujeron en la cámara para correr las placas (dos placas por corrida en la cámara). Cuando el solvente llegó a la raya marcada en la parte superior de las placas (16.0 cm), se sacaron de la cámara, se introdujeron en una campana de extracción y se dejaron secar. Una vez secas las placas cromatográficas se observaron nuevamente con luz uv de onda corta (254 nm) y larga (365 nm) en la cámara para luz ultravioleta y con un lápiz de punta delgada se señalaron levemente los contornos de las bandas de los estándares y de los ácidos fenólicos separados químicamente, pertenecientes a las muestras. Las placas se guardaron en el portaplacas. Las placas se fueron sacando y se colocaron en la campana de extracción, y se asperjaron primeramente con 20 mL del reactivo de Gibbs (solución al 0.5 % de 2, 6-dicloroquinona cloramida en metanol) y posteriormente con 10 mL de amoniaco anhidro por placa con un aspersor, para su revelado. Las placas se dejaron secar en la campana de extracción, se sacaron y se colocaron sobre una mesa. Sobre las bandas reveladas, se midieron en el centro las distancias recorridas por cada uno de los estándares y los ácidos fenólicos presentes en cada muestra. Con el valor de la distancia media recorrida por cada uno de los compuestos dividido entre la distancia total recorrida por el solvente se calcularon los R_fs. La identificación de los fenólicos en las muestras por cromatografía de capa fina se hizo por comparación entre los estándares y las muestras con base en la reacción a la luz uv antes del revelado, los R_fs y el color después del revelado.

2.2.2 Identificación y cuantificación de ácidos fenólicos por cromatografía líquida de alta resolución

El trabajo de identificación y cuantificación de los ácidos fenólicos en la paja de trigo por cromatografía líquida de alta resolución (CLAR) se realizó en el Laboratorio de Nutrición Vegetal, Programa de Edafología, Instituto de Recursos Naturales (IRENAT) del Colegio de Posgraduados, ubicado en Montecillo, Texcoco, Edo. de México, y se llevó a cabo en el periodo de junio de 2002 a agosto de 2004, con periodos de interrupción.

2.2.2.1 Extracción de compuestos fenólicos

Los extractantes seleccionados para la identificación y cuantificación de los ácidos fenólicos presentes en la paja de trigo fueron: 1) agua común, 2) agua a 60 °C; 3) agua a pH 5.5; 4) NaOH al 0.5 %; 5) KOH al 0.5 % y urea al 0.5 %. Estos extractantes se seleccionaron con base en los resultados obtenidos en la evaluación de 20 extractantes para la extracción de los compuestos fenólicos (capítulo siguiente).

Se pesaron 2 g de paja de trigo (\cong 20 mL) con una granulometría de 50 % de partículas < 2.00 mm y ≥ 1.00 mm y 50 % de partículas > 1.00 mm y ≤ 0.5 mm, y se colocaron en cada uno de seis vasos de precipitados de 250 mL y se les adicionaron 40 mL de los extractantes (relación 1: 2, paja: extractante v/v) y se dejaron reposar por 1 h. Posteriormente, se siguió el mismo procedimiento para la separación y purificación de los compuestos fenólicos, descrito para la identificación de los ácidos fenólicos por cromatografía de capa fina (apartado 2.2.1.4.). La diferencia con respecto al procedimiento descrito anteriormente fue que el sólido resultante de la evaporación en el rotavapor se disolvió en cinco mL de metanol.

2.2.2.2 Identificación y cuantificación de ácidos fenólicos

Los cinco mL de los extractos metanólicos se filtraron en un filtro de nylon de 2 μm , con la ayuda de un porta filtros y jeringa. El filtrado se recibió en un frasco de vidrio de 10 mL con tapa hermética y los filtrados se guardaron en un refrigerador hasta su uso posterior.

Para la separación, identificación y cuantificación de los ácidos fenólicos se utilizó un equipo de cromatografía de líquidos marca GBC (Australia), constituido por un automuestreador avanzado modelo LC 1,650, un organizador del sistema modelo LC 1,445, un detector uv/visible modelo LC 1,210, un desgasificador modelo ERC-3415, de ERC INC., con una bomba de cuatro fases modelo LC 1,150, conectado a un equipo de cómputo Compaq Deskpro y un monitor V 50, con un programa de computo específico denominado Wincrom, versión 2.0.

Para la separación de los ácidos fenólicos se usó una columna Alltech C8 (fase reversa), 5 μm , 250 mm X 4.6 mm, la cual se mantuvo a 40 °C mediante el horno incluido en el equipo. La fase móvil estuvo constituida por una fase A (ácido acético: acetonitrilo: agua, 5: 30: 65) y una fase B (acetonitrilo: agua, 3: 97) con una velocidad de flujo de 1.5 mL min^{-1} y un programa isocrático de 30 % de A y 70 % de B por un tiempo de corrida de 30 minutos. La detección se hizo a una longitud de onda de 326 nm (uv). El volumen inyectado fue de cinco μL . El acetonitrilo utilizado fue de la marca Burdick and Jackson, No. de catálogo AH015-4 grado HPLC; el agua fue de la marca Merk (WX 0004-1), también grado HPLC. El ácido acético glacial fue Fermmont CAS-64-19-7.

La identificación de los ácidos fenólicos presentes en los extractos en metanol se hizo por comparación de los tiempos de retención de estos con el de los estándares. Para la cuantificación de los ácidos fenólicos en las muestras se utilizaron concentraciones de 10, 30, 60, 80, 100 y 150 mg L^{-1} de los mismos y se relacionaron con la altura de los picos para establecer las ecuaciones de regresión. Las ecuaciones resultantes fueron: $Y = 3.71 X$, para el ácido *p*-cumárico y $Y = 4.1862 X$, para el ácido ferúlico; en donde Y corresponde a la concentración, y X a la altura de los picos.

Los resultados de la cuantificación de los ácidos *p*-cumárico y ferúlico presentes en cinco μL se sumaron, se hizo la cuantificación en 1000 μL (1 mL) y posteriormente se cuantificó en 5 mL, que fue el volumen total en que se disolvieron los compuestos obtenidos de la evaporación en el rotavapor.

2.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

2.3.1 Identificación de ácidos fenólicos en paja de trigo por cromatografía de capa fina

2.3.1.1 Extracto con agua común

En el Cuadro 1, se presentan las características registradas en la placa cromatográfica, los ácidos fenólicos identificados y los no identificados, utilizando como extractante agua común. Se encontraron ocho bandas correspondientes a ocho ácidos fenólicos. Usando los cinco estándares de los ácidos fenólicos fue posible identificar cinco ácidos fenólicos en el extracto de agua común: caféico, *p*-cumárico, ferúlico, siríngico y vainílico. La identificación se hizo tomando en consideración principalmente los R_fs y la reacción a la luz uv de onda larga (365 nm) y adicionalmente el revelado con el reactivo de Gibbs y amoniaco anhidro. En todos los casos las distancias recorridas por los ácidos fenólicos de las muestras, los R_fs, la reacción a la luz ultravioleta de onda larga (366 nm) y el color en el revelado, no coincidieron exactamente con los ácidos fenólicos utilizados como estándares, sino de manera muy aproximada. Las diferencias observadas pueden explicarse por efecto de la diferencia en concentraciones. Las concentraciones de los ácidos fenólicos utilizados como estándares presentaron bandas muy anchas, probablemente debido a las altas concentraciones utilizadas (3 mg en dos mL-1,500 mg L⁻¹) y las distancias recorridas por los compuestos se registraron a la mitad del ancho de la banda en sentido vertical.

Cuadro 1. Características registradas en la placa cromatográfica, ácidos fenólicos identificados y no identificados utilizando agua común como extractante. Las bandas se presentan en orden ascendente en la placa.

Número de banda	[‡] DR	Ancho de banda	Rf	uv- onda larga (366nm)	Color después del revelado Gibbs + amoniaco	Ácido fenólico Identificado
-----cm-----						
1ra.	1.00	1.0	0.062	Azul claro	Sin color	No identificado 1 [†]
2da.	3.10	1.0	0.193	Azul claro	Café claro	Ácido caféico
3ra.	5.20	0.5	0.325	Azul claro brillante	Sin color	Ácido gentísico*
4ta.	8.20	1.2	0.512	No fluorescente	Centro amarillo-borde violeta	Ácido <i>p</i> -cumárico
5ta.	12.10	0.5	0.756	Azul claro	Centro amarillo-borde violeta	Ácido ferúlico
6ta.	12.70	0.3	0.793	No fluorescente	Morado	Ácido siríngico
7ma.	13.15	0.5	0.821	No fluorescente	Casi morado	Ácido vainílico
8va.	15.10	0.5	0.943	Azul claro	Amarillo	No identificado 2 [†]
Estándares de ácidos fenólicos						
1ra.	3.10	N. D.	0.193	Azul claro	Café oscuro	Ácido caféico
2da.	8.30	N. D.	0.518	No fluorescente	Centro amarillo-bordes-violeta	Ácido <i>p</i> -cumárico
3ra.	12.30	N. D.	0.768	Azul claro	Centro amarillo-bordes-violeta	Ácido ferúlico
4ta.	12.70	N. D.	0.793	No fluorescente	Morado	Ácido siríngico
5ta.	13.10	N. D.	0.818	No fluorescente	Azul intenso casi morado	Ácido vainílico

[‡]DR- distancia recorrida; [†]No identificado = No se tuvieron estándares; *Reportado por Harborne (1984), con Rf de 0.33; N. D- no determinada; Distancia total recorrida por el solvente = 16.0 cm.

Por otro lado, las bandas correspondientes a los mismos ácidos fenólicos presentes en los extractos de las muestras fueron más delgadas y los centros de las bandas delgadas, y los centros de las bandas anchas no coincidieron exactamente, aunque aproximadamente ambas bandas se presentaron a la misma distancia del punto de aplicación del extracto metanólico.

Tratando de identificar los tres ácidos fenólicos no identificados, adicionalmente, se corrieron dos placas en las cuales se aplicó extracto metanólico del extracto obtenido con agua común, y se usaron como estándares los ácidos: benzoico, *p*-hidroxibenzoico, gentísico, sinápico, protocatecuico y salicílico.

Con excepción del ácido gentísico, ninguno de los otros ácidos fenólicos utilizados como estándares adicionales coincidieron en las características registradas en las placas con alguno de los ácidos fenólicos que no habían sido identificados, provenientes del extracto metanólico del extracto obtenido con agua común (Cuadro 1). Los otros dos ácidos fenólicos restantes no pudieron ser identificados y aparecen en el Cuadro 1 como no identificados 1 y 2. El ácido no identificado 1 es un compuesto muy polar, de hecho el más polar de todos los ácidos fenólicos presentes en el extracto metanólico del extracto obtenido con agua común. El ácido fenólico no identificado 2, es el compuesto menos polar de todos los ácidos fenólicos presentes en el extracto metanólico del extracto con agua común.

En resumen, se identificaron seis de los ocho ácidos fenólicos presentes en el extracto de la paja de trigo con agua común.

Adicionalmente se corrió otra placa en la cual se aplicó muestra del extracto puro en agua (sin hidrolizar) y los cinco estándares de los ácidos fenólicos, con el objetivo de comprobar si los fenólicos en la paja de trigo se encuentran en forma libre como ácidos fenólicos o como compuestos conjugados con azúcares (Harborne, 1980). No se detectaron bandas correspondientes a ácidos fenólicos libres en el extracto puro de agua común, por lo que se concluye que los fenólicos presentes en este extracto se encuentran en forma conjugada con azúcares (como β -D-glucopiranosidos principalmente, pero un amplio arreglo de otras formas de ligarse se conocen, Harborne, 1980).

2.3.1.2 Extracto con agua a 60 °C

En el Cuadro 2, se muestran los ácidos fenólicos identificados en el extracto de agua a 60 °C. Con excepción del ácido siríngico, se presentaron los mismos ácidos fenólicos que en el extracto de agua común. La ausencia de este ácido, se puede atribuir a la mayor solubilidad de alguno de los otros fenólicos en el agua caliente, no presentándose este ácido fenólico en la solución en equilibrio. En la misma placa que se corrió el extracto puro de agua común con los estándares para comprobar si existían ácidos fenólicos libres, también se agregó extracto puro sin hidrolizar obtenido del agua a 60 °C. Se comprobó también que no hay ácidos fenólicos libres en el extracto con agua a 60 °C.

2.3.1.3 Extracto con agua a pH 5.5

En el Cuadro 3, se muestran los ácidos fenólicos identificados en el extracto de agua a pH 5.5. Se identificaron únicamente cuatro ácidos fenólicos (caféico, gentísico, *p*-cumárico y ferúlico). La diferencia en número de ácidos fenólicos encontrados en el extracto con agua a pH 5.5 con respecto al número de ácidos fenólicos encontrados en el extracto de agua común y el extracto de agua a 60 °C puede explicarse por la diferencia en solubilidad de los ácidos fenólicos a pH ácido (formas disociadas y no disociadas) o bien porque los ácidos fenólicos identificados en esta placa se encontraban enlazados con una molécula de azúcar (forma éter) y con el tratamiento ácido se hidrolizaron. La diferencia también se puede explicar por su polaridad; en la placa del extracto con agua a pH 5.5, se presentaron únicamente los compuestos más polares (Cuadros 1, 2 y 3), la mayor polaridad de los ácidos fenólicos en orden ascendente es ácido caféico > ácido gentísico > ácido *p*-cumárico > ácido ferúlico > siríngico > vainílico.

Cuadro 2. Características registradas en la placa cromatográfica, ácidos fenólicos identificados y no identificados utilizando agua común a 60 °C como extractante. Las bandas se presentan en orden ascendente en la placa.

Número de banda	[‡] DR	Ancho de banda -----cm-----	Rf	uv-onda larga (366nm)	Color después del revelado Gibbs + amoniaco	Ácido fenólico Identificado
1ra.	1.00	1.0	0.0625	Azul claro	Sin color	No identificado 1 [†]
2da.	3.20	0.60	0.2000	Azul claro	Café claro	Ácido caféico
3ra.	5.10	0.70	0.3187	Azul claro	Sin color	Ácido gentísico*
4ta.	8.50	1.10	0.5312	No fluorescente	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido <i>p</i> -cumárico
5ta.	12.60	0.60	0.7875	Azul brillante	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido ferúlico
6ta.	13.50	0.30	0.8437	No fluorescente	Azul-violeta muy tenue	Ácido vainílico
7ma.	15.00	0.50	0.9375	Azul claro	Amarillo	No identificado 2 [†]
Estándares de ácidos fenólicos						
1ra.	2.80	nd	0.1750	Azul claro	Café oscuro	Ácido caféico <i>cis</i>
2da.	3.50	nd	0.2187	Azul claro muy brillante	Café claro	Ácido caféico <i>trans</i>
3ra.	7.10	nd	0.4437	No fluorescente	Casi morado	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>cis</i>
4ta.	8.60	nd	0.5375	No fluorescente	Morado	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>trans</i>
5ta.	12.40	nd	0.7750	Azul claro no brillante	Violeta claro	Ácido ferúlico <i>cis</i>
6ta.	13.00	nd	0.8125	Azul claro más brillante	Violeta oscuro	Ácido ferúlico <i>trans</i>
7ma.	13.10	nd	0.8187	No fluorescente	Violeta oscuro-morado	Ácido siríngico
8va.	13.30	nd	0.8312	No fluorescente	Violeta	Ácido vainílico

[‡]DR- Distancia recorrida; [†]No identificado = No se tuvieron estándares; *Reportado por Harborne (1984) con Rf de 0.33; nd.- No determinada. Distancia total recorrida por el solvente = 16.0 cm.

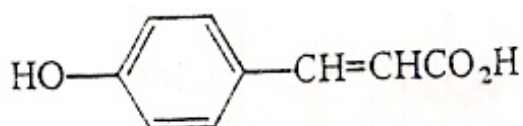
Cuadro 3. Características registradas en la placa cromatográfica y ácidos fenólicos identificados utilizando agua a pH 5.5 como extractante. Las bandas se presentan en orden ascendente en la placa.

Número de banda	[‡] DR	Ancho de Banda	Rf	uv- onda larga (366nm)	Color después del revelado Gibbs + amoniaco	Ácido fenólico Identificado
-----cm-----						
1ra.	3.10	0.60	0.1925	Azul poco brillante	Café claro	Ácido caféico
2da.	5.00	1.00	0.3105	Azul tendiendo a morado	Sin color	Ácido gentísico*
3ra.	8.30	1.10	0.5155	No fluorescente	Azul-violeta	Ácido <i>p</i> -cumárico
4ta.	12.20	0.40	0.7577	Azul un poco brillante	Violeta oscuro	Ácido ferúlico
Estándares de ácidos fenólicos						
1ra.	2.80	Nd	0.1739	Azul claro muy brillante	Café claro	Ácido caféico <i>cis</i>
2da.	3.80	Nd	0.2360	Azul claro menos brillante	Café oscuro	Ácido caféico <i>trans</i>
3ra.	7.00	Nd	0.4347	No fluorescente	Amarillo claro	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>cis</i>
4ta.	8.50	Nd	0.5279	No fluorescente	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>trans</i>
5ta.	11.80	Nd	0.7329	Azul claro no brillante	Violeta claro	Ácido ferúlico <i>cis</i>
6ta.	12.20	Nd	0.7577	Azul claro más brillante	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido ferúlico <i>trans</i>
7ma.	13.00	Nd	0.8125	No fluorescente	Violeta	Ácido siríngico
8va.	13.10	Nd	0.8187	No fluorescente	Morado	Ácido vainílico

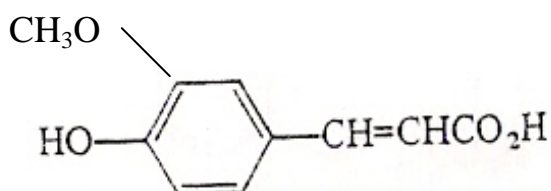
[‡]DR- Distancia recorrida; *Reportado por Harborne (1984), con Rf de 0.33; nd - No determinada; Distancia total recorrida por el solvente = 16.0 cm.

2.3.1.4 Extracto con NaOH al 2 %

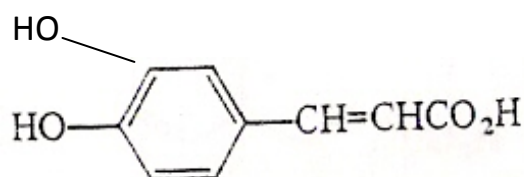
En el extracto metanólico del extracto con NaOH al 2 % (Cuadro 4), por CCF se encontraron los mismos ácidos fenólicos que en el extracto metanólico del extracto de agua a 60 °C, con excepción de los ácidos vainílico y no identificado 2, sin embargo apareció otro ácido fenólico que no pudo identificarse y se denotó como no identificado 3, además aparecieron las formas *cis* y *trans* del ácido *p*-cumárico. Los ácidos fenólicos invariablemente presentan dos marcas o manchas cuando se realiza la cromatografía en solventes acuosos, debido a la separación de los isómeros *cis* y *trans*. La isomerización de los ácidos cinámicos ocurre durante el aislamiento y exposición de los extractos a la luz (y particularmente luz ultravioleta) de tal manera que si el material natural en la planta se encuentra todo en forma *trans*, se llega a tener normalmente un equilibrio de estos isómeros (Harborne, 1984). Los ácidos *p*-cumárico y ferúlico presentan isomería *cis* y *trans*, por el doble enlace en la cadena lateral de tres carbonos (Figura 1).



Ácido *p*-cumárico



Ácido ferúlico



Ácido caféico

Figura 1. Isomería *cis*, *trans* en los ácidos hidroxicinámicos por el doble enlace C=C, con sus cadenas de carbono iguales, difiriendo los sustituyentes del anillo bencénico.

Cuadro 4. Características registradas en la placa cromatográfica, ácidos fenólicos identificados y no identificados utilizando NaOH al 2 % como extractante. Las bandas se presentan en orden ascendente en la placa.

Número de banda	[‡] DR	Ancho de banda	Rf	uv- onda larga (366nm)	Color después del revelado Gibbs + amoniaco	Ácido fenólico identificado
-----cm-----						
1ra.	1.20	0.20	0.0745	Azul un poco brillante	Café claro	No identificado 1 [†]
2da.	3.20	0.70	0.1987	Azul brillante	Azul-violeta	Ácido caféico
3ra.	5.20	0.40	0.3229	Azul claro	Sin color	Ácido gentísico*
4ta.	6.60	1.40	0.4099	No fluorescente	Violeta claro	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>cis</i>
5ta.	8.50	1.20	0.5279	No fluorescente	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>trans</i>
6ta.	9.60	0.60	0.5962	No fluorescente	Violeta claro	No identificado 3 [†]
7ma.	12.80	1.00	0.7950	Azul claro brillante	Centro amarillo-bordes café	Ácido ferúlico
Estándares de ácidos fenólicos						
1ra.	2.80	Nd	0.1750	Azul claro muy brillante	Café claro	Ácido caféico <i>cis</i>
2da.	3.50	Nd	0.2187	Azul brillante	Café oscuro	Ácido caféico <i>trans</i>
3ra.	7.10	Nd	0.4437	No fluorescente	Centro amarillo-bordes café claro	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>cis</i>
4ta.	8.60	Nd	0.5375	No fluorescente	Centro amarillo-bordes café claro	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>trans</i>
5ta.	12.40	Nd	0.7750	Azul claro no brillante	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido ferúlico <i>cis</i>
6ta.	13.00	Nd	0.8125	Azul claro más brillante	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido ferúlico <i>trans</i>
7ma.	13.10	Nd	0.8187	No fluorescente	Violeta oscuro	Ácido siríngico
8va.	13.30	Nd	0.8312	No fluorescente	Violeta claro	Ácido vainílico

[‡]DR- Distancia recorrida; [†]No identificado = No se tuvieron estándares; *Reportado por Harborne (1984) con Rf de 0.33; nd - No determinada; Distancia total recorrida por el solvente = 16.0 cm.

2.3.1.5 Extracto con KOH al 2 %

En el extracto metanólico del extracto de la paja de trigo tratada con KOH al 2 % se encontraron únicamente tres ácidos fenólicos: caféico, *p*-cumárico en sus formas *cis* y *trans* y el ferúlico también en sus formas *cis* y *trans* (Cuadro 5), todos conteniendo una cadena de tres carbonos unida al anillo bencénico terminada en grupo carboxilo (Figura 1).

La diferencia en el número y tipos de ácidos fenólicos encontrados en el extracto metanólico obtenido del extracto con KOH al 2 % con respecto a los extractantes anteriores es probable que se haya debido a la mayor solubilidad de los compuestos derivados del ácido cinámico (caféico, *p*-cumárico y ferúlico) en soluciones salinas, al formarse fenolatos, que sus correspondientes ácidos con estructura similar al ácido benzoico.

Cuadro 5. Características registradas en la placa cromatográfica y ácidos fenólicos identificados utilizando KOH al 2 % como extractante. Las bandas se presentan en orden ascendente en la placa.

Número de banda	[‡] DR	Ancho de Banda	Rf	uv-onda larga (366nm)	Color después del revelado Gibbs + amoniaco	Ácido fenólico Identificado
-----cm-----						
1ra.	3.10	0.90	0.1962	Azul brillante	Café claro	Ácido caféico
2da.	6.60	1.00	0.4177	No fluorescente	Café claro	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>cis</i>
3ra.	8.30	1.00	0.5253	No fluorescente	Violeta	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>trans</i>
4ta.	12.20	0.80	0.7721	Azul claro	Café muy claro	Ácido ferúlico <i>cis</i>
5ta.	12.70	0.50	0.8037	Azul oscuro	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido ferúlico <i>trans</i>
Estándares de ácidos fenólicos						
1ra.	2.80	Nd	0.1750	Azul claro muy brillante	Café claro	Ácido caféico <i>cis</i>
2da.	3.50	Nd	0.2187	Azul brillante	Café oscuro	Ácido caféico <i>trans</i>
3ra.	7.10	Nd	0.4437	No fluorescente	Centro amarillo-bordes café claro	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>cis</i>
4ta.	8.60	Nd	0.5375	No fluorescente	Centro amarillo-bordes café claro	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>trans</i>
5ta.	12.40	Nd	0.7750	Azul claro no brillante	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido ferúlico <i>cis</i>
6ta.	13.00	Nd	0.8125	Azul claro más brillante	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido ferúlico <i>trans</i>
7ma.	13.10	Nd	0.8187	No fluorescente	Violeta oscuro	Ácido siríngico
8va.	13.30	Nd	0.8312	No fluorescente	Violeta claro	Ácido vainílico

[‡]DR- Distancia recorrida; nd - No determinada; Distancia total recorrida por el solvente = 16.0 cm.

2.3.1.6 Extracto con urea al 2 %

Para el caso del extracto metanólico del extracto con urea al 2 % (Cuadro 6) únicamente se identificaron los ácidos *p*-cumárico y ferúlico, ambos en sus formas *cis* y *trans*. La aparición única de estos ácidos fenólicos en este extractante, se puede explicar con base en lo siguiente: es probable que las moléculas de urea reaccionen casi instantáneamente (aparición inmediata de extracto café oscuro) rompiendo los enlaces de H entre los xiloglucanos y los ácidos fenólicos que forman los puentes y liberando estos ácidos fenólicos en el medio acuoso (no se encontró evidencia bibliográfica de esto, sin embargo en pruebas previas en este trabajo, se demostró que existe una mayor liberación de compuestos fenólicos al utilizar urea al 2 %), evitando el proceso de difusión que prevalece cuando se utiliza agua común como extractante. Estos ácidos fenólicos encontrándose ya disueltos en el medio acuoso, se presentan en concentraciones importantes evitando que algunos otros ácidos fenólicos en la paja de trigo salgan de las vacuolas de las células (proceso de difusión más lento) hacia el medio acuoso por efecto de saturación de la concentración de solutos disueltos (máxima solubilidad en estas condiciones).

Cuadro 6. Características registradas en la placa cromatográfica y ácidos fenólicos identificados utilizando urea al 2 % como extractante. Las bandas se presentan en orden ascendente en la placa.

Número de banda	[‡] DR	Ancho de banda	Rf	uv-onda larga (366nm)	Color después del revelado Gibbs + amoniaco	Ácido fenólico Identificado
-----cm-----						
1ra.	7.00	0.70	0.4716	No fluorescente	Café claro	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>cis</i>
2da.	8.40	1.30	0.5471	No fluorescente	Café claro	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>trans</i>
3ra.	12.20	0.60	0.7625	Azul oscuro	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido ferúlico <i>cis</i>
4ta.	12.70	1.00	0.7936	Azul oscuro	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido ferúlico <i>trans</i>
Estándares de ácidos fenólicos						
1ra.	2.70	Nd	0.1698	Azul claro muy brillante	Café claro	Ácido caféico <i>cis</i>
2da.	3.80	Nd	0.2389	Azul brillante	Café oscuro	Ácido caféico <i>trans</i>
3ra.	6.80	Nd	0.4276	No fluorescente	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>cis</i>
4ta.	8.30	Nd	0.5220	No fluorescente	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido <i>p</i> -cumárico <i>trans</i>
5ta.	12.00	Nd	0.7547	Azul oscuro	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido ferúlico <i>cis</i>
6ta.	12.50	Nd	0.7861	Azul oscuro	Centro amarillo-bordes violeta	Ácido ferúlico <i>trans</i>
7ma.	13.00	Nd	0.8176	No fluorescente	Café rojizo	Ácido siríngico
8va.	13.50	Nd	0.8490	No fluorescente	Café claro-rosado	Ácido vainílico

[‡]DR- distancia recorrida; nd - no determinada. Distancia total recorrida por el solvente = 16.0 cm.

2.3.2 Identificación y cuantificación de ácidos fenólicos por cromatografía líquida de alta resolución (CLAR)

En las Figuras 1 a 6 del apéndice A, se presentan los cromatogramas de cada uno de los extractos metanólicos obtenidos de los extractos de paja de trigo con agua común, agua a 60 °C, agua a pH 5.5, NaOH al 0.5 %, KOH al 0.5 % y urea al 0.5 %.

En los Cuadros del 7 al 12, se muestran los valores de tiempo de retención, altura del pico, ácido fenólico identificado y concentración, determinados a partir de los cromatogramas correspondientes a los extractos metanólicos de los seis extractantes utilizados.

Cuadro 7. Características de los picos correspondientes a los ácidos fenólicos identificados y sus concentraciones en el extracto de agua común.

No. de pico	TR Estándar Minutos	TR Fenólico Minutos	Ácido fenólico identificado	Altura del pico umA	Concentración ng
1	17.10	17.19	APC <i>trans</i>	32.515	120.63
2	18.76	18.85	APC <i>cis</i>	3.483	12.92
Concentración total de ácido <i>p</i> -cumárico					133.55
3	22.00	22.09	AF <i>trans</i>	17.72	74.20
4	25.26	25.33	AF <i>cis</i>	3.756	15.72
Concentración total de ácido ferúlico					89.92
Concentración total de los dos ácidos fenólicos					223.47

TR = tiempo de retención; APC = ácido *p*-cumárico; AF = ácido ferúlico; umA = unidades de miliamperes; ng = nanogramos (1×10^{-9} g).

Los principales ácidos fenólicos identificados en todos los extractos metanólicos de los extractantes fueron los mismos: ácido *p*-cumárico *trans*, ácido *p*-cumárico *cis*, ácido ferúlico *trans* y ferúlico *cis*, aunque las concentraciones de ellos fueron diferentes.

Cuadro 8. Características de los picos correspondientes a los ácidos fenólicos identificados y sus concentraciones en el extracto de agua común a 60 °C.

No. de pico	TR estándar	TR Fenólico	Ácido fenólico identificado	Altura del pico	Concentración
	Minutos	Minutos		umA	ng
1	17.10	16.927	APC <i>trans</i>	26.269	97.45
2	18.76	18.616	APC <i>cis</i>	3.122	11.58
Concentración total de ácido <i>p</i> -cumárico					109.03
3	22.00	21.83	AF <i>trans</i>	15.49	64.85
4	25.26	25.04	AF <i>cis</i>	3.17	13.28
Concentración total de ácido ferúlico					78.13
Concentración total de los dos ácidos fenólicos					187.16

TR = tiempo de retención; APC = ácido *p*-cumárico; AF = ácido ferúlico; umA = unidades de miliamperes; ng = nanogramos (1×10^{-9} g).

Cuadro 9. Características de los picos correspondientes a los ácidos fenólicos identificados y sus concentraciones en el extracto de agua común a pH 5.5.

No. de pico	TR estándar	TR Fenólico	Ácido fenólico identificado	Altura del pico	Concentración
	Minutos	Minutos		umA	ng
1	17.10	16.955	APC <i>trans</i>	28.457	105.57
2	18.76	18.647	APC <i>cis</i>	3.643	13.51
Concentración total de ácido <i>p</i> -cumárico					119.08
3	22.00	21.903	AF <i>trans</i>	15.659	65.55
4	25.26	25.137	AF <i>cis</i>	3.559	14.89
Concentración total de ácido ferúlico					80.44
Concentración total de los dos ácidos fenólicos					199.52

TR = tiempo de retención; APC = ácido *p*-cumárico; AF = ácido ferúlico; umA = unidades de miliamperes; ng = nanogramos (1×10^{-9} g).

El orden de aparición de los ácidos *p*-cumárico *trans* y *cis* y ferúlico *trans* y *cis* en los cromatogramas (de izquierda a derecha), se determinaron primeramente porque la etiqueta en los frascos de los estándares especifica que estos contienen

los ácidos mencionados en forma predominantemente *trans*, y en las corridas de los estándares se observó que el primer pico de ambos ácidos fenólicos presentó mayor altura (*trans*) que el segundo, que corresponde a la forma *cis*.

Cuadro 10. Características de los picos correspondientes a los ácidos fenólicos identificados y sus concentraciones en el extracto con NaOH al 0.5 %.

No. de pico	TR estándar	TR Fenólico	Ácido fenólico identificado	Altura del pico	Concentración
	Minutos	Minutos		umA	ng
1	17.10	17.038	APC <i>trans</i>	7.274	26.98
2	18.76	18.869	APC <i>cis</i>	0.0703	2.60
Concentración total de ácido <i>p</i> -cumárico					29.58
3	22.00	22.089	AF <i>trans</i>	3.752	15.75
4	25.26	25.526	AF <i>cis</i>	0.23	0.960
Concentración total de ácido ferúlico					16.66
Concentración total de los dos ácidos fenólicos					46.24

TR = tiempo de retención; APC = ácido *p*-cumárico; AF = ácido ferúlico; umA = unidades de miliamperes; ng = nanogramos (1×10^{-9} g).

Cuadro 11. Características de los picos correspondientes a los ácidos fenólicos identificados y sus concentraciones en el extracto con KOH al 0.5 %.

No. de pico	TR estándar	TR Fenólico	Ácido fenólico identificado	Altura del pico	Concentración
	Minutos	Minutos		umA	ng
1	17.10	15.541	APC <i>trans</i>	43.42	161.08
2	18.76	17.144	APC <i>cis</i>	1.907	7.07
Concentración total de ácido <i>p</i> -cumárico					168.15
3	22.00	19.262	AF <i>trans</i>	77.131	322.88
4	25.26	22.679	AF <i>cis</i>	3.005	12.58
Concentración total de ácido ferúlico					335.46
Concentración total de los dos ácidos fenólicos					503.61

TR = tiempo de retención; APC = ácido *p*-cumárico; AF = ácido ferúlico; umA = unidades de miliamperes; ng = nanogramos (1×10^{-9} g).

Cuadro 12. Características de los picos correspondientes a los ácidos fenólicos identificados y sus concentraciones en el extracto con urea al 0.5 %.

No. de pico	TR estándar	TR compuesto	Ácido fenólico identificado	Altura del pico	Concentración
	Minutos	Minutos		umA	ng
1	17.10	16.992	APC <i>trans</i>	28.146	104.42
2	18.76	18.706	APC <i>cis</i>	4.219	15.65
Concentración total de ácido <i>p</i> -cumárico					120.07
3	22.00	22.030	AF <i>trans</i>	15.506	64.91
4	25.26	25.307	AF <i>cis</i>	4.359	18.22
Concentración total de ácido ferúlico					83.15
Concentración total de los dos ácidos fenólicos					203.22

TR = tiempo de retención; APC = ácido *p*-cumárico; AF = ácido ferúlico; umA = unidades de miliamperes; ng = nanogramos (1×10^{-9} g).

El orden de aparición de los ácidos *p*-cumárico *trans* y *cis* y ferúlico *trans* y *cis* en los cromatogramas (de izquierda a derecha), se determinaron en segundo lugar por los tiempos de retención de los ácidos *p*-cumárico y ferúlico de los estándares en sus formas *trans* y *cis*, los que coincidieron muy cercanamente con los tiempos de retención de los ácidos fenólicos correspondientes, presentes en los extractos metanólicos obtenidos de las pajas de trigo.

En tercer lugar, se menciona que las formas de estos ácidos en la naturaleza predominantemente se encuentran en forma *trans* y que las formas *cis* se presentan como resultado del proceso de extracción principalmente si los extractos se exponen a la luz, y en especial a la luz uv (Harborne, 1980).

Las formas *cis* (del latín “del mismo lado”) generalmente son más polares que las formas *trans* (del latín “a través”), debido a que su momento bipolar es mayor que el de la forma *trans* ($\mu = \text{carga} \times \text{distancia}$). En la forma *trans* los momentos bipolares tienden a anularse por lo que la molécula es menos polar (Thornton *et al.*, 1998).

También estos isómeros se diferencian con los Rf obtenidos de las bandas determinadas por CCF (Cuadros 7 a 12), en el sistema sílica gel como fase estacionaria (fase polar) y la mezcla 9: 1 cloroformo: ácido acético (fase móvil menos polar), por lo que eluyen primero las formas *cis* más polares.

En la separación de los compuestos fenólicos por medio de CLAR, los primeros en presentarse fueron las formas *trans*, debido a que la columna es de fase reversa (fase estacionaria) y el eluyente es predominantemente polar (fase móvil). El ácido ferúlico en los cromatogramas aparece posteriormente al ácido *p*-cumárico, porque de acuerdo con la estructura del ácido ferúlico este es un compuesto menos polar (contiene un grupo metoxilo en la posición 5 y un OH en la posición 4 del anillo bencénico) que el ácido *p*-cumárico (contienen solamente un grupo OH en la posición 4 del anillo bencénico), por lo que permanece retenido por un tiempo mayor en la columna de octilsilano que el ácido *p*-cumárico.

En los cromatogramas también se presentan algunos pequeños picos localizados entre los 5 y 10 minutos de tiempo de retención, estos picos corresponden principalmente a los ácidos caféico, siríngico y vainílico (se corroboraron por pruebas de tiempos de retención por CLAR con los respectivos estándares), los mismos que fueron identificados visualmente en las placas por CCF en los extractos de agua común y agua a 60 °C.

Aunque visualmente no se detectaron estos ácidos en las placas por CCF en los extractos de agua a pH 5.5, NaOH al 2 %, KOH al 2 % y urea al 2 %, si se presentaron en los cromatogramas de todos los extractos metanólicos. Lo anterior pudo haberse debido a las concentraciones tan pequeñas que visualmente no se percibieron, o debido también a la solubilidad diferencial de estos ácidos dependiendo de las concentraciones de los extractantes, sin embargo, mediante CLAR si se pudieron detectar (concentraciones en el orden de $\text{ng } \mu\text{L}^{-1}$).

Aunque los ácidos caféico, siríngico, y vainílico se detectaron en todos los cromatogramas, las concentraciones encontradas fueron muy bajas en relación con los ácidos fenólicos principales. El primer pico importante en los cromatogramas, no fue posible identificarlo (tiempo de retención aproximado de 14.49 minutos), ni localizado entre los ácidos fenólicos identificados o no

identificados por CCF.

La mayor concentración de ácido *p*-cumárico *trans* se obtuvo en el extracto con KOH al 0.5 % con 161.08 ng (5 µL), indicando probablemente que el tratamiento con este extractante actuó sobre el ácido *p*-cumárico que forma uniones con los polisacáridos y/ o la lignina (Pan *et al.*, 1998), haciéndose presentes en el extracto correspondiente y posteriormente en el extracto metanólico que se inyectó en el aparato de CLAR.

Con excepción del extracto con NaOH al 0.5 %, los restantes extractantes presentaron aproximadamente las mismas concentraciones de este ácido. Es probable que el NaOH al 0.5 % haya actuado sobre otros compuestos fenólicos diferentes a los ácidos fenólicos (lignina; Runcang *et al.*, 1995), por la razón de que en las pruebas de extracción de compuestos fenólicos con varios extractantes (Capítulo siguiente) la concentración de estos en el extracto de NaOH al 0.5 % fue superior a las CFST en los extractos de agua común, agua a tres temperaturas, a las concentraciones de KOH al 0.5 % y 1%, y a las cuatro concentraciones de los extractos con urea.

La concentración de ácido ferúlico *trans* fue mayor en el extracto de KOH al 0.5 %, mientras que las concentraciones de este ácido en los demás extractantes fueron similares entre sí, con excepción nuevamente del extracto con NaOH al 0.5 %. Las concentraciones de ácido ferúlico *cis* en todos los extractantes presentaron concentraciones similares a las del ácido *p*-cumárico *cis* y también fueron similares entre sí, con excepción del extracto con NaOH al 0.5 %.

También en los Cuadros del 7 al 12, se presentan las concentraciones totales derivadas de la suma de los ácidos *p*-cumárico y ferúlico en sus formas *cis* y *trans* cuantificadas por CLAR. El extractante con el cual se obtuvieron las mayores concentraciones de ácidos fenólicos fue el KOH al 0.5 % con 503.61 µg (5 µL), seguido por el agua común. Los demás extractantes presentaron concentraciones de ácidos fenólicos totales muy similares.

Los porcentajes de recuperación de los ácidos fenólicos por CLAR en relación con la CFST cuantificada por colorimetría en los extractos iniciales (Capítulo III) se muestran en el Cuadro 13. De acuerdo con estos resultados los porcentajes de

recuperación fueron muy bajos, variando entre 0.17 % en el extracto de NaOH al 0.5 % y 3.06 % en el extracto de KOH al 0.5 %.

Cuadro 13. Porcentaje de recuperación de ácidos fenólicos (ácidos *p*-cumárico + ferúlico) cuantificados por CLAR, con respecto a la concentración de fenólicos solubles totales cuantificados en los extractos iniciales.

Extractante	CFST [†] 40 mL extracto inicial	Ácidos <i>p</i> -cumárico y ferúlico en 5 mL extracto metanólico	Recuperación
	-----µg-----		%
Agua común	16,707.00	223.47	1.33
Agua 60 °C	16,872.00	187.16	1.10
Agua pH 5.5	16,806.80	199.52	1.18
NaOH 0.5 %	26,119.60	46.24	0.17
KOH 0.5 %	16,435.00	503.61	3.06
Urea 0.5 %	14,819.20	203.22	1.37

[†]CFST = concentración de fenólicos solubles totales determinadas con el reactivo de Folin y Ciocalteu.

Para tratar de dilucidar la gran diferencia en las concentraciones entre los ácidos fenólicos cuantificados por CLAR y las CFST en los extractos iniciales utilizando el reactivo de Folin y Ciocalteu, se cuantificaron por colorimetría las CFST en los extractos metanólicos provenientes de los extractos iniciales (Cuadro 14).

Los resultados muestran que aunque las CFST determinadas en los extractos metanólicos son mucho mayores en los extractos metanólicos con respecto a las concentraciones totales de los ácidos fenólicos cuantificados por CLAR, aún así, estas son bajas en relación con las CFST cuantificadas en los extractos iniciales de paja de trigo.

Los porcentajes de recuperación de fenólicos en el extracto metanólico en relación con las CFST de los extractos iniciales variaron entre 9.94 % en el extracto metanólico de agua a pH 5.5 y 20.17 % en el extracto metanólico de KOH al 0.5 % (Cuadro 14).

Los resultados anteriores sugieren que si las CFST en los extractos metanólicos son mayores que las CFST cuantificadas por CLAR, un alto porcentaje de los compuestos fenólicos que entran a la columna se quedan adheridos a ella, cuando se utilizan los eluyentes y el programa de elusión señalados.

Cuadro 14. Concentraciones de fenólicos solubles totales iniciales con seis extractantes, concentraciones de fenólicos en los extractos metanólicos, por CLAR y porcentajes de recuperación.

	CFST en 40 mL extracto inicial	CFST extracto metanólico	Recuperación en el extracto metanólico	CFST en extracto metanólico por CLAR	Recuperación del extracto metanólico por CLAR
	-----µg-----		%	µg	%
Agua común	16,707.00	2,414.80	14.45	223.47	9.25
Agua 60 °C	16,872.00	2,211.28	13.10	187.16	8.46
Agua pH 5.5	16,806.80	1,670.72	9.94	199.52	11.94
NaOH 0.5 %	26,119.60	3,632.90	13.90	46.58	1.28
KOH 0.5 %	16,435.00	3,315.50	20.17	503.61	15.18
Urea 0.5 %	14,819.20	2,088.40	14.09	203.22	9.73

CFST = concentración de fenólicos solubles totales; CLAR = cromatografía líquida de alta resolución.

La fijación de compuestos fenólicos, entre otros, en la columna de octilsilano se comprobó en el momento de los lavados de la columna de separación con solventes como acetonitrilo 100 %, agua 100 % o mezclas de acetonitrilo y agua en diferentes porcentajes, obteniendo picos muy altos, mucho mayores que las alturas de los picos que se presentaron en los ácidos fenólicos identificados y cuantificados por CLAR.

Conchie *et al* (1988), señalan que los compuestos fenólicos derivados de la lignina pueden reaccionar con el material de empaquetamiento de la columna de HPLC, lo cual puede prevenir u obstaculizar la elusión completa de estos compuestos.

Zahedifar (1996), señala que la suma de los ácidos fenólicos totales determinados por HPLC fue mucho más baja que los compuestos fenólicos cuantificados utilizando el reactivo de Folin y Ciocalteu. La concentración de fenólicos solubles totales en paja de trigo fue del orden de 23.1 %, mientras que la suma de todos los ácidos fenólicos determinados por CLAR fue de solo 0.18 %.

Álamo *et al* (2001), señalan que los porcentajes de recuperación de compuestos fenólicos de bajo peso molecular (catequina, epicatequina, vainillina, ácidos vainillínico, gálico, caféico, protocatecuico, siríngico, gentísico, sinápico, *p*-cumárico, ferúlico, *p*-hidroxibenzaldehído, aldehídos protocatecuico y siríngico) por cromatografía líquida de alta resolución, son muy bajos, en el orden de menos de 5 %, señalan además, que estos resultados se pueden atribuir a la pérdida de parte de los compuestos en las fases de carga y lavado de la muestra.

Los resultados anteriores sugieren que no todos los compuestos fenólicos cuantificados por colorimetría en los extractos iniciales son “ácidos fenólicos”, o mas bien, no solamente hubo glucósidos de los ácidos fenólicos en los extractos iniciales.

Otro aspecto importante es que el extracto metanólico obtenido de todos los extractos iniciales de paja de trigo, antes y después de filtrarse con el filtro de nylon de 2 μm tenía un color amarillo transparente y un olor relativamente agradable, color y olor que no se detectaron en ninguno de los ácidos fenólicos que se utilizaron como estándares y que también se disolvieron en metanol, por lo que también se presume que en los extractos metanólicos no solamente hubo ácidos fenólicos iguales a los estándares.

Sin embargo, aunque se presume que existen otros compuestos fenólicos diferentes a los ácidos fenólicos utilizados como estándares, ningún otro compuesto diferente a los ácidos fenólicos identificados o no identificados en las placas de CCF se pudo detectar utilizando la separación de los fenólicos con la mezcla de cloroformo: ácido acético (9: 1) o por las propiedades de reacción de los compuestos a la luz ultravioleta, debido quizás a la diferente estructura química de estos fenólicos.

Los bajos porcentajes de fenólicos solubles totales en los extractos metanólicos en

relación con las CFST de los extractos iniciales se pueden explicar por la pérdida de fenólicos en el proceso de separación y purificación de los fenólicos utilizando únicamente acetato de etilo, solvente orgánico considerado como un solvente útil en la extracción de compuestos con una moderada polaridad, por lo que es probable que compuestos fenólicos más polares que este solvente se hayan perdido en la fase acuosa.

La recuperación de los ácidos fenólicos cuantificados por CLAR con respecto a las CFST en los extractos metanólicos, exceptuando el de NaOH al 0.5 %, se encontró en el intervalo de 8.46 % en el extracto metanólico del agua a 60 °C y 15.18 % en el extracto metanólico de KOH al 0.5 % (Cuadro 14).

Se calculó la concentración total en los cinco mL del extracto metanólico de cada uno de los extractantes utilizados, sumando las concentraciones totales de los ácidos *p*-cumárico y ferúlico determinadas en 5 µL (volumen de inyección) obtenidas por CLAR y se hizo el cálculo en 1000 µL (1 mL), el resultado se multiplicó por los cinco mL totales del extracto metabólico y se hizo la relación a un kg de paja de trigo. Los resultados se presentan en el Cuadro 15.

Los resultados de las concentraciones de ácido ferúlico y *p*-cumárico cuantificadas por HPLC en la mayoría de los extractantes son bajas con respecto a las encontradas por Guenzi y McCalla (1966), quienes reportan que en el extracto de paja de trigo con 80 % de alcohol y posterior hidrólisis con NaOH se obtuvieron 238 ppm (mg kg^{-1}) de ácido *p*-cumárico y 18 ppm (mg kg^{-1}) de ácido ferúlico, con un total de 256 ppm (mg kg^{-1}). Los autores cuantificaron los ácidos fenólicos con un determinador de densidad (Photovolt Densicord). Este tratamiento presentado por Guenzi y McCalla (1966) es el más parecido a los tratamientos que se dieron a la paja de trigo en este experimento.

Estos mismos autores, muestran que otros tratamientos aplicados a la paja de trigo dieron como resultado concentraciones de ácido *p*-cumárico y ferúlico mayores (2,530 ppm de ácido *p*-cumárico y 350 ppm de ácido ferúlico para el tratamiento dado al residuo de la extracción con 80 % de alcohol y en autoclave por 45 minutos; 10,880 ppm de ácido *p*-cumárico y 320 ppm de ácido ferúlico en el tratamiento dado al residuo de la extracción con 80 % de alcohol tratado con

NaOH 2 N por cuatro horas).

Cuadro 15. Contenido de ácido *p*-cumárico, ácido ferúlico y la suma de los dos ácidos en paja de trigo variedad Saturno, expresada en mg kg⁻¹ de MS.

Extractante	Ácido <i>p</i> -cumárico	Ácido ferúlico	Total
mg kg ⁻¹ MS			
Agua común	66.77	44.96	111.73
Agua 60 °C	54.51	39.06	93.57
Agua pH 5.5	59.54	40.22	99.76
NaOH 0.5 %	14.79	8.33	23.12
KOH 0.5 %	84.07	167.73	251.80
Urea 0.5 %	60.03	41.57	101.60

Los ácidos *p*-cumárico y ferúlico son la suma de los isómeros *trans* y *cis*. MS = materia seca.

Salomonsson *et al.*, (1978), reportan los siguientes resultados para las concentraciones de ácidos fenólicos determinados en tres variedades de paja de trigo:

Variedad	APHB	AV	APC	AF
mg kg ⁻¹ MS				
Starke	26	33	1,160	860
Holme	42	24	1,740	1,700
Dabrant	91	180	1,910	1,670
Dabrant		80	4,900	2,900

APHB = ácido *p*-hidroxibenzoico; AV = ácido vainílico; APC = ácido *p*-cumárico; AF = ácido ferúlico; MS = materia seca.

Wu *et al.*, (1998), determinaron las concentraciones de fenólicos solubles totales en una relación de 10 g de paja y 100 mL de agua destilada (1: 10 p/v) utilizando la prueba de fenólicos solubles totales con el reactivo de Folin y Ciocalteu, y encontraron que los contenidos de fenólicos solubles totales variaron entre 4,950 mg kg⁻¹ y 7,151 mg kg⁻¹.

Las concentraciones de fenólicos solubles totales en paja de trigo variedad Saturno, expresados en mg kg^{-1} se presentan en el Cuadro 16. Se observa que las concentraciones de fenólicos solubles totales en la paja de trigo variedad Saturno en los extractos con agua común, agua a 60 °C y agua a pH 5.5 y el extracto con KOH al 0.5 %, fueron superiores a las concentraciones reportadas por Wu *et al* (1998), que presentaron un máximo de concentración de fenólicos solubles totales de 7,151 mg kg^{-1} . El extracto con urea al 0.5 % presentó menor concentración que el máximo de concentración de fenólicos solubles totales reportado por Wu *et al* (1998), mientras que las concentraciones de fenólicos solubles totales en los extractos con NaOH al 0.5 % fueron aún mayores.

Cuadro 16. Concentraciones de fenólicos solubles totales en los extractos de paja de trigo y concentración con base en peso seco.

Extractante	CFST en el extracto	CFST en PT	CFST en PT
	mg en 40 mL	mg kg^{-1}	%
Agua común	16.707	8,353.50	0.8353
Agua a 60 °C	16.872	8,436.00	0.8436
Agua a pH 5.5	16.806	8,403.00	0.8403
NaOH 0.5 %	26.119	13,059.50	1.3059
KOH 0.5 %	16.435	8,217.50	0.8217
Urea 0.5 %	14.819	7,409.50	0.7409

CFST = concentración de fenólicos solubles totales; PT = paja de trigo.

2.4 CONCLUSIONES

1. En el extracto de agua común por cromatografía de capa fina se identificaron los ácidos caféico, gentísico, *p*-cumárico, ferúlico, siríngico y vainílico, y otros dos ácidos fenólicos no fue posible su identificación.
2. En el extracto de agua a 60 °C se identificaron los mismos ácidos fenólicos que en el extracto de agua común, exceptuando al ácido siríngico.

3. En el extracto con agua a pH 5.5 se identificaron únicamente los ácidos caféico, gentísico, *p*-cumárico y ferúlico.
4. En el extracto con NaOH al 2 % se identificaron los ácidos caféico, *p*-cumárico (*trans* y *cis*) y ferúlico. No se identificaron dos ácidos fenólicos presentes en la placa cromatográfica.
5. En el extracto con KOH al 2 % los ácidos fenólicos identificados fueron el caféico, *p*-cumárico (*trans* y *cis*) y ferúlico (*trans* y *cis*).
6. En el extracto con urea al 2 % se identificaron únicamente los ácidos *p*-cumárico y ferúlico en sus isómeros *trans* y *cis*.
7. Por cromatografía líquida de alta resolución (CLAR) en los extractos metanólicos provenientes de la extracción con seis extractantes, se identificaron a los ácidos *p*-cumárico y ferúlico en sus isómeros *trans* y *cis*, y se consideran los ácidos fenólicos más importantes presentes en la paja de trigo variedad Saturno por su concentración. Los demás ácidos fenólicos que se identificaron por cromatografía en capa fina como el caféico, vainílico, gentísico y siríngico, se presentaron en concentraciones muy bajas.
8. Las concentraciones de los ácidos *p*-cumárico y ferúlico cuantificadas por CLAR en todos los extractantes fueron muy bajas. Los porcentajes de recuperación de estos fenólicos se presentaron en el intervalo de 0.17 % y 3.06 % con respecto a las concentraciones de fenólicos solubles totales en los extractos iniciales.
9. Los porcentajes de recuperación de fenólicos solubles totales en los extractos metanólicos, también se consideraron bajos en relación con las concentraciones de fenólicos solubles totales cuantificadas en los extractos iniciales en los seis extractantes. Los porcentajes de recuperación fluctuaron entre 9.94 % en el extracto con agua a pH 5.5 y 20.17 % en el extracto de KOH al 0.5 %. El

procedimiento para la separación y aislamiento de los compuestos fenólicos a partir de los extractos acuosos no es el más adecuado para conservar los fenólicos en el extracto orgánico en los embudos de separación.

10. Los ácidos fenólicos identificados y cuantificados por CLAR no son los fenólicos solubles más importantes en concentración entre los compuestos fenólicos presentes en la paja de trigo y por lo tanto, es posible que no representen los compuestos fenólicos más importantes que inhiben el crecimiento de las raíces y de la parte aérea de las plantas, como comúnmente se ha reportado en la literatura.

11. Los fenólicos solubles totales en los extractos metanólicos contienen fenólicos de naturaleza química relativamente distinta a los ácidos fenólicos con estructura del ácido benzoico o del ácido cinámico. Una alta proporción de fenólicos que ingresan a la columna de separación se quedan adheridos a la fase estacionaria de la columna con los eluyentes y condiciones de elusión para los ácidos fenólicos.

12. Los porcentajes de fenólicos cuantificados por CLAR representan entre el 1.28 % y el 15.18 % de las concentraciones de fenólicos solubles totales cuantificadas en los extractos metanólicos.

13. Las concentraciones de ácidos fenólicos en la paja de trigo variedad Saturno, con estructura del ácido cinámico fueron superiores a las concentraciones de los fenólicos con estructura del ácido benzoico.

14. Los dos métodos de identificación de los ácidos fenólicos coincidieron relativamente en los ácidos fenólicos identificados.

2.5 LITERATURA CITADA

- Álamo M, Del., L. Casado., V. Hernández., y C. Gómez-Cordovés. 2001. Análisis de compuestos fenólicos de bajo peso molecular por HPLC con extracción en fase sólida. Jornadas Científicas '01 de Grupos de Investigación Enológica. Libro de Actas C1. Valencia, España.
- Al-Hamdi, B., Inderjit, M. Olofsdotter., and J. C. Streibig. 2001. Laboratory bioassay for phytotoxicity. An example from wheat straw. *Agronomy Journal*. 93: 43-48.
- Conchie, J., J. Alister., and J. A. Lomax. 1988. Soluble lignin-carbohydrate complexes from sheep rumen fluid. Their composition and structural features. *Carbohydrate Research*. 177: 127-151.
- Elliot, L. F., T. M. McCalla., and A. Waiss. 1978. Phytotoxicity associated with residue management. pp. 131-146. *In: Crop Residue Management Systems*. American Society of Agronomy. Special publication No. 31. Madison, Wi. USA.
- Guenzi, W. D., and T. M. McCalla. 1966. Phenolic acids in oats, wheat, sorghum, and corn residues and their phytotoxicity. *Agronomy Journal*. 58: 303-304.
- Harborne, J. B. 1980. Plant phenolics. pp. 329-402. *In: Secondary Plant Products*. E. A. Bell and B. V. Charlwood. (eds.). Springer-Verlag. New York, USA.
- Harborne, J. B. 1984. Phenolic compounds. pp. 37-99. *In: Phytochemical Methods: A guide to modern techniques in plant analysis*. 2nd. Ed. Chapman & Hall. London. UK.
- Lodhi, M. A. K., R. Bilal., and K. A. Malik. 1987. Allelopathy in agroecosystems: wheat phytotoxicity and its possible roles in crop rotation. *Journal of Chemical Ecology*. 13: 1881-1891.
- Narwal, S. S., M. K. Sarmah., and D. P. S. Nandal. 1997. Allelopathic effects of wheat residues on growth and yield of fodder crops. *Allelopathy Journal*. 4: 111-120.
- Opoku, G., T. J. Vyn., and R. P. Voroney. 1997. Wheat straw placement effects on total phenolic compounds in soil and corn seedling growth. *Canadian Journal of Plant Science*. 77: 301-305.
- Pan G. X., J. L. Bolton., and G. J. Leary. 1998. Determination of ferulic and *p*-coumaric acids in wheat straw and the amounts released by mild acid and alkaline peroxide treatment. *J. Agri. Food Chem*. 46: 5283-5288.

- Rambakudzibga, A. M. 1991. Allelopathic effects of aqueous wheat (*Triticum aestivum* L.) straw extracts on the germination of eight arable weeds commonly found in Zimbabwe. *Zimbabwe Journal of Agricultural Research*. 29: 77-79.
- Runcang, S., J. M. Lawther., and W. B. Banks. 1995. Influence of alkaline pretreatments on the cell wall components of wheat straw. *Industrial crops and products*. 4: 127-145.
- Salomonsson, A. C., O. Theander., and P. Aman. 1978. Quantitative determination by GLC of phenolic acids and ethyl derivatives in cereal straw. *J. Agric. Food Chem.* 26: 830-835.
- Thornton, M. R., R. Neilson Boyd., and R. Neilson Body. 1998. *Química orgánica*. Quinta edición. Ed. Pearson Educación. Traducido por Rosa Zugazagoitia Herranz y Peter Fiedler.
- Waterman, P. G., and S. Mole. 1994. *Analysis of phenolic plant metabolites. Methods in ecology*. Blackwell Scientific Publications. Oxford, UK.
- Wu, H., J. Pratley., D. Lemerle., T. Haig., and B. Verbeek. 1998. Differential allelopathic potencial among wheat accessions to annual ryegrass. *Proceedings of the 9th Australian Agronomy Conference*. Australian Society of Agronomy. Disponible en línea <http://www.regional.org.au/au/asa/1998> (Revisado 30 de mayo de 2004).
- Zahedifar, M. 1996. Novel uses of lignin and hemicellulosic sugars from acid-hydrolyzed lignocellulosic materials. Ph. D. Thesis. University of Aberdeen. Scotland, U. K. Disponible en línea. http://www.macaulay.ac.uk/IFRU/thesis/phd_zahedifar.pdf. (Revisado 7 de septiembre de 2004).

CAPÍTULO III

CAPACIDAD DE EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS DE VEINTE EXTRACTANTES EN PAJA DE TRIGO

CAPACIDAD DE EXTRACCIÓN DE COMPUESTOS FENÓLICOS DE VEINTE EXTRACTANTES EN PAJA DE TRIGO

Fidel René Díaz Serrano, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2011

Con el objetivo de disminuir las concentraciones de fenólicos solubles totales (CFST) iniciales en los materiales de paja de trigo utilizados como sustratos en el crecimiento de plántulas de brócoli, se evaluó la capacidad de extracción de compuestos fenólicos de 20 extractantes. Las soluciones con NaOH en sus diferentes concentraciones fueron las que extrajeron las mayores CFST de la paja de trigo en la primera extracción. En la segunda extracción en la paja de trigo con solamente agua común, las CFST fueron relativamente similares aunque estadísticamente fueron diferentes. En la segunda extracción no se encontró una diferencia importante en las CFST en la paja de trigo entre los diferentes extractantes, por lo que desde el punto de vista práctico y económico no se recomienda utilizar ningún otro extractante diferente al agua común. Sin embargo, para poder descartar completamente la capacidad de extracción de los compuestos fenólicos se recomienda posteriormente hacer un bioensayo en plántulas de brócoli.

Las CFST con respecto a la cantidad total de compuestos orgánicos cuantificados en los extractos variaron entre 12.76 % utilizando como extractante agua a 60 °C y 53.43 % con NaOH al 1 %. En los extractantes con KOH y con urea no fue posible cuantificar la CFST con respecto al peso total de compuestos orgánicos extraídos, lo que sugiere que los extractantes con base en KOH y urea reaccionan químicamente con los tejidos de la paja de trigo.

Palabras clave: *paja de trigo, fenólicos, extractantes.*

EXTRACTION CAPACITY OF PHENOLICS COMPOUNDS OF TWENTY EXTRACTANTS IN WHEAT STRAW

Fidel René Díaz Serrano Ph. D.
Postgraduate College, 2011

With the aim to diminish the initial total soluble phenolic concentration (TSPC) in wheat straw materials used as substrates in the growing of broccoli seedlings, it was evaluated the TSPC extraction capacity of twenty extractants.

The NaOH solutions with different concentrations were that extracted the highest TSPC from wheat straw during the first extraction.

In the second extraction using only tap water the TSPC in wheat straw materials were relatively similar between them, however, statistically were different. It was no found an important difference in TSPC in the wheat straw materials using tap water in the second extraction, this apparently means that there is not a practical and economical advantage using another extractant different to tap water for phenolic extraction. However in order to discard completely the extraction capacity of phenolic compounds by the extractantes it is recommended to carry out a bioassay in broccoli seedlings.

The TSPC with respect to the total amount of organic compounds quantified in the extracts varied among 12.76 % using 60 °C water and 53.43 % with NaOH 1%. It was no possible to quantify the percentage of total phenolic compounds in relationship to the total amount of organic compounds extracted in the extracts based on NaOH and urea, suggesting that these compounds react chemically with wheat straw tissues.

Key words: *wheat straw, phenolics, extractants.*

3.1 INTRODUCCIÓN

Se conoce que la paja de trigo contiene compuestos fenólicos, principalmente derivados del ácido cinámico como los ácidos *p*-cumárico y el ferúlico, o derivados del ácido benzoico como el siríngico, vainílico, etc., los cuales causan inhibición (alelopatía) sobre el crecimiento de las raíces y la parte aérea de las plantas (Lodhi, 1987; Narwal et al., 1997; Opoku et al., 1997).

De acuerdo con los resultados obtenidos en el experimento descrito en el Capítulo I, aparentemente, se comprobó que la concentración de fenólicos solubles totales (CFST) extraída de la paja de trigo con agua común no fue suficiente para evitar el efecto de inhibición de estos compuestos sobre el crecimiento de las raíces y la parte aérea de plántulas de brócoli, por lo que se consideró evaluar otros extractantes, para extraer mayores concentraciones de fenólicos solubles totales y disminuir las concentraciones iniciales de estos compuestos en la de paja de trigo, para posteriormente ser utilizada como sustrato en el crecimiento de plántulas de brócoli.

En la gran mayoría de los trabajos de investigación encontrados en la literatura para la extracción de ácidos fenólicos en la paja de trigo se utilizan compuestos orgánicos de menor polaridad que el agua como el etanol al 80 % (Guenzi y McCalla, 1966; Iiyama *et al.*, 1990), metanol-agua 50 % (Waterman y Mole, 1994), se aplican tratamientos con NaOH 2 N o HCl 2 N (Guenzi y McCalla, 1966) o KOH al 24 % (Runcang *et al.*, 1995), por lo que se consideró importante evaluar otros extractantes de los compuestos fenólicos, diferentes al agua común.

Los objetivos de este trabajo fueron: 1) evaluar la capacidad de extracción de compuestos fenólicos solubles totales de 20 extractantes en paja de trigo, 2) cuantificar las CFST en paja de trigo en una segunda extracción con agua común, después de la primera extracción con los 20 extractantes, enjuagado tres veces con agua común y secado, y 3) determinar la cantidad de compuestos solubles extraídos con los 20 extractantes y determinar el porcentaje de fenólicos solubles totales con base en peso seco.

3.2 MATERIALES Y MÉTODOS

3.2.1 Extractantes

La evaluación de la capacidad de extracción de los compuestos fenólicos de la paja de trigo de cada uno de 20 extractantes se realizó en el Laboratorio de Nutrición Vegetal, Área de Nutrición Vegetal, Programa de Edafología, Instituto de Recursos Naturales (IRENAT) del Colegio de Postgraduados, en Montecillo, Texcoco. Edo. de México, en el periodo del 6 al 17 de enero de 2003. Los 20 extractantes se presentan en el Cuadro 1.

Todos los extractantes se prepararon con agua común, con un pH de 7.45 y una conductividad eléctrica de 0.37 mS cm^{-1} .

3.2.2 Capacidad de extracción de fenólicos solubles totales de 20 extractantes en paja de trigo

La extracción de los compuestos fenólicos se hizo con cuatro repeticiones por extractante, en frascos de vidrio de aproximadamente 100 mL, utilizando 2 g (\cong 20 mL) con 40 mL de extractante (relación 1: 2, v/v). La paja de trigo utilizada para la evaluación de la capacidad de extracción de los fenólicos solubles de los 20 extractantes se elaboró con 50 % de partículas $< 2.0 \text{ mm}$ y $\geq 1.0 \text{ mm}$ y 50 % de partículas < 1.0 y $\geq 0.5 \text{ mm}$, v/v. No se utilizaron partículas menores a 0.5 mm.

La modificación del tamaño de las partículas de la paja de trigo para elaborar los sustratos se fundamentó en pruebas sencillas de porosidad de aire realizadas en frascos de vidrio, en donde la porosidad de aire de los testigos Sunshine 3 y Sunshine fue de 2 % y 4 % respectivamente.

La porosidad de aire es quizás la propiedad física más importante en los sustratos (Ansorena, 1994). Asimismo, se evaluaron las proporciones 50-50, 60-40, 70-30, 80-20, 90-10 y 100-00 de paja de trigo con partículas $< 2.0 \text{ mm}$ y $\geq 1.0 \text{ mm}$ y partículas < 1.0 y $\geq 0.5 \text{ mm}$, v/v respectivamente en cada tratamiento, obteniendo porcentajes de porosidad de aire de 6.22 %, %, 6.62 %, 7.59 %, 8.14 %, 10.3 % y

12.0 % para los tratamientos señalados con anterioridad, respectivamente.

Lo anterior muestra, que a medida que el tamaño de partículas se incrementa tomando como base un mismo volumen, la porosidad de aire también se incrementa (macroporosidad).

Cuadro 1. Extractantes utilizados para la extracción de los fenólicos solubles en paja de trigo.

Extractante	Concentración
	%
Agua común	-----
Agua a 40 ° C	-----
Agua a 50 ° C	-----
Agua a 60 ° C	-----
Agua a pH 6.5	-----
Agua a pH 6.0	-----
Agua a pH 5.5	-----
Agua a pH 5.0	-----
Solución de NaOH	0.5
Solución de NaOH	1.0
Solución de NaOH	1.5
Solución de NaOH	2.0
Solución de KOH	0.5
Solución de KOH	1.0
Solución de KOH	1.5
Solución de KOH	2.0
Solución de Urea	0.5
Solución de Urea	1.0
Solución de Urea	1.5
Solución de Urea	2.0

De acuerdo con los resultados de porosidad de aire de los sustratos testigos, se consideró que la proporción 50: 50 con una porosidad de aire de 6.22 % era adecuada para suministrar suficiente aire (oxígeno) a las raíces de las plántulas de brócoli, tomando en consideración las porosidades de aire determinadas en los sustratos Sunshine 3 y Sunshine (2 % y 4 % respectivamente).

Los frascos con paja y extractante se dejaron reposar por una hora, después, el extracto se filtró con papel filtro y embudos de vidrio, recibiendo el filtrado en frascos de 100 mL limpios y secos. La cuantificación de la concentración de fenólicos solubles totales (CFST) en los filtrados se realizó por colorimetría, de acuerdo a lo señalado por Swain y Hillis (1959), modificando esta metodología original para microensayo y adaptándola al equipo Espectronic 20⁺ marca Milton Roy existente en el Laboratorio de Nutrición Vegetal (Capítulo II).

Para la cuantificación de los compuestos fenólicos en los extractos de paja de trigo, se elaboró una nueva curva estándar, utilizando ácido *p*-cumárico como estándar en lugar de utilizar fenol, como se describe en la metodología original. La comparación entre la concentración y absorbancia para la elaboración de las dos curvas estándar se presenta en el Cuadro 2.

La necesidad de elaborar una nueva curva estándar se fundamentó en el hecho de que una alta proporción de los compuestos fenólicos en la paja de trigo después de su extracción, separación y purificación para su identificación por cromatografía de capa fina, se encontró como ácido *p*-cumárico (Capítulo II), de tal manera que la cuantificación de la CFST se pudiera relacionar más directamente con el peso molecular del ácido *p*-cumárico (164.16 g mol⁻¹) que con el peso molecular del fenol (94.00 g mol⁻¹), esto es, para reducir los errores en la cuantificación de estos compuestos, cuando se utiliza como estándar un compuesto químico que no se encuentre relacionado con los compuestos fenólicos presentes en una muestra (Waterman y Mole, 1994).

El análisis de varianza de las CFST fue con un diseño completamente al azar, con 20 extractantes y 4 repeticiones. La comparación de medias fue con una prueba de Tukey (DHS-Diferencia Honesta Significativa) con una $\alpha = 0.05$.

Cuadro 2. Comparación entre la concentración de fenol y ácido *p*-cumárico en solución y absorbancia a una longitud de onda de 725 nm, para la elaboración de las curvas patrón.

Concentración de fenol $\mu\text{g mL}^{-1}$	Absorbancia	Concentración de ácido <i>p</i> -cumárico $\mu\text{g mL}^{-1}$	Absorbancia
0.000	0	0.000	0.000
0.375	0.033	0.375	0.050
0.750	0.065	0.750	0.080
1.500	0.131	1.500	0.140
3.125	0.262	3.125	0.250
6.250	0.538	6.250	0.570
12.50	0.990	12.500	0.800
25.00	1.560	25.000	1.900

Ecuación original obtenida utilizando fenol $Y = -0.68 + 15.35 X$, en donde Y = concentración de fenol en $\mu\text{g mL}^{-1}$; X = absorbancia. Ecuación para relacionar la concentración de ácido *p*-cumárico con la absorbancia: $Y = -0.247 + 13.52 X$; en donde Y = concentración de ácido *p*-cumárico en $\mu\text{g mL}^{-1}$; X = absorbancia.

3.2.3 Concentración de fenólicos en los extractos de paja de trigo después de la primera extracción, enjuague tres veces y secado (segunda extracción)

Una vez que se cuantificaron las CFST en la paja de trigo con cada uno de los 20 extractantes, la paja contenida en los frascos se enjuagó tres veces con 40 mL de agua común y las aguas de cada enjuague se filtraron con papel filtro, posteriormente las pajas en los frascos se secaron en una estufa a 60 °C hasta peso constante. Una vez secas, a las pajas contenidas en los frascos, se les adicionaron 40 mL de agua común (relación 1: 2, v/v) y se dejaron reposar por una hora, después, el extracto se filtró y se cuantificaron las nuevas CFST. Se hizo un análisis de varianza para las nuevas CFST, utilizando un diseño completamente al azar, con 20 extractantes y cuatro repeticiones. La comparación entre medias se hizo con una prueba de Tukey (DHS) y una $\alpha = 0.05$.

La selección de los seis mejores extractantes de la primera extracción, se hizo considerando las CFST determinadas en estos últimos extractos. La cuantificación de las CFST en las pajas de trigo en la segunda extracción se realizó con el objetivo de establecer un nuevo experimento con seis sustratos de paja de trigo y dos turbas como testigos (Capítulo IV).

3.2.4 Determinación del peso de los compuestos solubles de la paja de trigo por efecto del tratamiento con los extractantes

Con la finalidad de cuantificar la pérdida de compuestos orgánicos solubles en la paja de trigo debido al tratamiento con cada uno de los extractantes y establecer su relación con las CFST, se pesaron 2 g (\cong 20 mL) de paja de trigo con la granulometría señalada con anterioridad, y se pusieron en frascos de vidrio de aproximadamente 100 mL. Se agregaron 40 mL de cada extractante (relación 2: 1) y se dejaron reposar por una hora, después se filtraron con papel filtro y embudos de vidrio, pasando todo el contenido del frasco al papel filtro, este junto con la paja que se quedó en él, se enjuagaron tres veces con suficiente agua destilada, exprimiendo el papel filtro con la paja en cada ocasión para remover los compuestos adheridos a las superficies de la paja, recibiendo el extracto y el agua de los enjuagues en vasos de precipitados de 250 mL. El extracto y el líquido de los enjuagues contenidos en los vasos de precipitados de 250 mL se filtraron nuevamente utilizando jeringa, portafiltros y filtros de nylon de 2 μ m para evitar el paso de material sólido. El filtrado se recogió en vasos de precipitados de 250 mL limpios y secos, previamente identificados y pesados.

Los vasos con el líquido colectado del extracto y los lavados, se introdujeron en una estufa a una temperatura de 60 °C hasta peso constante. Los frascos y su contenido seco (sólido de color café oscuro en todos los casos) se pesaron en una balanza analítica. Los pesos del contenido de compuestos orgánicos solubles extraídos se obtuvieron por diferencia de peso tomando en consideración el peso del vaso de precipitados limpio. También se cuantificó la CFST en % con base en peso seco, considerando primeramente las CFST por un mL, en 40 mL del

extracto y en 100 g de paja de trigo seca. Estas determinaciones se hicieron solamente con una repetición.

3.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.3.1 Capacidad de extracción de fenólicos solubles en paja de trigo de 20 extractantes (primera extracción)

La $P > F$ del análisis de varianza, la DHS ($\alpha = 0.05$) y la comparación entre medias de las CFST determinadas en cada uno de los extractantes se presentan en el Cuadro 3.

El extractante con el cual se extrajo la mayor CFST fue el NaOH al 2.0 % con 1,443.68 mg L⁻¹, mientras que el extractante que extrajo la menor concentración fue la urea al 0.5 %, con 370.48 mg L⁻¹, siendo estadísticamente diferentes y con una diferencia entre estos extractantes de 1,037.20 mg L⁻¹.

Si dentro de los 20 extractantes se hace una separación por grupos, considerando: 1) el agua común, 2) el agua a las temperaturas de 40 °C, 50 °C y 60 °C, 3) el agua a pHs de 6.5, 6.0, 5.5 y 5.0, 4) concentraciones de NaOH, 5) concentraciones de KOH, y 6) concentraciones de urea, se aprecia, que el NaOH fue el que extrajo la mayor CFST con un promedio de 1,147.31 mg L⁻¹, el segundo lugar lo ocupó el KOH con un promedio de 718.75 mg L⁻¹, el tercer lugar fue para los extractantes con agua caliente con un promedio de 456.68 mg L⁻¹, el cuarto lugar fue para los extractantes en donde se varió el pH con 453.52 mg L⁻¹, el quinto lugar fue para los extractantes con base en urea con 443.40 mg L⁻¹ y por último el agua común con un promedio de 419.59 mg L⁻¹.

En la extracción con agua caliente, las CFST aumentaron al aumentar la temperatura del agua, excepto en el agua a 60 °C, cuya CFST fue estadísticamente diferente a las CFST en el agua a las otras dos temperaturas, lo que pudo haber sucedido por efecto de la mayor temperatura, degradando algunos de los fenólicos (Waterman y Mole, 1994).

Cuadro 3. Comparación de las concentraciones de fenólicos solubles totales en paja de trigo extraídos con 20 extractantes, incremento de concentración con respecto al agua común y porcentaje de fenólicos solubles totales con base en peso seco.

Extractante	Concentración de fenólicos solubles totales	Incremento de concentración en relación con agua común	Fenólicos solubles totales en paja de trigo
	mg L ⁻¹	-----%-----	
1 Agua común (pH= 7.45)	419.59 j	0.00	0.83
2 Agua 40 °C	469.35 gh	11.85	0.93
3 Agua 50 °C	479.12 gh	14.18	0.95
4 Agua 60 °C	421.57 j	0.470	0.84
5 Agua pH 6.5	488.92 g	11.65	0.97
6 Agua pH 6.0	452.60 hi	7.860	0.90
7 Agua pH 5.5	420.17 j	0.100	0.84
8 Agua pH 5.0	452.40 hi	7.810	0.90
9 Solución NaOH 0.5 %	652.99 f	55.62	1.30
10 Solución NaOH 1.0 %	1,150.52 c	74.20	2.30
11 Solución NaOH 1.5 %	1,342.06 b	219.8	2.68
12 Solución NaOH 2.0 %	1,443.68 a	244.0	2.88
13 Solución KOH 0.5 %	418.38 j	-0.28	0.83
14 Solución KOH 1.0 %	633.46 f	50.97	1.26
15 Solución KOH 1.5 %	828.81e	92.52	1.65
16 Solución KOH 2.0 %	994.38 d	136.98	1.98
17 Solución urea 0.5 %	370.48 k	-11.70	0.74
18 Solución urea 1.0 %	431.42 ij	2.81	0.86
19 Solución urea 1.5 %	480.51 g	14.51	0.96
20 Solución urea 2.0 %	491.21 g	17.06	0.98
P>F	0.001		
DHS	27.65		

Medias con la misma letra en la columna son estadísticamente iguales. DHS = diferencia honesta significativa.

En los extractantes en donde se controló el pH se aprecia que con excepción del extractante a pH 5.0, las CFST disminuyeron con respecto a la concentración obtenida en el extracto a pH 6.5 en la medida en que disminuyó el pH. Grossl e Inskeep (1996), señalan que en pH ácido (4.5), los grupos fenólicos están probablemente protonados y consecuentemente los ácidos fenólicos tuvieron menor solubilidad en agua.

En los extractantes de NaOH, KOH y urea, las CFST se incrementaron, al incrementarse las concentraciones de estos, y fueron estadísticamente diferentes dentro de su grupo, con excepción de los extractantes de urea al 1.5 % y 2.0 % los cuales fueron iguales entre sí.

Los porcentajes de incremento de las CFST de los demás extractantes con respecto al agua común se muestran también en el Cuadro 3. Las soluciones de NaOH fueron las que presentaron los porcentajes más altos de incremento en la extracción de estos compuestos, por ejemplo en el NaOH al 2 % el incremento en la extracción de fenólicos solubles totales con respecto al agua común fue de 244 %, sin embargo también se encontraron CFST menores a las cuantificadas utilizando agua común como extractante, como fueron los casos de las soluciones de KOH al 0.5 % y urea al 0.5 %.

Los compuestos fenólicos cuantificados en este trabajo en el extracto con agua común, muy probablemente representan compuestos fenólicos que tienden a ser solubles en agua y ocurren frecuentemente combinados con azúcares como glucósidos y se localizan usualmente en las vacuolas de las células (Harborne, 1984). No se encontraron ácidos fenólicos libres en los extractos de agua común, al correr muestras hidrolizadas y no hidrolizadas para la identificación de ácidos fenólicos por cromatografía de capa fina (Capítulo II).

Los compuestos fenólicos raramente ocurren en estado libre en los tejidos vivos de las plantas, prácticamente se presentan en forma conjugada. Los fenoles simples libres son sustancias cáusticas. La relativa infrecuencia en plantas de fenoles simples puede relacionarse con su fitotoxicidad (Harborne, 1980). En el caso de los ácidos hidroxicinámicos (ejem: ácidos *p*-cumárico y ferúlico) ocurren más frecuentemente como ésteres del ácido quínico, este está usualmente

pegado al grupo del ácido carboxílico más bien que al residuo fenólico (Harborne, 1980). El azúcar unido a la molécula del fenólico, le proporciona mayor solubilidad en agua, en comparación a la forma libre, la cual es más soluble en solventes menos polares que el agua como el metanol, etanol o acetona. El metanol al 50 % en agua es muy utilizado (Waterman y Mole, 1994).

Lo anterior obedece a un principio químico fundamental que establece que “semejante disuelve a semejante”. El agua disuelve compuestos polares.

Por otro lado, es probable que entre los compuestos extraídos de la paja de trigo con agua común se encuentren “fenólicos” los cuales están enlazados a una molécula de azúcar por medio de enlaces éter (Guenzi y McCalla, 1966), por lo que también es muy probable que no se hayan podido cuantificar utilizando la metodología propuesta por Swain y Hillis (1959), ya que esta detecta como “fenólico” cualquier compuesto que contenga un anillo fenólico. Para que la forma éter sea detectada o cuantificada por esta metodología es necesario hidrolizar la molécula a $\text{pH} < 2.0$ (Guenzi y McCalla, 1966; Pan *et al.*, 1998).

Con respecto a los tratamientos con agua caliente es conocido que dentro de ciertos límites la solubilidad de los compuestos se incrementa al incrementarse la temperatura, aunque en estudios de identificación de los compuestos fenólicos en paja de trigo extraídos con agua a 60°C , no se encontró ácido siríngico, en comparación con los demás ácidos fenólicos identificados en el extracto con agua común (Capítulo II).

Para el caso de los extractos obtenidos con variación de pH, se conoce que existen algunas formas de los ácidos fenólicos que son lábiles a pH ácidos, los que se encuentran unidos a azúcares por medio de uniones glucosídicas (éter) (Guenzi y McCalla, 1966).

Al respecto, es importante señalar que en los estudios de identificación de los ácidos fenólicos presentes en la paja de trigo (Capítulo II), para el caso del extractante de agua a pH 5.5, únicamente se identificaron cuatro ácidos fenólicos: caféico, gentísico, *p*-cumárico y ferúlico, mientras que para el caso de los ácidos fenólicos identificados en el extracto con agua común, además de los ácidos fenólicos señalados con anterioridad se identificaron los ácidos siríngico, vainílico

y se detectaron otros dos ácidos fenólicos que no fue posible identificar. Asimismo, es conocido que la forma alquil-aril-éter resiste la hidrólisis alcalina suave, pero es lábil a los ácidos (Scalbert *et al.*, 1985). Estos hechos, demuestran que el pH de la solución extractante influye tanto en la capacidad para extraer estos compuestos, como en las formas químicas de los mismos. (solubilidad dependiente del pH). El pH del extractante más ácido (pH =5) no es lo suficientemente ácido comparandolo con el pH < 2, necesario para que algunos derivados del ácido cinámico (ácidos fenólicos) se rompan en algún grado por el tratamiento ácido (Guenzi y McCalla, 1966).

Para el caso de los extractantes con NaOH se sabe que se obtuvieron mayores cantidades de ácidos fenólicos en el tratamiento con NaOH 2 N (normal) que con HCl 2 N (Guenzi y McCalla, 1966). En paja de trigo, se encontraron mayores concentraciones de ácido ferúlico y *p*-cumárico en los extractos con NaOH 2N (120 y 2,410 ppm) que en los extractos con HCl 2 N (59 y 84 ppm). Se indica también que la hidrólisis con HCl 2 N rompió la mayoría de las uniones glucosídicas y el tratamiento con NaOH 2 N rompió los enlaces ester con la lignina (Guenzi y McCalla, 1966). La diferencia en estabilidad de las uniones ester y éter permite una separación de los ácidos *p*-cumárico y ferúlico en sus formas éter y ester.

En un tratamiento secuencial de la paja de trigo, la hidrólisis alcalina suave sirve para liberar los ácidos *p*-cumárico y ferúlico enlazados por uniones ester, y luego la hidrólisis ácida rompe las uniones alquil-aril-éter; la forma esterificada y los puentes ester-éter entre la lignina y los polisacáridos (Pan *et al.*, 1998).

En el presente trabajo, también se obtuvieron mayores concentraciones de fenólicos solubles totales en los extractos con NaOH que en los extractos ácidos. Las máximas concentraciones de NaOH y KOH (2 %) en este trabajo utilizadas como extractantes de compuestos fenólicos corresponden a concentraciones 0.5 N.

Se ha encontrado que los ácidos *p*-cumárico y ferúlico actúan como moléculas bifuncionales con sitios de enlace en el grupo carboxilo y en el grupo fenólico, siendo un medio para enlazarse con los polímeros de la pared celular (Pan *et al.*,

1998). Por otro lado, se ha propuesto que el ácido ferúlico en sus formas de éster o éter formando puentes, juegan un papel predominante en los enlaces entre la lignina y los polisacáridos en paja de trigo (Scalbert *et al.*, 1985). Muchos estudios han demostrado que en todos los estados de maduración de la paja de trigo, el ácido *p*-cumárico está mayoritariamente esterificado con la lignina o los polisacáridos, mientras que el ácido ferúlico está casi en la misma proporción en la forma esterificada que en la forma de éter (Pan *et al.*, 1998).

De acuerdo con lo anterior, las mayores CFST cuantificadas en los extractantes de NaOH en alguna de sus concentraciones, con respecto a las obtenidas con agua común se pueden atribuir a la ruptura de las uniones éster de los ácidos fenólicos con la lignina y/o polisacáridos que constituyen la pared celular, liberando principalmente a los ácidos *p*-cumárico y ferúlico como constituyentes de las paredes celulares.

Para establecer que los fenólicos extraídos con NaOH y con agua común son de diferente origen, se trató primeramente la paja de trigo con NaOH al 1.5 % por una h, obteniendo una concentración promedio de tres repeticiones de 825 mg L⁻¹. La paja se enjuagó tres veces y se exprimió en el papel filtro. A cada uno de los tres frascos con la paja de trigo, incluyendo el papel filtro, se les adicionaron 40 mL de NaOH al 2 %, agua a pH 5.0 y agua común y se dejaron reposar por una hora. Las CFST determinadas fueron: 73.24 mg L⁻¹, 11.24 mg L⁻¹ y 12.59 mg L⁻¹ para los extractantes de NaOH al 2 %, agua a pH 5.0 y agua común respectivamente. Si se les sigue adicionando NaOH a las pajas de trigo, estas siguen liberando compuestos fenólicos.

Por otro lado, las CFST determinadas en las diversas concentraciones de KOH, las cuales también fueron muy superiores a las CFST determinadas en el extracto con agua común, se pueden atribuir al mismo efecto. Sin embargo, aunque tanto el NaOH como el KOH extraen mayores CFST con respecto al agua común, se aprecia que las CFST extraídas con el NaOH fueron superiores a las extraídas con las soluciones de KOH (Cuadro 3). Esta diferencia en la capacidad para romper los enlaces éster con la lignina y/o polisacáridos a pesar de que los dos son hidróxidos, es probable que sea atribuible a la mayor electronegatividad del Na

con respecto a la del K. La mayor actividad química del NaOH, también se puede constatar por la mayor capacidad del NaOH para extraer la lignina y la hemicelulosa de la paja de trigo y tener mayor pérdida de peso, que con el KOH (Runcang *et al.*, 1995).

Para el caso de la urea, se reporta que la urea 8 M (480 g L^{-1}) a pH neutro y a 25 °C rompe los enlaces de H, rompiendo aproximadamente el 30 % de los xiloglucanos que experimentalmente se unen por puentes de H a la celulosa pura y solubilizando el 2 % de la pared celular (Fry, 1989). No se encontró información con referencia a la propiedad de la urea para liberar o solubilizar compuestos fenólicos de la pared celular. La selección de la urea como extractante de compuestos fenólicos en este trabajo se fundamentó en pruebas previas, en donde se encontró que la urea al 2 % extrajo mayor CFST que el agua común, tomando como información inicial la capacidad de la urea para romper los enlaces de H de los xiloglucanos (Fry, 1989). Si las concentraciones de urea superiores al 0.5 % incrementaron las CFST con respecto a las encontradas en el agua común como extractante, es obvio suponer que la urea en solución interactuó no solamente con los enlaces de H entre los xiloglucanos, sino que también rompió algunos enlaces en donde los fenólicos se encontraban unidos estructuralmente, por medio de uniones éster. Los únicos ácidos fenólicos identificados en los extractos de urea al 2 % fueron el *p*-cumárico en sus formas *cis* y *trans* y el vainílico. Lo que es claro es que simplemente, la urea extrajo en general mayor CFST que el agua común y que además el tipo de ácidos fenólicos encontrados en el tratamiento con urea al 2 %, fue mucho más restringido, al encontrar únicamente dos ácidos fenólicos.

En el Cuadro 3, también se presenta el porcentaje de fenólicos solubles totales en paja de trigo con base en peso seco. Se muestra que con agua común se extrae solamente el 0.83 %, mientras que con NaOH al 2 % el porcentaje se incrementó a 2.88 %, encontrándose las concentraciones de los demás extractantes entre este intervalo.

Pan *et al.*, (1998), señalan que la paja de trigo tuvo 0.48 % de ácido ferúlico y 0.42 % de ácido *p*-cumárico. Sumando estos dos porcentajes, tenemos 0.90 % de los

dos ácidos fenólicos. Aunque los procedimientos, concentraciones y extractantes difieren con relación al presente trabajo, los porcentajes encontrados por estos autores y en esta evaluación son muy similares. Con excepción de todas las concentraciones de NaOH y las concentraciones superiores a 1 % de KOH, todos los demás extractantes tuvieron porcentajes de fenólicos similares a los reportados por los autores señalados. Cabe hacer mención, que los autores desecharon los compuestos solubles en agua destilada de la paja de trigo, esta se enjuagó y después hicieron la determinación de los ácidos mencionados. Lawther *et al.*, (1995), encontraron porcentajes de fenólicos totales de 0.72 %, 0.85 % y 0.19 % en las fracciones de hemicelulosa A, hemicelulosa B y celulosa respectivamente tratando la paja de trigo con KOH al 10 % y nitrobenzeno. Sumando estos porcentajes, se tiene un total de 1.72 %, porcentaje similar al encontrado en el presente trabajo para los casos de los extractantes de KOH al 1 %, 1.5 % y 2 %.

3.3.2 Concentración de fenólicos solubles totales en paja de trigo después de la extracción, enjuague y secado (segunda extracción)

En el Cuadro 4, se muestran las medias de las CFST cuantificadas en la segunda extracción. Se presentaron diferencias altamente significativas entre las CFST en las pajas, en donde las mayores CFST las presentaron los extractos con agua común en las pajas en las que la primera extracción se hizo con agua a pH 5.0 y con NaOH al 1 %, ambas con una concentración de 12.93 mg L⁻¹, y la menor concentración se determinó en la solución de KOH al 1.5 % con 4.07 mg L⁻¹.

Al comparar la CFST en la paja tratada con agua común y las extracciones con agua a las tres temperaturas, estas últimas estadísticamente incrementaron las CFST en la primera extracción, sin embargo en la segunda extracción las CFST fueron estadísticamente iguales. Si consideramos la CFST de la segunda extracción como la característica más importante con relación a la CFST en la primera extracción para la selección del material de paja de trigo para la elaboración de los sustratos para el siguiente experimento, se pudo establecer

aparentemente que los tratamientos con agua a 40 °C, 50 °C y 60 °C no ofrecieron una ventaja con respecto al agua común para extraer los fenólicos de la paja de trigo.

Las pajas de los extractos de agua a pH entre 5.0 y 6.5 en la primera extracción, en la segunda extracción, presentaron CFST que variaron entre 9.21 mg L⁻¹ y 12.93 mg L⁻¹, siendo tres de ellos estadísticamente iguales entre sí, pero diferentes con relación a la CFST encontrada en el extracto de agua común en la segunda extracción, aunque las diferencias con respecto a este último extractante fueron relativamente pequeñas.

Cuadro 4. Concentración de fenólicos solubles totales en la segunda extracción y disminución de las CFST con respecto a las CFST iniciales.

Extractante	CFST mg L ⁻¹	Disminución de la CFST %
1 Agua común (pH= 7.45)	11.41 abcd	97.28
2 Agua 40 °C	12.25 ab	97.39
3 Agua 50 °C	12.25 ab	97.09
4 Agua 60 °C	12.08 abc	97.52
5 Agua pH 6.5	12.93 a	97.14
6 Agua pH 6.0	10.56 bcde	97.48
7 Agua pH 5.5	9.21 e	97.96
8 Agua pH 5.0	9.81 de	97.66
9 Solución NaOH 0.5 %	12.08 abc	98.15
10 Solución NaOH 1.0 %	12.93 a	98.87
11 Solución NaOH 1.5 %	12.08 abc	99.09
12 Solución NaOH 2.0 %	12.66 a	99.12
13 Solución KOH 0.5 %	6.40 f	98.47
14 Solución KOH 1.0 %	5.93 f	99.06
15 Solución KOH 1.5 %	4.07 g	99.50
16 Solución KOH 2.0 %	6.40 f	99.35
17 Solución urea 0.5 %	11.24 abcd	96.96
18 Solución urea 1.0 %	10.22 de	97.63
19 Solución urea 1.5 %	10.39 cde	97.83
20 Solución urea 2.0 %	10.32 de	97.89
Significancia	0.0001	
DHS	1.75	

Medias con la misma letra en la columna son estadísticamente iguales. DHS = diferencia honesta significativa.

Para el caso de las pajas tratadas con las soluciones de NaOH en la primera extracción, en la segunda extracción con agua común presentaron CFST muy

similares y fueron estadísticamente iguales entre sí, y fueron también estadísticamente iguales a la CFST presentada en el extracto con agua común.

De acuerdo con lo anterior se puede establecer que, aunque en la primera extracción el NaOH al 2 % fue el extractante que más compuestos fenólicos extrajo con relación a los otros extractantes con NaOH, en la segunda extracción las CFST en los extractos de las pajas fueron iguales entre sí, e iguales a la CFST en el agua común, por lo que se considera que el tratamiento con NaOH tampoco representa una ventaja en la extracción de estos compuestos, tomando en cuenta que el objetivo fundamental del presente trabajo fue extraer con los extractantes, la mayor CFST de las pajas en la primera extracción y después del enjuagado y secado de las mismas, presentar las menores CFST para ser utilizadas como sustratos en el crecimiento de plántulas de brócoli.

Aunque en la primera extracción hubo diferencias altamente significativas entre las CFST de las soluciones tratadas con urea y la obtenida en el agua común, en la segunda extracción, las CFST en los extractantes con alguna de las concentraciones de urea y la CFST en el tratamiento con agua común, fueron estadísticamente iguales, por lo que ninguna de las concentraciones de urea en los extractantes tampoco representó aparentemente una ventaja con respecto al agua común utilizada como extractante.

La desventaja aparente del uso de los extractantes con respecto al agua común, sin incluir al KOH, se refiere exclusivamente a las CFST encontradas en el segundo extracto, esto, sin considerar la probable interacción del tipo de “ácidos fenólicos” presentes en cada uno de los extractos, con las raíces de las plántulas de brócoli que pudieran crecer en paja de trigo tratada con alguno de estos extractantes.

Por otro lado, las CFST obtenidas en la segunda extracción en agua común y que en la primera extracción se trataron con alguna concentración de KOH, fueron las que mostraron las menores CFST entre los 20 extractantes evaluados, variando entre 4.07 mg L^{-1} y 6.40 mg L^{-1} , siendo estadísticamente diferentes a todos los demás extractantes evaluados.

En el Cuadro 5, también se presenta la disminución de las CFST entre la primera y

la segunda extracción, expresada en porcentaje. En general las CFST disminuyeron entre 97.14 % y 99.50 %.

De acuerdo con los resultados anteriores, y estableciendo que finalmente las CFST aunque fueron estadísticamente diferentes, son relativamente similares y que estas diferencias se podrían minimizar por medio de los riegos en las pajas de trigo utilizadas como sustratos, se decidió seleccionar un extractante correspondiente a cada uno de los grupos de extractantes incluyendo al agua común para el siguiente experimento.

La decisión se sustentó en la utilización de la menor concentración del extractante en cada uno de los grupos de extractantes (punto de vista económico), obteniendo finalmente la misma CFST en la segunda extracción cuando el extractante en la primera extracción se utiliza en su mayor o menor concentración en cada grupo de extractantes. Los extractantes finalmente seleccionados para el tratamiento de paja de trigo para el siguiente experimento fueron: agua común, agua a 40 °C, agua a pH 5.5, solución de NaOH al 0.5 %, solución de KOH al 0.5 % y solución de urea al 0.5 %.

3.3.3 Cuantificación de la concentración de compuestos solubles en paja de trigo por efecto del tratamiento con los 20 extractantes (primera extracción)

La concentración de compuestos solubles de la paja de trigo por efecto de los tratamientos con los 20 extractantes, se presenta en el Cuadro 5.

Para la cuantificación de los compuestos solubles, fue necesario restar en los casos del NaOH, KOH y urea, la posible contribución del peso de los hidróxidos y la urea disueltos, en el peso final estimado del material soluble total y despreciando la posible contribución de las sales minerales disueltas ya contenidas en el agua utilizada como solvente.

El porcentaje de compuestos solubles principalmente orgánicos varió entre 4.4 % y 12.29 %, ambos porcentajes en soluciones de NaOH (0.5 % y 2 % respectivamente).

Cuadro 5. Pérdida de compuestos principalmente orgánicos en el tratamiento de paja de trigo con 20 extractantes y porcentaje de fenólicos solubles totales en relación con el porcentaje total de orgánicos extraídos.

Extractante	Peso de solubles extraídos	Peso de solutos disueltos	Peso de compuestos orgánicos solubles	Pérdida de orgánicos solubles	Fenólicos solubles totales
	-----g-----			-----%-----	
Agua común	0.1210	¹ D	0.1210	6.05	13.87
Agua 40 °C	0.1432	¹ D	0.1432	7.16	12.98
Agua 50 °C	0.1288	¹ D	0.1288	6.44	14.75
Agua 60 °C	0.1316	¹ D	0.1316	6.58	12.76
Agua pH 6.5	0.1090	¹ D	0.1090	5.45	17.80
Agua pH 6.0	0.1216	¹ D	0.1216	6.08	14.80
Agua pH 5.5	0.1256	¹ D	0.1256	6.28	13.37
Agua pH 5.0	0.1366	¹ D	0.1366	6.83	13.17
NaOH 0.5 %	0.2881	0.20	0.0881	4.40	29.54
NaOH 1.0 %	0.4861	0.40	0.0861	4.30	53.48
NaOH 1.5 %	0.7795	0.60	0.1795	8.97	29.87
NaOH 2.0 %	1.0459	0.80	0.2459	12.29	23.43
KOH 0.5 %	0.2490	0.20	0.0490	2.45	nd
KOH 1.0 %	0.4053	0.40	0.0053	0.265	nd
KOH 1.5 %	0.5947	0.60	nd	nd	nd
KOH 2.0 %	0.6983	0.80	nd	nd	nd
Urea 0.5 %	0.2097	0.20	0.0097	0.485	nd
Urea 1.0 %	0.3067	0.40	nd	nd	nd
Urea 1.5 %	0.4114	0.60	nd	nd	nd
Urea 2.0 %	0.5663	0.80	nd	nd	nd

¹Despreciable. Se considera que la aportación de solutos del agua común en el peso de los orgánicos extraídos es despreciable. nd - no determinado.

Es importante señalar que aunque, dentro del intervalo de solubilidad de compuestos orgánicos señalado anteriormente, las pajas de trigo que se trataron con agua común, con agua a las tres temperaturas y los cuatro extractantes en donde se controló el pH, también presentaron concentraciones importantes de materia orgánica soluble (se asume que su gran mayoría son compuestos orgánicos).

Se reporta que la paja de trigo contiene un 12.6 % de solubles en agua (Muller 1969, citado por Staniforth. 1986). Thurman (1985), señala que entre el 25 % y 40 % de la materia orgánica puede ser solubilizada por tratamiento con agua por 24 h. Señala además, que el carbono orgánico del lixiviado inicial del material de una planta lo comprenden carbohidratos simples y ácidos orgánicos coloreados, teniendo estos últimos pesos moleculares menores de 1000 Daltons. Grossl y linskeep (1996), indican que el 91 % de la fracción soluble en agua de la paja de trigo, está compuesta por pequeños ácidos fenólicos aromáticos, polifenoles oxidados con los grupos carboxilos expuestos y sacáridos que se condensaron durante la senescencia.

Blanco y Almendros (1995), mencionan que la paja de trigo contiene un 8.7 % de solubles en agua, después de 24 h de remojo a 25 °C.

La diferencia en los porcentajes de compuestos solubles en agua en el presente trabajo con respecto a los valores reportados por la literatura, en parte se pueden explicar por la diferencia en el tiempo de extracción, los datos reportados utilizan tiempos de extracción de 24 h, mientras que en el presente trabajo se utilizó solamente 1 h. El porcentaje de fenólicos solubles totales con respecto al porcentaje total de orgánicos solubles fue de 13.71 % cuando se utilizó agua común como extractante (Cuadro 5).

Para el caso del agua caliente se aprecia que al aumentar la temperatura, la concentración de orgánicos solubles disminuye, si tomamos como punto de partida el 7.16 % de orgánicos solubles para el tratamiento con agua a 40 °C, en relación con el 6.58 % de pérdida para el caso del agua a 60 °C.

Lawther *et al.*, (1995), reportan un 4.44 % de rendimiento de materiales solubles por proteolisis con agua a 40 °C por 6 h, de los cuales el 65.84 % fue de

polisacáridos solubles en agua. La galactosa y arabinosa fueron los azúcares predominantes, mientras que también se encontraron azúcares en cantidades menores como la xylosa, manosa y glucosa. El contenido de proteína liberada fue de 1.52 %. El porcentaje de compuestos orgánicos solubles en el presente trabajo en el tratamiento con agua a 40 °C fue de 7.16 % con base en peso seco, porcentaje un poco mayor que el reportado por estos autores.

El porcentaje de fenólicos solubles totales con respecto al porcentaje total de orgánicos solubles para los tratamientos de la paja de trigo con agua a tres temperaturas se presentó en el intervalo entre 12.76 % y 14.75 % (Cuadro 5).

Para los casos del agua a diferentes pH la solubilidad de orgánicos se incrementa al disminuir el pH (aumento de la concentración de iones hidrógeno). El porcentaje de fenólicos solubles totales con respecto al porcentaje total de orgánicos solubles para los tratamientos de la paja de trigo con agua a pHs diferentes se presentó en el intervalo entre 17.80 % para el caso del agua a pH 6.5 y 13.17 % para el caso del agua a pH 5.0 y disminuye al disminuir el pH (Cuadro 5). La solubilidad de orgánicos diferentes a los compuestos fenólicos en este caso puede atribuirse entre otros aspectos, a la remoción de hemicelulosas de las celulosas por el tratamiento con ácido diluido (Broda, 1992).

En las soluciones con NaOH, la solubilidad de orgánicos solubles en porcentaje aumenta al aumentar la concentración del extractante. El incremento en la concentración de orgánicos solubles totales fue de 7.89 % entre la concentración más alta y la más baja. La CFST en general disminuyó, con excepción de la concentración de 1.0 % de NaOH, en donde se presentó un aumento de 23.94 %. Lo anterior indica que el NaOH actuó más sobre la extracción de material orgánico diferente a los fenólicos. El porcentaje de fenólicos solubles totales con respecto al porcentaje de orgánicos solubles para los tratamientos de la paja de trigo con las soluciones de NaOH se presentó en el intervalo entre 23.43 % con el NaOH al 2 % y 53.48 % con el NaOH al 1.0 % (Cuadro 5). La concentración que más compuestos fenólicos extrajo en relación con el porcentaje total de compuestos orgánicos solubles fue el NaOH a la concentración de 1 %.

Aunque al aumentar la concentración de NaOH el porcentaje de orgánicos

solubles se incrementó (Cuadro 5), los extractantes de NaOH al 1.5 % y 2 % no extrajeron más fenólicos que la concentración al 1 %, por lo que se considera que el tratamiento a la paja de trigo con estas concentraciones mas bien solubilizó la celulosa y hemicelulosa (Fry, 1989) y además sílice (Jackson, 1977), provenientes de la ruptura de los enlaces de H para el caso de las hemicelulosas y por la ruptura de los enlaces entre los monómeros de la lignina, o entre la lignina y los polisacáridos de la pared celular (Runcang *et al.*, 1995).

Lo mismo se podría aplicar para el caso de las soluciones de KOH (Runcang *et al.*, 1995), aunque desgraciadamente en el presente trabajo no se pudo cuantificar con precisión la extracción de orgánicos solubles debido a que al restar la posible contribución del KOH o la urea disueltos en estos extractantes, en el peso de los compuestos solubles de la paja, resultó que el peso de los solutos disueltos fue mayor al peso seco final registrado de los compuestos extraídos. Lo anterior hace pensar que para el caso del KOH y también para la urea, es posible que parte de ellos se queden “secuestrados” en la paja de trigo, por lo cual no se presentan en los compuestos solubles de la solución extractante, ni tampoco pudieron ser extraídos por medio de los tres enjuagues hechos con agua común. No se encontró información con respecto a este fenómeno.

La pérdida de compuestos orgánicos diferentes a los fenólicos, en los tratamientos con urea, se atribuye principalmente a la hemicelulosa disuelta por rompimiento de los enlaces de H entre los xiloglucanos que se unen a la celulosa. Se ha cuantificado que aproximadamente se solubiliza el 2 % de la pared celular con un tratamiento de urea 8 M. (Fry, 1989).

No se encontró una relación lineal entre la extracción de orgánicos solubles totales y la CFST extraída utilizando los extractantes, agua con tres temperaturas, agua a diferentes pH y NaOH con cuatro concentraciones. Los coeficientes de regresión (R^2) fueron 0.02, 0.39 y 0.62 respectivamente, resultando no significativa (NS) la regresión como fuente de variación en el análisis de varianza en los tres casos.

Aunque la prueba de solubilidad de compuestos orgánicos se realizó solamente con una repetición, se considera que los datos son confiables. Cabe mencionar que la variación en la cuantificación de las CFST fue muy pequeña cuando los

datos se obtuvieron de cuatro repeticiones, sin alcanzar el 5 %, por lo que se considera que los datos obtenidos con una repetición hubieran sido muy similares al promedio, si se hubieran obtenido de cuatro repeticiones. Las pruebas se hicieron en condiciones de laboratorio y los pesos de las pajas y los volúmenes de los extractantes se controlaron para que la variación fuera mínima.

3.4 CONCLUSIONES

1. El extractante con el que se extrajo la mayor concentración de fenólicos solubles totales en la primera extracción fue el NaOH al 2 %.
2. La mayoría de los extractantes evaluados mostraron mayor capacidad para extraer fenólicos de la paja de trigo en relación con la capacidad de extracción de fenólicos del agua común en la primera extracción.
3. Aunque la mayoría de los extractantes evaluados mostraron mayor capacidad de extracción de fenólicos que el agua común en la primera extracción, en la segunda extracción con agua común, las CFST fueron estadísticamente iguales, o las diferencias fueron relativamente pequeñas entre los extractantes, con excepción de los extractantes con alguna concentración de KOH en donde las CFST fueron menores y estadísticamente diferentes a la CFST en el agua común.
4. Las concentraciones de fenólicos solubles totales cuantificadas en los extractos de la segunda extracción, muestran que aparentemente no existe alguna ventaja relativa al tratar la paja de trigo con agua común o con alguno de los otros extractantes en la primera extracción, con excepción de los extractantes con KOH.
5. Los porcentajes de compuestos orgánicos solubles en los tratamientos de extracción variaron en el intervalo de 2.45 % en el tratamiento con KOH al 0.5 % y 12.29 % en el tratamiento con NaOH al 2 %.

6. Los porcentajes de fenólicos solubles totales cuantificados en los extractos fueron bajos en relación al porcentaje de compuestos orgánicos solubles extraídos de la paja de trigo, con excepción del extractante con NaOH al 1 % en donde el 53 % de los compuestos extraídos fueron fenólicos. Un alto porcentaje de los compuestos orgánicos solubles en los extractos son de naturaleza diferente a los fenólicos solubles totales, que pueden incluir principalmente azúcares solubles.

3.5 LITERATURA CITADA

- Blanco, M. J., and G. Almendros. 1995. Forecasting agrobiological properties of wheat straw with different additives-multiple regression models including chemical parameters. *Commun. Soil. Sci. Plant. Anal.* 26: 2473-2484.
- Broda, P. 1992. Biotechnology in the degradation and utilization of lignocellulose. *Biodegradation.* 3: 219-238.
- Fry, S. C. 1989. Analysis of cross-links in the growing cell walls of higher plants. pp 12-36. *In: Plant Fibers. Modern methods of plant analysis. Volume 10.* Linskens, H. F. and J. F. Jackson (eds.). Springer-Verlag. Berlin, Germany.
- Grossl, P. R., and W. P. Linskeep. 1996. Characterization of the hydrophobic acid fraction isolated from a wheat straw extract. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60: 158-162.
- Guenzi, W. D., and T. M. McCalla. 1966. Phenolic acids in oats, wheat, sorghum, and corn residues and their phytotoxicity. *Agronomy Journal.* 58: 303-304.
- Harborne, J. B. 1980. Secondary plant products. Plant phenolics. E. A. Bell and B. V. Charlwood. (eds.). Springer Verlag. New York, USA.
- Harborne, J. B. 1984. Phytochemical methods: A guide to modern techniques in plant analysis. 2nd. Ed. Chapman and Hall. London, UK.
- Iiyama, K., T. B. T. Lam., and B. A. Stone. 1990. Phenolic acid bridges between polysaccharides and lignin in wheat straw internodes. *Phytochemistry.* 29: 733-737.
- Jackson, M. G. 1977. The alkali treatment of straws. *Anim. Feed Sci. Technol.* 2: 105-130.
- Lawther, J. M., R. Sun., and W. B. Banks. 1995. Extraction, fractionation, and characterization of structural polysaccharides from wheat straw. *J. Agric. Food Chem.* 43: 667-675.

- Lodhi, M. A. K., R. Bilal., and K. A. Malik. 1987. Allelopathy in agroecosystems: Wheat phytotoxicity and its possible roles in crop rotation. *Journal of Chemical Ecology*. 13: 1881-1891.
- Narwal, S. S., M. K. Sarmah., and D. P. S. Nandal. 1997. Allelopathic effects of wheat residues on growth and yield of fodder crops. *Allelopathy Journal*. 4: 111-120.
- Opoku, G., T. J. Vyn., and R. P. Voroney. 1997. Wheat straw placement effects on total phenolic compounds in soil and corn seedling growth. *Can. J. Plant Sci.* 77: 301-305.
- Pan G. X., J. L. Bolton., and G. J. Leary. 1998. Determination of ferulic and *p*-coumaric acids in wheat straw and the amounts released by mild acid and alkaline peroxide treatment. *J. Agri. Food Chem.* 46: 5283-5288.
- Runcang, S., J. M. Lawther., and W. B. Banks. 1995. Influence of alkaline pretreatments on the cell wall components of wheat straw. *Industrial crops and products*. 4: 127-145.
- Scalbert, A., B. Monties., J-I. Lallemand., E. Guittet., and C. Rolando. 1985. Ether linkage between phenolic acids and lignin fractions from wheat straw. *Phytochemistry*. 24: 1359-1362.
- Staniforth, A. R. 1986. *Paja de cereales*. Traductor Pedro Ducar Maluenda. Ed. Acribia. S.A. Zaragoza, España.
- Swain, T., and W. E. Hillis. 1959. The phenolic content of *Prunus domestica*. *J. Sci. Food Agric.* 10: 63-68.
- Thurman, E. M. 1985. *Organic geochemistry of natural waters*. Nihjoff/Junk Publ., Dordrecht, The Netherlands.
- Waterman, P. G., and S. Mole. 1994. pp. 86-88. Analysis of phenolic plant metabolites. *In: Methods in Ecology*. Blackwell Scientific Publications. Oxford, Great Britain.

CAPÍTULO IV

**EVALUACIÓN DE SEIS SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO Y DOS TURBAS
COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI**

EVALUACIÓN DE SEIS SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO Y DOS TURBAS COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI

Fidel René Díaz Serrano, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2011

Se evaluaron seis sustratos de paja de trigo con extracción de fenólicos en el crecimiento de plántulas de brócoli. Los extractantes de los compuestos fenólicos en la paja de trigo fueron: agua común, agua a 40 °C, agua con pH 5.5, NaOH 0.5 %, KOH 0.5 % y urea 0.5 %. Las concentraciones iniciales de fenólicos solubles totales en los sustratos no influyeron en los porcentajes de emergencia de las plántulas a los nueve días después de la siembra. Las concentraciones de fenólicos solubles totales (CFST) en los sustratos fueron disminuyendo durante el período de 30 días en que las plántulas de brócoli permanecieron en los sustratos. La disminución en las CFST en los sustratos varió entre 59.63 % en el sustrato con extracción de fenólicos con urea al 5 % y 78.62 % en el sustrato con extracción con agua común. Las CFST en los sustratos de paja de trigo al final del experimento variaron entre 6.34 mg L⁻¹ y 8.67 mg L⁻¹ sugiriendo que estas concentraciones ya no afectan el crecimiento de las raíces y parte aérea de las plántulas de brócoli, pudiendo ser incluso estimulante.

Los sustratos de paja de trigo no presentaron pérdidas importantes de materia orgánica en el transcurso del experimento, clasificándose como materiales altamente bioestables. Ninguna de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo presentó pesos secos de vástagos iguales estadísticamente a los pesos secos que presentaron las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos testigos. El peso seco de la parte aérea de las plántulas de brócoli que crecieron en el mejor sustrato de paja de trigo representó solamente el 79.50 % del peso seco de las plántulas de brócoli de las plántulas que crecieron en el mejor sustrato con base en turba (Sogemix VT-M).

Palabras clave: *paja de trigo, sustratos, fenólicos, plántulas de brócoli*

EVALUATION OF SIX WHEAT STRAW SUBSTRATES AND TWO COMMERCIAL PEAT MOSS IN THE GROWING OF BROCCOLI SEEDLINGS

Fidel René Díaz Serrano, Ph. D.
Postgraduate College, 2011

Six wheat straws and two commercial peat mosses were evaluated as substrates in the growing of broccoli seedlings. The extractants of wheat straw phenolic compounds were tap water, 60 °C water, water pH 5.5, NaOH 0.5 %, KOH 0.5 % and urea 0.5 %. The initial concentrations of total phenolic compounds in wheat straw substrates did not affect the emergence percentage of seedlings at nine days after seeding with respect to the percentages of emergence of seedlings recorded in the peat moss commercial substrates. The total soluble phenolic concentrations (TSPC) decreased during the period of 30 days of the experiment in which the seedlings were growing in the substrates. The decrease in the TSPC in wheat straw substrates varied among 59.63 % in the substrate treated with urea 0.5 % and 78.62 % in the substrate treated with tap water.

The TSPC in the wheat straw substrates at the end of the experiment varied from 6.34 mg L⁻¹ to 8.67 mg L⁻¹ suggesting that these concentrations did not affect the growth of the root and aerial parts of the broccoli seedlings and that probably had a stimulant effect.

The wheat straw substrates did not show important losses of organic matter during the time of the experiment, being classified as substrates with high bioestability.

No one of the seedlings that growth in the wheat straw substrates showed aerial parts dry weights statistically similar to those obtained in seedlings that were grown in the peat moss substrates.

The aerial dry weight of broccoli seedlings that were grown in the best wheat straw substrate represented just the 79.50 % of the dry weight of the aerial part of seedlings that were grown in the best peat moss substrate (Sogemix VT-M).

Key words: *wheat straw, substrates, phenolics, broccoli seedlings.*

4.1 INTRODUCCIÓN

De acuerdo con los resultados descritos en el Capítulo I, la extracción de fenólicos solubles con agua común, las concentraciones de fenólicos solubles totales que se extrajeron de la paja de trigo utilizada como sustrato, no fueron suficientes para que las plántulas de brócoli no presentaran efectos de inhibición sobre el crecimiento de las raíces y la parte aérea de plántulas de brócoli, por lo que en el Capítulo III se evaluaron 20 extractantes de los fenólicos, seleccionando seis extractantes al final de las pruebas.

Con el uso de alguno de los nuevos extractantes, se espera que las concentraciones iniciales de fenólicos en las pajas de trigo utilizadas como sustratos, sean más bajas que las concentraciones de fenólicos solubles totales presentes en el sustrato al cual se le extraen los fenólicos con agua común, y por lo tanto se espera que el efecto de inhibición del crecimiento de los compuestos fenólicos presentes en la paja de trigo tratada con extractantes diferentes al agua común sea menor que la inhibición que se presenta en el sustrato al que se le extraen los fenólicos con agua común.

Por otro lado, se hizo un cambio en la granulometría de los sustratos de paja de trigo. Las granulometrías en porcentaje en los sustratos de paja de trigo evaluados en el experimento descrito en el Capítulo I fueron de 50-10-40, 50-20-30 y 40-30-30.

De acuerdo con las observaciones realizadas sobre las propiedades físicas de estos sustratos se vio que los sustratos señalados anteriormente presentaron una alta retención de humedad, y esta permaneció en el sustrato durante bastante tiempo, situación que influyó en el proceso de intercambio gaseoso con la atmósfera y por lo tanto en la respiración de las raíces y por consecuencia en el crecimiento de la parte aérea de las plántulas de brócoli.

De acuerdo con pruebas de porosidad de aire realizadas previamente, se determinó que la granulometría 50-50 (%) presentó una porosidad de aire de 6.22 %, considerándola como adecuada para el crecimiento de las plántulas de brócoli cuando se comparó con las porosidades de aire determinadas en los sustratos

testigos Sunshine 3 y Sunshine, con porosidades de aire de 2 % y 4 % respectivamente. Por lo anterior, se decidió que todos los sustratos para este experimento tuvieran esta granulometría (50 % de partículas menores de 2.00 mm y mayores e iguales a 1.00 mm y 50 % de partículas menores de 1.00 mm y mayores e iguales a 0.5 mm).

La porosidad de aire es fundamental en un sustrato, debido a que la respiración de las raíces depende de esta (Ansorena, 1994). El O₂ necesario para la respiración de las raíces se difunde de la fase gaseosa a la fase líquida y la concentración en esta última fase depende principalmente de la temperatura del sustrato.

El objetivo de este experimento fue evaluar seis sustratos de paja de trigo derivados del tratamiento de extracción de fenólicos solubles con seis extractantes, y dos turbas comerciales como testigos, en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot (Sakata Seeds).

4.2 MATERIALES Y MÉTODOS

4.2.1 Extractantes de fenólicos en la paja de trigo

La extracción de fenólicos en paja de trigo variedad Saturno, se realizó con seis extractantes seleccionados, con base en los resultados obtenidos del experimento descrito en el Capítulo III, los cuales fueron: agua común, agua a 40 °C, agua a pH 5.5, NaOH al 0.5 %, KOH al 0.5 % y urea al 0.5 %.

4.2.2 Acondicionamiento de la paja de trigo y elaboración de los sustratos

La granulometría de la paja de trigo utilizada en este experimento fue de 50 % de partículas menores a 2.0 mm y mayores e iguales a 1.0 mm y 50 % de partículas menores de 1.0 mm y mayores e iguales a 0.5 mm, con base en volumen.

La extracción de los compuestos fenólicos de la paja de trigo con los seis extractantes seleccionados se realizó en cubetas de plástico de 20 L utilizando una relación 1: 2 (sustrato: extractante), dejando reposar el contenido de la cubeta

por una hora. La extracción se realizó en el Laboratorio de Nutrición Vegetal, Área de Nutrición Vegetal, Programa de Edafología, Instituto de Recursos Naturales (IRENAT) del Colegio de Postgraduados, en Montecillo, Texcoco, Edo. de México. Pasado este tiempo, los extractantes se decantaron con la ayuda de una malla de plástico para evitar la pérdida de partículas de paja, posteriormente todos los tratamientos se enjuagaron tres veces con agua común con el mismo volumen utilizado para la extracción, y las pajas con el agua del último lavado se neutralizaron a pH 7, agregando H₂SO₄ diluido o NaOH diluido dependiendo del extractante utilizado y se dejaron reposar por una h para alcanzar el equilibrio. La verificación del pH de la solución en las cubetas se hizo con un equipo Conductronic Modelo 20. Posteriormente a la neutralización, la paja se exprimió con un pedazo de tela y se secó al sol. La paja seca se guardó en bolsas de plástico hasta su posterior utilización como sustrato. La elaboración de los sustratos se realizó durante la segunda quincena del mes de enero de 2003.

4.2.3 Sustratos evaluados

En el Cuadro 1, se presentan los ocho sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot.

Cuadro 1. Sustratos evaluados en el experimento y extractantes de fenólicos solubles totales utilizados.

Sustrato	Extractante
Paja de trigo	Agua común
Paja de trigo	Agua 40 °C
Paja de trigo	Agua pH 5.5
Paja de trigo	NaOH 0.5 %
Paja de trigo	KOH 0.5 %
Paja de trigo	Urea 0.5 %
Sogemix VT-M	-----
Sunshine	-----

El experimento de evaluación de los sustratos en el crecimiento de plántulas de brócoli, se llevó a cabo en un invernadero del Área de Nutrición Vegetal, en el Colegio de Posgraduados, en Montecillo, Texcoco, Edo. de México, durante el periodo del 1 de febrero al 2 de marzo del 2003.

4.2.4 Llenado de charolas y siembra

Las charolas utilizadas fueron de plástico reciclado termo formado de color negro de 200 celdas cuadradas con una configuración de 10 x 20, de 2.38 cm de lado y 3.81 cm de profundidad, con un volumen de 13.11 cm³ por celda (TLC, Polyform, Inc., S/F). Los sustratos se humedecieron ligeramente con agua destilada hasta alcanzar una humedad aproximada de 60 %, para el llenado de las charolas, las cuales se llenaron manualmente y se presionaron ligeramente con la parte inferior de otra charola para obtener mayor uniformidad en el llenado de las celdas. Se dejó aproximadamente un cm entre la parte superior de la charola y la superficie del sustrato, con el fin de hacer la siembra lo más uniforme posible.

Se sembraron 50 celdas por repetición (dos repeticiones por charola) con dos semillas por celda, dejando diez hileras de la charola como espacio libre entre los sustratos. Se utilizó el cv. de brócoli Patriot (Sakata Seeds). La semilla se tapó con vermiculita de tamaño mediano hasta llenar la charola. El experimento se estableció con ocho sustratos y cuatro repeticiones en un diseño de bloques al azar.

4.2.5 Propiedades químicas iniciales en los sustratos

4.2.5.1 pH, conductividad eléctrica y concentración de fenólicos solubles totales

Los sustratos se regaron con agua destilada con una aspersora manual hasta aproximadamente su capacidad de contenedor, dejando reposar por una hora y posteriormente se adicionaron 6.5 mL de agua destilada (relación 1: 2; agua:

sustrato; v/v) en cada una de cuatro celdas y los lixiviados se colectaron en pequeñas bolsas de plástico. En este experimento, se aumentó el volumen de agua adicionada a cada celda debido a que al adicionar únicamente 5 mL en el experimento anterior de evaluación de sustratos (Capítulo I), la cantidad de lixiviado para el análisis era muy pequeña.

Los lixiviados de cada una de las cavidades por sustrato se juntaron y sobre esta solución se determinaron el pH, la conductividad eléctrica (CE) y la concentración de fenólicos solubles totales (CFST) de los sustratos al inicio del experimento. Las determinaciones del pH y la CE se hicieron directamente en los lixiviados.

La metodología para la cuantificación de las CFST se describió detenidamente en capítulos anteriores. Los análisis estadísticos de estas variables se hicieron para un diseño de bloques completos al azar con ocho tratamientos y cuatro repeticiones y la comparación entre medias se hizo por medio de la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

Después de tomar las muestras para la cuantificación del pH, la CE y la CFST en los sustratos, las charolas se cubrieron con un plástico negro y se pusieron en la sombra para su germinación. Las charolas con los sustratos y la semilla, se regaron inicialmente con agua común ($\text{pH} \cong 7.5$) hasta la emergencia de las plántulas. Posteriormente, a los tres días después de la emergencia (doce días después de la siembra) se dejó únicamente una plántula por celda.

4.2.5.2 Materia orgánica de los sustratos

Con la finalidad de cuantificar la posible degradación de los sustratos de paja de trigo, en el transcurso del experimento, se determinaron en los ocho sustratos el porcentaje inicial y final de materia orgánica (MO).

Se pesaron 2 g de cada sustrato, los cuales previamente se habían secado en una estufa a una temperatura de 60 °C hasta peso constante, y se colocaron en crisoles de porcelana, los cuales previamente se pusieron a peso constante y se identificaron con números. Los crisoles se introdujeron a una mufla. La temperatura de la mufla se fue incrementando poco a poco hasta llegar a una

temperatura de 550 °C, permaneciendo en esta por un tiempo de cuatro h, después de las cuales la mufla se apagó y se dejó enfriar hasta otro día. Los crisoles se transfirieron con unas pinzas para crisol a un desecador para evitar su humectación, y se fueron tomando uno a uno para pesarlos en una balanza analítica. El porcentaje de materia orgánica de los sustratos se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula para la determinación de las cenizas, y posteriormente por diferencia de 100.

$$\text{Cenizas (\%)} = 100 \times \frac{(T + C) - T}{(T + MS) - T}$$

en donde:

T = peso del recipiente seco y tarado, C = peso de las cenizas, MS = peso de la muestra seca (Ansorena, 1994).

4.2.6 Solución nutritiva

Los nutrimentos para las plántulas se suministraron inmediatamente después de la emergencia de las plántulas a los nueve días después de la siembra (DDS), con solución nutritiva al 50 % y se aplicó con un pH de 5.5 hasta los 18 DDS. Posteriormente del 19vo. al 30vo. día la solución nutritiva se aplicó al 100 %. La solución nutritiva que se utilizó como fuente de nutrimentos para las plántulas y su concentración, también se seleccionó con base en los resultados de un experimento anterior (Capítulo I). La concentración de la solución al 200 % en el experimento de evaluación de sustratos (Capítulo I), no ayudó a disminuir significativamente el efecto de inhibición de los compuestos fenólicos presentes en la paja de trigo sobre el crecimiento de plántulas de brócoli, por lo que decidió disminuir a la mitad la concentración de dicha solución nutritiva. La composición nutrimental en meq L⁻¹ de la solución al 100 % se describe en el Cuadro 2.

La solución nutritiva se preparó partiendo de soluciones madre (1 Normal - 1N ó

0.5 N) con fertilizantes grado reactivo. Las especificaciones para la elaboración de la solución nutritiva se presentan en el Cuadro 3.

Cuadro 2. Concentración de nutrimentos en la solución al 100 %.

Aniones meq L ⁻¹			Cationes meq L ⁻¹			
NO ₃	H ₂ PO ₄	SO ₄	K	Ca	Mg	NH ₄ (30 %)
8.4	1	10.6	7	5.4	4.0	3.6
meq aniones = 20			meq cationes = 20			
mM = 30; PO = 0.072 MPa; CE = 2.35 dS m ⁻¹						

meq L⁻¹ = mili equivalentes por litro; mM = mili moles totales; PO = Presión osmótica (MPa - mega Pascales). Se adicionaron 1 mL L⁻¹ de micro nutrimentos y 0.5 mL L⁻¹ de Fe-EDTA con una concentración de 5.6 mg L⁻¹ en la solución nutritiva final.

Los micronutrimentos se prepararon también a partir de compuestos grado reactivo analítico (Hewitt, 1966) de acuerdo a lo que se muestra en el Cuadro 4.

Cuadro 3. Especificaciones para la preparación de la solución nutritiva al 100%.

Fertilizante	Peso molecular	Peso equivalente	Solución madre 1 N	Volumen adicionado a la solución nutritiva final	Concentración en la solución nutritiva final
	-----g-----			mL L ⁻¹	meq L ⁻¹
Ca(NO ₃) ₂ · 4H ₂ O	236.08	118.040	118.040	5.4	5.4
KNO ₃	101.10	101.10	101.10	3.0	3.0
K ₂ SO ₄ *	174.00	87.13	87.13*	6.0	3.0
MgSO ₄ · 7H ₂ O	246.37	123.18	123.18	4.0	4.0
KH ₂ PO ₄	136.09	136.09	136.09	1.0	1.0
(NH ₄) ₂ SO ₄	132.14	66.07	66.07	3.6	3.6

* El K₂SO₄ se preparó a una concentración 0.5 N debido a su baja solubilidad.

El Fe como micronutriente se preparó por separado con $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ y sal disódica del ácido etilendiaminotetracético ($\text{Na}_2\text{-EDTA}$), con una concentración de 5.6 g L^{-1} . De esta solución se tomaron 0.5 mL L^{-1} para la solución nutritiva final de riego, suministrando una concentración de 2.8 mg L^{-1} de Fe-EDTA.

Cuadro 4. Fuentes de micronutrientes, preparación de la solución madre y concentración en la solución nutritiva final suministrada a las plántulas de brócoli.

Compuesto químico	Peso disuelto en la solución madre de micronutrientes	Concentración del nutriente en la solución madre	Concentración en la solución nutritiva final
	g L^{-1}	g L^{-1}	mg L^{-1}
H_3BO_3	2.88	0.50	0.50
$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1.81	0.50	0.50
$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	0.22	0.05	0.05
$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.18	0.045	0.045
$\text{H}_2\text{MoO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	0.02	0.01	0.01

Todos estos compuestos en conjunto se disolvieron en un L de agua destilada y se adicionó 1 mL de esta mezcla de micronutrientes por L de solución final.

El número de riegos diario con solución nutritiva varió de dos a tres, según las condiciones ambientales y en algunas ocasiones se regó con agua acidulada a pH 5.5, para controlar la conductividad eléctrica en los sustratos. Los riegos se proporcionaron a las plántulas en forma abundante con una aspersora manual.

4.2.7 Número de plántulas emergidas a los nueve días después de la siembra.

Se contó el número de plántulas emergidas del sustrato a los nueve días después de la siembra (DDS). Los resultados de esta variable se procesaron por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con ocho tratamientos y cuatro repeticiones, y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

4.2.8 Propiedades químicas de los sustratos a los 15 y 22 días después de la siembra

Con el objetivo de cuantificar los posibles cambios en las propiedades químicas iniciales en los ocho sustratos durante el experimento también se cuantificaron el pH, la CE y la CFST a los 15 y 22 DDS. Los datos por sustrato se registraron en las cuatro repeticiones.

4.2.8.1 pH y conductividad eléctrica

Para la cuantificación de estas propiedades, a cada una de cuatro celdas por tratamiento con plántulas tomadas al azar en las charolas, se les agregaron 10 mL de agua destilada (método de vertido) y los lixiviados se recolectaron en una bolsita de plástico transparente previamente identificada, haciendo una muestra compuesta de las cuatro celdas. Posteriormente en el laboratorio se determinaron el pH y la CE, con el equipo mencionado con anterioridad.

4.2.8.2 Concentración de fenólicos solubles totales

Después de cuantificar las propiedades anteriores, se tomaron 2.1 mL del extracto restante y se cuantificaron las concentraciones de fenólicos solubles totales (CFST) de acuerdo con el procedimiento ya señalado anteriormente para esta propiedad. La medición se hizo por cuadruplicado en cada tratamiento.

Los datos de las propiedades químicas determinadas a los 15 y 22 DDS se procesaron por medio de un análisis de varianza correspondiente a un diseño de bloques al azar con ocho tratamientos y cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

4.2.9 Densidad de pelos radicales a los 15 y 22 días después de la siembra

A los 15 y 22 días después de la siembra (DDS) se realizaron observaciones de la

densidad de pelos radicales en los cepellones. Como las raíces en los sustratos no se habían desarrollado lo suficiente, los cepellones se extrajeron con la ayuda de una llave larga.

4.2.10 Variables evaluadas a los 30 días después de la siembra (colecta de las plántulas)

4.2.10.1 En sustratos

4.2.10.1.1 pH y conductividad eléctrica

Procedimiento similar al señalado para la cuantificación de estas propiedades a los 15 y 22 DDS (cuatro repeticiones).

4.2.10.1.2 Concentración de fenólicos solubles totales

Procedimiento similar al señalado para la cuantificación de estas propiedades a los 15 y 22 DDS (cuatro repeticiones).

4.2.10.1.3 Degradación microbiológica

Para la cuantificación de esta variable, se tomaron tres cepellones de tres plántulas por repetición en cada tratamiento, los cuales se secaron en una estufa a 60 °C. Una vez secos, los cepellones se abrieron con los dedos por uno de sus lados y se desmenuzaron, evitando que el sustrato llevara raíces secas y se mezclaron para obtener una muestra homogénea. Se tomó una muestra de 0.1 g de sustrato por repetición, y se distribuyó primeramente en el campo visual del estereoscopio en el aumento de menor magnitud y posteriormente se observó con los de mayor magnitud.

La evaluación se hizo con la siguiente escala visual: 1) degradación poco apreciable (1-10 %), 2) degradación muy moderada (11-25 %), 3) degradación

moderada (26-50 %), 4) degradación intensa (51-75 %), 5) degradación muy intensa (>75 %), y se estimó sobre el área total de los tejidos de las partículas del sustrato, tomando como patrón los mismos materiales sin degradar.

4.2.10.1.4 Materia orgánica y bioestabilidad

Procedimiento similar al señalado para la cuantificación de la materia orgánica (MO) en los sustratos al inicio del experimento. La bioestabilidad se calculó dividiendo el porcentaje de MO final entre el porcentaje de MO inicial y se multiplicó por 100. El porcentaje de pérdida de MO se calculó por diferencia entre los porcentajes de MO inicial y final.

4.2.10.2 En plántulas

4.2.10.2.1 En vástagos

4.2.10.2.1.1 Lecturas SPAD

En diez plántulas tomadas al azar en cada repetición en las hojas más desarrolladas se tomaron diez lecturas SPAD. El promedio de las diez lecturas se tomó como promedio de cada repetición.

Se colectaron diez plántulas al azar de la parte central de cada bloque de plántulas, de las que se separó el cepellón del vástago con unas tijeras, y se cuantificaron las siguientes variables de la plántula en el vástago.

4.2.10.2.1.2 Longitud de vástagos

Esta variable se evaluó desde la inserción de la raíz en el tallo (cuello de la raíz) hasta la punta de la hoja superior.

4.2.10.2.1.3 Diámetro de tallo

Esta variable se evaluó a los dos o tres mm abajo de las hojas embrionarias de la plántula.

4.2.10.2.1.4 Peso de materia seca de vástagos

Se tomaron los diez vástagos de las diez plántulas de brócoli colectadas, se introdujeron en una bolsa de papel y se pusieron en una estufa para su secado hasta peso constante. Se cuantificó la materia seca.

Con la finalidad de tratar de explicar mejor el fenómeno de la inhibición de los compuestos fenólicos presentes en la paja de trigo sobre las variables de crecimiento en las plántulas de brócoli, se corrieron análisis de regresión simple y múltiple tomando como variables dependientes la longitud, el diámetro y el peso de materia seca de vástagos y como variables independientes la CFST, el pH y la CE, a los 15, 22 y 30 DDS. Se utilizó el paquete estadístico S.A.S, versión 6.12.

4.2.10.2.1.5 Deficiencias nutrimentales

Visualmente se revisaron las plántulas que crecieron en las cuatro repeticiones de los ocho sustratos evaluados, registrando si existían deficiencias nutrimentales.

4.2.10.2.2 En raíces

4.2.10.2.2.1 Color de raíces

Esta variable se calificó visualmente por medio de la extracción manual de cinco plántulas extras a las diez utilizadas para evaluar el desarrollo de las plántulas por medio de la siguiente escala:

- 1) blancas, 2) ligeramente amarillas, 3) café-amarillento.

4.2.10.2.2 Facilidad para extraer el cepellón

Esta variable se calificó también en las cinco plántulas tomadas para evaluar la variable anterior, utilizando la siguiente escala: 1) fácil de extraer, 2) moderadamente fácil de extraer y 3) difícil de extraer. La evaluación de esta variable se realizó después de un riego con agua común y corriente.

4.2.10.2.3 Densidad de pelos radicales

Después de extraer las plántulas de las cavidades de las charolas y evaluar la variable anterior, los cepellones, se llevaron a un estereoscopio para observar la densidad de pelos radicales presentes en las raíces que crecieron en los sustratos evaluados de acuerdo con la siguiente escala visual:

- 1) alta densidad, 2) moderada densidad, 3) baja densidad y 4) nula densidad.

Las variables cuantitativas determinadas en las plántulas a los 30 DDS se procesaron por medio del análisis de varianza correspondiente a un diseño de bloques al azar con ocho tratamientos y cuatro repeticiones y la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$. Las variables cualitativas se reportan de acuerdo a la calificación asignada en la escala utilizada.

4.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.3.1 Propiedades químicas iniciales

4.3.1.1 pH

El análisis de varianza para esta variable muestra que existió diferencia significativa entre los sustratos evaluados (Cuadro 5). El sustrato Sunshine fue el que presentó el pH más ácido (4.0), valor que pudiera influir de forma negativa en

la germinación y crecimiento posterior de las plántulas de brócoli. El sustrato Sogemix VT-M fue el único sustrato que mostró un valor adecuado de pH (5.45) de acuerdo al intervalo óptimo entre 5.0 y 5.5 señalado por Bunt (1988) para los sustratos orgánicos. Los sustratos de paja de trigo tuvieron pH ligeramente ácidos, en el intervalo de 6.40 a 6.65 y fueron estadísticamente iguales entre sí.

Cuadro 5. Propiedades químicas iniciales de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot.

Sustrato (extractante)	PH	CE	CFST	MO inicial
		dS m ⁻¹	mg L ⁻¹	%
Paja (agua común)	6.50 a	0.54 b	34.39 a	94.25 ab
Paja (agua 40 ° C)	6.50 a	0.56 b	18.58 c	95.00 ab
Paja (agua pH 5.5)	6.47 a	0.57 b	31.56 a	94.50 ab
Paja (NaOH 0.5 %)	6.65 a	0.62 b	23.06 b	95.25 ab
Paja (KOH 0.5 %)	6.65 a	0.59 b	20.72 bc	94.00 b
Paja (Urea 0.5 %)	6.40 a	0.55 b	21.27 bc	93.37 b
Sogemix VT-M	5.45 b	2.15 a	nd	56.37 c
Sunshine	4.20 c	0.07 c	nd	96.37 a
Significancia	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
DHS	0.416	0.132	4.45	2.01

CE = conductividad eléctrica; CFST = concentración de fenólicos solubles totales; MO = materia orgánica. nd = no determinado. DHS = diferencia honesta significativa.

4.3.1.2 Conductividad eléctrica

La CE es una medida indirecta de la concentración de sales disueltas en una solución. También en el Cuadro 5, se presentan los valores de CE de los sustratos al inicio del experimento. El análisis de varianza detectó diferencias altamente significativas entre los valores promedio de CE en los sustratos. El sustrato

Sunshine fue el que presentó la menor CE con un valor de 0.07 dS m^{-1} . Las turbas en su estado natural no tienen concentraciones apreciables de sales minerales (Canadian Sphagnum Peat Moss Association, 1996).

Los sustratos de paja de trigo presentaron valores de CE en el intervalo de 0.54 dS m^{-1} y 0.62 dS m^{-1} , siendo iguales estadísticamente. El sustrato Sogemix VT-M fue el que presentó la CE más alta (2.15 dS m^{-1}). Este tipo de sustrato posee una CE relativamente alta porque en el proceso de su elaboración se le adicionan cantidades específicas de fertilizantes (macronutrientes y micronutrientes).

El sustrato Sogemix VT-M presentó un pH entre 5.2 y 6.2 (relación 1: 3; sustrato: agua destilada; v/v) y una CE entre 1.6 dS m^{-1} y 2.2 dS m^{-1} en extracto de saturación (Premier, S/F).

4.3.1.3 Concentración inicial de fenólicos solubles totales en los sustratos de paja de trigo

Las CFST iniciales en los sustratos de paja de trigo se presentan en el Cuadro 5. Los sustratos que tuvieron mayores CFST fueron los sustratos a los cuales se les extrajeron los compuestos fenólicos con agua común y agua a pH 5, siendo entre ellos estadísticamente iguales. Los demás sustratos presentaron menores concentraciones, siendo la paja de trigo a la que se le extrajeron los fenólicos con agua a $40 \text{ }^\circ\text{C}$ la que presentó las menores CFST junto con las pajas a las que se les extrajeron los fenólicos con KOH al 0.5 % y urea al 0.5 %. Las CFST en los sustratos iniciales en este experimento, presentaron valores diferentes a los cuantificados en la segunda extracción en el experimento anterior (Capítulo III), debido a que las relaciones sustrato: agua destilada fueron diferentes. Las CFST fueron superiores en los sustratos de paja de trigo que en las pruebas de extracción con diferentes extractantes (Capítulo III), debido a un efecto de concentración de la solución con fenólicos en un volumen menor de agua destilada. Las CFST iniciales en los sustratos en este experimento fueron menores a las cuantificadas en el experimento anterior debido a que los volúmenes utilizados en el primero fueron de 20 mL de sustrato por 40 mL de agua (relación

1: 2), mientras que en el presente experimento fue de 6.5 mL en 13 mL de sustrato ya húmedo (relación 1: 2).

4.3.1.4 Materia orgánica

La MO inicial en los sustratos de paja de trigo (%) y en la turba Sunshine fue muy alta debido a que en estos materiales la MO se encuentra sin degradar (paja) o muy poco degradada (Sunshine) y no contienen ningún aditivo. El Sogemix VT-M, presentó el porcentaje de MO más bajo (56.37 %) debido a que además de material orgánico (musgo *Sphagnum*), contiene aproximadamente un 30 % de vermiculita fina (en volumen), cal calcítica y dolomítica, macro y micronutrientes (Premier, S/F).

No hubo diferencia estadística significativa en el contenido de MO entre los sustratos de paja de trigo; en promedio ninguno de los tratamientos de extracción de fenólicos afectó significativamente el contenido de MO de los mismos; los extractantes no disolvieron significativamente el material orgánico constituyente de los tejidos de la paja de trigo, los que se disolvieron fueron compuestos orgánicos fácilmente solubles, entre los cuales se pueden incluir a los fenólicos.

4.3.2 Porcentaje de plántulas emergidas

De acuerdo con los datos del Cuadro 6, no hubo diferencia significativa en el porcentaje de plántulas emergidas entre los sustratos, a los nueve DDS. Se observa que aunque no hubo diferencias significativas entre los sustratos en esta variable los tratamientos con pH 5.5, NaOH al 5 %, KOH al 5 % y urea al 5 % presentaron porcentajes de emergencia de plántulas inferiores a los sustratos testigos con diferencias que alcanzaron un 9 %.

Lo anterior supone que ninguna de las propiedades químicas de los sustratos como el pH, la CE y la CFST inhibió significativamente la emergencia de las plántulas desde la siembra hasta los nueve DDS.

Cuadro 6. Porcentaje de plántulas emergidas en ocho sustratos a los nueve DDS.

Sustrato (extractante)	Plántulas emergidas
	%
Paja (agua común)	91.0 a
Paja (agua 40 °C)	91.5 a
Paja (agua pH 5.5)	88.0 a
Paja (solución NaOH 0.5 %)	88.5 a
Paja (solución KOH 0.5 %)	86.0 a
Paja (solución urea 0.5 %)	84.0 a
Sogemix VT-M	93.0 a
Sunshine	93.5 a
Significancia	0.2938 (NS)
DHS	14.02

Valores con la misma letra en la columna son iguales estadísticamente. DHS = diferencia honesta significativa.

4.3.3 Propiedades químicas de los sustratos durante el experimento

4.3.3.1 pH

De acuerdo con el pH de 4.0 del sustrato Sunshine se decidió dar los riegos iniciales, hasta la emergencia de las plántulas, con agua común (pH = 7.50) para neutralizar la acidez de este sustrato, pensando a la vez que el pH del agua común al aplicarlo en los demás sustratos no influiría en el porcentaje de plántulas emergidas entre los sustratos evaluados. Al aplicar agua ligeramente alcalina en el sustrato Sogemix VT-M se esperaba alcanzar un pH de aproximadamente 6.5. En el caso de los sustratos de paja de trigo se esperaba un incremento en el pH, sin sobrepasar el pH del agua común (7.5).

En la Figura 1, se muestran los valores de pH obtenidos en los sustratos a los 0, 15, 22 y 30 DDS. El pH de los sustratos de paja de trigo a los 15 DDS se incrementó de acuerdo al registro realizado al inicio del experimento. Sin embargo, aunque en la Figura 1, el incremento de pH a los 15 DDS se muestra como un

incremento drástico, en la realidad no fue así, debido a que el periodo transcurrido entre la primera lectura y la segunda fue de 15 días.

También en los sustratos testigos se observó un incremento en esta propiedad química a los 15 DDS. El incremento pudo haber sido el resultado de la aplicación de agua común ($\text{pH} = 7.45$) durante los primeros ocho días, antes de la emergencia de las plántulas. Sin embargo, de acuerdo con datos presentados en el Capítulo VII la paja de trigo por sí misma, tiende a incrementar su pH , independientemente de la aplicación de agua común con $\text{pH} 7.45$.

Los sustratos de paja de trigo a los 22 DDS mostraron casi los mismos valores de pH que tuvieron a los 15 DDS, en cambio en los sustratos testigos, el pH mostró una tendencia a disminuir ligeramente.

El pH de los sustratos de paja de trigo a los 30 DDS disminuyó. La disminución del pH en todos los sustratos se debió a la aplicación de la solución nutritiva a $\text{pH} 5.5$. Aunque en el Figura 1, se observa un cambio drástico de pH entre la lectura a los 22 DDS y 30 DDS en los sustratos de paja de trigo, en realidad el cambio no fue así, sino que fue paulatino con relación al tiempo transcurrido y el efecto sobre las plántulas no fue tan pronunciado. La disminución del pH en los sustratos de paja de trigo fue el resultado de la neutralización de los bicarbonatos contenidos en la paja de trigo provenientes del agua de riego con la cual se regaron los sustratos durante los primeros ocho DDS, con la constante aplicación de la solución nutritiva (dos o tres riegos diariamente) a $\text{pH} 5.5$ y su posterior disminución al no haber más bicarbonatos por neutralizar, aunado a la neutralización de compuestos inherentes a la paja de trigo, los que mostraron una tendencia a aumentar el pH .

El pH de los sustratos testigos a los 30 DDS disminuyó ligeramente con respecto al valor registrado a los 22 DDS. Es conveniente mencionar que el sustrato Sogemix VT-M contiene carbonato de calcio, que ayuda a mantener el pH en un intervalo adecuado para el crecimiento de las plantas.

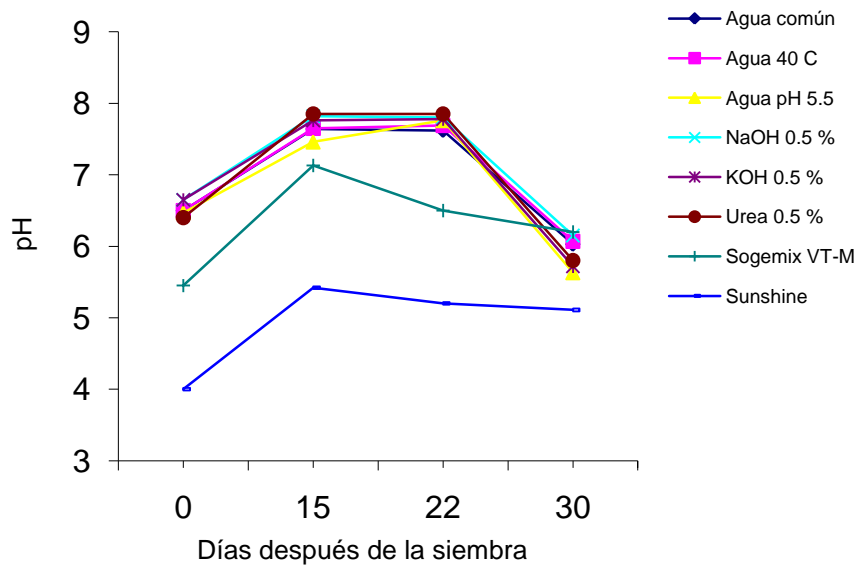


Figura. 1. pH de los sustratos durante el experimento.

4.3.3.2 Conductividad eléctrica

La CE (dS m^{-1}) de los sustratos evaluados a los 0, 15, 22 y 30 DDS, se muestra en la Figura 2. La CE inicial de todos los sustratos se encontró en el intervalo considerado como adecuado (0.75 dS m^{-1} y 1.99 dS m^{-1}) para la germinación y el crecimiento de las plantas en sustratos orgánicos (Bunt, 1988). A los 15 DDS la CE de todos los sustratos se incrementó debido a la adición de la solución nutritiva al 50 %, conservándose aún en el intervalo de valores de CE considerado como adecuado para el crecimiento de las plantas, ya señalado con anterioridad.

La CE de los sustratos de paja de trigo a los 22 DDS, disminuyó con referencia a los valores registrados a los 15 DDS, lo que nos hace suponer que parte de los nutrimentos agregados a través de la solución nutritiva reaccionaron con la paja de trigo, principalmente los compuestos nitrogenados, o bien, una parte de los compuestos nitrogenados de la solución nutritiva fue utilizada por microorganismos en la transformación de compuestos orgánicos solubles en agua.

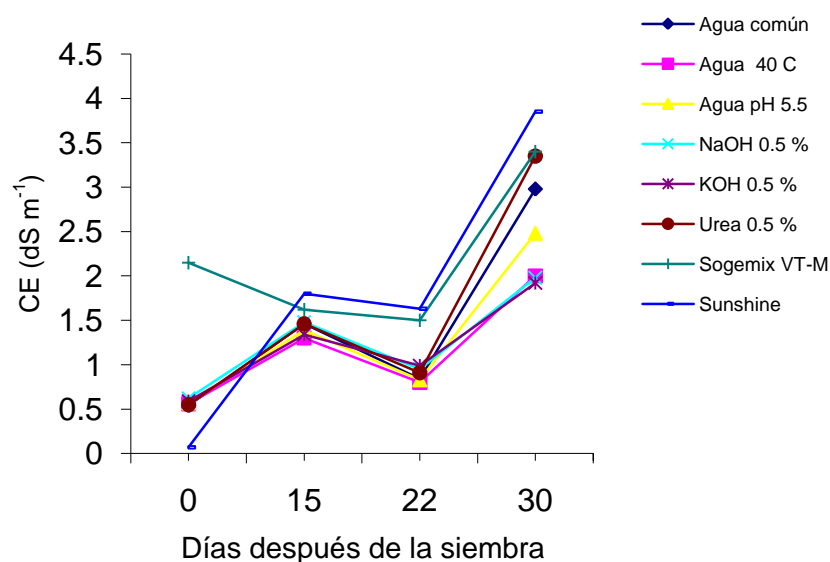


Figura. 2. Conductividad eléctrica (CE) en los sustratos durante el experimento.

El análisis de regresión entre la CE de los sustratos de paja de trigo a los 22 DDS como variable dependiente y la CFST en la misma fecha presentaron un coeficiente de determinación (R^2) = 0.2190 con una $P > F = 0.0211$, indicando que parte de la variación en la CE depende de la CFST de manera significativa. Se señala que se sintetizaron nuevos compuestos químicos nitrogenados entre los ácidos *p*-cumárico y ferúlico presentes en las pajas de trigo al tratarlas con amoníaco anhidro (Chabaca *et al.*, 2000).

Se indica que existe reacción entre compuestos nitrogenados (NH_3 y NO_2) con varios materiales orgánicos como las turbas, aserrín y residuos con lignina (Nömmik y Vahtras, 1982), sin embargo, las turbas utilizadas como sustratos en este experimento, ya se trataron con nitrógeno desde su proceso de elaboración por lo que su reacción ante los nutrimentos nitrogenados es menor. La fijación está asociada con oxidación (utilización de O_2), y se favorece por pH alcalinos (Nömmik y Vahtras, 1982).

Los nutrimentos nitrogenados una vez que reaccionan con los compuestos fenólicos no contribuyen a la CE de los sustratos (no electrolitos).

La CE de los sustratos a los 30 DDS fue relativamente alta, sin embargo la gran mayoría de los sustratos de paja de trigo presentaron CE menores que el Sogemix VT-M.

El análisis de regresión de la CE como variable dependiente y la CFST a los 30 DDS, aún presentó significancia ($P > F = 0.0004$) y una R^2 de 0.3188, indicando que aún existe relación entre estas dos variables. El pH de los sustratos no presentó relación con ninguna de las dos variables anteriores. Es poco probable que ciertas cantidades de N y otros elementos hayan sido utilizadas por microorganismos presentes en los sustratos de paja de trigo en la transformación de compuestos orgánicos solubles en agua. Las pajas de trigo presentaron muy poca pérdida de materia orgánica (degradación) y esta se atribuye principalmente a la lixiviación de compuestos orgánicos solubles con los riegos proporcionados.

4.3.3.3 Concentración de fenólicos solubles totales

En la Figura 3, se muestra la dinámica de las CFST en los sustratos a los 0, 15, 22 y 30 DDS.

Las CFST en los sustratos de paja de trigo disminuyeron en relación con el tiempo transcurrido, presentándose la mayor disminución durante los primeros 15 DDS. La disminución de las CFST en los sustratos de paja de trigo entre los 15 y 22 DDS fue menor que la que se presentó durante los primeros 15 DDS y la disminución entre los 22 y 30 días fue todavía menor que la anterior. La disminución de las CFST en los sustratos de paja de trigo se atribuye principalmente a pérdidas por lixiviación, producidas por los riegos frecuentes con la solución nutritiva.

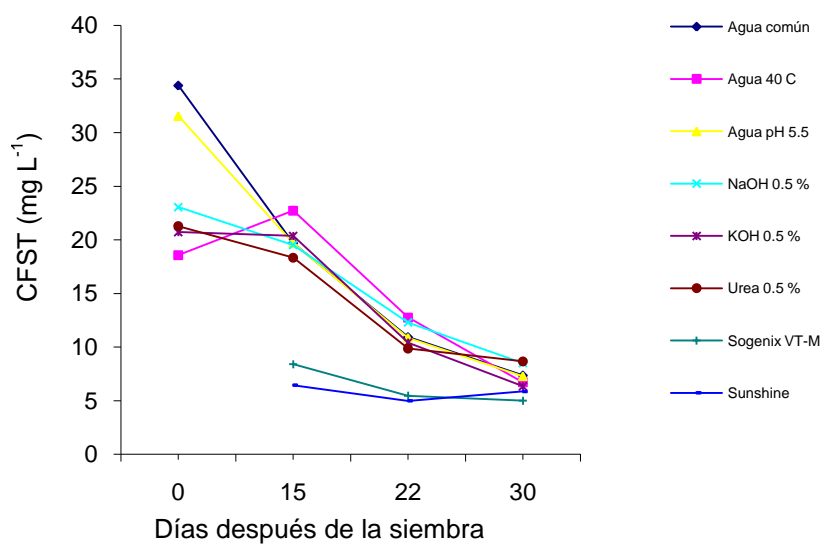


Figura. 3. Concentración de fenólicos solubles totales (CFST) en los sustratos durante el experimento.

4.3.4 Propiedades químicas de los sustratos a los 30 DDS

4.3.4.1 pH

De acuerdo con el análisis de varianza hubo diferencia altamente significativa en el pH entre los sustratos a los 30 DDS (Cuadro 7). Con excepción del sustrato Sunshine, con un pH promedio de 5.11 todos los demás sustratos fueron iguales estadísticamente, presentando valores de pH en el intervalo de 5.63 a 6.2, que de acuerdo con Escudero (1993) son pH adecuados para el crecimiento de las plantas (entre 5.5 y 6.8). Se menciona que un pH adecuado para el crecimiento de las plantas se encuentra entre 5.2 y 6.2 (Premier, S/F). El pH de 5.11 en el Sunshine es adecuado para el crecimiento de las plantas de acuerdo con Bunt (1988).

Cuadro 7. Propiedades químicas de los sustratos a los 30 días después de la siembra.

Sustrato (extractante)	pH	CE dS m ⁻¹	CFST final mg L ⁻¹	Disminución de la CFST %
Paja (agua común)	6.03 a	2.98 ab	7.35 a	78.62
Paja (agua 40 °C)	6.07 a	2.00 b	6.71 a	63.88
Paja (agua pH 5.5)	5.63 ab	2.48 ab	7.28 a	76.93
Paja (NaOH 0.5 %)	6.15 a	1.98 b	8.50 a	63.13
Paja (KOH 0.5 %)	5.72 ab	1.92 b	6.34 a	69.40
Paja (urea 0.5 %)	5.80 a	3.35 ab	8.67 a	59.23
Sogemix VT-M	6.20 a	3.40 ab	4.99 a	nd
Sunshine	5.11 b	3.85 a	5.86 a	nd
Significancia	0.002	0.005	0.09 (N.S)	_____
DHS	0.64	1.74	4.12	_____

CE = conductividad eléctrica; CFST = concentración de fenólicos solubles totales;

nd = no determinada. DHS = diferencia honesta significativa.

4.3.4.2 Conductividad eléctrica

De acuerdo con el análisis de varianza hubo diferencia significativa entre los sustratos en esta variable (Cuadro 7). El sustrato que presentó la mayor CE fue el Sunshine (3.85 dS m⁻¹) y fue estadísticamente diferente a todos los demás sustratos, los cuales fueron estadísticamente iguales entre sí, encontrándose en el intervalo de 1.92 dS m⁻¹ y 3.40 dS m⁻¹. La CE de la gran mayoría de los sustratos se encuentra fuera del valor máximo adecuado (1.99 dS m⁻¹) para la germinación y el crecimiento de las plantas en sustratos orgánicos (Bunt, 1988), sin embargo no se observaron síntomas del efecto de exceso de sales en las plántulas (deficiencia de agua).

4.3.4.3 Concentración de fenólicos solubles totales

Las CFST en los sustratos evaluados al final del experimento también se presentan en el Cuadro 7. El intervalo de las CFST en los sustratos de paja de trigo al final del experimento fue entre 6.34 mg L^{-1} en el sustrato con paja tratada con KOH al 0.5 % y 8.67 mg L^{-1} para la paja tratada con NaOH al 0.5 %. No hubo diferencia estadística en las CFST entre los sustratos de paja de trigo, ni tampoco de estos con las CFST presentes en los sustratos testigos.

Tomando como base las CFST iniciales y finales en los sustratos de paja de trigo, los porcentajes de disminución de las CFST variaron entre 59.23 % para el caso de la paja tratada con urea al 0.5 % y 78.62 % en la paja tratada con agua común (Cuadro 7). La disminución de las CFST en todos los sustratos evaluados se atribuye principalmente a la pérdida de estos compuestos por lixiviación o drenaje, ocasionada por los riegos con solución nutritiva sobre los sustratos (lixiviado primeramente de color café oscuro y conforme transcurrió el tiempo el color cambió a ligeramente amarillo hasta llegar al final del experimento a un color amarillo casi translúcido).

La disminución en los valores de las CFST en los sustratos de paja de trigo también pudo haberse debido a reacciones de los compuestos fenólicos con los compuestos nitrogenados aplicados en la solución nutritiva, situación por la cual es probable que no hayan podido ser detectados por medio del procedimiento de cuantificación para estos compuestos (reactivo de Folin y Ciocalteu).

4.3.4.4 Materia orgánica

En el Cuadro 8, se presenta el contenido de MO de los sustratos a los 30 DDS. Con excepción del sustrato Sunshine 3, los demás sustratos tuvieron estadísticamente el mismo contenido de MO (%). Tomando como base el contenido de MO inicial en los sustratos, se observa que los porcentajes de MO en los sustratos de paja de trigo al final del experimento no disminuyeron significativamente.

Cuadro 8. Propiedades de la materia orgánica de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot a los 30 DDS.

Sustrato (extractante)	MO final	Pérdida de MO %	Bioestabilidad	Categoría de bioestabilidad [†]
Paja (agua común)	90.50 a	3.75	96.02	Muy alta
Paja (agua 40 °C)	91.25 a	3.75	96.05	Muy alta
Paja (agua pH 5.5)	91.50 a	3.00	96.82	Muy alta
Paja (NaOH 0.5 %)	91.00 a	4.25	95.53	Muy alta
Paja (KOH 0.5 %)	93.00 a	1.00	98.93	Muy alta
Paja (urea 0.5 %)	92.25 a	1.12	98.80	Muy alta
Sogemix VT-M	49.12 b	7.24	87.13	Alta
Sunshine	91.75 a	4.62	95.20	Alta
P>F	0.0001	_____	_____	_____
DHS	4.50	_____	_____	_____

MO = materia orgánica. Medias con la misma letra en la columna son iguales estadísticamente; DHS = diferencia honesta significativa.

Los porcentajes de disminución variaron entre 7.24 % en el sustrato Sogemix VT-M y 1.0 % en el sustrato de paja de trigo tratada con KOH al 0.5 %. El sustrato de paja de trigo tratada con agua común perdió solamente 3.75 % de MO en el transcurso de 30 días. En esta variable al igual que en la variable CFST, la disminución del contenido de MO en los sustratos al final del experimento fue por pérdida de materiales orgánicos solubles en agua, como consecuencia de los riegos aplicados a los sustratos, y no por la degradación del material complejo constituyente de los tejidos (por ejemplo celulosa, hemicelulosa o lignina). Es importante señalar que en pruebas de extracción de compuestos fenólicos de la paja de trigo la pérdida de compuestos solubles en agua común fue de 6.05 % y la paja tratada con agua a pH 5.5 perdió 6.28 % de materia orgánica (Capítulo III). Lemaire (1997), señala que la paja de trigo perdió aproximadamente un 22 % de MO a los 15 días, 24 % a los 30 días, 50 % a los 60 días, 55 % a los 90 días y 80 % a los 180 días después del inicio de la degradación microbiana. La pérdida de MO se realizó sin la adición de N extra, al ya contenido en la paja de trigo.

Los bajos porcentajes de pérdida de MO en los sustratos de paja de trigo encontrados en el presente trabajo no coinciden con lo señalado por Lemaire (1997), en donde la paja de trigo se consideró como un material poco bioestable (índice 0-70) después de 180 días de exposición a la degradación microbológica, perdiendo el 24 % de su peso en 30 días. Las diferencias entre lo encontrado en el presente trabajo y lo señalado por Lemaire (1997), probablemente fue consecuencia del remojo de la paja de trigo por una hora con varios extractantes para la extracción de los compuestos fenólicos y posteriormente se enjuagó tres veces, y en este proceso muchos de los microorganismos y materiales orgánicos solubles se acarrearon con el agua y se perdieron, o bien una considerable cantidad de microorganismos murió (especialmente en las pajas tratadas con NaOH y KOH al 0.5 %), de tal manera que no había suficientes poblaciones de microorganismos o no había el tipo de microorganismos necesarios para realizar la transformación de la materia orgánica, aún considerando que en los sustratos de paja de trigo se suministró suficiente cantidad de N a través de la solución nutritiva para que los microorganismos pudieran realizar la descomposición de la misma.

Esto, relativamente concuerda con lo indicado por Blanco y Almendros (1995), en donde la paja de trigo a la que se le extrajeron los compuestos solubles por remojo durante 24 horas y posteriormente fue sometida a compostaje, únicamente perdió el 29 % de su peso, en comparación con otras pajas de trigo, las cuales no se sometieron a un pretratamiento de extracción de compuestos solubles en agua, las que perdieron entre el 42 % y 50 % de su peso en un periodo de 90 días. Por otro lado se reporta que la extracción de sustancias lábiles de la paja de trigo disminuyó los valores de carbono rápidamente mineralizable y la cantidad de biomasa microbiana (Saviozzi *et al.*, 1997).

Una de las características importantes de un sustrato orgánico para el crecimiento de plantas es que tenga suficiente bioestabilidad, esto es, que debe mantener principalmente sus características físicas y químicas durante el periodo de tiempo en el que la planta se desarrolle en el sustrato (Lemaire, 1997). La bioestabilidad es la propiedad de un material orgánico de perder poca materia orgánica y

conservar sus propiedades físicas y químicas durante varios meses (Lemaire, 1997).

Tomando como única característica la pérdida de MO, la bioestabilidad de los sustratos de paja de trigo se ubicó en la categoría de muy alta bioestabilidad (Cuadro 8), indicando que la pérdida es muy baja, presentando inclusive mayor bioestabilidad que los sustratos testigos con base en turba en el mismo periodo de tiempo (30 días), los que se ubicaron únicamente en el nivel de alta bioestabilidad. Las consecuencias de falta de bioestabilidad son: pérdida de volumen, trayendo como consecuencia compactación del sustrato, disminución de la porosidad, disminución del contenido de aire y de agua a pF1 (agua fácilmente disponible), alteración del tamaño de partículas, cambio en la composición de la fase gaseosa debido a la producción de CO₂, incremento del pH, CE, salinidad debida a la mineralización, síntesis de nuevos compuestos orgánicos con efectos fitotóxicos o estimulantes (Lemaire, 1995). La bioestabilidad evaluada por Lemaire (1997), se hace con los materiales orgánicos guardados en contenedores de plástico negro de dos litros, los cuales se humedecen hasta capacidad de contenedor, se cubren con una bolsa plástica de color negro y se colocan en un invernadero. Se deja que los microorganismos contenidos en el sustrato actúen sobre el mismo durante un tiempo determinado.

Aunque la pérdida de MO de los sustratos orgánicos evaluados en este experimento se tomó como criterio para evaluar la bioestabilidad de los mismos, desde un punto de vista más estricto, la pérdida de MO soluble al parecer no fue por acción de los microorganismos, por lo que en este caso se podría sustituir el término bioestabilidad por "estabilidad química" o *quimioestabilidad*, tomando en consideración que la solubilización de un compuesto químico en agua es un fenómeno químico.

4.3.5 Variables evaluadas en la parte aérea de las plántulas de brócoli a los 30 días después de la siembra (DDS)

Los resultados de las variables evaluadas en la parte aérea de las plántulas de brócoli se presentan en el Cuadro 9. En estas variables cuando se hable de longitud de plántula o alguna de las otras variables se entiende que el valor señalado es el promedio de 10 plántulas.

4.3.5.1 Longitud de vástagos

La mayor longitud de vástagos de brócoli se obtuvo en plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M, con 13.82 cm y fue estadísticamente diferente a la longitud de las plántulas que presentaron los demás sustratos, incluyendo al Sunshine (testigo).

Las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine presentaron una longitud de vástagos de 11.83 cm y fueron estadísticamente iguales a la longitud de vástagos en las plántulas en los sustratos de paja de trigo, exceptuando al sustrato de paja de trigo que fue tratado con NaOH al 0.5 %. Aunque las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo no alcanzaron las longitudes de vástago que tuvieron las plántulas que crecieron en el Sogemix VT-M (mezcla profesional), tuvieron un crecimiento similar a los vástagos de las plántulas que crecieron en el testigo Sunshine, indicando que los sustratos de paja de trigo, con excepción de la paja tratada con NaOH al 0.5 %, aparentemente suministraron a las raíces de las plántulas un medio de crecimiento relativamente similar al del Sunshine, situación que permitió a la parte aérea de las plántulas tener longitudes de vástago similares.

El pH que tuvo el sustrato Sunshine desde el inicio (pH = 4.0, Figura 1) hasta unos 10 DDS, es probable que haya influido sobre la absorción de nutrientes y por consecuencia en la longitud de los vástagos de las plántulas, impidiendo alcanzar la longitud de vástago que presentaron las plántulas que crecieron en el Sogemix VT-M en donde el pH fue menos ácido desde el inicio del experimento.

La regresión múltiple realizada únicamente con datos de las dos turbas con las variables independientes pH, CE y CFST a los 30 DDS muestra que el pH influyó significativamente en la variable longitud de vástago, obteniendo un coeficiente de regresión $R^2 = 0.6302$ ($P > F = 0.0186$).

El 63.02 % de la variación en la variable longitud de vástago se explica por la variación en el pH.

Cuadro 9. Variables evaluadas en la parte aérea de plántulas de brócoli cv. Patriot a los 30 días después de la siembra (DDS).

Sustrato (extractante)	Longitud de vástagos	Diámetro	PMSV	PRMS	Lecturas SPAD
	cm	mm	g	%	
Paja (agua común)	11.28 b	2.18 a	1.54 b	77.00	62.40 a
Paja (agua 40 °C)	10.33 bc	2.11 a	1.28 bc	64.00	61.22 a
Paja (agua pH 5.5)	11.66 b	2.20 a	1.59 b	79.50	62.07 a
Paja (NaOH 0.5 %)	9.33 c	1.87 b	0.97 c	48.50	60.22 a
Paja (KOH 0.5 %)	10.79 bc	2.18 a	1.38 b	69.00	63.22 a
Paja (urea 0.5 %)	10.42 bc	2.09 a	1.33 bc	66.50	63.25 a
Sogemix VT-M	13.82 a	2.28 a	2.00 a	100 00	52.55 b
Sunshine	11.83 b	2.16 a	1.45 b	72.50	50.67 b
Significancia	0.0001	0.0001	0.0001		0.0001
DHS	1.53	0.20	0.39		5.63

PMSV = peso de materia seca de vástagos; PRMS = porcentaje relativo de materia seca de vástagos con referencia a los vástagos que crecieron en el Sogemix VT-M (100 %). Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente. DHS = diferencia honesta significativa.

Los resultados de la regresión múltiple a los 15 DDS indican que el pH fue la única variable independiente que tuvo relación significativa con la variable longitud de vástagos ($R^2 = 0.4019$; $P > F = 0.09$). También los resultados de la regresión múltiple a los 22 DDS indican que el pH y la CFST fueron las dos variables independientes que tuvieron relación significativa con la variable longitud de

vástagos ($R^2 = 0.86$; $P > F = 0.0073$), perteneciendo la mayor variabilidad al pH ($R^2 = 0.7359$; $P > F = 0.0064$).

En el caso de los sustratos de paja de trigo, los valores menores en la longitud de vástagos con respecto al testigo Sogemix VT-M se atribuyen principalmente al efecto de las CFST presentes en los sustratos de paja de trigo, a las cuales estuvieron expuestas las raíces de las plántulas que crecieron en ellos.

El análisis de regresión múltiple utilizando el procedimiento FORWARD, tomando como variable respuesta la longitud de vástagos de las plántulas y las variables pH, CE y CFST como independientes, a través del experimento, corroboran lo anterior (Cuadro 10).

Cuadro 10. Análisis de regresión múltiple entre las variables independientes pH, CE y CFST a los 15, 22 y 30 DDS, y la variable respuesta longitud de vástagos de plántula en ocho sustratos evaluados.

Variable respuesta	Variables	R^2	$P > F$ Regresión	Valor del Intercepto	Coefficiente de regresión	R^2 parcial	$P > F$
LONGV	CFST 15	0.3977	0.0001	13.56	-0.14	0.3977	0.0001
LONGV	CFST 22	0.4613	0.0001	14.22	-0.31	0.4613	0.0001
LONGV	CE 30	0.3744	0.0001	11.67	0.67	0.1754	0.0170
	CFST 30				-0.33	0.1990	0.0050

¹LONGV = longitud de vástagos; CFST = concentración de fenólicos solubles totales.

De acuerdo con los datos presentados en el Cuadro 10, la variable más importante que influyó en la longitud de vástagos a través del experimento fue la CFST. La R^2 con valor de 0.3977 para la longitud de vástagos como variable dependiente y la CFST 15 DDS como variable independiente, indica que el 39.77 % de la variación en la longitud de los vástagos al final del experimento se explica por la variación en la CFST a los 15 DDS, siendo esta relación significativa ($P > F = 0.0001$), indicando que es muy poco probable que esta relación se haya dado debido al azar.

De los datos del Cuadro 10, también se desprende la ecuación de regresión $LONGV = 13.56 - 0.14 (CFST\ 15DDS)$. La ecuación indica que por cada unidad ($mg\ L^{-1}$) que se incrementa la CFST, la longitud de los vástagos disminuye en 0.14 cm. De acuerdo con el análisis de regresión realizado, ninguna otra variable (pH o CE) registrada en los sustratos a los 15 DDS influyó de manera significativa en la longitud de los vástagos.

A los 22 DDS, la única variable que influyó en la longitud de los vástagos también fue la CFST al determinar una $R^2 = 0.4613$, indicando que el 46.13 % de la variación de la longitud de los vástagos se explica por la variación de la CFST. esta relación es altamente significativa. La ecuación $LONGV = 14.22 - 0.31 (CFST\ 22\ DDS)$, indica que por cada $mg\ L^{-1}$ de incremento en la CFST la longitud de los vástagos es inhibida en 0.31 cm.

A los 30 DDS el 37.44 % de la variación en la longitud de los vástagos se explica por la variación de dos variables la CE (17.54 %) y la CFST (19.90 %). El modelo de regresión fue significativo ($P > F = 0.0170$). La ecuación $LONGV = 11.67 + 0.6723 (CE) - 0.3363 (CFST\ 22\ DDS)$, indica que la longitud de los vástagos se explica con el intercepto (11.67), por la CE; en donde por cada unidad de CE ($dS\ m^{-1}$) en los sustratos la longitud de los vástagos se incrementa 0.6723 cm, y por la CFST, señalando que por cada $mg\ L^{-1}$ de fenólicos en los sustratos la longitud de los vástagos se disminuye 0.3363 cm. Es importante hacer mención que los coeficientes de determinación (R^2) señalados anteriormente aunque algunos de ellos son relativamente altos, solamente explican una parte de la variación de uno con respecto al otro; la variación restante corresponde a otras variables diferentes a las consideradas como variables independientes.

Aunque no se tienen datos específicos para afirmar lo siguiente, la diferencia significativa en esta variable entre los sustratos de paja de trigo y el Sunshine con respecto al sustrato de paja de trigo tratada con NaOH al 0.5 % se puede atribuir al efecto del Na residual en este último sustrato sobre las raíces de las plántulas de brócoli.

4.3.5.2 Diámetro de plántulas

El diámetro de las plántulas se presenta en el Cuadro 9. Con excepción del diámetro que presentaron las plántulas en el sustrato de paja de trigo tratada con NaOH al 0.5 %, el diámetro de las plántulas que crecieron en los demás sustratos fueron estadísticamente iguales. Lo anterior sugiere que la variabilidad en el pH, la CE y las CFST en los sustratos durante el experimento no influyeron significativamente en esta variable. La diferencia en el diámetro del tallo de las plántulas de brócoli que crecieron en el sustrato de paja de trigo tratada con NaOH al 0.5 % se pudo haber debido a que con el tratamiento de extracción de los compuestos fenólicos con NaOH al 0.5 %, la paja se quedó con Na en sus tejidos aún después de lavada, siendo liberado posteriormente durante el transcurso del experimento, inhibiendo el crecimiento de las plántulas.

4.3.5.3 Peso de materia seca

El peso de la materia seca de diez vástagos de brócoli que crecieron en los sustratos evaluados se presenta también en el Cuadro 9.

El sustrato en el que mejor se desarrollaron las plántulas de brócoli fue el Sogemix VT-M, obteniendo un peso de materia seca de vástagos (PMSV) de 2.0 g. Con excepción del sustrato de paja de trigo tratada con NaOH al 0.5 %, todos los demás sustratos (incluido el sustrato testigo Sunshine) fueron estadísticamente diferentes al sustrato Sogemix VT-M e iguales entre sí. El comportamiento de esta variable fue muy similar al presentado en la variable longitud de plántula.

Las plántulas de brócoli que crecieron en el sustrato Sunshine no alcanzaron el PMSV de las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M debido al pH ácido que presentó este sustrato quizás hasta los 15 DDS. El pH más ácido en este sustrato pudo haber influido sobre la absorción de nutrimentos por las raíces de las plantas y por consecuencia en el crecimiento de las plántulas (Cuadro 11).

De acuerdo con los datos presentados en la Figura 1, con excepción del pH inicial de 4.0, el pH registrado en el sustrato Sunshine en las lecturas a los 15, 18 y 22

DDS, fueron menos ácidos y se encuentran en el intervalo señalado como óptimo para el crecimiento de las plantas en sustratos orgánicos. Por otro lado el pH registrado en el sustrato Sogemix VT-M, con excepción del pH inicial (5.5), las demás lecturas se registraron en el intervalo de 7.13 a 6.2.

Lo encontrado en este experimento no concuerda con lo señalado por Bunt (1988), que indica que el pH óptimo para el crecimiento de las plantas en sustratos orgánicos se encuentra en el intervalo de 5.0 a 5.5. Las plántulas que crecieron en pH superiores a los señalados por Bunt (1988) (Sogemix VT-M) tuvieron mayor PMSV (2.0 g) que las plántulas que se desarrollaron en el sustrato Sunshine que mostró un intervalo de pH entre 4 y 5.42, manteniendo el pH arriba de 5.0 en la gran mayoría de su periodo de crecimiento; desde los 15 DDS hasta los 30 DDS.

De acuerdo al pH mostrado por el Sogemix VT-M y por el Sunshine a los 15 DDS, se presume que el pH de estos sustratos cambio relativamente rápido, debido a los riegos realizados en todos los sustratos con agua común con un pH de 7.45, sugiriendo que las raíces de las plántulas que crecieron en el Sunshine, antes de los 15 DDS en realidad no estuvieron soportando el pH ácido de 4. El PMSV de las plántulas que crecieron en el Sunshine fue de 1.45 g, correspondiendo al 72.50 % del peso obtenido en las plántulas del Sogemix VT-M.

Los resultados del análisis de regresión múltiple (Cuadro 11), señalan que la variación en la variable PMSV estuvo afectada por la variación del pH en los sustratos testigos (turbas) en el transcurso del experimento.

Cuadro 11. Regresión múltiple entre las variables independientes pH, CE y CFST a los 15, 22 y 30 DDS y la variable respuesta peso de materia seca de vástagos en dos turbas comerciales.

Variable Respuesta	Variables	R ²	P>F Regresión	Valor del Intercepto	Coefficiente de regresión
PMSV	pH 15 DDS	0.5813	0.0270	0.2379	0.2375
PMSV	pH 22 DDS	0.7960	0.0029	- 0.64	0.4053
PMSV	pH 30 DDS	0.7181	0.0079	-0.8613	0.4500

PMSV = peso de materia seca de vástagos.

El 58.13 % de la variación en el PMSV se explica significativamente por la variación en el pH a los 15 DDS. Lo mismo se aplica para las regresiones realizadas entre las variables independientes y el PMSV como variable dependiente a los 22 DDS y 30 DDS.

De acuerdo con la revisión de literatura, y a los fundamentos que se establecieron al principio de este experimento, la inhibición del crecimiento de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo puede atribuirse a las CFST a las que las raíces de las plántulas estuvieron expuestas durante el periodo del experimento, sin embargo se consideró conveniente relacionar también las variables pH y conductividad eléctrica (CE) para explicar la variable respuesta PMSV.

Los resultados de las regresiones múltiples indican efectivamente, que de las tres variables independientes registradas en los sustratos de paja de trigo (pH, CE y CFST) a los 15 DDS y 22 DDS, la única de estas que influyó en la inhibición para la acumulación de materia seca en las plántulas fue la CFST, y a los 30 DDS, la CE tendió a incrementar el PMSV, pero al mismo tiempo las CFST tendieron a inhibir su acumulación, predominando ligeramente el efecto inhibitorio de las CFST, con respecto al efecto positivo de la CE (Cuadro 12).

Cuadro 12. Regresión múltiple entre las variables independientes pH, CE y CFST a los 15, 22 y 30 DDS y la variable respuesta peso de materia seca de vástagos en ocho sustratos.

Variable respuesta	Variables	R ²	P>F Regresión	Valor del Intercepto	Coefficiente de regresión	R ² parcial	P>F
PMSV	CFST 15	0.1899	0.0126	1.81	- 0.2000	0.1899	0.0126
PMSV	CFST 22	0.3220	0.0007	2.01	- 0.058	0.3220	0.0007
PMSV	CE 30	0.2822	0.0082	1.50	0.1367	0.1326	0.0405
	CFST 30				- 0.062	0.1496	0.0202

PMSV = Peso de materia seca de vástagos.

Existe alguna información con referencia a esta situación. La concentración de nutrientes en las soluciones nutritivas influye en la respuesta de las variables de crecimiento al efecto de los ácidos fenólicos; dentro de ciertos límites, a mayor concentración de nutrientes en las soluciones con ácidos fenólicos, el efecto de inhibición de estos disminuye (Stowe y Osborn, 1980; Vaughan y Ord, 1990).

Asimismo, en el Cuadro 9, se presentan los porcentajes relativos del peso de materia seca (PRMS) de los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos, con referencia al PMSV de las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M que fue el que tuvo el mayor PMSV de plántulas de brócoli.

El testigo Sunshine presentó solamente el 72.50 % del peso del Sustrato Sogemix VT-M y los mejores sustratos de paja de trigo mostraron 79.50 % en el sustrato de paja de trigo tratada con agua a pH 5.5 y 77 % en el sustrato de paja de trigo tratada con agua común, siendo ligeramente superiores al sustrato Sunshine indicando que hubo algún o algunos factores que influyeron de manera negativa en el crecimiento de las plántulas de estos sustratos.

Si tomamos como variable principal del crecimiento de las plántulas de brócoli el PMSV, ninguno de los sustratos de paja de trigo ni el testigo Sunshine, obtuvieron un PMSV similar al obtenido en las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M.

El PMSV del mejor sustrato de paja de trigo fue el que se determinó en el sustrato con agua a pH 5.5, representando únicamente el 79.50 % del PMSV del mejor testigo (Sogemix VT-M). Este valor en porcentaje es mayor en 34.43 % al porcentaje del PMSV que se determinó en el mejor sustrato de paja de trigo (50-10-40) en el experimento descrito en el Capítulo I.

4.3.5.4 Lecturas SPAD

Las lecturas SPAD (Desarrollo de Análisis de Suelo y Planta) son una medida indirecta de la concentración de clorofila en las hojas, y a su vez esta estima el contenido de N. El contenido de clorofila y de nitrógeno determinados por los métodos tradicionales en cultivos de leguminosas, gramíneas, frutales y hortalizas

presentaron una alta correlación con las lecturas SPAD medidas con el SPAD-501 (Reeves *et al.*, 1993). En general al incrementarse los valores de las lecturas SPAD determinadas con un medidor SPAD-502, el contenido de clorofila y N se incrementan de forma lineal (Rodríguez *et al.*, 1998).

Los promedios de las lecturas SPAD en las hojas de las plántulas que crecieron en los sustratos evaluados se presentan en el Cuadro 9. Las lecturas SPAD determinadas en las hojas más desarrolladas de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos testigos tuvieron valores más bajos que los valores que presentaron las hojas de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo. Lo anterior pudo haber sido consecuencia de un efecto estimulante en mayor producción de clorofila debido a las bajas CFST en los sustratos de paja de trigo a los 30 DDS.

Se reporta que concentraciones de 25, 50 y 100 mg L⁻¹ de los ácidos *o*-hidroxifenilacético (*p*-hidroxibenzoico), ferúlico y *p*-cumárico, inhibieron el contenido de clorofila en hojas de arroz. Se sugiere que el suministro-orientación de clorofila es inhibido significativamente por los fenólicos exógenos causando la disminución de clorofila. El orden de inhibición fue ferúlico>*p*-cumárico>*o*-hidroxifenilacético (Yang *et al.*, 2002).

Las CFST cuantificadas en los sustratos al final del experimento (el mismo día y después de la determinación de las lecturas SPAD) fueron más bajas (entre 6.34 mg L⁻¹ y 8.67 mg L⁻¹) que la más baja concentración (25 mg L⁻¹) reportada por los autores anteriores, la cual también causó disminuciones en el contenido de clorofila de plántulas de arroz.

El aumento de los valores en las lecturas SPAD en las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo de acuerdo con el análisis de regresión realizado para los ocho sustratos con respecto a los valores de las lecturas SPAD registradas en las plántulas de los sustratos testigos es consecuencia de la interacción CE*CFST30, la CE y la CFST30 (Cuadro 13), enlistadas en orden de importancia tomando en consideración los valores de R² (criterio de parsimonia).

El 53.32 % de la variación de la variable lecturas SPAD se explica por la variación de las tres variables independientes señaladas, contribuyendo en mayor

porcentaje la interacción CE*CFST, con un 26.42 %. Por otro lado se encontró una correlación positiva ($r = 0.5646$) y altamente significativa ($P > R = 0.0040$) entre la CE y la CFST a los 30 DDS.

La interacción CE*CFST se puede explicar porque los compuestos fenólicos interactúan con algunos nutrimentos (por ejemplo NH_4) formando nuevos compuestos, los cuales actúan como quelatantes y proporcionan mayores concentraciones de estos nutrimentos a las raíces de las plántulas, o bien una vez sintetizados los nuevos compuestos estos penetran al interior de la célula por la pared celular y la membrana celular, incrementando el metabolismo para la formación de clorofila. Se reporta que los ácidos *p*-cumárico y ferúlico presentes en la paja de trigo cuando se trataron con amoníaco anhidro, formaron compuestos nitrogenados, capturados en forma irreversible e indigestibles para los bovinos (Chabaca *et al.*, 2000).

En la literatura se encontró información específica referente a la interacción entre los ácidos fenólicos y los nutrimentos y la relación con su efecto sobre el crecimiento de las plantas, se conoce que al aumentar la concentración de nutrimentos específicos como el N y el P en las soluciones que contienen concentraciones de ácidos fenólicos el efecto inhibitorio sobre el crecimiento de las plántulas es menor (Stowe y Osborn, 1980; Vaughan y Ord, 1990).

A pesar del efecto de los fenólicos sobre el crecimiento de las plántulas de brócoli, no se detectaron visualmente deficiencias nutrimentales durante el experimento y por supuesto tampoco al final del experimento, de acuerdo con las lecturas SPAD (concentración de clorofila-nitrógeno).

Cuadro13. Variables independientes que influyeron en la variable lecturas SPAD.

Variable respuesta	Variables	R ²	P>F Regresión	Valor del Intercepto	Coefficiente de regresión	R ² parcial	P>F
Lecturas SPAD	CE*CFST	0.5332	0.0001	86.98	1.5400	0.2642	0.0010
	CE				-12.31	0.1640	0.0215
	CFST				-3.37	0.1051	0.0181

CE = Conductividad eléctrica; CFST = Concentración de fenólicos solubles totales.

4.3.6 Variables cualitativas evaluadas en los sustratos en que crecieron las plántulas de brócoli, en las raíces de las plántulas y en el cepellón, a los 30 días después de la siembra

Los valores de las variables degradación microbiológica (DM), color de raíz (CR), densidad de pelos radicales (DPR) y facilidad para extraer el cepellón (FEC) se presentan en el Cuadro 14.

4.3.6.1 Degradación microbiológica

La degradación microbiológica (DM) de los sustratos de paja de trigo, evaluada visualmente con la ayuda de un estereoscopio, fue insignificante (valor de 1, correspondiente a una degradación entre 1 y 10 %) en todos los sustratos de paja de trigo) tendiendo más hacia la no degradación (Cuadro 14).

Cuadro14. Variables cualitativas registradas en los sustratos, en las raíces de las plántulas de brócoli cv. Patriot y en el cepellón, a los 30 días después de la siembra (DDS).

Sustrato (extractante)	DM	CR	DPR	FEC
Paja (agua común)	1	1	1	1
Paja (agua 40 ° C)	1	1	1	1
Paja (agua pH 5.5).	1	1	1	1
Paja (NaOH 0.5 %)	1	1	1	1
Paja (KOH 0.5 %)	1	1	1	1
Paja (urea 0.5 %)	1	1	1	1
Sogemix VT-M	1	1	1	1
Sunshine	1	1	1	1

DM = degradación microbiológica; CR = color de raíz; DPR = densidad de pelos radicales; FEC = facilidad para extraer el cepellón.

Lo anterior corrobora los resultados presentados en el Cuadro 8, donde se muestra que los porcentajes de MO determinados en los sustratos a los 30 DDS

fueron altos y que la disminución de MO en los sustratos de paja de trigo fue muy baja (entre 1 y 3.75 %), registrando mayores pérdidas de MO los sustratos testigos elaborados con base en turba (4.62 % en el Sogemix VT-M y 7.25 % en el Sunshine), además los sustratos de paja de trigo se clasificaron como materiales con muy alta bioestabilidad, mientras que los sustratos testigos únicamente se ubicaron en la categoría de alta bioestabilidad.

La pérdida de MO en todos los sustratos se atribuye prácticamente a la pérdida de compuestos orgánicos solubles en agua que se lixiviaron con la aplicación de los riegos con solución nutritiva.

Con lo anterior se concluye que, aunque la paja de trigo está considerada como un material orgánico con una alta probabilidad de degradación microbiológica (Lemaire, 1997), en el presente trabajo no hubo degradación microbiológica apreciable en ninguno de los seis sustratos de paja de trigo. Las razones atribuibles a este fenómeno se explicaron con anterioridad en el punto en donde se trató lo referente a la MO al final del experimento.

4.3.6.2 Color de raíces

El color de las raíces de las plántulas de brócoli en todos los sustratos a los 30 DDS fue de color blanco, indicando buen funcionamiento y sin efecto marcado de compuestos fenólicos. No se observaron raíces de color amarillo o café como se observaron en otros experimentos anteriores (Cuadro 14).

4.3.6.3 Densidad de pelos radicales

Se realizaron observaciones del crecimiento de los pelos radicales en la raíz a los 15, 22 y 30 DDS. Las raíces de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo a los 15 DDS se observaron de color blanco (color normal), sin embargo no tenían pelos radicales, las raíces de las plántulas de brócoli en los sustratos testigos sí. A los 22 días DDS las raíces de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo tenían una densidad de pelos radicales

mucho mayor que a los 15 DDS, sin embargo no presentaron la misma densidad que la que presentaron los sustratos testigos. La densidad de pelos radicales en las raíces de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo, a los 30 días DDS presentaron aproximadamente la misma cantidad de pelos radicales que los sustratos testigos (valor 1-alta densidad de pelos radicales, Cuadro 14).

El aumento en la densidad de pelos radicales en las raíces de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo fue paulatino y al parecer se relacionó con las CFST que se registraron en el transcurso del experimento, esto es, la aparición de pelos radicales se fue dando conforme las CFST en los sustratos de paja de trigo fueron disminuyendo.

Los pelos radicales son estructuras unicelulares que se originan o se desarrollan de las células epidérmicas y entre sus funciones se menciona el ayudar a la raíz a la absorción de agua y nutrimentos del suelo aumentando la superficie de absorción (Esau, 1976).

4.3.6.4 Facilidad para extraer el cepellón

Todos los sustratos evaluados desarrollaron suficiente raíz para extenderse desde un poco más abajo de la superficie del sustrato hasta el fondo de las celdas de las charolas, por lo que en ninguno de los sustratos hubo problema para extraer el cepellón completo, otorgando a todas las plántulas que se extrajeron manualmente de la charola el valor de 1 (fácil de extraer).

4.4 CONCLUSIONES

1. Las concentraciones de fenólicos solubles totales, el pH y la CE en los sustratos de paja de trigo al inicio del experimento y hasta los nueve días después de la siembra, no disminuyeron el porcentaje de emergencia de las plántulas, en comparación con los sustratos testigos.

2. El pH de los sustratos de paja de trigo permaneció arriba del punto neutro al menos hasta los 22 DDS, después disminuyó sus valores entre 6.2 y 5.8. El sustrato Sunshine presentó valores de pH entre 5.5 y 5.42 y el Sogemix VT-M entre 5.5 y 7.13, permaneciendo en valores adecuados al menos durante los últimos 15 días del experimento.

3. La conductividad eléctrica (CE) de todos los sustratos se incrementó por la aplicación de la solución nutritiva a los 15 y 22 DDS. Solo los sustratos de paja de trigo presentaron un decremento de la CE, debido probablemente a la reacción con los ácidos fenólicos o a la reacción con algunos compuestos químicos constituyentes de la paja de trigo y posteriormente se incrementó hasta los 30 DDS.

4. En general, todos los sustratos de paja de trigo disminuyeron su CFST, que fue más acentuada durante los primeros 15 DDS. La disminución de las CFST en los sustratos de paja de trigo desde el inicio hasta el término del experimento, se estableció en el intervalo de 59.23 a 78.62 %.

5. Las concentraciones de fenólicos solubles totales en los sustratos de paja de trigo a los 30 DDS fueron bajas en relación con las CFST iniciales. El intervalo de CFST en los sustratos de paja de trigo fue entre 6.34 mg L⁻¹ y 8.67 mg L⁻¹, probablemente en este intervalo de CFST el efecto inhibitorio sobre el crecimiento de las plántulas de brócoli es casi nulo y puede ser incluso estimulante del crecimiento.

6. Los sustratos de paja de trigo al final del experimento mostraron altos porcentajes de materia orgánica (MO), indicando poca pérdida, variando entre 1 % (agua común) y 3.75 % (KOH 0.5 %), lo que clasifica a los sustratos de paja de trigo como materiales altamente bioestables (95 % a 100 % de MO) en contraposición a lo que normalmente se reporta para la paja de trigo, considerándose como un material poco bioestable. Los sustratos testigos por su

mayor pérdida de materia orgánica durante el experimento se clasificaron únicamente como materiales con alta bioestabilidad (80 a 94 % de MO).

7. Ninguna de las variables independientes pH, CE y CFST en los sustratos influyó significativamente en el diámetro de tallo de las plántulas de brócoli.

8. Ninguna de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo alcanzaron la longitud de vástagos (cm) ni el peso de materia seca de diez vástagos (g) de las plántulas que crecieron en el mejor sustrato testigo (Sogemix VT-M). Las diferencias significativas que se presentaron en los valores de las variables longitud de vástagos y peso de materia seca de vástagos entre el sustrato Sogemix VT-M y los sustratos de paja de trigo se pueden atribuir principalmente al efecto de las concentraciones de fenólicos solubles totales a las cuales estuvieron sometidas las raíces de las plántulas de brócoli en el transcurso de 30 días.

9. Las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo presentaron a los 30 DDS lecturas SPAD mayores y estadísticamente diferentes a las de los sustratos testigos, atribuyéndose este efecto principalmente a la interacción entre la CE y las CFST (CE*CFST).

10. La degradación microbiológica de los sustratos de paja de trigo fue baja (1 en la escala-entre 1 y 10 % de degradación), tendiendo más hacia la no degradación, en el transcurso de 30 días de duración del experimento.

11. Las raíces de las plántulas de brócoli a los 15 DDS presentaron raíces blancas, pero sin pelos radicales; a los 22 DDS presentaron mayor densidad de pelos radicales, pero sin alcanzar la densidad que presentaron los sustratos testigos. A los 30 DDS, la densidad de pelos radicales en las raíces de las plántulas de brócoli fue mayor que a los 22 DDS, alcanzando aproximadamente la misma densidad de pelos radicales que las raíces en los sustratos testigos.

12. A pesar de que las raíces de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo no presentaron el mismo desarrollo que las raíces de los sustratos testigos, tuvieron un crecimiento de raíces suficiente para poder extraer completamente el cepellón de las cavidades de la charola con facilidad de manera similar a como se extrajeron en los sustratos testigos.

13. Ninguno de los tratamientos con alguno de los seis extractantes ayudó a extraer la suficiente cantidad de compuestos fenólicos solubles presentes en la paja de trigo, para disminuir las concentraciones de fenólicos solubles totales hasta el nivel de evitar el efecto de inhibición de estos sobre el crecimiento de las plántulas de brócoli cv. Patriot. Las CFST en los sustratos de paja de trigo durante el experimento fueron similares entre sí, en las fechas en las que se tomaron las muestras para la cuantificación de esta variable.

14. El mejoramiento de las variables de crecimiento de las plántulas de brócoli en este experimento con relación a las obtenidas en el experimento descrito en el Capítulo I (incremento de 34.43 % en el peso de materia seca de plántulas), es probable que haya sido debido a las diferencias en las propiedades físicas entre los sustratos (por ejemplo la porosidad de aire), siendo aparentemente mejores en este experimento que en el experimento descrito en el Capítulo I.

4.5 LITERATURA CITADA

Ansorena, M. J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Editorial Mundi-Prensa. Bilbao, España.

Blanco, M. J., and G. Almendros. 1995. Evaluation of parameters related to chemical and agrobiological qualities of wheat straw composts including different additives. *Bioresource Technology*. 51: 125-134.

Bunt, A. C. 1988. Media and mixes for container grown plants. Unwin Hyman Ltd. London, UK.

Canadian Sphagnum Peat Moss Association. 1996. A Horticultural Teaching Plan. (Disponible en línea en <http://www.peatmoss.com/hortprog1.php>). (Revisado

el 8 de noviembre de 2003).

- Chabaca, R., A. Larwence., M. Paynot., et J. L. Tisserand. 2000. Effet de diverses conditions de traitement à l'ammoniac d'une paille de blé sur les teneurs en acides *p*-coumarique et fèrulique et sur la dégradabilité de l'azote mesurée in situ. *Ann. Zootech.* 49: 29-38.
- Esau, K. 1976. Anatomía vegetal. Ediciones Omega. Barcelona, España.
- Escudero, J. 1993. Cultivo hidropónico de tomate. pp. 261-297. *In*: F. Cánovas y J. R. Díaz. (eds.). Curso superior de especialización sobre cultivos sin suelo. I. E. A. / F.I.A.P.A. Almería, España.
- Hewitt, E. J. 1966. Sand and water culture methods. CAB. Technical Communication No. 22. London, UK.
- Lemaire, F. 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. *Acta Horticulturae.* 99: 67-80.
- Lemaire, F. 1997. The problem of biostability in organic substrates. *Acta Horticulturae.* 450: 63-69.
- Nömmik, H., and K. Vahtras. 1982. "Retention and fixation of ammonium in soils. pp. 198-258. *In*: G. J. Stevenson, Ed. Nitrogen in agricultural soils. American Society of Agronomy. Soil Science Society of Agronomy. Madison. WI. USA.
- Premier (S/F). Folleto promocional.
- Reeves, W. D., P. L. Mask., C. W. Wood., and D. P. Delay. 1993. Determination of wheat nitrogen status with a handheld chlorophyll meter. Influence of management practices. *J. Plant Nutr.* 16: 7781-7796.
- Rodríguez, M, Ma. De las N., G. Alcántar G., A. Aguilar S., J. D. Etchevers B., y J. A. Santizo R. 1998. Estimación de la concentración de nitrógeno y clorofila en tomate mediante un medidor portátil de clorofila. *Terra.* 16: 135-141.
- SAS Institute. 1996. The SAS system for windows. Release 6.12. SAS Institute. Cary, North Carolina. USA.
- Stowe, L. G., and A. Osborn. 1980. The influence of nitrogen and phosphorus levels on the phytotoxicity of phenolic compounds. *Can. J. Bot.* 58: 1149-1153.
- Saviozzi, A., R. Levi-Minzi., R. Riffaldi., and G. Vanni. 1997. Role of chemical constituents of wheat straw and pig slurry on their decomposition in soil. *Biol. Fertil. Soils.* 25: 401-406.

TLC Polyform, Inc. S/F. Contenedores y charolas ecológicas para la horticultura de plástico reciclado. Folleto promocional.

Vaughan, D., and B. Ord. 1990. Influence of phenolic acids on morphological changes in roots of *Pisum sativum*. J. Sci. Food Agric. 52: 289-299.

Yang, C. M., C. N. Lee., and C. H, Chou. 2002. Effects of three allelopathic phenolics on chlorophyll accumulation of rice (*Oriza sativa*) seedlings: I. Inhibition of supply-orientation. Bot. Bull. Acad. Sin. 43: 299-304.

CAPÍTULO V

SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO CON DIFERENTE GRANULOMETRÍA Y DOS TURBAS COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI

SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO CON DIFERENTE GRANULOMETRÍA Y DOS TURBAS COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI

Fidel René Díaz Serrano, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2011

Se evaluaron seis sustratos de paja de trigo con diferente granulometría (100-00, 90-10, 80-20, 70-30, 60-40 y 50-50; porcentaje de partículas menores de 2 mm y mayores e iguales a 1 mm y porcentaje de partículas menores a 1 mm y mayores e iguales a 0.5 mm) y dos turbas comerciales en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot (Sakata Seeds). Con la finalidad de extraer compuestos fenólicos y disminuir las concentraciones de estos en los sustratos, se remojaron en agua común por 1 h y después se enjuagaron 3 veces. Los porcentajes de plántulas emergidas muestran que no existió diferencia significativa en esta variable entre los sustratos. Ninguna de las variables físicas o químicas de los sustratos influyó de manera negativa en el porcentaje de plántulas emergidas. Los porcentajes de disminución de las CFST en los sustratos de paja de trigo después de 30 días estuvieron entre 84.44 % y 86.69 %. Los sustratos de paja de trigo no presentaron una disminución significativa de materia orgánica a los 30 días después del experimento, clasificándose como materiales altamente bioestables, de manera similar o mejor que los sustratos testigos con base en turba. En general los sustratos de paja de trigo con granulometrías 90-10, 80-20, 70-30 y 60-40 produjeron plántulas con valores iguales estadísticamente en las variables longitud de vástagos, diámetro de tallo, peso de materia seca de raíces y peso de materia seca de vástagos. Estos resultados sugieren que las CFST cuantificadas durante el experimento no inhibieron significativamente el crecimiento de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo. Al menos dos sustratos de paja de trigo podrían utilizarse comercialmente como sustitutos de los sustratos importados con base en turba (peat moss).

Palabras clave: *sustratos, paja de trigo, granulometría, propiedades físicas*

WHEAT STRAW SUBSTRATES WITH DIFFERENT PARTICLE SIZE AND TWO COMMERCIAL PEAT MOSSES IN THE GROWING OF BROCCOLI SEEDLINGS

Fidel René Díaz Serrano, Ph.D.
Postgraduate College, 2011

Six wheat straw substrates (100-00, 90-10, 80-20, 70-30, 60-40 and 50-50; percentage of particle size smaller than 2 mm and larger and equal to 1 mm, percentage of particles smaller than 1 mm and larger and equal to 0.5 mm, and percentage of particles smaller than 0.5 mm) and two commercial peat moss were evaluated as substrates for growth of broccoli seedlings Patriot cultivar (Sakata seeds). With the aim to extract phenolic compounds and diminish its concentrations, the wheat straw substrates were soaked in tap water by 1 hour and were rinsed 3 times. The emergence percentages at 9 days after seeding indicate that there were not statistical significant differences in this variable among the substrates. No one of the physical and chemical variables of the substrates had negative influence on this variable. The diminishing percentages of TSPC in wheat straw substrates after 30 days were among 84.44 and 86.69 %. In the general way the wheat straw substrates with particle sizes of 90-10, 80-20, 70-30 and 60-40 produced seedlings with values statistically equals in shoot length, stem diameter, dry weight of roots and shoots. These results suggest that the TSPC quantified during the experiment did not inhibit significantly the growing of broccoli seedlings that grown in wheat straw substrates.

At least two wheat straw substrates could be used as substitute substrates of the peat moss imported substrates in broccoli seedling production.

Key words: *substrates, wheat straw, particle sizes, physical properties.*

5.1 INTRODUCCIÓN

Los sustratos o medios de crecimiento más utilizados en México para la producción de plántulas de hortalizas para trasplante se preparan con base en turba y se importan a nuestro país principalmente de Canadá. Las turbas son utilizadas como sustratos en la producción de plántulas por poseer una alta resistencia a la degradación microbológica a través del tiempo (bioestabilidad), y buenas características físicas de aireación y retención de humedad, proporcionando un medio adecuado para el crecimiento de las raíces y la parte aérea de las plántulas.

La importación a nuestro país de estos sustratos, hace a las compañías empacadoras de brócoli o productores particulares de esta especie dependientes tecnológicamente de este insumo en la producción de plántulas para trasplante.

La turba es un producto orgánico fósil que ha sido usado como sustrato por su bioestabilidad; pero con la finalidad de conservar las fuentes de turba y proteger el ambiente, otros materiales renovables han sido investigados: residuos urbanos, agrícolas, forestales, pesqueros, desperdicios de la industria de la madera, lodos residuales, entre otros (Lemaire, 1997).

De lo anterior, se desprende la necesidad de realizar investigación enfocada a la producción de sustratos nacionales, y más específicamente a sustratos regionales mediante el uso de materiales vegetales residuales.

En el estado de Guanajuato en el año 2009 se reporta una superficie cosechada de brócoli de 15,950 ha (SIAP, 2010). Se menciona también que los residuos provenientes de este cultivo son manejados en forma inadecuada a través de la quema (Gómez y Grajeda, S/F). La quema indiscriminada de las pajas, principalmente la de trigo ha traído como consecuencia el establecimiento de la Norma Técnica Ambiental NTA_IEG_005/2000 en el acuerdo No. 195, incluida en la Ley de Protección y Preservación del Ambiente del Estado de Guanajuato (Gobierno del estado de Guanajuato, 2000), en donde se estipula que queda estrictamente prohibida la quema de esquilmos. Aunque aparentemente por un lado el problema de la quema de la paja se ha solucionado en un alto porcentaje,

por otro lado, los productores no saben qué hacer con ella.

Se han implementado algunos programas de apoyo a los productores a través de la compra de maquinaria para el empacado o triturado de la paja (SDA, 2009) sin embargo, la disposición final de la paja de trigo sigue siendo un problema para los productores.

La presente investigación se enfocó a la utilización de paja de trigo como sustrato para el desarrollo de plántulas de brócoli, partiendo del hecho fundamental de que la paja aunque en condiciones de campo o para el compostaje es considerada como un material de fácil degradación, en este trabajo desde el inicio, se consideró como un material que puede resistir la degradación microbológica (bioestable), al menos durante 30 días, tiempo en el que las plántulas de brócoli se desarrollen en este material.

Por otro lado, se contempló la extracción de los compuestos fenólicos presentes en la paja de trigo (Lodhi *et al.*, 1987; Narwal *et al.*, 1997; Opoku *et al.*, 1997) con agua común, para disminuir las concentraciones de fenólicos solubles totales y evitar problemas de inhibición del crecimiento en plántulas de brócoli.

Además de la extracción de los fenólicos solubles, también se consideró que las propiedades físicas de los sustratos elaborados con paja de trigo pueden influir sobre el crecimiento de las plántulas de brócoli, tomando en consideración que la porosidad de aire y el agua fácilmente disponible de los sustratos depende directamente de la granulometría.

Con base en los resultados obtenidos del experimento descrito en del Capítulo IV, en donde el peso de materia seca de vástagos (PMSV) del sustrato con extracción de fenólicos con agua a pH 5.5, alcanzó el 79.51 % del peso de materia seca de vástagos del mejor de los sustratos testigos (Sogemix VT-M). Se observó que el PMSV de las plántulas de brócoli que crecieron en el mejor sustrato de paja de trigo (Capítulo IV) se incrementó de 45 % a 79.51 %, lo que sugirió es que probablemente el problema del crecimiento de las plántulas de brócoli en los sustratos de paja de trigo puede estar también relacionado con las propiedades físicas de estos.

Los objetivos de este experimento fueron:

1. Establecer si existe diferencia significativa en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot que se desarrollen en los sustratos de paja de trigo con diferentes granulometrías, en relación a plántulas de brócoli que se desarrollen en los sustratos testigos.
2. Establecer si existe diferencia significativa en las variables de crecimiento de plántulas de brócoli que se desarrollen en los sustratos de paja de trigo con diferentes granulometrías, por efecto de las propiedades físicas.
3. Constatar nuevamente y bajo las condiciones específicas de este experimento, que los sustratos de paja de trigo poseen alta bioestabilidad en el transcurso de 30 días de crecimiento de las plántulas de brócoli.
4. Establecer el intervalo de concentraciones de fenólicos solubles totales en los sustratos de paja de trigo, en el que, la presencia de los pelos radicales de las raíces de las plántulas no se vea afectada.
5. Definir si el pH, la conductividad eléctrica y las concentraciones de fenólicos solubles totales determinadas en el transcurso del experimento inhiben de manera significativa el crecimiento de plántulas de brócoli en los sustratos de paja de trigo, en relación con los sustratos testigos.
6. Establecer si existen diferencias en la concentración de nutrimentos en los vástagos de las plántulas de brócoli que crezcan en los sustratos de paja de trigo con respecto a los vástagos de las plántulas que lo hagan en los sustratos testigos, debido a la inhibición del crecimiento por los compuestos fenólicos presentes en los primeros.

5.2 MATERIALES Y MÉTODOS

5.2.1 Acondicionamiento de la paja de trigo y elaboración de los sustratos

Pacas de paja de trigo variedad Saturno se molieron en un molino de martillos y en la salida del material molido se utilizó una malla de 2 mm, usada para moler grano de sorgo. La paja se recibió en costales limpios de fertilizante. El tamaño de las partículas de paja de trigo se seleccionó utilizando tamices de 2.0 mm, 1.0 mm y 0.5 mm de diámetro. Las partículas de paja que se quedaron en los tamices de 2.0 mm y 1.0 mm se colocaron en costales separados.

Se prepararon seis mezclas con granulometrías de 100-00, 90-10, 80-20, 70-30, 60-40 y 50-50 en porcentaje y con base en volumen, de partículas menores de 2.0 mm y mayores e iguales a 1.0 mm, y partículas menores de 1.0 mm y mayores e iguales a 0.5 mm respectivamente. Una vez realizadas las mezclas de las partículas en los porcentajes señalados, los materiales de paja de trigo se introdujeron en cubetas de plástico de 20 L y se les agregó agua común para la extracción de los compuestos fenólicos. La extracción se hizo en relación 1: 2 (sustrato: agua) con base en volumen y se dejó reposar por una hora. La extracción se realizó en el Laboratorio de Nutrición Vegetal, Área de Nutrición Vegetal, Programa de Edafología, Instituto de Recursos Naturales (IRENAT) del Colegio de Postgraduados, en Montecillo, Texcoco, Edo. de México.

Pasado este tiempo, el agua se decantó con la ayuda de una malla de plástico bastante cerrada para evitar la pérdida de partículas de paja, posteriormente las pajas de todos los tratamientos se enjuagaron tres veces (aproximadamente tres minutos en cada enjuague) con agua común y con el mismo volumen utilizado para la extracción. La paja se exprimió con la ayuda de un trozo de tela y secó al sol. Se guardó en bolsas de plástico negro hasta su utilización como sustrato. Este procedimiento para la elaboración de los sustratos se realizó durante la segunda semana del mes de abril del año 2003.

5.2.2 Sustratos evaluados

En el Cuadro 1, se presentan los ocho sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot. El experimento de evaluación de los sustratos en el crecimiento de plántulas de brócoli, se llevó a cabo en un invernadero del Área de Nutrición Vegetal, en el Colegio de Postgraduados, en Montecillo, Texcoco, Edo. de México, durante el periodo del 27 de abril al 27 de mayo del 2003.

Cuadro 1. Sustratos evaluados en el experimento de granulometrías.

Sustrato	Material	Granulometría %
1	Paja de trigo	100-00
2	Paja de trigo	90-10
3	Paja de trigo	80-20
4	Paja de trigo	70-30
5	Paja de trigo	60-40
6	Paja de trigo	50-50
7	Sogemix VT-M	2.63 % --2.0 mm; 22.62 % -- 1.0 mm; 15.26 % -- 0.5; 59.49 %-- <0.5 mm*
8	Sunshine	41.62 % -- 2.0 mm; 15.03 % -- 1.00 mm; 17.50 % -- 0.5; 26.28 % -- < 0.5 mm*

*La granulometría determinada con base en peso en los sustratos testigos es el promedio de tres repeticiones.

La determinación de la granulometría de los sustratos testigos se realizó de acuerdo con Ansorena (1994), utilizando tamices de 2.00 mm, 1.00 mm y 0.5 mm.

5.2.3 Propiedades físicas iniciales de los sustratos

5.2.3.1 Densidad aparente

La densidad aparente (g cm^3) se determinó en una probeta de vidrio graduada de

250 mL. Primeramente los sustratos se secaron en estufa a una temperatura de 70 °C. Los sustratos secos se vertieron sobre la probeta hasta llenar un volumen aproximado de 50 mL. Posteriormente se aplicaron seis golpeteos sobre la base de la probeta teniendo cuidado de que el nivel del sustrato permaneciera horizontal. Se anotó el volumen ocupado por el sustrato adicionado. La probeta y el sustrato se pesaron. El peso del sustrato se obtuvo por diferencia entre el peso de la probeta + sustrato y el peso de la probeta sola (previamente pesada). El peso del sustrato se dividió entre el volumen ocupado por el sustrato y se obtuvo la densidad aparente (DA) en g cm^{-3} . Se hicieron cuatro repeticiones por cada sustrato (Buckman, 1991).

Asimismo, se determinó la DA utilizando como contenedores las charolas que se usaron para la evaluación del crecimiento de las plántulas de brócoli con celdas de 13.11 mL. Los sustratos secos con las granulometrías especificadas se agregaron sobre las 200 celdas de las charolas y se presionaron simulando la presión que se realiza normalmente en el llenado de las charolas con el sustrato.

Las partículas remanentes de paja localizadas sobre las superficies de la charola se removieron para evitar la contribución de estas en el peso total de la charola con sustrato. La charola con las 200 cavidades llenas de sustrato seco se pesó en una báscula. La DA se obtuvo restando el peso de la charola vacía del peso de la charola con sustrato y el peso de este último se dividió entre el volumen total de las 200 celdas de la charola (2,622 mL). Se hicieron cuatro repeticiones por sustrato. Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño completamente al azar con cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS = diferencia honesta significativa).

5.2.3.2 Densidad real

La densidad real (g cm^{-3}) se determinó por medio de una de las tres metodologías evaluadas por Téres *et al.*, (1995), la cual se describe a continuación:

- El sustrato se seca a 105 °C hasta peso constante.
- Se pesan matraces aforados de 100 cm³ limpios y secos (P_s).
- Se añade sustrato seco al matraz y se pesa (P_m). La cantidad de sustrato añadida es aproximadamente un tercio del volumen del matraz.
- Se añade agua destilada hervida hasta aproximadamente la mitad del matraz, arrastrando hacia el interior las partículas de sustrato que hubieran quedado adheridas a las paredes del matraz.
- Se deja reposar por 24 h.
- Se hierve suavemente durante unos minutos para expulsar el aire, agitando con suavidad para evitar la pérdida de sustrato por formación de espuma.
- Se enfría en baño termostático a 20 °C y se añade agua destilada hervida a una temperatura de 20 °C hasta la raya de aforo.
- El exterior del matraz se seca con un paño seco y se pesa (P_{sa}).
- El matraz vacío se seca y se llena con agua destilada hervida.
- Se lleva a 20 °C en baño termostático y se afora.
- El exterior del matraz se seca y se pesa (P_a).
- La densidad real (DR) del sustrato se obtiene por medio de la fórmula:

$$DR = d_a (P_s - P_m) / (P_{sa} - P_a)$$

$$d_a = \text{densidad del agua a } 20 \text{ }^\circ\text{C (1 g cm}^{-3}\text{)}$$

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño completamente al azar con tres repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

5.2.3.3 Porosidad total

Con los datos de DA y DR obtenidos en los dos puntos anteriores se calculó la porosidad total de los sustratos por medio de la fórmula:

$$PT = (1 - DA/DR) \times 100$$

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño completamente al azar con tres repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

5.2.3.4 Propiedades físicas determinadas en embudos de succión y columnas colgantes

A falta de equipo más moderno y especializado para la determinación de las propiedades físicas de los sustratos con el método de referencia propuesto por la Sociedad Internacional de Ciencias Hortícolas (Verdonck, 1992), se hizo una adaptación de este método para la determinación de las propiedades físicas por medio de embudos de succión.

Este estudio se llevó a cabo en el Laboratorio de Física de Suelos, Programa de Edafología en el Instituto de Recursos Naturales (IRENAT) del Colegio de Postgraduados.

La metodología utilizada fue la siguiente:

- Los embudos de vidrio (Pyrex No. 36060, 150 mL, ASTM 10-15 M) con placa filtrante, unidos a mangueras de polietileno de 3/4 de pulgada (1.9 cm) y estas unidas a mangueras de plástico de 1/8 de pulgada (0.31 cm) se lavaron con agua corriente y jabón y se enjuagaron con agua común.
- Las mangueras se llenaron con agua común por su extremo abierto, colocando el embudo en el suelo y llenando las mangueras desde una posición elevada hasta que el agua comenzó a salir por la placa porosa del embudo, extrayendo las burbujas de aire en la placa porosa y en las mangueras. Una vez sin aire en el sistema, los embudos se montaron en una estructura "porta embudos" a una altura aproximada de 2.5 m y se fijaron a esta por medio de pinzas para bureta. La parte interior del embudo

y la parte superior de la placa porosa se secaron con una tela.

- El menisco del agua localizado en el extremo abierto de la manguera inferior se puso justamente al nivel bajo de la placa porosa y se dejó equilibrar por lo menos dos horas.
- Después del equilibrio, se adicionaron 50 mL del sustrato seco (medido en probeta) y se distribuyó uniformemente en el interior del embudo teniendo cuidado de no comprimir el sustrato. Por la parte exterior y alrededor del embudo se marcó con un plumón de tinta permanente el nivel superior del sustrato (aproximadamente 5 cm de altura tomando como nivel de referencia la placa porosa).
- Con la ayuda de una bureta se fue adicionando muy lentamente agua sobre el sustrato teniendo precaución de no alterar el volumen total inicial del sustrato (volumen constante). Se adicionó agua hasta ver el espejo del agua sobre el sustrato. Los embudos se cerraron por la parte superior con un tapón de plástico el cual estaba unido a una varilla de vidrio en su centro y esta, interconectada a una manguera superior de 1/8 de pulgada, la que se conectó al extremo superior de una bureta graduada y está conectada al extremo inferior o abierto de la manguera.
- Los puntos de unión entre el tapón y el embudo, y la manguera de 1/8 de pulgada con el extremo superior de la bureta se sellaron con plástico auto adherible para cerrar completamente el sistema. El sistema se dejó en este estado hasta el siguiente día con la finalidad de permitir la total saturación del sustrato. Después de 12 horas los embudos se destaparon y a los sustratos se les adicionó más agua, llevándolos nuevamente hasta que se observó el espejo de agua sobre la superficie de los sustratos, se dejaron reposar por 2 horas y se verificó si el espejo del agua se conservaba. En caso de no conservarse (absorción de agua) se les volvió a adicionar más agua, hasta su completa saturación.
- El volumen total de agua adicionado correspondió al espacio total de poros, y tomando el volumen de 50 mL como el 100 % de volumen se calculó la porosidad total.

- Después de la saturación, a partir del nivel medio de la altura ocupada por el sustrato (aproximadamente 2.5 cm) el nivel del menisco de agua correspondiente en la manguera inferior se bajó 10 cm (succión a 10 cm).
- El nivel del menisco de la manguera inferior se estuvo verificando con frecuencia, marcando con plumón permanente sobre la manguera de plástico de 1/8 de pulgada el nivel del menisco en cada revisión. Una vez que el menisco permaneció constante (equilibrio) el embudo se destapó y se tomó una muestra de sustrato desde la superficie hasta el fondo del embudo y se colocó en un contenedor de aluminio previamente marcado y pesado y se introdujeron en una estufa para su secado a una temperatura de 105 °C hasta peso constante. El contenido de humedad se calculó por diferencia de pesos.
- Para el caso de las tensiones de 50 cm y 100 cm de columna de agua, después de la saturación de los sustratos y partiendo del nivel medio de la altura ocupada por el sustrato en cada embudo, el menisco del agua de la manguera inferior se bajo primeramente a 10 cm, una vez equilibrado el sistema a esta tensión, el menisco del agua se bajo a 50 cm, y para el caso de la tensión a 100 cm primeramente el sustrato tuvo que estar sometido a tensiones de 10 cm y 50 cm y posteriormente el menisco del agua en la manguera se bajó hasta 100 cm.
- La diferencia en el contenido de humedad entre el nivel de 0 cm (saturación) y 10 cm de columna de agua corresponde a la porosidad de aire (PA) o capacidad de aireación del sustrato.
- La diferencia en el contenido de humedad en los sustratos entre 10 cm y 50 cm de tensión de columna de agua corresponde al agua fácilmente disponible (AFD).
- La diferencia en contenidos de humedad en los sustratos entre 50 cm y 100 cm de columna de agua corresponde al agua de reserva o de amortiguamiento (AR).
- El agua retenida en el sustrato a tensiones superiores a 100 cm de columna de agua corresponde al agua difícilmente disponible (ADD).

- La transformación del contenido de humedad con base en peso a base en volumen se hizo usando la densidad aparente ($DA = m/v$) de cada sustrato.

Los datos de esta variable se analizaron por medio de análisis de varianza de un diseño completamente al azar con ocho tratamientos y dos repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

5.2.3.5 Propiedades físicas determinadas en charola aplicando presión

Charolas negras con las características especificadas con anterioridad, se cortaron en secciones de 4 x 4 celdas y se llenaron con los sustratos secos ejerciendo una ligera presión, simulando el llenado normal de las charolas. Posteriormente, a cada una de tres celdas se taparon con el dedo índice de la mano izquierda y se agregó agua por medio de una bureta. El agua se agregó muy lentamente hasta que el sustrato presentó el espejo de agua en su superficie (saturación aparente). El tiempo aproximado de “saturación” para los sustratos de paja de trigo fue aproximadamente de 15 minutos, mientras que para los dos sustratos testigos (turbas) fue de aproximadamente 30 minutos.

Se cuantificó la cantidad de agua adicionada a los sustratos, la cual equivale en volumen a la porosidad total presente en el sustrato. Posteriormente se quitó el dedo índice del orificio inferior de drenaje y se dejó drenar hasta que no goteó más agua (equilibrio con la presión atmosférica), recibiendo el agua de drenaje en una probeta de 10 mL. El agua de drenaje en la probeta de 10 mL equivale en volumen a la porosidad de aire (correspondiente a 10 cm de tensión de columna de agua). El agua retenida por el sustrato se calculó por diferencia entre el agua total adicionada al sustrato y el agua drenada.

El espacio sólido se calculó restando la porosidad total (PT) del volumen total ocupado por el sustrato. Todas estas propiedades se calcularon en porcentaje y con base en volumen.

Estas variables se analizaron por medio de análisis de varianza de un diseño

completamente al azar con tres repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

5.2.4 Llenado de charolas y siembra

Las charolas utilizadas fueron de plástico reciclado termo formado de color negro de 200 celdas cuadradas con una configuración de 10 x 20, de 2.38 cm de lado y 3.81 cm de profundidad, con un volumen de 13.11 cm³ por celda (TLC, Polyform, Inc., S/F). Los sustratos se humedecieron ligeramente con agua destilada para permitir un llenado más uniforme de las charolas. Estas, se llenaron manualmente y se presionaron ligeramente con la parte inferior de otra charola para obtener mayor uniformidad en el llenado de las celdas. Se dejó aproximadamente un cm entre la parte superior de la charola y la superficie del sustrato, con el fin de hacer la siembra lo más uniforme posible. Se sembraron 50 celdas por repetición (dos repeticiones por charola) con dos semillas por celda. Se dejaron cuatro hileras de la charola como espacio libre entre sustratos en cada charola. Se utilizó el cv. híbrido de brócoli Patriot (Sakata Seeds). La semilla se tapó con vermiculita de tamaño mediano hasta llenar la charola. El experimento se estableció con ocho sustratos y cuatro repeticiones en un diseño de bloques al azar. La siembra del experimento se realizó el 27 de abril del año 2003.

5.2.5 Propiedades químicas iniciales en los sustratos

5.2.5.1 pH, conductividad eléctrica y concentración de fenólicos solubles totales

Los sustratos en las charolas, se regaron con agua destilada con una aspersora manual hasta “capacidad de contenedor”, dejando reposar por una hora y posteriormente se adicionaron 6.5 mL de agua destilada (relación 1: 2; agua: sustrato; v/v) en cada una de cuatro celdas y los lixiviados se colectaron en bolsas de plástico pequeñas. Los lixiviados de cada una de las celdas de cada sustrato

se juntaron y en esta solución se determinaron el pH, la conductividad eléctrica (CE-dS m⁻¹) y la concentración de fenólicos solubles totales (CFST-mg L⁻¹) de los sustratos. Las determinaciones del pH y la CE se hicieron directamente en los lixiviados. La metodología para la cuantificación de las CFST ha sido descrita detenidamente en capítulos anteriores. Estas variables se analizaron por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con ocho tratamientos y cuatro repeticiones y la comparación entre medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

Después de tomar las muestras para la cuantificación del pH, la CE y la CFST, las charolas con los sustratos se regaron con agua común, se cubrieron con un plástico negro y se pusieron en la sombra hasta un poco antes de la emergencia de las plántulas. Las charolas se regaron tres veces con agua común antes de la emergencia de las plántulas.

5.2.5.2 Materia orgánica

Con la finalidad de cuantificar la posible degradación de los sustratos de paja de trigo, en el transcurso del experimento, se determinaron en los sustratos el porcentaje inicial y final de materia orgánica (MO). Se pesaron 2 g de cada sustrato, los cuales previamente se secaron en una estufa a una temperatura de 80 °C hasta peso constante, y se colocaron en crisoles de porcelana, los cuales previamente se pusieron a peso constante y se identificaron con números. Los crisoles se introdujeron a una mufla. La temperatura de la mufla se fue incrementando poco a poco hasta llegar a 550 °C para permanecer a esta temperatura por un tiempo de cuatro horas, después de las cuales la mufla se apagó y se dejó enfriar hasta otro día. Los crisoles se transfirieron con unas pinzas para crisol a un desecador para evitar su humectación, y se fueron sacando uno a uno para pesarlos. El contenido de materia orgánica de los sustratos se calculó de acuerdo con la siguiente fórmula para la determinación de las cenizas y posteriormente por diferencia de 100.

$$\text{Cenizas (\%)} = 100 \times \frac{(T + C) - T}{(T + MS) - T}$$

T = peso del recipiente seco y tarado

C = peso de las cenizas

MS = peso de la muestra seca

(Ansorena, 1994).

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con ocho tratamientos y cuatro repeticiones, y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

5.2.5.3 Capacidad de intercambio catiónico

La cuantificación de esta propiedad se realizó por medio de una metodología modificada del método del acetato de amonio a pH 7 (Rhoades, 1982), la cual se describe a continuación:

- Se pesaron 5 g de sustrato y se colocaron en embudos de percolación a los que previamente se les colocó una capa de algodón. Se adicionaron 100 mL de acetato de amonio (NH_4AC) 1 N a pH 7, y se dejaron reposar por 12 h.
- El extracto (iones intercambiables y iones acetato) se colectó utilizando un gasto de $0.5 \text{ gotas seg}^{-1}$.
- Se adicionaron al embudo 100 mL de etanol (1N) para eliminar los residuos de acetato.
- El sustrato en el embudo nuevamente se saturó con NH_4AC 1 N de la misma manera que en los pasos anteriores, a diferencia que ahora el extracto se recibió en un matraz para digestión.
- Al matraz se le adicionaron 1 g de parafina, 10 g de sal (NaCl) y 50 mL de NaOH 1 N y se procedió a destilar.

- El gas se recibió en 20 mL de ácido bórico 2 N, usando como indicadores verde y rojo de bromocresol. La destilación se interrumpió hasta obtener en el matraz un volumen de 75 mL.
- El volumen del líquido en el matraz se tituló con ácido sulfúrico con una concentración 0.01 N.
- El cálculo de la capacidad de intercambio catiónico (CIC) se realizó utilizando la siguiente fórmula:

$$\text{CIC (meq } 100 \text{ g}^{-1} \text{ de sustrato)} = \frac{(\text{Vm} - \text{Vb}) \times \text{N del H}_2\text{SO}_4 \times 100}{\text{mL de alícuota destilada} \times \text{peso de muestra}}$$

en donde:

Vm es el volumen de H₂SO₄ 0.01 N utilizado para la titulación de la muestra.

Vb es el volumen de H₂SO₄ 0.01 N utilizado para la titulación del blanco.

La determinación de la CIC de los sustratos se realizó por triplicado. La CIC calculada en meq 100 g⁻¹ se transformó a cmoles (+) kg⁻¹ (centimoles carga por kilogramo de sustrato).

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño completamente al azar con ocho tratamientos y tres repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

5.2.6 Solución nutritiva

Los nutrientes en los sustratos se suministraron a los ocho días después de la siembra con una solución nutritiva al 100 % y con un pH de 5.5, exceptuando el Sogemix VT-M que se regó con agua común. Lo anterior se realizó con la finalidad de conseguir que la CE de los sustratos de paja de trigo y el Sunshine (sin aditivos) tuvieran una CE similar a la CE del sustrato Sogemix VT-M. La solución nutritiva que se utilizó como fuente de nutrientes para las plántulas y su

concentración, es la misma que se utilizó en el experimento anterior (evaluación de sustratos con diferentes extractantes; Capítulo IV). A los 10 DDS la solución nutritiva al 100 % se suministró en todos los sustratos.

5.2.7 Porcentaje de plántulas emergidas a los nueve días después de la siembra

Se contó el número de plántulas emergidas en los sustratos a los nueve días después de la siembra (nueve DDS) y se calculó el porcentaje de emergencia. Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

5.2.8 Propiedades químicas en los sustratos a los 10, 13, 15, 23 y 27 DDS

Con el objetivo de cuantificar los posibles cambios de las propiedades químicas iniciales de los ocho sustratos durante el experimento también se cuantificaron el pH, la CE y la CFST a los 10, 13, 15, 23 y 27 DDS. Los datos por sustrato se obtuvieron de cuatro repeticiones.

5.2.8.1 pH y conductividad eléctrica

Para la cuantificación de estas propiedades, en cada una de cuatro celdas con plántulas tomadas por repetición al azar en las charolas, se agregaron 6.5 mL de agua destilada (método de vertido, Wright, 1986) y los lixiviados se recolectaron en una bolsa de plástico pequeña y transparente previamente identificada, haciendo una muestra compuesta de las cuatro celdas. Posteriormente en el laboratorio se determinaron el pH y la CE, con el equipo mencionado con anterioridad.

5.2.8.2 Concentración de fenólicos solubles totales

Después de cuantificar las propiedades anteriores, se tomaron 2.1 mL del extracto restante y se cuantificaron las concentraciones de fenólicos solubles totales (CFST) en mg L^{-1} , de acuerdo con el procedimiento ya señalado anteriormente para esta propiedad. La medición se hizo en cada tratamiento por cuadruplicado. Los datos de las propiedades químicas determinadas a los 10, 13, 15, 23 y 27 DDS se procesaron por medio de un análisis de varianza correspondiente a un diseño de bloques al azar con ocho tratamientos y cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

5.2.9 Densidad de pelos radicales a los 10, 13, 15, 23 y 27 DDS

A los 10, 13, 15, 23 y 27 DDS en cinco cepellones de cada sustrato se realizaron observaciones de la densidad de pelos radicales con la ayuda de una lupa. Como las raíces en los sustratos no se habían desarrollado lo suficiente hasta los 23 DDS, los cepellones se extrajeron con la ayuda de una espátula delgada. La densidad de pelos radicales presentes en las raíces que crecieron en los sustratos se evaluó de acuerdo con la siguiente escala visual:

1) alta densidad, 2) moderada densidad, 3) baja densidad y 4) nula densidad.

Una vez realizada la observación con la lupa los cepellones se regresaron a las charolas.

5.2.10 Variables evaluadas en los sustratos a los 30 días después de la siembra (colecta de las plántulas)

5.2.10.1 Propiedades químicas en los sustratos

5.2.10.1.1 pH y conductividad eléctrica

Procedimiento similar al señalado para la cuantificación de estas propiedades a los 10, 13, 15, 23 y 27 DDS (cuatro repeticiones).

5.2.10.1.2. Concentración de fenólicos solubles totales

Procedimiento similar al señalado para la cuantificación de estas propiedades a los 10, 13, 15, 23 y 27 DDS (cuatro repeticiones).

Estas tres variables, se analizaron por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

5.2.10.1.3 Materia orgánica

Procedimiento similar al señalado para la cuantificación de la materia orgánica en los sustratos al inicio del experimento. Con los datos de MO inicial y MO final en los sustratos se calculó la bioestabilidad, dividiendo el porcentaje de MO final entre el porcentaje de MO inicial y se multiplicó por 100. El porcentaje de pérdida de MO se calculó por diferencia entre los porcentajes de MO inicial y final.

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

5.2.10.2 En vástagos

5.2.10.2.1 Deficiencias nutrimentales

Visualmente se revisaron las plántulas que crecieron en las cuatro repeticiones de

los ocho sustratos evaluados, registrando si existían deficiencias nutrimentales.

5.2.10.2.2 Lecturas SPAD

En diez plántulas tomadas al azar en cada repetición, en la hoja más desarrollada se tomaron diez lecturas SPAD con un medidor SPAD-502 (Minolta). El promedio de las diez lecturas se tomó como promedio de cada repetición.

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

5.2.10.2.3 Longitud de vástagos

Se colectaron diez plántulas al azar de la parte central de cada bloque de plántulas, de las cuales se separó el cepellón del vástago con unas tijeras. Esta variable se evaluó con una regla, desde la inserción de la raíz en el tallo (cuello de la raíz) hasta el borde superior de la hoja más larga (cm).

5.2.10.2.4 Diámetro de tallo

Esta variable se evaluó a los dos o tres mm abajo de las hojas embrionarias de la plántula (mm).

5.2.10.2.5. Peso de materia seca de vástagos

Se tomaron los diez vástagos de las diez plántulas de brócoli colectadas, se lavaron con agua común y posteriormente con agua destilada. Se secaron cuidadosamente con papel higiénico y se introdujeron en una bolsa de papel, y se colocaron en una estufa a 80 °C para su secado hasta peso constante. Se pesó la materia seca (g).

Con la finalidad de tratar de explicar mejor el fenómeno de la inhibición de los

compuestos fenólicos presentes en la paja de trigo sobre las variables de crecimiento en las plántulas de brócoli, se corrieron análisis de regresión múltiple tomando como variables dependientes la longitud, el diámetro y el peso de materia seca de vástago y como variables independientes el pH, la CE y la CFST a los 0, 10, 13, 15, 23, 27 y 30 DDS. Se utilizó el paquete S.A.S, versión 6.12.

5.2.10.2.6 Relación peso de materia seca de vástagos/ longitud de vástagos

El peso de la materia seca de 10 vástagos (g) se dividió entre las longitud promedio de los 10 vástagos (cm).

5.2.10.2.7. Análisis químico de vástagos

Para realizar el análisis químico del tejido de los vástagos, estos una vez secos, se molieron en un mortero de porcelana con la ayuda de un pistilo hasta dejar las partículas de tejido reducidas a polvo. El polvo se homogeneizó en una pequeña bolsa de plástico. Por falta de recursos económicos para realizar los análisis en las cuatro repeticiones, se mezclaron las repeticiones 1 y 2 y las repeticiones 3 y 4 para formar únicamente las repeticiones 1 y 2. De aquí se tomaron 0.1 g para el análisis de N y 0.5 g para el análisis de otros nutrimentos (P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn y B). El método para el análisis de N total en el tejido molido fue el propuesto por Bremner y Mulvaney, 1982.

Para la determinación de los otros nutrimentos se siguió el procedimiento de digestión húmeda convencional (Alcántar y Sandoval, 1999) y se cuantificaron por espectroscopia de emisión acoplada a plasma en un equipo ICP-AES Plasma 96 de Varian, perteneciente al Laboratorio de Nutrición Vegetal, Área de Nutrición Vegetal, Programa de Edafología, Instituto de Recursos Naturales del Colegio de Postgraduados.

Los datos se analizaron por medio de un análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con ocho sustratos y dos repeticiones, y la comparación de medias

se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

5.2.10.3 En raíces

5.2.10.3.1 Peso de materia seca de raíces

Los cepellones de las plántulas de brócoli se lavaron en el chorro de la llave para desprender las partículas de sustrato y dejar únicamente las raíces de las plántulas. Las raíces libres de partículas de sustrato se pusieron en una bolsa de papel pequeña y se introdujeron a una estufa para su secado a 80 °C hasta peso constante. Las diez raíces secas de las cuatro repeticiones y los ocho sustratos se pesaron. Los datos se analizaron por medio de un análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con ocho tratamientos y cuatro repeticiones, y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

5.2.10.3.2. Relación peso de materia seca de vástagos/ peso de materia seca de raíces

Con los datos del peso de materia seca de diez vástagos y peso de materia seca de diez raíces se calculó la relación peso de materia seca de vástagos/peso de materia seca de raíces. Los datos se analizaron por medio de un análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con ocho sustratos y cuatro repeticiones, y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

5.2.10.4. En sustratos

5.2.10.4.1 Degradación microbiológica

Para la cuantificación de esta variable, se tomaron tres cepellones por repetición en cada tratamiento, los cuales se secaron en una estufa a 50 °C. Una vez secos, los cepellones se abrieron con los dedos por uno de sus lados y se

desmenuzaron, evitando que el sustrato llevara raíces secas y se mezclaron para obtener una muestra homogénea. Se tomó una muestra de 0.1 g de sustrato, y se distribuyó primeramente en el campo visual del estereoscopio en el aumento de menor magnitud y posteriormente se observó con los de mayor magnitud. La evaluación se hizo con la siguiente escala visual:

1) degradación poco apreciable (1-5 %), 2) degradación muy moderada (5-15 %), 3) degradación moderada (15-25 %), 4) degradación intensa (25-35 %), 5) degradación muy intensa (>35%), y se estimó sobre el área total de los tejidos de las partículas del sustrato, tomando como patrón los mismos materiales sin degradación. Esta variable se reporta únicamente como variable cualitativa.

5.2.10.4.2 Color de raíces

Esta variable se calificó visualmente por medio de la extracción manual de cinco plántulas extras a las diez utilizadas para evaluar el desarrollo de las plántulas, por medio de la siguiente escala:

1) blancas, 2) ligeramente amarillas, y 3) café-amarillento.

5.2.10.4.3 Facilidad para extraer el cepellón

Esta variable se calificó también en las cinco plantas tomadas para evaluar la variable anterior, utilizando la siguiente escala:

1) fácil de extraer, 2) moderadamente fácil de extraer y 3) difícil de extraer. La evaluación de esta variable se realizó después de un riego con agua común y corriente.

5.2.10.4.4 Densidad de pelos radicales

En el cepellón, se observó en estereoscopio la densidad de pelos radicales en las raíces que crecieron en los sustratos de acuerdo con la siguiente escala visual:

- 1) alta densidad, 2) moderada densidad, 3) baja densidad y 4) nula densidad.

Las variables cualitativas únicamente se reportan de acuerdo a la calificación asignada en la escala utilizada.

5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.3.1 Propiedades físicas iniciales de los sustratos

5.3.1.1 Densidad aparente, densidad real y porosidad total

La densidad aparente, la densidad real y la porosidad total determinadas en los sustratos se presentan en el Cuadro 2.

La densidad “aparente” de un sustrato se define como la masa o peso de las partículas contenidas en un volumen determinado (g cm^{-3} , kg m^{-3} , etc.) y su valor depende de lo compacto que se encuentre el sustrato en un contenedor. De acuerdo con el análisis de varianza hubo diferencias altamente significativas entre los sustratos evaluados para esta variable determinada en probeta ($P > F = 0.0001$). El sustrato Sogemix VT-M fue el que presentó la mayor densidad aparente ($DA^1 = 0.1971 \text{ g cm}^{-3}$) seguido en segundo lugar por el sustrato Sunshine (0.1215 g cm^{-3}), ambos utilizados como testigos.

Las DA^1 en los sustratos de paja de trigo se encuentran en el intervalo de 0.0865 g cm^{-3} en el sustrato con granulometría 100-00 y 0.0925 g cm^{-3} en el sustrato con granulometría 50-50, resultando este último estadísticamente diferente al primero. Se observa también que la DA^1 en los sustratos de paja de trigo aumenta en

relación con el aumento en la proporción de partículas menores de 1.0 mm y mayores e iguales a 0.5 mm. Este comportamiento se debe a que al aumentar las proporciones de estas últimas partículas, el número de partículas sólidas en el mismo volumen se incrementa, y por lo tanto se incrementa el peso, por lo que la DA^1 también se incrementa. La mayor DA^1 de los sustratos testigos con respecto a los sustratos de paja de trigo es consecuencia de una mayor proporción de partículas de menor tamaño contenidas en estos, lo cual se relaciona directamente con la granulometría (Cuadro 1). Los sustratos de paja de trigo no tienen partículas menores de 0.5 mm.

Cuadro 2. Densidad aparente, densidad real y porosidad total de los sustratos evaluados.

Sustrato	DA^1	DA^2	DR	PT^1	PT^2
Granulometría	-----gr cm ⁻³ -----			-----%-----	
100-00	0.0865 d	0.1017 e	1.3086 c	94.52 a	92.24 a
90-10	0.0889 cd	0.1019 e	1.3496 c	94.25 a	92.31 a
80-20	0.0900 cd	0.1046 de	1.4447 b	94.15 ab	92.77 a
70-30	0.0902 cd	0.1120 d	1.5422 a	93.57 ab	92.77 a
60-40	0.0922 cd	0.1216 c	1.5722 a	93.13 ab	92.29 a
50-50	0.0925 c	0.1273 c	1.5792 a	92.81 b	91.97 a
Sogemix VT-M	0.1971 a	0.2165 a	1.4412 b	84.15 d	85.01 b
Sunshine	0.1215 b	0.1528 b	1.0863 d	88.86 c	85.89 b
P> F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
DHS	0.0060	0.0089	0.0479	1.44	1.13

DA^1 = Densidad aparente calculada en probeta; DA^2 = Densidad aparente calculada en charola; DR = densidad real; PT^1 y PT^2 = porosidad total calculada utilizando la DA^1 y DA^2 . DHS = diferencia honesta significativa. Valores con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

La DA^2 obtenida en charolas se presenta también en el Cuadro 2. La DA^2 por este método resultó ser mayor que la obtenida utilizando la probeta, cuando se esperaba que la DA^1 obtenida en probeta fuera mayor que la de la charola debido

al golpeteo conferido a la probeta, haciendo que una mayor cantidad de partículas de los sustratos se asentaran o se empaquetaran en un mismo volumen. Esta situación aparentemente anómala es que debido a lo ligero de las partículas de todos los sustratos al golpear la base de la probeta, en lugar de compactarse, las partículas cercanas a la superficie en el sustrato “saltaron” impidiendo que sucediera el acomodo de una mayor cantidad de partículas en un mismo volumen. Para el caso de las DA^2 calculadas en la charola no hubo golpeteo, sino que simplemente los sustratos se adicionaron presionando ligeramente los sustratos sobre las celdas de la charola, acomodándose de manera específica.

El análisis de varianza de las DA^2 obtenidas en charolas (celdas de 13.11 mL) indica que hay diferencia altamente significativa ($P > F = 0.0001$). De manera similar a las DA^1 determinadas por el método de la probeta, las DA^2 de los sustratos testigos fueron mayores y estadísticamente diferentes a las DA^2 de los sustratos de paja de trigo, por las razones expresadas con anterioridad.

Las DA^2 de los sustratos de paja de trigo aumentaron al incrementarse las proporciones de partículas menores de 1.0 mm y mayores e iguales a 0.5 mm, comportamiento similar al encontrado en las DA^1 . Por otro lado y de acuerdo con la comparación entre medias utilizando el procedimiento de Tukey ($\alpha = 0.05$), las DA^2 de los sustratos con granulometrías 60-40 y 50-50 fueron mayores y estadísticamente diferentes a las DA^2 que presentaron los otros sustratos de paja de trigo (sustratos más densos). De acuerdo con los datos obtenidos, y a los razonamientos expresados, podría ser preferible utilizar el método de la charola que el de la probeta para la estimación de la DA en estos sustratos, especialmente si estos se van a usar en charolas, cuando es necesario comprimir con cierta fuerza los sustratos para que no queden grandes espacios vacíos.

La densidad real (DR) de un sustrato se define como la masa o peso de sus partículas en un volumen determinado, sin tomar en consideración el espacio poroso. La DR de los sustratos se presenta también en el Cuadro 2. Hubo diferencias altamente significativas entre los sustratos en esta variable ($P > F = 0.0001$). Los sustratos de paja de trigo incrementaron su DR en la medida en que se incrementó el porcentaje de partículas menores de 1.00 mm e iguales a 0.5

mm, debido al mayor número de partículas en un mismo volumen. Los sustratos 70-30, 60-40 y 50-50 fueron los que presentaron las mayores DR entre los sustratos de paja de trigo y fueron estadísticamente diferentes a los demás sustratos de paja de trigo y a los sustratos testigos. El sustrato Sogemix VT-M tuvo la mayor DR de todos los sustratos.

Con los valores de DA^1 , DA^2 y DR de los sustratos, se calculó la porosidad total (PT) por la fórmula: $PT = (1-DA/DR) \times 100$ (Cuadro 2). El análisis de varianza para la PT^1 calculada con la DA^1 obtenida en probeta y la DR, indica que existen diferencias altamente significativas entre los sustratos. Los sustratos con mayor PT^1 fueron los sustratos de paja de trigo los que fueron estadísticamente iguales entre sí, excepto el sustrato con granulometría 50-50 que fue el que tuvo la menor PT^1 , y fueron estadísticamente diferentes a los sustratos testigos. La PT^1 en los sustratos de paja de trigo osciló entre 94.52 % para el sustrato con granulometría 100-00 y 92.81 % en el sustrato con granulometría 50-50. La PT^1 en los sustratos de paja de trigo es muy alta, debido a que la DA^1 obtenida por el método de la probeta proporcionó valores muy bajos. La PT^1 disminuyó conforme la proporción de partículas menores de 1.0 mm y mayores e iguales a 0.5 mm se incrementó, de manera inversa a como se comportó la DA^1 . Este comportamiento es normal para partículas de forma granular (Burés, 1997), aunque en el presente trabajo las partículas de paja de trigo son de forma laminar y de estructura fibrosa. De acuerdo con Burés (1997), aunque no se han hecho muchos estudios sobre el empaquetamiento de materiales fibrosos, existen indicios de que los materiales que tienen fibras rígidas tienen un comportamiento similar a los materiales granulares.

Por otro lado la PT^2 obtenida utilizando la DA^2 en charolas, arroja valores de PT^2 ligeramente menores a los encontrados utilizando la DA^1 calculada en probeta. Hubo diferencias altamente significativas entre los sustratos de paja de trigo y los sustratos testigos ($P > F = 0.0001$). Los valores de PT^2 en los sustratos de paja de trigo también disminuyeron conforme la proporción de partículas menores de 1.0 mm y menores e iguales a 0.5 aumentó. La PT^1 calculada utilizando la DA^1

prácticamente fue superior en todos los casos que la PT^2 calculada utilizando la DA^2 .

5.3.1.2 Propiedades físicas utilizando embudos de succión con columnas colgantes

En el Cuadro 3, se presentan los resultados de las propiedades físicas determinadas con el equipo mencionado.

5.3.1.2.1 Porosidad total

Los resultados del análisis de varianza muestran que existe diferencia altamente significativa entre los sustratos evaluados en la PT ($P > F = 0.0016$). El sustrato Sogemix VT-M fue el único que presentó diferencia significativa en esta variable con respecto a los demás sustratos, presentando solamente 88 % de PT. Los demás sustratos presentaron PT en el intervalo de 91.50 % en el sustrato 50-50 y de 94.20 % en el sustrato 100-00. La PT en los sustratos de paja de trigo, calculada adicionando directamente agua en los sustratos contenidos en los embudos, fue muy similar a las PT calculadas con las DA^1 , DA^2 y la DR de los sustratos. La PT de los sustratos de paja de trigo también presenta una tendencia a disminuir, en la medida en que se incrementa la proporción de partículas menores de 1.0 mm y mayores e iguales a 0.5 mm. Esta tendencia es normal.

La mayor PT de los sustratos testigos en las determinaciones de esta variable utilizando los embudos de succión con referencia a las PT obtenidas por medio de la fórmula, pudo haberse debido a que tanto en el método de la probeta como en el método de la charola, la densidad aparente se calculó con los sustratos relativamente compactados, mientras que en las determinaciones de la PT en el método de los embudos de succión los sustratos no se presionaron, por lo que las densidades de los mismos se supone fueron menores y por lo tanto se aumentó la porosidad.

5.3.1.2.2 Espacio sólido

Los valores de espacio sólido (ES) determinados en los ocho sustratos evaluados se presentan también en el Cuadro 3.

Los sustratos de paja de trigo presentaron un aumento en los porcentajes de ES en la medida en que se incrementaron las proporciones de partículas menores de 10 mm y mayores e iguales a 0.5 mm. El análisis de varianza muestra que hubo diferencia altamente significativa entre los tratamientos ($P > F = 0.0016$).

El Sogemix VT-M presentó un 12 % de ES, todos los demás sustratos tuvieron ES menores y fueron estadísticamente diferentes a este último.

El intervalo de valores de ES en los demás sustratos fluctuó entre 5.80 % en el sustrato 100-00 de paja de trigo y 8.00 % en el sustrato Sunshine.

5.3.1.2.3 Porosidad de aire

La porosidad de aire (PA) o capacidad de aireación de un sustrato se puede concebir como el espacio ocupado por aire, después de que un sustrato ha sido saturado y posteriormente se deja drenar libremente. Este espacio se encuentra ocupado por macroporos que no retienen el agua. Lo anterior, equivale aproximadamente al volumen de agua que se libera al aplicar una tensión de 10 cm de columna de agua (-1 kPa) sobre los sustratos contenidos en los embudos de succión, o bien equivale al porcentaje de aire en volumen que queda en lugar del agua desplazada.

La capacidad de aireación es una de las propiedades físicas más importantes debido a que el proceso de respiración de las raíces de las plantas se encuentra relacionado directamente a la concentración de O_2 presente primeramente en la fase gaseosa y posteriormente se difunde hacia la fase líquida, de la cual, las raíces de las plantas obtienen el O_2 disuelto para su respiración (Burés, 1997; Baas *et al.*, 2000).

Cuadro 3. Propiedades físicas de los sustratos evaluados determinadas en embudos de succión con columnas colgantes.

	PT	ES	PA	AFD	AR	ATD	ADD	PAGUA
Sustrato	% en volumen							
100-00	94.20 a	5.80 b	6.11 a	42.96 a	11.60 a	54.56 a	33.53 a	88.09 a
90-10	93.50 a	6.50 b	6.35 a	40.46 a	10.69 a	51.15 a	36.00 a	87.15 a
80-20	93.20 a	6.80 b	6.39 a	38.47 a	8.38 a	46.85 a	39.96 a	86.81 a
70-30	93.00 a	7.00 b	5.53 a	36.88 a	7.79 a	44.67 a	42.80 a	87.47 a
60-40	92.30 a	7.70 b	5.00 a	33.93 a	7.20 a	41.13 a	46.17 a	87.30 a
50-50	91.50 a	8.50 b	4.30 ab	31.85 a	6.00 a	37.85 a	49.35 a	87.20 a
Sogemix VT-M	88.00 b	12.00 a	2.18 b	32.20 a	8.24 a	40.44 a	45.38 a	85.82 a
Sunshine	92.00 a	8.00 b	5.29 a	35.57 a	7.47 a	43.04 a	43.67 a	86.71 a
P>F	0.0016	0.0016	0.001	0.2833	0.1654	0.2071	0.1644	0.6540
DHS	3.23	3.23	2.24	17.89	7.20	23.35	20.74	4.25

PT = porosidad total; ES = espacio sólido; PA = porosidad de aire; AFD = agua fácilmente disponible; AR = agua de reserva; ATD = agua total disponible; ADD = agua difícilmente disponible; PAGUA = porosidad de agua; DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

De Boodt y Verdonck (1972), establecieron que un “sustrato ideal” para plantas ornamentales debe de tener una porosidad total igual o superior al 85 %, una capacidad de aireación entre 20 % y 30 % y agua fácilmente disponible entre 20 % y 30 %, mientras que el volumen de agua de amortiguamiento tiene que ser pequeño (entre 4 % y 10 %), el resto de la humedad pertenece al agua difícilmente disponible.

Lo anterior, lo establecieron estos autores para macetas de 10 cm de altura y plantas ornamentales, en donde las raíces de las plantas permanecen en el sustrato una buena parte de su ciclo de vida, además de que estos valores se obtuvieron para las condiciones de Gante en Bélgica.

Sin embargo, con los resultados que se muestran posteriormente, se considera cuestionable que estos valores se tomen como referencia tanto para sustratos utilizados en la producción de hortalizas en invernadero en donde se utilizan contenedores de mucho mayor tamaño, que el tamaño del contenedor especificado por estos autores, como para sustratos utilizados en celdas o alvéolos para la producción de plántulas para trasplante (Muratalla, 2003; Rodríguez, 2004).

De acuerdo con Anon (1990), en la norma BS (British Standard) 4156, se recomienda que los sustratos con base en turba para la producción de plantas de temporada en alvéolos y sustratos de semillero tengan una porosidad de aire entre 5 % y 11 %, teniendo precaución para evitar el sobre riego. Menciona además que estos valores han sido calibrados por medio de la experiencia de agricultores y técnicos y que se han distribuido en aplicaciones tanto en campo como en laboratorio. La norma BS 4156 presenta valores de PA bastante diferentes a los señalados por De Boodt y Verdonck (1972).

Es importante tomar también con precaución los valores de la norma inglesa, debido a que las condiciones del Reino Unido son diferentes a las de México. Es probable, que debido a que una buena parte del año en el Reino Unido tienen condiciones de nubosidad, las plántulas tengan menores tasas de evapotranspiración, con lo cual, si las raíces de las plantas están sujetas a condiciones altas de humedad en el sustrato por un largo tiempo, las raíces de estas pueden tener problemas de respiración (falta de O₂), por lo tanto, se

necesitan sustratos con capacidades de aireación mayores a las que pueden requerir las raíces de las plántulas en México, para realizar la respiración. Se asume que la tasa de respiración de las raíces y la transpiración de las plántulas en el Reino Unido son menores que la tasa de respiración y transpiración en nuestro país.

Al respecto, se reporta que el consumo medio de agua en el mes de junio por plantas de jitomate en plena producción en el Reino Unido (1978 y 1996) y en el sur de España fueron de $1.58 \text{ L}^{-1} \text{ planta día}^{-1}$ (1978), $1.33 \text{ L}^{-1} \text{ planta día}^{-1}$ (1996), y $2.25 \text{ L}^{-1} \text{ planta día}^{-1}$ respectivamente debido a la evapotranspiración (Salas y Urrestarazu, 2000), esto demuestra que las tasas de evapotranspiración pueden ser diferentes en ambientes diferentes.

De acuerdo con lo anterior es muy probable que las raíces de las plántulas y las plántulas en general en México funcionen adecuadamente en sustratos con porosidades de aire menores que las reportadas en la norma BS 4156, por la razón de que la tasa de intercambio de gases entre el sustrato y la atmósfera en México se puede dar con mayor rapidez que en el Reino Unido.

De Boodt y Verdonck (1972), mencionan que las raíces de las plantas ornamentales deben de encontrar en un sustrato una gran cantidad de agua fácilmente disponible en los poros y al mismo tiempo un gran volumen de aire en contacto con la atmósfera libre, por lo que es necesario tener una buena proporción aire: agua la cual está en función de la planta a cultivar.

Por ejemplo, se tiene la PA del testigo Sogemix VT-M con un valor promedio de 2.18 %, con base en volumen (Cuadro 3), el cual, de acuerdo con los lineamientos señalados por la norma BS 4156 (1990) podría considerarse como un sustrato no apto para ser usado para la producción de plántulas en alvéolos, sin embargo, en las condiciones en donde se evaluó este sustrato (Montecillo, Texcoco, Edo. de México), esta porosidad de aire (o menor) fue suficiente para producir el mejor desarrollo en plántulas de brócoli en este experimento (Cuadro 8). Probablemente, la verdadera porosidad de aire en volumen de este sustrato en la celda de una charola sea menor al valor determinado de 2.18 %, por la razón de que los sustratos en las celdas se introducen con presión, con la finalidad de que la celda

quede completamente llena y sin grandes espacios para obtener una uniformidad del sustrato en la celda. Por otro lado, también se puede pensar que la PA del sustrato Sogemix VT-M bajo condiciones normales de manejo puede ser mayor a la calculada, debido a que el sustrato no llega a saturarse completamente.

También es importante considerar la porosidad de fractura, la cual tiene importancia en los sustratos en interfases sustrato-contenedor y en planchas de cultivo (Burés, 1997).

De acuerdo con el análisis de varianza para esta variable, hubo diferencias altamente significativas entre los sustratos ($P > F = 0.001$). Todos los sustratos de paja de trigo y el testigo Sunshine fueron estadísticamente iguales en la prueba de comparación entre medias. La PA en estos sustratos se encuentra en el intervalo de 4.30 % en el sustrato de paja de trigo 50-50 y 6.39 % en el sustrato 80-20. Con excepción de los valores de 2.18 % en el sustrato Sogemix y de 4.30 % en el sustrato de paja de trigo con granulometría 50-50, todos los demás sustratos presentaron valores en el intervalo señalado por la norma inglesa BS 4156.

Se menciona que sustratos con valores de porosidad de aire menores al 7.0 % se pueden utilizar para plantas de ciclo corto en maceta y para plantas de temporada, teniendo cuidado de regar cuidadosamente, especialmente en condiciones de baja transpiración (Bragg y Chambers, 1987, citados por Ansorena, 1994).

De acuerdo con lo señalado por De Boodt y Verdonck (1972), los valores de porosidad de aire o capacidad de aireación encontrados en los sustratos evaluados no serían adecuados para el crecimiento ideal de las plántulas de brócoli, porque muestran valores muy bajos, sin embargo, en la práctica las raíces de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos testigos (sin efecto de compuestos fenólicos) no presentaron problemas de anoxia en sus raíces, mostrando raíces blancas y vigorosas.

5.3.1.2.4 Agua fácilmente disponible

No hubo diferencias significativas ($P > F = 0.2833$) entre los sustratos en el porcentaje de agua fácilmente disponible (AFD) (Cuadro 3). Todos los sustratos tuvieron estadísticamente el mismo porcentaje de AFD.

El agua fácilmente disponible (AFD) se concibe como el porcentaje de agua con base en peso o volumen que se libera de un sustrato al aplicar tensiones entre 10 cm (-1 kPa) y 50 cm de columna de agua (-5 kPa), partiendo del nivel medio del sustrato, utilizando embudos de succión. De Boodt y Verdonck (1972), establecieron este intervalo de tensiones como el adecuado para que el agua de un sustrato pueda ser absorbida por las raíces de las plantas con la menor inversión de energía y para que puedan desarrollarse sin problemas de disponibilidad de agua. Lo anterior, indica que esta agua no se encuentra fuertemente adherida o absorbida por el sustrato, ocupando macroporos (300 μ), principalmente interparticulares. Asimismo, señalan que el AFD debe de ocupar entre 20 % y 30 % del volumen total ocupado por el sustrato y debe representar entre 75 % y 90 % del agua total disponible (De Boodt y Verdonck, 1972).

Todos los valores de AFD obtenidos en los sustratos sobrepasan ligeramente el valor mínimo de 75 % del agua total disponible (Cuadro 3).

Es importante mencionar que el volumen en el que se desarrolla una plántula en una celda de una charola es muy pequeño; en el presente trabajo se utilizaron charolas con celdas de 13.11 mL. Si tenemos que el sustrato 100-00 posee un porcentaje de AFD de 42.96 %, en la celda de la charola tendríamos únicamente 5.63 mL de AFD, mientras que siguiendo el valor de referencia de 20 % a 30 % de AFD tendríamos como máximo 3.93 mL. Es importante mencionar que el 20 % o 30 % de AFD que señalan los autores es suficiente o no para un cultivo determinado, dependiendo del volumen del contenedor. Un sustrato en una maceta o bolsa de 15 L con una capacidad de AFD de 30 %, tendría disponible 4.5 L de agua.

Los sustratos Sogemix VT-M y la paja de trigo con granulometría 50-50 poseen poros más pequeños que hacen que el agua fácilmente disponible no se

encuentre en las mismas proporciones que en el caso de los demás sustratos, aunque sus medias fueron iguales estadísticamente.

5.3.1.2.5 Agua de reserva

El agua de reserva (AR) o de amortiguamiento se entiende como el porcentaje de agua que se libera de un sustrato al aplicar tensiones entre 50 cm y 100 cm de columna de agua (-5 kPa y -10 kPa). Las plantas pueden obtener agua adicional cuando la succión se realiza arriba de 50 cm de columna de agua (-5 kPa), el agua de amortiguamiento es considerada una medida de la reserva de agua en el sustrato, necesaria cuando ocurren ondas repentinas de calor, trayendo como consecuencia una muy intensa transpiración. El AR en un sustrato debe representar al menos entre el 4 % y 5 % del volumen con la finalidad de que esta sea óptima (De Boodt y Verdonck, 1972). El tamaño de los poros en los cuales se aloja el agua de reserva es menor en relación con los poros en donde se aloja el agua fácilmente disponible.

El análisis de varianza para esta variable muestra que no existe diferencia significativa entre los sustratos evaluados ($P > F = 0.1654$). Todos los sustratos estadísticamente tuvieron el mismo porcentaje de AR. El sustrato que presentó el mayor porcentaje de AR fue el sustrato de paja de trigo con granulometría 100-00, con un 11.60 %. Se observó una relación directa entre la granulometría de los sustratos de paja de trigo y el porcentaje de AR en volumen contenida entre tensiones de 50 cm y 100 cm de columna de agua, esto es, el AR se incrementó en relación con el aumento en la proporción de partículas menores de 2.00 mm y mayores e iguales a 1.00 mm en los sustratos de paja de trigo. Este comportamiento es contrario a lo que se esperaba. El comportamiento normal es que al aumentar la proporción de partículas menores de 1.0 mm y mayores e iguales a 0.5 mm el agua de reserva se incrementara. El comportamiento de las pajas de trigo con respecto a esta variable puede explicarse tomando en consideración que las partículas de paja de trigo tienen porosidad interna, interconectada con la porosidad que proporciona el empaquetamiento de las

partículas. Cuando las partículas de paja de trigo son más largas, el agua queda atrapada en la porosidad interna y es más difícil de extraer de la parte interior media de esta partícula que de la parte interior media de una partícula más pequeña o corta.

Para el caso de los sustratos testigos, se observa un incremento en el volumen de AR al incrementarse la proporción de partículas menores de 0.5 mm en el sustrato Sogemix VT-M (Cuadro 3).

5.3.1.2.6 Agua total disponible

El agua total disponible es simplemente la suma del AFD y el AR. En el Cuadro 3, se muestran los resultados de esta variable. De acuerdo con el análisis de varianza no hubo diferencias significativas entre los sustratos ($P > F = 0.2071$). Las medias de todos los tratamientos fueron estadísticamente iguales entre sí. El intervalo de valores del ATD en los sustratos de paja de trigo se encuentra entre 54.56 % en el sustrato 100-00 y 37.85 % en el sustrato 50-50. El sustrato Sunshine presentó un valor de ATD muy cercano al presentado por los sustratos de paja de trigo, mientras que el sustrato Sogemix VT-M fue el que presentó el menor volumen de ATD con solo 40.44 %.

En los sustratos de paja de trigo se observa una tendencia a disminuir el porcentaje de ATD en relación con el aumento en la proporción de partículas menores de 1.0 mm y mayores e iguales a 0.5 mm. En los sustratos testigos también se presentó Esta disminución, en relación con el aumento de la proporción de las partículas menores de 0.5 mm.

El conocimiento del porcentaje de agua total disponible es importante, ya que afecta la frecuencia de riego, que puede espaciarse a medida que aumenta el valor de agua disponible (Ansorena, 1994). La producción de plántulas con sustratos en contenedores, en volúmenes reducidos, exige la aplicación de agua con cierta frecuencia (de dos a cuatro riegos diarios, dependiendo de las condiciones ambientales).

5.3.1.2.7 Agua difícilmente disponible

El agua difícilmente disponible (ADD) se define como el porcentaje de agua en volumen, retenida en el sustrato después de aplicar una tensión de 100 cm de columna de agua (-10 kPa). El agua difícilmente disponible se encuentra almacenada en poros de menor tamaño (microporos $< 30 \mu$), localizados en los espacios interparticulares de partículas muy pequeñas ($< 0.5 \text{ mm}$) y en los espacios intraparticulares de las mismas (porosidad abierta). Este volumen de agua se encuentra fuertemente retenida por el sustrato, de tal manera que para ser obtenida por las raíces de las plántulas es necesario invertir mayor cantidad de energía en relación con el AFD o el AR.

De acuerdo con los resultados de ADD presentados en el Cuadro 3, no hubo diferencia significativa entre los sustratos evaluados ($P > F = 0.1664$). Todos los sustratos presentaron estadísticamente el mismo contenido de ADD en volumen, mostrando que aunque los sustratos de paja de trigo tienen mayores porcentajes de partículas superiores a 0.5 mm (mayor porosidad interparticular) en relación con los sustratos testigos, también poseen un alto porcentaje de porosidad interna abierta (microporos intraparticulares), lo que hace que una proporción importante del agua en el sustrato no esté disponible para ser absorbida por las raíces de las plántulas.

Para el caso de los sustratos testigos que contienen mayores porcentajes de partículas menores de 0.5 mm, (28 % el sustrato Sunshine y 49 % el sustrato Sogemix VT-M), era de esperarse que una alta proporción del agua retenida en estos sustratos estuviera en calidad de ADD. La contribución más importante en la proporción de ADD en los sustratos testigos se atribuye principalmente a los microporos localizados entre las partículas menores de 0.5 mm, aunque también se reporta que los musgos del género *Sphagnum* poseen un tallo y ramas constituidas por células de córtex, las cuales son hialinas y grandes en las que se almacena principalmente agua (Bold, 1989). Lo anterior hace suponer que al menos parte del ADD en los sustratos testigos (turbas) se encuentra dentro de las

células corticales, no estando disponible para ser absorbida por las raíces de las plántulas.

Para hacer una comparación entre el contenido de humedad en 100 cm de tensión de columna de agua (-10 kPa) y el contenido real de agua en un sustrato en donde crecieron plántulas de brócoli, a los 30 DDS, se tomaron tres plántulas de brócoli con su cepellón del sustrato de paja de trigo con granulometría 60-40, cuando estas presentaban apenas los primeros síntomas de deficiencia de agua, se separó la parte aérea de los cepellones y estos últimos se llevaron al laboratorio en pequeños botes de aluminio con tapa. Se pesaron 0.5 g de este sustrato con cierto contenido de humedad (relativamente seco) incluyendo material de paja de trigo a lo largo del eje vertical del cepellón (parte superior un poco más seca que la parte inferior) y se secaron en estufa a 80 °C hasta peso constante. El resultado del cálculo del contenido de humedad promedio de las tres repeticiones del mismo sustrato con base en volumen fue de 4.24 %. Este valor es mucho menor que el que se calculó por medio de las columnas colgantes correspondiente al agua difícilmente disponible en este sustrato, el cual fue de 46.17 %. Las diferencias son del orden de casi 10 veces menos el contenido de humedad en el primero que en el segundo.

Con base en estos resultados, y sin asegurar que son datos concluyentes, cabe hacerse el cuestionamiento sobre el establecimiento de la tensión de 100 cm de columna de agua propuesta por De Boodt y Verdonck (1972), como límite inicial del ADD, en donde las plántulas ya no pueden tomar fácilmente el agua del sustrato, y posteriormente presentan síntomas de falta de agua y no pueden recuperarse de este estrés aun a pesar de adicionar agua al sustrato (punto de marchitez permanente).

Por otro lado, se observó que las plántulas que crecieron en los sustratos testigos presentaron primeramente síntomas de deficiencia de agua que las plántulas que crecieron en cualquiera de los sustratos de paja de trigo, al menos en dos o tres ocasiones en el transcurso del experimento, indicando que los sustratos de paja de trigo proveen de mayor cantidad de AFD y AR (agua total disponible) a las

plántulas que los sustratos testigos, aunque en los resultados de ATD todos los valores hayan sido estadísticamente iguales y muy cercanos unos a otros.

5.3.1.2.8 Porosidad de agua

Los resultados de los valores correspondientes a la porosidad de agua se presentan también en el Cuadro 3, indicando la diferencia entre la porosidad total y la porosidad de aire, o bien el agua total retenida después de que el sustrato se satura y se deja drenar libremente. De acuerdo con el análisis de varianza para esta variable, no hubo diferencias significativas entre los sustratos ($P > F = 0.6540$). Desde el punto de vista práctico, esta variable no es de mucha utilidad para la interpretación de los grados de tensión con que el agua se encuentra retenida en el sustrato y Esta pueda ser absorbida por las raíces de las plantas.

5.3.1.3 Propiedades físicas determinadas en charolas

Algunas propiedades físicas de los sustratos, como porosidad total, espacio sólido, porosidad de aire o capacidad de aireación y porosidad de agua, obtenidas en celdas de las charolas con las especificaciones mencionadas, se presentan en el Cuadro 4.

5.3.1.3.1 Porosidad total

El análisis de varianza muestra que hubo diferencias altamente significativas en la PT ($P > F = 0.0001$). Los sustratos que presentaron mayor PT fueron los sustratos de paja de trigo siendo estadísticamente iguales entre sí y diferentes a los sustratos testigos.

El intervalo de valores de PT en los sustratos de paja de trigo fue de 78.52 % en el sustrato 50-50 y 81.61 % en el sustrato 70-30, con una diferencia de 3.09 %. No se observa una disminución de la PT en los sustratos de paja de trigo al aumentar la proporción de partículas menores de 1.0 mm y mayores e iguales a 0.5 mm,

como en la determinación de esta propiedad química por medio de las columnas colgantes.

La PT relativamente alta en los sustratos de paja de trigo indica que estos sustratos tienen una alta macroporosidad, la cual es ocupada rápidamente por el agua adicionada, llegando a la “saturación”, punto en el cual el sustrato ya no admite más agua. La diferencia entre la PT en los sustratos obtenida por medio de las columnas colgantes y la PT obtenida por medio de la charola, se atribuye a la falta de humectación de los sustratos en esta última, indicando que la proporción faltante de espacio por ocupar, se debe específicamente a espacios ocupados por microporos.

Cuadro 4. Propiedades físicas de ocho sustratos cuantificadas en charolas.

	PT	ES	PA	PAGUA
Sustrato	-----%-----			
100-00	79.83 a	20.17 b	5.52 a	74.30 a
90-10	80.09 a	19.91 b	5.28 a	74.80 a
80-20	80.59 a	19.40 b	7.28 a	73.31 a
70-30	81.61 a	18.38 b	5.56 a	76.04 a
60-40	80.59 a	19.40 b	4.60 a	75.99 a
50-50	78.52 a	21.48 b	4.63 a	73.30 a
Sogemix VT-M	71.68 b	28.32 a	4.41 a	67.24 b
Sunshine	69.91 b	30.09 a	7.13 a	62.77 c
P>F	0.0001	0.0001	0.0774*	0.0001
DHS	3.86	3.86	3.56	4.35

PT = porosidad total; ES = espacio sólido; PA = porosidad de aire; PAGUA = porosidad de agua.

Los sustratos testigos presentaron valores menores de PT que los sustratos de paja de trigo con 71.68 % en el sustrato Sogemix VT-M y 69.91 % en el Sustrato Sunshine. La diferencia de PT entre los sustratos de paja de trigo y los sustratos testigos, se atribuye a que, como las pruebas de porosidad total se realizaron en un tiempo relativamente corto (aproximadamente 15 minutos por repetición para los sustratos de paja de trigo y 30 minutos para los sustratos testigos), los

microporos presentes en mayor proporción en los sustratos testigos debido a su granulometría, no llegaron a humectarse totalmente, y la “saturación” se presentó relativamente de forma rápida en comparación con el método de embudos de succión. Los sustratos de paja de trigo presentaron mayor PT por la razón de que tienen poros más grandes (mayor granulometría) y a la vez probablemente porque cierta proporción de los poros pequeños se llenó más rápido (poros intraparticulares) que los microporos de los sustratos testigos (microporos interparticulares), aún a pesar de que en el caso del sustrato Sogemix VT-M contiene agente humectante. El sustrato Sunshine fue el que presentó la menor PT entre todos los sustratos, lo anterior se debe principalmente a que este sustrato es una turba que no tiene agente humectante, por lo que la absorción de agua se lleva a cabo más lentamente.

La diferencia entre la PT obtenida por medio de las columnas colgantes y la PT obtenida en charolas, aparentemente nos podría señalar el volumen de microporos en los sustratos, sin embargo, se observa que representa solamente una parte de los microporos. Si se piensa que el ADD se encuentra en los microporos, el volumen de esta correspondería a la diferencia entre las PT determinadas por los dos métodos, sin embargo no corresponden. Por ejemplo, el volumen de ADD en el sustrato 80-20 de paja de trigo fue de 39.96 %, mientras que la diferencia en las PT fue solamente de 12.61 %, sugiriendo que la otra parte de microporos son microporos más grandes y que pudieron llenarse con agua al adicionarla con la bureta.

5.3.1.3.2 Espacio sólido

Los sustratos de paja de trigo presentaron menores porcentajes de espacios sólidos y significativamente diferentes a los espacios sólidos de los sustratos testigos (Cuadro 4). Cabe hacer mención que estos valores de ES en los sustratos, obtenidos por el método de la charola, fueron mayores a los valores de ES obtenidos por alguno de los otros dos métodos utilizados. El ES se incrementó por la falta de saturación de los sustratos. El análisis de varianza señala que hubo

diferencias altamente significativas entre los sustratos ($P > F = 0.0001$). El espacio sólido en los sustratos testigos fueron mayores significativamente diferentes a los sustratos de paja de trigo.

5.3.1.3.3 Porosidad de aire

El análisis de varianza para la porosidad de aire (PA), muestra que no hubo diferencias significativas entre los sustratos ($P > F = 0.0774$). La PA en los sustratos evaluados (incluyendo los sustratos testigos) varió entre 4.41 % en el Sogemix VT-M y 7.28 % en el sustrato de paja de trigo con granulometría 80-20, presentando una diferencia entre ellos de únicamente 2.87 %.

Comparando los valores de PA obtenidos por el método de la charola (Cuadro 4) y por el método de las columnas colgantes (Cuadro 3) para un mismo sustrato, se puede apreciar que no existe una diferencia importante. En los sustratos 100-00, 90-10 y 80-20 los valores de PA fueron ligeramente mayores en las determinaciones en las columnas colgantes que los valores de PA obtenidos por el método de la charola. Las diferencias en estos sustratos variaron entre 0.59 % y 1.07 %. En los sustratos de paja de trigo con granulometrías de 70-30, 60-40 y 50-50, las PA calculadas por los dos métodos fueron casi idénticas. En los sustratos testigos las PA fueron superiores en la determinación realizada en las charolas que en las columnas colgantes, lo anterior se explica también por la diferencia en el tiempo de saturación entre las dos metodologías.

Las diferencias en la PA en un mismo sustrato en los sustratos testigos fueron mayores que las diferencias que se presentaron en un mismo sustrato en los sustratos de paja de trigo. Las diferencias fueron de 2.23 % en el sustrato Sogemix VT-M y 1.84 % en el sustrato Sunshine. A los sustratos testigos les faltaron relativamente pocos espacios porosos por llenar, para ocupar todos los macroporos del sustrato utilizando el método de la charola. Se podría considerar que las ligeras diferencias en los valores de PA obtenidos por ambos métodos no son significativas al comparar un mismo sustrato.

En los sustratos de paja de trigo el método de la charola es adecuado para la estimación de la PA, mientras que no podría ser tan conveniente para los sustratos testigos, o bien hacer modificaciones al método permitiendo por mayor tiempo la humectación de este tipo de sustratos modificando la velocidad de goteo en la bureta.

5.3.1.3.4 Porosidad de agua

El análisis de varianza reporta diferencias significativas en la porosidad de agua ($P > F = 0.0001$). Los sustratos testigos estadísticamente fueron diferentes a los sustratos de paja de trigo y a la vez estos fueron diferentes entre sí. Los sustratos de paja de trigo presentaron estadísticamente el mismo volumen de porosidad de agua (PAGUA).

Para el caso de la PAGUA, las diferencias fueron considerables al comparar los valores obtenidos por los dos métodos; el método de la charola y el de las columnas colgantes. Como era de esperarse, la PAGUA fue mayor en los sustratos cuando se usó el método de columnas colgantes que cuando se usó el método de la charola. La diferencia se establece claramente en que, en el método de la charola la absorción de agua en los sustratos fue menor debido al poco tiempo de exposición de los sustratos al agua.

Con excepción de la PA en donde los valores fueron muy similares o las diferencias fueron relativamente pequeñas, todas las demás variables presentaron diferencias importantes al comparar ambos métodos.

Al respecto algunos autores (Lemaire *et al.*, 2003; Rivière *et al.*, 1990), señalan que en realidad la condición de saturación y de capacidad de contenedor en los sustratos raramente se llegan a alcanzar en condiciones cotidianas de trabajo en la práctica hortícola, por lo que se puede pensar que las variables físicas determinadas en la charola pudieran ser las condiciones más cercanas a las “normales” en el manejo de los sustratos. Tomando lo anterior como criterio, para la estimación de algunos parámetros físicos como la PT, PA y PAGUA y con el conocimiento de la granulometría de un sustrato podrían ser suficientes para

estimar a *grosso modo*, las características de disponibilidad de agua para las raíces de las plántulas en un sustrato.

5.3.2 Propiedades químicas iniciales de los sustratos

5.3.2.1 pH y conductividad eléctrica

Los análisis de varianza para estas variables muestran que existió diferencia altamente significativa ($P > F = 0.0001$ y $P > F = 0.0001$ respectivamente) entre los sustratos evaluados (Cuadro 5).

Cuadro 5. Propiedades químicas iniciales de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot.

Sustrato	pH	CE	CFST	MO	CIC
		dS m ⁻¹	mg L ⁻¹	%	cmoles (+) kg ⁻¹
100-00	6.95 ab	0.35 c	39.10 c	94.00 b	17.43 c
90-10	6.66 c	0.34 c	38.76 c	94.12 b	16.33 c
80-20	7.02 a	0.35 c	38.76 c	93.50 b	17.73 c
70-30	6.72 bc	0.35 c	41.80 ab	93.50 b	18.43 c
60-40	6.74 bc	0.38 c	40.11 bc	93.50 b	18.86 c
50-50	7.18 a	0.47 b	43.15 a	93.50 b	18.00 c
Sogemix VT-M	6.40 d	2.20 a	25.24 d	56.37 c	62.80 b
Sunshine	4.35 e	0.18 c	16.45 e	96.37 a	108.13 a
P>F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
DHS	0.259	0.049	2.14	1.734	8.25

CE = conductividad eléctrica; CFST = concentración de fenólicos solubles totales; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico. DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Aunque hubo diferencia significativa entre los sustratos en estas variables, de acuerdo con los valores de estas, se consideró que el pH y la CE en los sustratos

iniciales no afectarían el porcentaje de emergencia de las plántulas de brócoli, con base en lo que se presentó en el experimento descrito en el Capítulo IV de evaluación del crecimiento de plántulas de brócoli, por lo que únicamente se presentan en el Cuadro 5 a manera de valores iniciales o de referencia.

5.3.2.2 Concentración de fenólicos solubles totales

Las CFST iniciales en los sustratos de paja de trigo se presentan también en el Cuadro 4. De acuerdo con el análisis de varianza, hubo diferencias altamente significativas entre las CFST de los sustratos evaluados ($P > F = 0.0001$).

El sustrato de paja de trigo que presentó la mayor CFST inicial fue el sustrato 50-50 con 43.15 mg L^{-1} , el cual resultó ser estadísticamente igual al sustrato de paja de trigo con granulometría 70-30. Los demás sustratos de paja de trigo fueron estadísticamente diferentes a los sustratos de paja de trigo mencionados, presentando relativamente menores CFST. Comparando los valores de las CFST en los sustratos iniciales en este experimento con respecto a las CFST del experimento descrito en Capítulo IV, se observa que en general los sustratos de paja de trigo tratados con alguno de los extractantes diferentes al agua común, presentaron menores CFST que los sustratos iniciales en este experimento. El único sustrato de paja de trigo del experimento anterior que mostró una CFST similar a las CFST de los sustratos iniciales de paja de trigo en este experimento fue el sustrato al que se le extrajeron los compuestos fenólicos con solo agua común, situación similar a la que se realizó para la extracción de los compuestos fenólicos en los materiales de paja de trigo en este experimento.

Tomando como fundamento que las CFST iniciales que se presentaron en los sustratos de paja de trigo en el experimento anterior no afectaron significativamente y en forma negativa la emergencia de las plántulas, en este experimento también se asumió que las CFST en los sustratos de paja de trigo no afectarían la germinación y por consecuencia la emergencia de las plántulas de brócoli.

En general se consideró, al igual que en experimento anterior, que ni el pH, ni la CE, ni la CFST afectarían la germinación y emergencia de las plántulas de brócoli. Esto se comentará con mayor profundidad posteriormente.

5.3.2.3 Materia orgánica

La materia orgánica inicial en los sustratos de paja de trigo (%) y en la turba Sunshine fue muy alta debido a que en estos materiales la materia orgánica se encuentra sin degradar (paja) o muy poco degradada (Sunshine) (Cuadro 4). Las turbas comerciales tienen poca degradación y se clasifican generalmente entre H2 y H3 en la escala de Von Post (Caraveo, 1994).

El análisis de varianza para esta variable indica que existe diferencia altamente significativa entre los sustratos ($P > F = 0.0001$), siendo los sustratos testigos diferentes estadísticamente a los sustratos de paja de trigo, mientras que estos últimos presentan porcentajes de MO similares y estadísticamente iguales.

El Sogemix VT-M, presentó el porcentaje de MO más bajo (56.37 %) debido a que además de material orgánico, contiene aproximadamente un 30 % de vermiculita fina (en volumen) y cal calcítica y dolomítica, macro y micronutrientes (Premier, S/F).

5.3.2.4 Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), es la propiedad de las superficies de las arcillas del suelo cargadas negativamente y de algunos sustratos para adsorber cationes e intercambiarlos con la solución del suelo. Esta propiedad juega un papel importante en la reserva de nutrientes disponibles para las plantas (Verdonck *et al.*, 1981). Abad y Noguera (2000), señalan que en sustratos a los que se aplica solución nutritiva en forma periódica es recomendable utilizar sustratos de origen orgánico con CIC menores a $20 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$ (cmoles (+) kg^{-1}). La CIC de los sustratos evaluados en este experimento se presenta en el Cuadro 4. De acuerdo con el análisis de varianza para la CIC, los sustratos de paja de

trigo presentaron CIC estadísticamente iguales, presentándose en el intervalo entre 16.33 cmoles (+) kg⁻¹ y 18.86 cmoles (+) kg⁻¹.

Los sustratos testigos con base en turba, presentaron CIC mucho mayores y estadísticamente diferentes a las CIC de los sustratos de paja de trigo. El sustrato Sogemix VT-M tuvo una CIC de 62.80 cmoles (+) kg⁻¹ mientras que el Sunshine presentó una CIC de 108.13 cmoles (+) kg⁻¹. Se señala que una turba tiene una CIC de 120 meq 100 g⁻¹ de sustrato (Peat Moss de México S. A., S/F). Lemaire *et al.*, 2003, señalan una CIC de 115 eq m⁻³, equivalente a 115 meq L⁻¹ para una turba rubia.

La diferencia de CIC entre los dos sustratos testigos, se puede atribuir al alto contenido de vermiculita expandida en el Sogemix VT-M (30-40 % en volumen; Premier, S/F) y probablemente también al efecto de los agentes humectantes. La turba Sunshine no contiene agentes humectantes.

Se reporta, que los agentes humectantes en los sustratos incrementan la capacidad para lixiviar nutrientes en sistemas de frecuente irrigación y que la longevidad de los agentes humectantes fluctúa entre tres y cuatro semanas (Bilderback y Lorscheider, 1997). Lo anterior puede estar vinculado a la interacción que ejerce el agente humectante sobre las superficies de los componentes de la turba, que normalmente muestran una alta CIC (Sunshine), disminuyendo la misma. Es importante también señalar que la CIC en los sustratos orgánicos se incrementa al incrementarse el pH debido al aumento de las cargas negativas de los grupos ácidos R-COOH por efecto de ionización (Ansorena, 1994). La determinación de la CIC de los sustratos se realizó a pH 7.0, por lo que las CIC presentadas en el Cuadro 4, hubieran sido o serían ligeramente inferiores si las soluciones nutritivas y/o el ambiente del sustrato se maneja a pH inferiores.

Por otro lado, y en relación con los sustratos de paja de trigo que contienen celulosa, se reporta que los materiales celulósicos parecen zeolitas en su habilidad para tomar parte en reacciones de intercambio, en las cuales los iones metálicos son intercambiados unos por otros, o por iones de hidrógeno. La capacidad de intercambio de fibras de celulosa no purificadas es debida en su mayor parte a las impurezas que contiene, mientras que en celulosas purificadas

la capacidad de intercambio es probablemente debida a los grupos ácidos (tales como los carboxilos) en las moléculas de celulosa (Kirk y Othmer, 1949).

Por otro lado se reporta, que la CIC de las especies dicotiledóneas es mucho mayor que las especies de plantas monocotiledóneas. La CIC para raíces de trigo, maíz, frijol y jitomate fueron de 23 meq 100 g⁻¹, 29 meq 100 g⁻¹, 54 meq 100 g⁻¹ y 62 meq 100 g⁻¹ (Keller y Deuel, 1957., citado por Marschner, 1995). La CIC de 23 meq 100 g⁻¹ (23 cmoles (+) kg⁻¹) reportada para raíces de trigo es relativamente similar a las CIC que se determinaron en las pajas de trigo (principalmente tallos) con CIC entre 16.33 cmoles (+) kg⁻¹ a 18.86 cmoles (+) kg⁻¹.

De acuerdo con los resultados en esta variable, se consideró que aunque los sustratos de paja de trigo presentaron CIC bajas, no por esto el crecimiento de las plántulas de brócoli debería ser menor que el crecimiento que presentarán las plántulas de brócoli que crecieran en los sustratos testigos con mayor CIC (Cuadro 5). La falta de suficiente CIC se suple con una mayor frecuencia en el suministro de solución nutritiva.

5.3.3 Porcentaje de plántulas emergidas

De acuerdo con los resultados del Cuadro 6, no hubo diferencia significativa en el porcentaje de plántulas emergidas entre los sustratos a los nueve DDS ($P > F = 0.0933$).

Las medias de todos los tratamientos fueron iguales estadísticamente. Ninguna de las propiedades físicas (p. ej. porosidad de aire) o químicas iniciales de los sustratos (pH, CE y CFST) inhibieron la germinación de las semillas y por consecuencia la emergencia de las plántulas.

Cuadro 6. Porcentaje de plántulas emergidas en ocho sustratos a los nueve días después de la siembra.

Sustrato	Plántulas emergidas
	%
100-00	93.50 a
90-10	93.00 a
80-20	93.50 a
70-30	94.00 a
60-40	95.00 a
50-50	95.50 a
Sogemix VT-M	93.50 a
Sunshine	94.00 a
P>F	0.0933
DHS	2.78

DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en la columna son iguales estadísticamente.

5.3.4 Propiedades químicas de los sustratos durante el experimento

5.3.4.1 pH

En la Figura 1, se muestran los pH obtenidos en los sustratos a los 0, 10, 13, 15, 23, 27 y 30 DDS. Con base en el efecto de los valores de pH en las variables de crecimiento de las plántulas de brócoli en el experimento descrito en el Capítulo IV, no se profundizará mucho sobre este aspecto.

Exceptuando al sustrato Sunshine, en el que durante 23 días las raíces de las plántulas estuvieron soportando pH bastante ácidos (entre 4.29 y 4.91), todos los demás sustratos permanecieron con pH en valores que se consideran como óptimos o aceptables para el crecimiento de las plantas (Escudero, 1993).

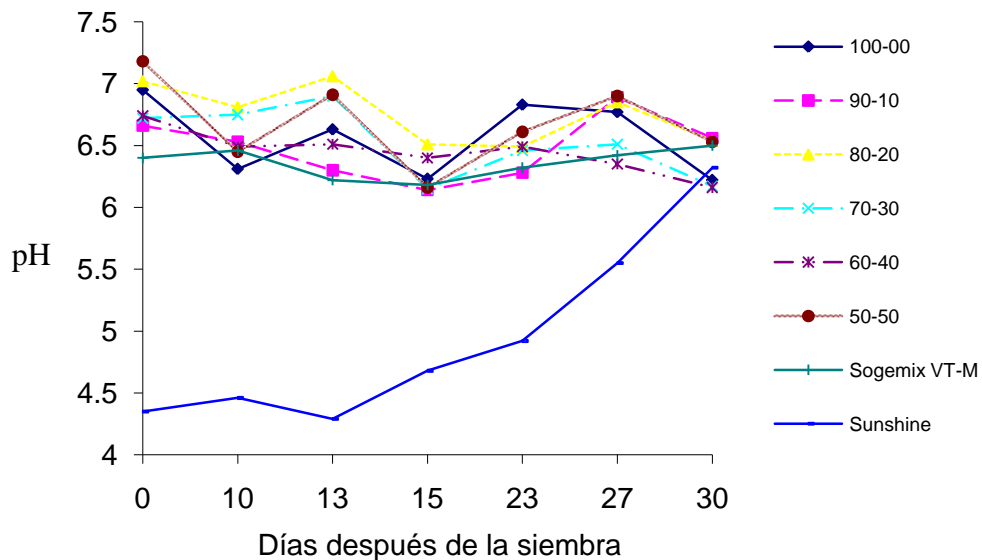


Figura 1. pH de los sustratos durante el experimento.

La variación en el pH de los sustratos, se presentó entre 7.06 (casi neutro) en el sustrato 60-40 y 6.16, en el sustrato 80-20 a los 30 DDS. Los valores de pH ligeramente alcalinos registrados en los sustratos de paja de trigo al inicio del experimento, se consideran normales de tal manera que se piensa que no influyeron sobre el crecimiento o absorción de nutrimentos por las raíces de las plántulas; la emergencia se registró a los nueve DDS y la solución nutritiva a pH 5.5 se suministró desde los nueve DDS. Los valores de pH en los sustratos durante las diferentes fechas de muestreo en el experimento, los cuales se utilizaron para la elaboración de la Figura 1, la significancia de los análisis de varianza y la comparación entre medias se presentan en el Cuadro 1 del apéndice B.

5.3.4.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica, de los sustratos evaluados a los 0, 10, 13, 15, 23, 27 y 30 DDS, se muestra en la Figura 2. La CE inicial de todos los sustratos se encuentra en el intervalo considerado como adecuado (0.75 dS m^{-1} y 1.99 dS m^{-1}) para la germinación y el crecimiento de las plantas en sustratos orgánicos (Bunt, 1988).

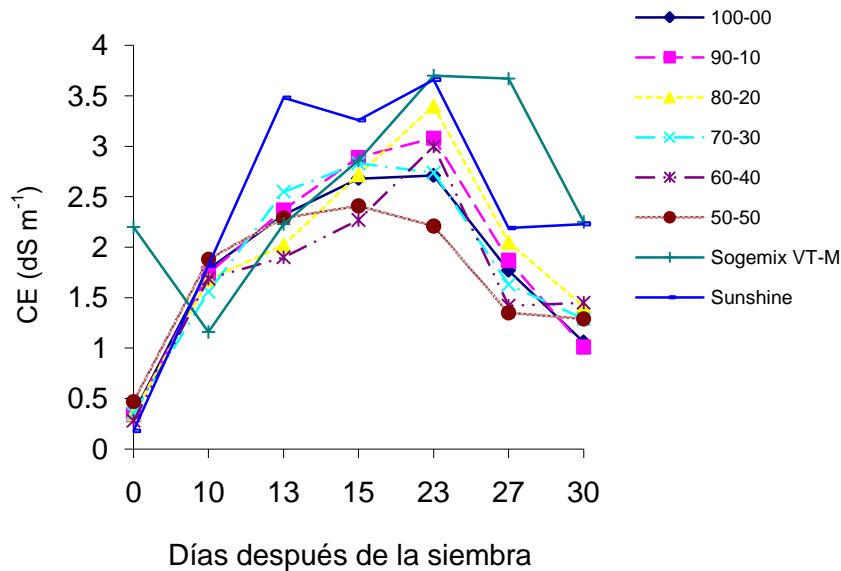


Figura 2. Conductividad eléctrica (CE) en los sustratos durante el experimento

A los 10 DDS la CE de los sustratos de paja de trigo y en el Sunshine se incrementó por efecto de la aplicación de la solución nutritiva al 100 % con una CE aproximada de 2.5 dS m^{-1} , excepto el Sogemix VT-M, el cual hasta esta fecha se regó únicamente con agua común. Inmediatamente después de tomadas las lecturas, todos los sustratos se regaron con solución nutritiva al 100 %.

En general, la CE de los sustratos de paja de trigo entre los 10 DDS y los 27 DDS varió entre 1.56 dS m^{-1} en el sustrato 70-30 a los 10 DDS y 3.4 dS m^{-1} a los 23 DDS en el sustrato 80-20. La CE en el testigo Sunshine se incrementó fuertemente a los 13 DDS alcanzando valores de 3.48 dS m^{-1} y permaneció aproximadamente igual en las lecturas de esta variable tomadas a los 15 y 23 DDS.

A los 23 DDS y después de tomar la muestra para la determinación de la CE en los sustratos, este día se regó únicamente con agua a pH 5.5 para disminuir la CE de todos los sustratos. Al día siguiente las plántulas se regaron con solución al 100 %, el efecto de disminución de la CE se presentó en las lecturas a los 27 DDS y 30 DDS. Un día antes de la cosecha de las plántulas (30 DDS) los sustratos se regaron con agua a pH 5.5. Los valores de CE en los sustratos durante las diferentes fechas de muestreo en el experimento, las cuales se utilizaron para la

elaboración de la Figura 2, la significancia de los análisis de varianza y la comparación entre medias, se presentan en el Cuadro 2 del apéndice B.

En la Figura 3, se muestra la dinámica de las CFST en los sustratos a los 0, 10, 13, 15, 23, 27 y 30 DDS.

Las CFST en los sustratos de paja de trigo disminuyeron en relación con el tiempo transcurrido, con excepción de las CFST a los 13 DDS en donde se presentó un ligero aumento, teniendo la mayor disminución durante los primeros 10 DDS.

Las CFST en este experimento a los 15, 23 y 30 DDS, fueron relativamente similares a las CFST registradas a los 15, 22 y 30 DDS en el experimento descrito en el Capítulo IV; sin embargo es importante señalar que las CFST en este experimento se encuentran ligeramente más diluidas que en el experimento anterior, debido a que la relación sustrato: agua para obtener la muestra fue ligeramente superior en este experimento.

Los valores de CFST en los sustratos durante las diferentes fechas de muestreo en el experimento, los cuales se utilizaron para la elaboración de la Figura 3, la significancia de los análisis de varianza y la comparación entre medias, se presentan en el Cuadro 3 del apéndice B.

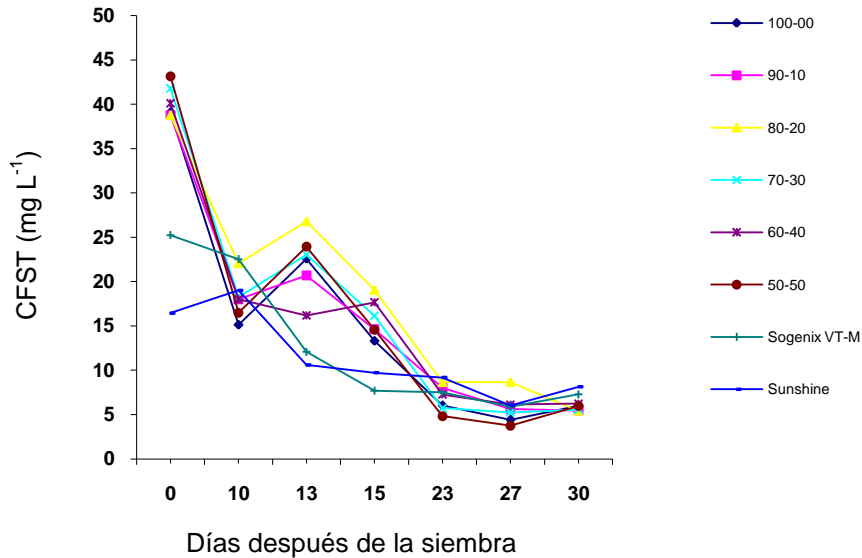


Figura 3. Concentración de fenólicos solubles totales (CFST) en los sustratos durante el experimento.

5.3.5 Propiedades químicas de los sustratos a los 30 DDS

5.3.5.1 pH

De acuerdo con el análisis de varianza no hubo diferencia significativa ($P > F = 0.2842$) en el pH entre los sustratos a los 30 DDS (Cuadro 7).

Todos los sustratos fueron estadísticamente iguales en la comparación de medias, presentando un intervalo de valores de pH entre 6.16 en el sustrato 60-40 y 6.56 en el sustrato 90-10 y de acuerdo con Escudero (1993), son pH adecuados para el crecimiento de las plantas (entre 5.5 y 6.8). Se menciona que un pH adecuado para el crecimiento de las plantas se encuentra entre 5.2 y 6.2 (Premier, S/F).

Cuadro 7. Propiedades químicas de los sustratos a los 30 días después de la siembra.

Sustrato	pH	CE	CFST	Disminución de la CFST
Granulometría		dS m ⁻¹	mg L ⁻¹	%
100-00	6.22 a	1.06 b	6.00 ab	84.66
90-10	6.56 a	1.01 b	5.46 b	85.91
80-20	6.54 a	1.41 ab	5.42 b	86.00
70-30	6.17 a	1.29 b	5.56 b	86.69
60-40	6.16 a	1.45 ab	6.24 ab	84.44
50-50	6.53 a	1.29 b	5.96 ab	86.18
Sogemix VT-M	6.50 a	2.25 a	7.28 ab	71.15
Sunshine	6.32 a	2.23 a	8.13 a	50.57
P>F	0.2842	0.0002	0.0033	
DHS	0.71	0.85	2.41	

CE = conductividad eléctrica; CFST = concentración de fenólicos solubles totales; MO = materia orgánica. DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

5.3.5.2 Conductividad eléctrica

De acuerdo con el análisis de varianza hubo diferencia significativa entre los sustratos en esta variable (Cuadro 7). Los sustratos que presentaron las mayores CE fueron los sustratos testigos. (Sogemix VT-M y Sunshine) y fueron estadísticamente diferentes a los sustratos de paja de trigo.

Los sustratos de paja de trigo presentaron valores de CE que estadísticamente fueron iguales entre sí. Las CE en los sustratos de paja de trigo registradas a los 30 DDS se consideran dentro del intervalo de valores recomendados para el crecimiento de las plantas (Bunt, 1988). Los sustratos testigos presentaron CE ligeramente superiores a lo señalado con anterioridad, sin embargo se considera que esta CE no influye negativamente en el crecimiento de las plantas. La CE del

sustrato Sogemix VT-M al inicio del experimento (2.2 dS m^{-1}) no influyó en la germinación de las semillas de brócoli.

5.3.5.3 Concentración de fenólicos solubles totales

Las CFST en los sustratos al final del experimento también se presentan en el Cuadro 6. De acuerdo con el análisis de varianza hubo diferencias altamente significativas en las CFST entre los sustratos ($P > F = 0.0033$). El intervalo de CFST en los sustratos de paja de trigo al final del experimento fue entre 5.42 mg L^{-1} en el sustrato de paja de trigo con granulometría 80-20 y 6.24 mg L^{-1} para el sustrato con granulometría 60-40 siendo estadísticamente iguales entre sí. Los sustratos testigos presentaron CFST de 7.28 mg L^{-1} para el Sogemix VT-M y 8.13 mg L^{-1} para el sustrato Sunshine.

Tomando como base las CFST iniciales y finales en los sustratos, los porcentajes de disminución de las CFST variaron entre 84.44 % para el sustrato de paja de trigo con granulometría 60-40 y 86.69 % en el sustrato con granulometría 70-30 (Cuadro 7). La disminución de las CFST en todos los sustratos evaluados se atribuye a la pérdida de estos compuestos por lixiviación o drenaje, ocasionada por los riegos con solución nutritiva sobre los sustratos.

Los lixiviados, primeramente presentaron un color café oscuro y con el tiempo el color fue cambiando hacia colores menos oscuros, a ligeramente amarillo, y llegar al final del experimento a un color amarillo casi translúcido.

Aunque la cuantificación de las CFST se realizó por medio de espectrofotometría (colorimetría) utilizando el reactivo de Folin y Ciocalteu proporcionando una coloración azul oscura o clara dependiendo de la concentración, se podría deducir que sin hacer la prueba de reactividad con el reactivo de Folin y Ciocalteu y registrar su lectura en absorbancia en el espectrofotómetro, se podría decir a *grosso modo* si un determinado lixiviado tiene mayor o menor CFST, esto es, con el color que presente el lixiviado se infiere la CFST.

La disminución, o la no detección de los fenólicos (dependiendo de su estructura) por falta de reacción con el reactivo de Folin y Ciocalteu, también se puede atribuir

a reacciones de los fenólicos con los compuestos nitrogenados aplicados en la solución nutritiva, o a fenólicos unidos a un azúcar a través de uniones éter, situación mencionada con anterioridad (Capítulo IV).

Los sustratos testigos también presentaron disminuciones importantes en la CFST (71.15 % en el sustrato Sogemix VT-M y 50.57 % en el sustrato Sunshine).

5.3.5.4 Materia orgánica

En el Cuadro 8, se presenta el porcentaje de materia orgánica (MO) de los sustratos a los 30 DDS. El análisis de varianza muestra que existen diferencias altamente significativas entre los sustratos evaluados en esta variable ($P > F = 0.0001$).

Con excepción del sustrato Sogemix VT-M, los demás sustratos estadísticamente tuvieron los mismos porcentajes de MO. Tomado como base el porcentaje de MO inicial y final de los sustratos, se observa que los contenidos de MO en los sustratos de paja de trigo al final del experimento no disminuyeron considerablemente.

Los porcentajes de disminución de materia orgánica en los sustratos de paja de trigo variaron entre 0.37 % en el sustrato 90-10 y 1.5 % en el sustrato 70-30. Los sustratos testigos perdieron mayores porcentajes de MO, 6.37 % en el Sogemix VT-M y 3.62 % en el Sunshine.

Es conveniente señalar, que en pruebas de extracción de compuestos fenólicos en la paja de trigo, la pérdida inicial de compuestos solubles en agua común fue de 6.05 % y la paja tratada con agua a pH 5.5 perdió 6.28 % de MO (Capítulo III).

Lemaire (1997), señala que la paja de trigo perdió aproximadamente un 22 % de MO a los 15 días, 24 % a los 30 días, 50 % a los 60 días, 55 % a los 90 días y 80 % a los 180 días después del inicio de la degradación microbiológica. La pérdida de MO se realizó sin adición de N extra, al ya contenido en la paja de trigo.

Los bajos porcentajes de pérdida de MO en los sustratos de paja de trigo encontrados en el presente trabajo no coinciden con lo señalado por Lemaire (1997), en donde la paja de trigo se consideró como un material poco bioestable

después de 180 días (índice 0-70) de exposición a la degradación microbológica, perdiendo el 24 % de su peso en 30 días.

Cuadro 8. Propiedades de la materia orgánica de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot a los 30 DDS.

Sustrato	MO 30 DDS	Pérdida de MO	Bioestabilidad	Categoría de bioestabilidad [†]
	-----%-----			
100-00	93.25 a	0.75	99.20	Muy alta
90-10	93.75 a	0.37	99.60	Muy alta
80-20	92.50 a	1.00	98.93	Muy alta
70-30	92.00 a	1.50	98.39	Muy alta
60-40	93.12 a	0.37	99.59	Muy alta
50-50	92.50 a	1.00	98.93	Muy alta
Sogemix VT-M	50.00 b	6.37	88.69	Alta
Sunshine	92.75 a	3.62	96.24	Muy Alta
P>F	0.0001	_____	_____	_____
DHS	1.90	_____	_____	_____

DDS = días después de la siembra; MO = materia orgánica. DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en la columna son iguales estadísticamente.

Las diferencias entre lo encontrado en el presente trabajo y lo señalado por Lemaire (1997), probablemente fue consecuencia del remojo de la paja de trigo con agua por una hora para la extracción de los compuestos fenólicos y posteriormente se enjuagó tres veces, y en este proceso muchos de los microorganismos y materiales orgánicos solubles se acarrearon en el agua y se perdieron, o bien una considerable cantidad de microorganismos murió, de tal manera que no había suficientes poblaciones de microorganismos, o no hubo el tipo de microorganismos necesarios para realizar la transformación de la MO, aun considerando que en los sustratos de paja de trigo se suministró suficiente cantidad de N a través de la solución nutritiva para que los microorganismos pudieran realizar la descomposición de la misma.

Esto, relativamente concuerda con lo indicado por Blanco y Almendros (1995), en donde la paja de trigo a la que se le extrajeron los compuestos solubles por remojo durante 24 horas y posteriormente fue sometida a compostaje, perdió únicamente el 29 % de su peso, en comparación con otras pajas de trigo, las que no se sometieron a un pre-tratamiento de extracción de compuestos solubles en agua, y perdieron entre el 42 % y 50 % de su peso en un periodo de 90 días.

Por otro lado, se reporta que la extracción de sustancias lábiles de la paja de trigo disminuyó los valores de carbono rápidamente mineralizable y la cantidad de biomasa microbiana (Saviozzi *et al.*, 1997).

Una de las características importantes de un sustrato orgánico para el crecimiento de plantas es que tenga suficiente bioestabilidad, esto es, que debe de perder poca materia orgánica y conservar sus propiedades físicas y químicas durante varios meses o en el periodo de tiempo en el que la planta se desarrolle en el sustrato (Lemaire, 1997).

Tomando como única característica la pérdida de materia orgánica, la bioestabilidad de los sustratos de paja de trigo se ubicó en la categoría de muy alta bioestabilidad (Cuadro 8), indicando que la pérdida de MO es muy baja, teniendo mayor bioestabilidad que el sustrato Sogemix VT-M, el cual únicamente se consideró en la categoría de alta bioestabilidad. El Sunshine también se ubicó en la categoría de muy alta bioestabilidad.

Las consecuencias de falta de bioestabilidad son: pérdida de volumen, trayendo como consecuencia compactación del sustrato, disminución de la porosidad, disminución del contenido de aire y de agua a pF1 (- 1kPa - contenido de agua en un sustrato después de aplicar una succión de 10 cm de columna de agua), alteración del tamaño de partículas, cambio en la composición de la fase gaseosa debido a la producción de CO₂, incremento del pH, conductividad eléctrica y salinidad debida a la mineralización, síntesis de nuevos compuestos orgánicos con efectos fitotóxicos o estimulantes (Lemaire, 1995).

La bioestabilidad evaluada por Lemaire (1997), se hace con los materiales orgánicos guardados en contenedores de plástico negro de dos litros, los cuales se humedecen hasta capacidad de campo y se cubren con una bolsa plástica de

color negro y se colocan en un invernadero. Se deja que los microorganismos presentes en el sustrato actúen sobre el mismo durante un tiempo predeterminado.

No se observó disminución importante en el volumen de los sustratos de paja de trigo en las celdas de las charolas, ni aumento significativo en la concentración de fenólicos (compuestos fitotóxicos) como posibles productos de la degradación microbiológica de la lignina de la paja de trigo (Camarero *et al.*, 1994).

Aunque la pérdida de MO de los sustratos orgánicos evaluados en este experimento se tomó como criterio para evaluar la bioestabilidad de los mismos, desde un punto de vista más estricto, la pérdida de MO soluble no fue por efecto de los microorganismos, por lo que en este caso, se podría sustituir el término bioestabilidad por “estabilidad química” o “*quimioestabilidad*”, tomado en consideración que la solubilización de un compuesto químico en agua es un fenómeno químico.

5.3.6 Variables evaluadas en vástagos y raíces de plántulas de brócoli a los 30 DDS

Los resultados de las variables evaluadas en los vástagos y en raíces de las plántulas de brócoli se presentan en el Cuadro 9. Cuando se hable de longitud de plántula o alguna de las otras variables, se entiende que el valor señalado es el promedio de 10 plántulas.

5.3.6.1 Longitud de vástagos

El análisis de varianza para esta variable señala que existe diferencia altamente significativa entre los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los diversos sustratos ($P > F = 0.001$).

La mayor longitud de vástagos en plántulas de brócoli se obtuvo en las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M, con 19.54 cm y fue estadísticamente diferente a la longitud de los vástagos que crecieron en los demás sustratos (DHS

= 1.391cm). Los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine tuvieron una longitud promedio de 17.36 cm y fueron estadísticamente iguales a las longitudes de los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo.

Aunque las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo no alcanzaron las longitudes de vástago que tuvieron las plántulas que crecieron en el Sogemix VT-M (mezcla profesional), tuvieron un crecimiento similar a las plántulas que crecieron en el testigo Sunshine, indicando que los sustratos de paja de trigo, aparentemente suministraron a las raíces de las plántulas un medio de crecimiento relativamente similar al del Sunshine, situación que permitió a la parte aérea de las plántulas tener longitudes de vástagos similares.

La diferencia en longitudes de vástago entre los sustratos Sogemix VT-M y Sunshine se atribuye al efecto del pH ácido que presentó este último sobre el crecimiento de las raíces y la absorción de nutrimentos. Los resultados de la regresión múltiple entre la variable pH en las diferentes fechas de muestreo y la variable longitud de vástago se presentan en el Cuadro 10.

Los resultados de la regresión se traducen en que la longitud de los vástagos de las plántulas está estrechamente relacionada con el pH de los sustratos testigos, esto es, al aumentar el pH de los sustratos la longitud de los vástagos de la plántula se incrementa en forma lineal.

Cuadro 9. Variables evaluadas en vástagos y raíces de plántulas de brócoli cv. Patriot a los 30 DDS.

Sustrato	LONGV	DT	PMSR	PMSV	PRMSV	PMSV/ PMSR	PMSV/LV	Lecturas SPAD
	cm	mm	g	g	%			
100-00	16.59 b	2.65 a	0.60 d	2.83 c	74.08	4.68 a	0.171 b	54.87 ab
90-10	16.77 b	2.68 ab	1.04 a	3.36 abc	87.95	3.22 b	0.200 a	57.52 a
80-20	17.59 b	2.73 ab	1.04 a	3.71 ab	97.12	3.55 b	0.211 a	57.30 a
70-30	16.89 b	2.76 ab	1.04 a	3.46 ab	90.57	3.32 b	0.205 a	56.42 ab
60-40	17.60 b	2.78 a	1.04 a	3.70 ab	96.85	3.54 b	0.210 a	55.62 ab
50-50	16.79 b	2.60 b	0.95 b	3.19 bc	83.50	3.35 b	0.190 ab	55.10 ab
Sogemix VT-M	19.54 a	2.66 ab	1.06 a	3.82 a	100	3.58 b	0.197 ab	54.97 ab
Sunshine	17.36 b	2.68 ab	0.78 c	3.41 abc	89.26	4.33 a	0.196 ab	53.22 b
P>F	0.001	0.035	0.0001	0.0006	-----	0.0001	0.0033	0.0149
DHS	1.391	0.1727	0.023	0.6205	-----	0.7126	0.0289	3.6787

DDS = días después de la siembra; LONGV = longitud de vástagos; DT = diámetro de tallo; PMSR = peso materia seca de raíces; PMSV = peso de materia seca de vástagos; PRMSV = porcentaje relativo de materia seca de vástagos con referencia al peso de materia seca de vástagos del sustrato Sogemix VT-M (100 %); PMSV/PMSR = relación peso de materia seca de vástagos/peso de materia seca de raíces; PMSV/LV = relación peso de materia seca de vástago/longitud de vástagos. DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

En el caso de los sustratos de paja de trigo, los valores menores en la longitud de los vástagos con respecto al testigo Sogemix VT-M se atribuyen principalmente a las CFST presentes en los sustratos de paja de trigo en el periodo comprendido entre los nueve o diez DDS y 15 DDS (este efecto se explicará con mayor detalle posteriormente, y se encuentra relacionado con la presencia y densidad de pelos radicales en las raíces de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo).

Cuadro 10. Valores de regresión múltiple entre la variable independiente pH, a los 0, 10, 13, 15, 23, 27 y 30 DDS y la variable respuesta longitud de vástagos de plántulas en las dos turbas evaluadas como testigos.

Variable respuesta	Variable independiente	R ²	P>F Regresión	Valor del Intercepto	Coficiente de regresión
LONGV	pH 0 DDS	0.9024	0.0003	12.66	1.07
LONGV	pH 10 DDS	0.8190	0.0020	12.72	1.04
LONGV	pH 13 DDS	0.8826	0.0005	12.47	1.13
LONGV	pH 15 DDS	0.8291	0.0017	11.10	1.35
LONGV	pH 23 DDS	0.5973	0.0245	11.66	1.20
LONGV	pH 27 DDS	0.8933	0.0004	14.52	1.34
LONGV	-----	-----	-----	-----	-----

DDS = días después de la siembra; LONGV = longitud de vástagos de plántulas en los sustratos testigos evaluados.

Los análisis de regresión múltiple de las variables independientes en las siete fechas en que se registraron las variables independientes pH, CE y CFST, muestran que únicamente la variable CFST a los 10 DDS tuvo una relación importante con la longitud de vástagos de las plántulas ($R^2 = 0.649$ y $P > F = 0.0158$). Esta misma variable en las otras fechas de registro de las variables independientes mostró valores de R^2 muy bajos y no significativos tomando un nivel de confianza una $\alpha = 0.05$.

5.3.6.2 Diámetro de tallo

Los resultados de diámetro de tallo (DT) de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos evaluados se presentan también en el Cuadro 9. El análisis de varianza muestra que existen diferencias significativas ($P > F = 0.035$).

Con excepción del sustrato con granulometría 50-50, todas las plántulas que crecieron en los demás sustratos tuvieron estadísticamente el mismo DT, incluyendo a las plántulas que crecieron en los sustratos testigos (DHS = 0.172).

Las regresiones múltiples realizadas entre las variables independientes pH, CE y CFST en las siete fechas de registro y la variable DT, no mostraron relaciones significativas ($P > F$), con coeficientes de determinación (R^2) muy bajos, por lo que se puede comentar que ninguna de las variables independientes registradas en las fechas mencionadas tuvieron influencia negativa o estimulante en la variable diámetro de tallo. La diferencia estadística encontrada entre la mayoría de los sustratos de paja de trigo y los testigos con el sustrato de paja de trigo con granulometría 50-50, se atribuye quizás a diferencias en las propiedades físicas entre los sustratos, pudiendo hablar específicamente de la porosidad de aire, aunque no se encontraron evidencias estadísticas de ello.

5.3.6.3 Lecturas SPAD

Las lecturas SPAD (Desarrollo de Análisis de Suelos y Planta) son una medida indirecta de la concentración de clorofila en las hojas, y a su vez esta estima el contenido de N. La cantidad de clorofila y nitrógeno determinados por los métodos tradicionales en cultivos de leguminosas, gramíneas, frutales y hortalizas presentaron una alta correlación con las lecturas SPAD medidas con el detector SPAD-501 (Reeves *et al.*, 1993). En general al incrementarse los valores de las lecturas SPAD determinadas con un medidor SPAD-502, el contenido de clorofila y N se incrementan de forma lineal (Rodríguez *et al.*, 1998).

Los resultados de las lecturas SPAD determinados en las plántulas que crecieron en los sustratos evaluados se presentan en el Cuadro 9. De acuerdo con el

análisis de varianza para esta variable, si hubo diferencias significativas entre las plántulas que crecieron en los sustratos evaluados ($DHS = 3.67$).

Las lecturas SPAD determinadas a los 30 DDS en las hojas superiores de las plántulas de brócoli en los sustratos de paja de trigo fueron estadísticamente iguales a las lecturas SPAD determinadas en las plántulas de brócoli que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M. Las hojas de las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine fueron las únicas que presentaron un valor promedio de lecturas SPAD menor y estadísticamente diferente a las lecturas SPAD promedio de las hojas de las plántulas que crecieron en los demás sustratos evaluados.

Esta diferencia de concentración de clorofila entre los vástagos que crecieron en las dos turbas también se podría explicar por el efecto del pH ácido en este sustrato ($R^2 = 0.92$; $P > F = 0.023$; intercepto = 7.46; pendiente = -0.2156) sobre la absorción de nutrientes, probablemente N que es un constituyente fundamental de la molécula de clorofila.

Si los valores de las lecturas SPAD determinadas en los sustratos de paja de trigo al final del experimento resultaron estadísticamente iguales que el mejor de los sustratos testigos (Sogemix VT-M), se puede considerar que las CFST cuantificadas en el transcurso del experimento, no inhibieron significativamente esta variable, y con menor probabilidad a los 30 DDS. Las lecturas SPAD determinan el contenido de clorofila y/o N de manera indirecta y son útiles únicamente para el momento en que se toma la lectura.

Es preciso señalar que el efecto de los compuestos fenólicos sobre la presencia y densidad de pelos radicales en las raíces de las plántulas de brócoli dejó de hacerse notorio a los 23 DDS, y a los 30 DDS prácticamente no se presentó efecto de los compuestos fenólicos de los sustratos de paja de trigo sobre la densidad de pelos radicales en las raíces de las plántulas, por lo que también es probable que las CFST a los 30 DDS no hayan influido negativamente en las lecturas SPAD.

5.3.6.4 Peso de materia seca de vástagos

El peso de materia seca de vástagos (PMSV) se presenta también en el Cuadro 9. El análisis de varianza indica diferencias altamente significativas entre los sustratos ($P > F = 0.0006$). El mayor PMSV lo presentó el sustrato Sogemix VT-M con 3.82 g, y fue estadísticamente igual al testigo Sunshine con 3.41 g, y a los sustratos de paja de trigo 90-10, 80-20, 70-30 y 60-40 con 3.36 g, 3.71 g, 3.46 g y 3.70 g respectivamente. El PMSV de los sustratos 100-00 y 50-50 con 2.83 g y 3.19 g, fueron estadísticamente diferentes a los sustratos anteriores. Las diferencias estadísticas que presentaron los sustratos 100-00 y 50-50 con respecto a los sustratos testigo y los demás sustratos de paja de trigo se pueden atribuir a la diferencia en las propiedades físicas de estos sustratos; falta de humedad en el primer sustrato (mayor evapotranspiración) y exceso de humedad en el segundo (menor evapotranspiración) debido a la granulometría.

En varias ocasiones durante el experimento, se observó que las plántulas de brócoli que se desarrollaron en el sustrato 100-00, presentaron primeramente síntomas de deficiencia de agua que los otros sustratos de paja de trigo, lo que se traduce en una menor cantidad de agua fácilmente disponible para las plántulas, afectando de esta manera la absorción de agua y nutrientes y consecuentemente el crecimiento de las plántulas.

En el caso del sustrato 50-50, la diferencia en el PMSV con respecto a los demás sustratos de paja de trigo, se atribuye a la menor porosidad de aire que presenta este sustrato (Cuadro 3), aunque estadísticamente fue igual a los demás sustratos de paja de trigo en esta variable. En este sustrato fue en el que se observaron los últimos síntomas de deficiencia de agua entre los sustratos de paja de trigo. Los dos sustratos testigos presentaron deficiencia de agua antes que cualquiera de los sustratos de paja de trigo, debido a su menor porcentaje de agua fácilmente disponible (Cuadro 3) o lo que es lo mismo, a su mayor contenido de ADD.

5.3.6.5 Porcentaje relativo de peso de materia seca de vástagos

El porcentaje relativo del peso de materia seca de vástagos con relación al mejor testigo (PRMSV) también se muestra en el Cuadro 9. Los sustratos 80-20 y 60-40 fueron los que presentaron PRMSV más cercanos al PRMSV del testigo Sogemix VT-M con valores de 97.12 % y 96.85 % respectivamente. El sustrato Sunshine presentó valores de PRMSV inferiores a los que presentaron los sustratos de paja de trigo, con excepción de los sustratos 100-00 y 50-50.

Haciendo una comparación entre el PMSV en este experimento con respecto al PMSV en los dos experimentos anteriores en donde también se evaluó el crecimiento de plántulas de brócoli se puede mencionar que en el primer experimento el PMSV del mejor sustrato de paja de trigo solo alcanzó un porcentaje de 45.07 % del PMSV del mejor testigo (Capítulo I), mientras que en el segundo experimento el sustrato de paja de trigo con granulometría 50-50 en el cual la extracción de compuestos fenólicos se realizó con agua común, alcanzó el 77.02 % del PMSV del mejor testigo (Capítulo IV), y en el presente experimento el mejor sustrato de paja de trigo alcanzó un 97.12 % del PMSV con respecto al mejor testigo.

Un análisis retrospectivo sobre el mejoramiento del crecimiento de las plántulas de brócoli en los sustratos de paja de trigo a través de los tres experimentos indica que aunque no se presentan datos concluyentes, las diferencias en el crecimiento de las plántulas de brócoli en los tres experimentos tienden a explicarse por las diferencias en las propiedades físicas de los sustratos, principalmente por la porosidad de aire.

En el primer experimento, aunque no se determinaron las propiedades físicas de los sustratos de paja de trigo, se observó que por efecto de las altas proporciones de partículas menores de 0.5 mm, los sustratos de paja de trigo permanecieron durante bastante tiempo con altos contenidos de humedad, impidiendo un rápido intercambio gaseoso del sustrato con la atmósfera, restringiendo la respiración de las raíces por agotamiento del O₂, dando por consecuencia la disminución en absorción de nutrimentos para el crecimiento de las plántulas de brócoli.

En el segundo experimento, la granulometría de los sustratos fue de 50-50, aparentemente con mayor porosidad de aire que los sustratos con partículas menores de 0.5 mm del primer experimento, contribuyendo a un mejor intercambio gaseoso entre el sustrato y la atmósfera, permitiendo una mayor respiración de las raíces y una mejor absorción de nutrientes.

En el tercer experimento (presente experimento), los sustratos 80-20 y 60-40 muestran porosidades de aire mayores a los sustratos con granulometría 50-50, situación que permitió mayor intercambio gaseoso con la atmósfera que los sustratos con granulometría 50-50 y por consecuencia una mejora en la respiración de las raíces y la absorción de nutrientes por estas. En este experimento el sustrato con granulometría 50-50 alcanzó solamente el 83.50 % del peso del sustrato Sogemix VT-M.

5.3.6.6 Peso de materia seca de raíces

El peso de la materia seca de raíces (PMSR) de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos evaluados se presenta en el Cuadro 9. El análisis de varianza muestra que hay diferencias altamente significativas entre los sustratos en esta variable ($P > F = 0.0001$). Los sustratos que presentaron los menores PMSR fueron los sustratos 100-00, el Sunshine y el sustrato de paja de trigo 50-50 con pesos de 0.60 g, 0.78 g y 0.95 g respectivamente, y fueron estadísticamente diferentes entre sí ($DHS = 0.023$ g), y diferentes estadísticamente a los demás sustratos.

Las diferencias en el PMSR entre los sustratos con granulometría 100-00 y 50-50 se puede pensar que se presentaron más bien debido a las propiedades físicas de los sustratos; falta de humedad en el primer sustrato (mayor evapotranspiración) con la consecuencia de falta de crecimiento de las raíces, y exceso de humedad en el segundo (menor evapotranspiración y falta de oxígeno) debido a la granulometría, trayendo como consecuencia deficiencia en la respiración de las raíces y por lo tanto disminución en el crecimiento de las mismas, aunque esta deficiencia no fue muy marcada.

Aunque la cantidad de AFD para el sustrato 100-00 indica que es el sustrato que tuvo el mayor porcentaje de AFD, no significa que toda esta agua la utilice la plántula, sino que parte de esta agua también se puede perder fácilmente por evaporación, por lo que es probable que desde el punto de vista práctico el porcentaje de AFD para las plántulas en este sustrato haya sido menor con referencia a los demás sustratos de paja de trigo.

En el caso del sustrato de paja de trigo 50-50, el porcentaje de AFD es menor que el que presentó el sustrato de paja de trigo 100-00, sin embargo debido a su menor granulometría es probable que el porcentaje de humedad haya sido excesivo (por falta de evaporación) y no haya permitido una buena respiración de las raíces de las plántulas (intercambio gaseoso con la atmósfera), por lo que el crecimiento de sus raíces fue significativamente menor que en los demás sustratos de paja de trigo, exceptuando al sustrato 100-00. De acuerdo con lo anterior la falta de agua es más drástica que el exceso de la misma en los sustratos; en el sustrato 100-00 se tuvo un PMSR de 0.60 g, mientras que en el sustrato 50-50 fue de 0.78 g, siendo estos valores estadísticamente diferentes entre sí.

Lo señalado en el punto anterior de PMSR se puede señalar también para el caso de la variable PMSV, sin embargo, es probable que tanto el efecto de la falta de agua (100-00) como el exceso de agua (50-50) haya tenido su consecuencia en el PMSV por falta de absorción de nutrimentos.

Los sustratos de paja de trigo 90-10, 80-20, 70-30 y 60-40, presentaron PMSR iguales estadísticamente, lo que nos sugiere que las propiedades físicas de estos sustratos fueron muy similares (Cuadro 3).

El PMSR de las plantas que crecieron en los sustratos de paja de trigo con granulometrías 90-10, 80-20, 70-30 y 60-40 fueron iguales entre sí, e iguales al PMSR del mejor sustrato, el Sogemix VT-M con 1.06 g.

La marcada diferencia en el PMSR en el sustrato Sunshine con respecto a los demás sustratos se atribuye al efecto del pH sobre el crecimiento de estas. Las regresiones múltiples utilizando el pH, la CE y la CFST como variables independientes y el PMSR como variable dependiente en las dos turbas, muestran

que la única variable que incidió de manera significativa y con coeficientes de determinación (R^2) altos fue el pH (Cuadro 11).

5.3.6.7 Relación peso de materia seca de vástagos/ peso de materia seca de raíces

La relación PMSV/PMSR obtenida en cada uno de los sustratos evaluados se muestra en el Cuadro 9. Esta relación es importante desde el punto de vista del trasplante; mientras menor sea, el PMSR es mayor con relación al PMSV, indicando un mejor desarrollo de las raíces, una posible ventaja al momento del trasplante de las plántulas. Se espera que al tener mayor proporción de raíces con relación a la parte aérea, la plántula soporta más fácilmente las condiciones de trasplante en el suelo.

Cuadro 11. Regresión múltiple entre la variable independiente pH, a los 0, 10, 13, 15, 23, 27 y 30 DDS y la variable respuesta peso de materia seca de raíces en plántulas de brócoli que crecieron en las dos turbas evaluadas como testigos.

Variable respuesta	Variable Independiente	R^2	Prob>F Regresión	Valor del Intercepto	Coefficiente de regresión
PMSR	pH 0 DDS	0.9989	0.0001	0.7610	0.1381
PMSR	pH 10 DDS	0.9814	0.0001	0.1794	0.1365
PMSR	pH 13 DDS	0.9941	0.0001	0.1706	0.1435
PMSR	pH 15 DDS	0.9025	0.0003	0.0142	0.1677
PMSR	PH 23 DDS	0.8807	0.0006	-0.0548	0.1743
PMSR	PH 27 DDS	0.9468	0.0001	-0.8815	0.3018
PMSR	-----	-----	-----	-----	-----

DDS = días después de la siembra; PMSR = peso de materia seca de raíces.

De acuerdo con el análisis de varianza para esta relación, hubo diferencias altamente significativas ($P>F = 0.0001$). Con excepción de los sustratos 90-10 y Sunshine que tuvieron relaciones mayores, todos los demás sustratos presentaron estadísticamente la misma relación PMSV/PMSR (DHS = 0.71). El sustrato

Sogemix VT-M que presentó el mayor PMSV, tuvo una relación PMSV/PMSR de 3.58 y fue estadísticamente igual a la relación encontrada en los sustratos de paja de trigo, exceptuando al sustrato 100-00, que presentó una mayor relación (4.68). El sustrato Sunshine también presentó una alta relación PMSV/PMSR y fue estadísticamente igual a la relación con el sustrato 100-00.

5.3.6.8 Relación peso de materia seca de vástagos/ longitud de vástagos

Los resultados de esta relación se muestran también en el Cuadro 9. Esta relación se estableció para conocer de alguna manera el grado de compactación de la plántula, esto es, un determinado peso (g) del vástago por unidad de longitud (cm). De acuerdo con el análisis de varianza de esta relación, hubo diferencias altamente significativas ($P > F = 0.0033$), y la comparación de medias nos señala que el sustrato 100-00 fue el único que mostró diferencias significativas en esta relación con respecto a los demás sustratos presentando la menor relación (0.171). Sin embargo, aunque no existen diferencias significativas entre los demás sustratos, se observa que las relaciones de los sustratos 90-10, 80-20, 70-30 y 60-40 fueron superiores a las relaciones PMSV/LV que presentaron los sustratos testigos.

Las plántulas que se desarrollaron en los sustratos de paja de trigo, se observaron más pequeñas, pero más vigorosas que las que se desarrollaron en los sustratos testigos. Esta es una situación que es deseable en las plántulas, de tal manera que se puede considerar que las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo (conteniendo compuestos fenólicos) y que presentaron estadísticamente el mismo PMSV que el mejor testigo (Sogemix VT-M), su peso lo tienen distribuido en una menor longitud de la plántula, haciendo que las plántulas se observen más robustas que las que se desarrollaron en los sustratos testigos, pudiendo considerar que son plantas de mayor calidad.

5.3.7 Variables cualitativas en los sustratos y cepellones a los 30 DDS

Los resultados de las variables cualitativas registradas en los sustratos y en los cepellones a los 30 DDS se presentan en el Cuadro 12.

5.3.7.1 Degradación microbiológica

La degradación microbiológica (DM) de los sustratos de paja de trigo, evaluada visualmente con la ayuda de un estereoscopio, fue insignificante (valor de 1, correspondiente a una degradación entre 1 y 5 %) en todos los sustratos de paja de trigo) tendiendo más hacia la no degradación (Cuadro 12).

Cuadro 12. Variables cualitativas registradas en los sustratos, en las raíces de las plántulas de brócoli cv. Patriot, y en el cepellón, a los 30 días después de la siembra.

Sustrato	DM	CR	DPR	FEC
100-00	1	1	1	1
90-10	1	1	1	1
80-20	1	1	1	1
70-30	1	1	1	1
60-40	1	1	1	1
50-50	1	1	1	1
Sogemix VT-M	---	1	1	1
Sunshine	---	1	1	3

DM = degradación microbiológica; CR = color de raíz; DPR = densidad de pelos radicales; FEC = facilidad para extraer el cepellón.

Lo anterior corrobora los resultados presentados en el Cuadro 8, donde se muestra que los porcentajes de materia orgánica determinados en los sustratos a los 30 DDS fueron altos y que la disminución de MO en los sustratos de paja de trigo fue muy baja (entre 0.37 % en el sustrato 60-40 y 1.50 % en el sustrato 70-30), registrando mayores pérdidas de MO los sustratos testigos elaborados con

base en turba (6.37 % en el Sogemix VT-M y 3.62 % en el Sunshine); además los sustratos de paja de trigo junto con el Sunshine se clasificaron como materiales con muy alta bioestabilidad, mientras que el sustrato Sogemix VT-M se ubicó únicamente en la categoría de alta bioestabilidad.

La disminución de MO en los sustratos durante el experimento, se atribuye a la pérdida de compuestos orgánicos solubles en agua que se lixiviaron con la aplicación de los riegos con agua o solución nutritiva.

Con lo anterior se concluye que, aunque la paja de trigo está considerada por algunos autores como un material orgánico con una alta probabilidad de degradación microbológica (Lemaire, 1997), en el presente trabajo no hubo degradación microbológica apreciable en ninguno de los seis sustratos de paja de trigo. Las razones atribuibles a este fenómeno se explicaron con anterioridad en el punto en donde se trató lo referente a MO al final del experimento. Asimismo, no se observó disminución aparente en los volúmenes de los sustratos de paja de trigo que ocuparon las celdas de las charolas, confirmando aún más que la degradación en los sustratos de paja de trigo no fue significativa.

5.3.7.2 Color de raíces

El color de las raíces de las plántulas de brócoli en todos los sustratos a los 30 DDS fue blanco (valor de 1 en la escala sugerida), indicando buena respiración y sin efecto de compuestos fenólicos (color amarillo o café-indicador de mal funcionamiento) (Cuadro 12).

5.3.7.3 Densidad de pelos radicales

Se realizaron observaciones del crecimiento de los pelos radicales en las raíces a los 13, 15, 23, 27 y 30 DDS. Las raíces de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo a los 13 y 15 DDS se observaron de color blanco (color normal), sin embargo no tenían pelos radicales.

A los 23 DDS las raíces de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo tuvieron una densidad de pelos radicales mucho mayor que a los 15 DDS, pero ligeramente menor que la densidad de pelos radicales en las raíces de las plántulas de brócoli en los sustratos testigos.

La densidad de pelos radicales en las raíces de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo a los 27 y 30 días DDS presentaron la misma cantidad o mayor cantidad de pelos radicales que las raíces de las plántulas que crecieron en los sustratos testigos (valor de 1-alta densidad de pelos radicales) (Cuadro 12).

El incremento en la densidad de pelos radicales en los sustratos de paja de trigo fue paulatino y al parecer se relacionó directamente con las CFST que se registraron en el transcurso del experimento, esto es, la aparición de nuevos pelos radicales se fue presentando conforme las CFST en los sustratos de paja de trigo fueron disminuyendo con el tiempo. La aparición de pelos radicales en los sustratos de paja de trigo se presentó a los 23 DDS cuando los sustratos de paja de trigo tuvieron aproximadamente 7 mg L^{-1} (0.042 mM (milimoles) L^{-1} de fenólicos o equivalentes de ácido *p*-cumárico). Vaughan y Ord (1990), reportan que concentraciones de 0.1 mM de ácido *p*-cumárico inhibieron aproximadamente un 6.34 % el peso de vástagos e incrementó aproximadamente un 1 % el peso fresco de la raíz de plántulas de chícharo de 15 días de desarrollo.

De acuerdo con las observaciones realizadas en las raíces de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo, es probable que el efecto de inhibición más importante de las CFST presentes en los sustratos de paja de trigo sobre el crecimiento de las plántulas se haya presentado solo durante unos cinco días (entre 10 DDS-un día después de la emergencia de las plántulas y 15 DDS), después de los cuales su efecto fue menor. El efecto más drástico de los compuestos fenólicos sobre el crecimiento de las plántulas de brócoli, se observó cuando estas presentaron solamente dos hojas embrionarias y la primera hoja verdadera aún no emergía del macollo.

Lo anterior hace considerar que el efecto de los compuestos fenólicos (u otro tipo de compuestos inhibidores del crecimiento) no fue significativo al momento de la

recolección, debido a que las plántulas de brócoli entre los 10 y 15 DDS aún no se encontraban en su estado de crecimiento más acelerado. Este estado se presentó después de que la primera hoja verdadera emergió y se extendió y fue aún más acelerado el crecimiento cuando las plántulas presentaron la segunda o tercera hojas verdaderas y la cuarta hoja verdadera venía emergiendo.

Los pelos radicales son estructuras unicelulares que se originan o se desarrollan de las células epidérmicas de la raíz y entre sus funciones se menciona el ayudar a la raíz en la absorción de agua y nutrimentos del suelo por medio del incremento de la superficie de absorción (Esau, 1976). Sin embargo, también se ha demostrado que los pelos radicales no son necesarios en los sistemas hidropónicos (Russell y Clarkson, 1975). La inhibición de la formación de pelos radicales en las raíces de las plántulas de brócoli, pudo haber disminuido la capacidad de las raíces para la absorción de agua y nutrimentos, influyendo directamente y de manera negativa en el crecimiento de la parte aérea y de la raíz entre 10 DDS y 15 DDS. Las diferencias estadísticas en el PMSR en los sustratos de paja de trigo no se pueden atribuir con certeza a las CFST en los sustratos de paja de trigo debido a que las CFST fueron relativamente similares en los mismos. Las regresiones de la variable CFST en los sustratos en sus siete muestreos con la variable PMSR no mostraron R^2 altas ni con altas significancias ($P > F$).

De acuerdo con Baranov (1980), los compuestos fenólicos son sinergistas del ácido indol acético al mostrarse un incremento en el crecimiento en una mezcla de fenólicos y ácido indol acético (AIA), mientras que en la mezcla de los compuestos derivados de la oxidación de los fenólicos y el AIA mostraron un efecto de inhibición en el crecimiento de segmentos de coleóptilo de trigo.

Por otro lado se encontró que los polifenoles sinergizan con el AIA induciendo a un crecimiento, contrarrestando la descarboxilación del AIA. Los polifenoles endógenos sin duda ejercen la misma influencia en plantas intactas (sin AIA). Los ácidos sinápico ($5 \times 10^{-5}M$) y ferúlico ($5 \times 10^{-5}M$) actúan como los polifenoles. Los monofenoles estimulan la descarboxilación del AIA en condiciones en las cuales disminuyeron el crecimiento (Tomaszewski y Thimann, 1966).

Los compuestos fenólicos actúan como antioxidantes. De 24 compuestos fenólicos relacionados con el ácido ferúlico, evaluados por su capacidad antioxidante con metil linoleato, el ácido ferúlico fue el antioxidante más efectivo.

Estos resultados indican que no sólo la actividad de los radicales de los antioxidantes, sino que también su afinidad con los sustratos lípidos pueden ser importantes en su actividad (Kikuzaki *et al.*, 2002).

De acuerdo con esta información es posible que los fenólicos se hayan oxidado (reacción con el O₂ de la fase líquida) y que en parte la inhibición del crecimiento haya sido consecuencia de falta de oxígeno en la fase líquida, y agotamiento del mismo en la fase gaseosa de los sustratos de paja de trigo, y posteriormente falta de difusión hacia la fase líquida para la respiración de las células de la raíz. Los antioxidantes se consideran compuestos que se oxidan para proteger la oxidación de otros compuestos (Encliconet, 2009).

Es probable que la falta de oxígeno para la respiración de las raíces haya inhibido la formación de pelos radicales. Puede haber una relación directa entre la CFST en la fase líquida y la concentración de oxígeno en la misma, y esta a su vez con la fase gaseosa.

Otros posibles mecanismos de cómo actúan los compuestos fenólicos en la inhibición del crecimiento de la raíz y de la parte aérea de las plantas, fueron mencionados en el Capítulo I.

Por otro lado, es conveniente señalar que tanto en los sustratos testigos, como en los sustratos de paja de trigo el crecimiento de las raíces con sus pelos radicales se presentó casi de forma exclusiva en la parte exterior de los sustratos.

No se observaron cantidades de raíces importantes entre los espacios de los sustratos en las zonas más internas. Lo anterior sugiere que las raíces de las plántulas de brócoli prefieren crecer en ambientes mejor oxigenados, esto es, utilizando la porosidad de fractura (Burés, 1997), que es la porosidad que se presenta entre la superficie exterior de los sustratos y las paredes de los contenedores en donde se encuentra el sustrato.

5.3.7.4 Facilidad para extraer el cepellón

Con excepción del sustrato testigo Sunshine con un valor de 3 (difícil de extraer), los demás sustratos evaluados desarrollaron plántulas de brócoli con suficiente raíz para extenderse desde un poco más abajo de la superficie del sustrato hasta el fondo de las celdas de las charolas, por lo que no hubo problema para extraer el cepellón completo, otorgando a todas las plántulas que se extrajeron manualmente de la charola el valor de 1 (fácil de extraer, Cuadro 12).

Las raíces en el sustrato Sunshine se desarrollaron más sobre la parte media superior del sustrato, debido probablemente al efecto del pH menos ácido en relación con la parte media inferior más ácida. El pH registrado en los sustratos es un promedio de los pH en las diferentes profundidades del sustrato, sin embargo se puede considerar que el pH en la parte superior del sustrato es mayor que el pH del sustrato en la parte inferior.

Otra causa que pudiera haber sido consecuencia del menor crecimiento de las raíces de las plántulas de brócoli que se desarrollaron en el sustrato Sunshine es el mal riego que pudiera haberse proporcionado al sustrato (riego superficial), sin embargo esta posibilidad queda descartada, porque los riegos siempre se dieron hasta que los sustratos drenaron.

5.3.8 Análisis químico de los vástagos de plántulas de brócoli recolectadas a los 30 DDS

Los resultados de los análisis químicos de N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn y B en los vástagos de las plántulas colectadas a los 30 DDS se presentan en las Figuras 4 a 13 respectivamente.

5.3.8.1 Nitrógeno

La concentración de N en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos evaluados se presenta en la Figura 4. El análisis de varianza indica

que no hubo diferencias significativas en la concentración de N ($P > F = 0.2394$) en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en todos los sustratos evaluados. Lo anterior, sugiere que en general ninguna de las variables independientes o condiciones de los sustratos inhibieron la absorción de N por las raíces y su posterior transporte a los vástagos de las plántulas de brócoli al final del experimento, incluye a las concentraciones de compuestos fenólicos solubles totales, las cuales en primer término se consideraron como limitantes en el crecimiento de las plántulas de brócoli.

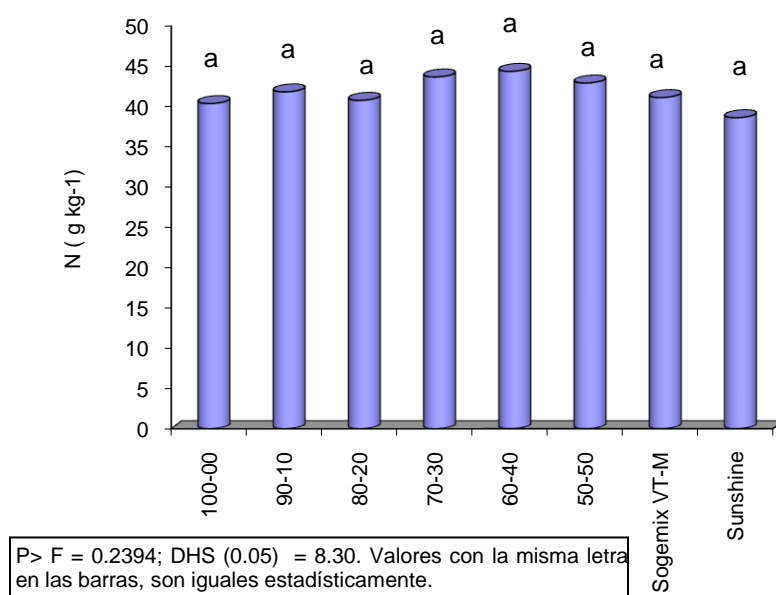


Figura 4. Concentración de N (g kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv.Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra.

Las concentraciones de N determinadas en los vástagos difieren un poco con los resultados obtenidos de las lecturas SPAD, en donde las hojas de las plántulas de brócoli que crecieron en el sustrato Sunshine mostraron diferencias estadísticas significativas en el contenido de clorofila y/o concentración de N con respecto a las lecturas SPAD de las hojas de las plántulas que crecieron en los demás sustratos, mientras que en las concentraciones de N en los vástagos de las plántulas no se encontraron diferencias significativas.

Esta diferencia puede ser debida a la precisión de cada una de las metodologías de cuantificación y/o debido a que las lecturas SPAD determinan indirectamente el contenido de N solamente de las hojas sobre las cuales se realiza la medición, mientras que la concentración de N es sobre la totalidad del tejido de la parte aérea de la planta (tallos y hojas).

Las concentraciones de N en los vástagos de las plántulas variaron entre 38.6 g kg⁻¹ en el sustrato Sunshine y 44.3 g kg⁻¹ en el sustrato 60-40 de paja de trigo.

Aunque el análisis de varianza no detectó diferencias significativas en la concentración de N en los vástagos de las plántulas de brócoli, se observa que al menos en tres análisis de vástagos para este nutrimento (sustratos 70-30, 60-40 y 50-50), tuvieron concentraciones de N ligeramente superiores a las concentraciones de N de los dos sustratos testigos.

5.3.8.2 Fósforo

La concentración de P en los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos evaluados se presenta en la Figura 5.

El análisis de varianza indica que no existen diferencias significativas en la concentración de P ($P > F = 0.1261$) en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos evaluados. Esto, se traduce, a que en general ninguna de las variables independientes o condiciones de los sustratos inhibieron la absorción de P por las raíces y el transporte hacia los vástagos de las plántulas de brócoli al final del experimento, incluye a las CFST.

Las concentraciones de P en los vástagos de las plántulas variaron entre 6.49 g kg⁻¹ en el sustrato 60-40 de paja de trigo y 7.77 g kg⁻¹ en el sustrato Sogemix VT-M. Aunque el análisis de varianza no detecta diferencias significativas en la concentración de P en los vástagos de las plántulas de brócoli en los sustratos evaluados, se observa que con excepción del sustrato 50-50, todos los demás vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los otros sustratos de paja de trigo tuvieron menores concentraciones de P que los vástagos de las plántulas que crecieron en el mejor de los sustratos testigos (Sogemix VT-M).

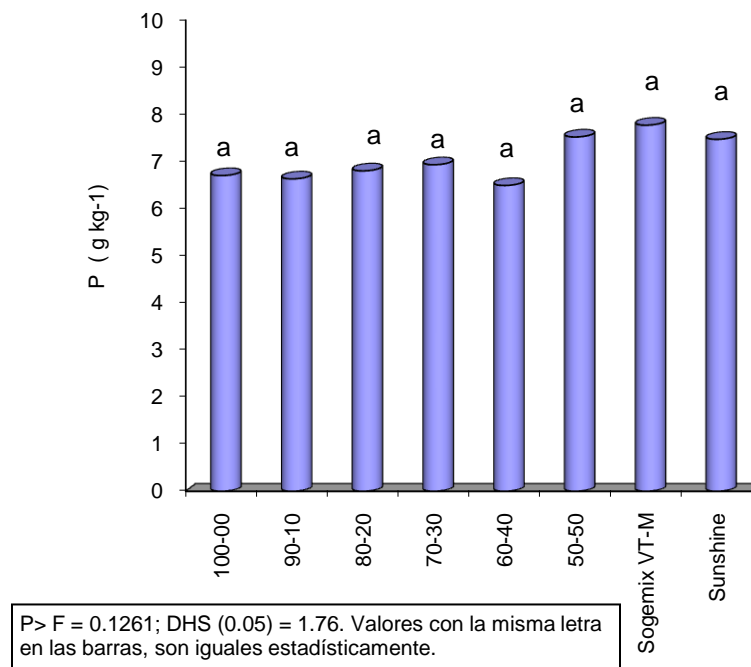


Figura 5. Concentración de P (g kg⁻¹) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra.

5.3.8.3 Potasio

La concentración de K en los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos evaluados se presenta en la Figura 6. El análisis de varianza indica que no existen diferencias significativas en la concentración de K ($P > F = 0.2837$) en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos evaluados. Esto sugiere, que en general ninguna de las variables independientes o condiciones de los sustratos inhibieron la absorción de K por las raíces y el transporte a los vástagos de las plántulas de brócoli al final del experimento, incluye a las CFST.

Las concentraciones de K en los vástagos de las plántulas variaron entre 9.38 g kg⁻¹ en el sustrato Sogemix VT-M (testigo) y 14.38 g kg⁻¹ en el sustrato de paja de trigo 100-00.

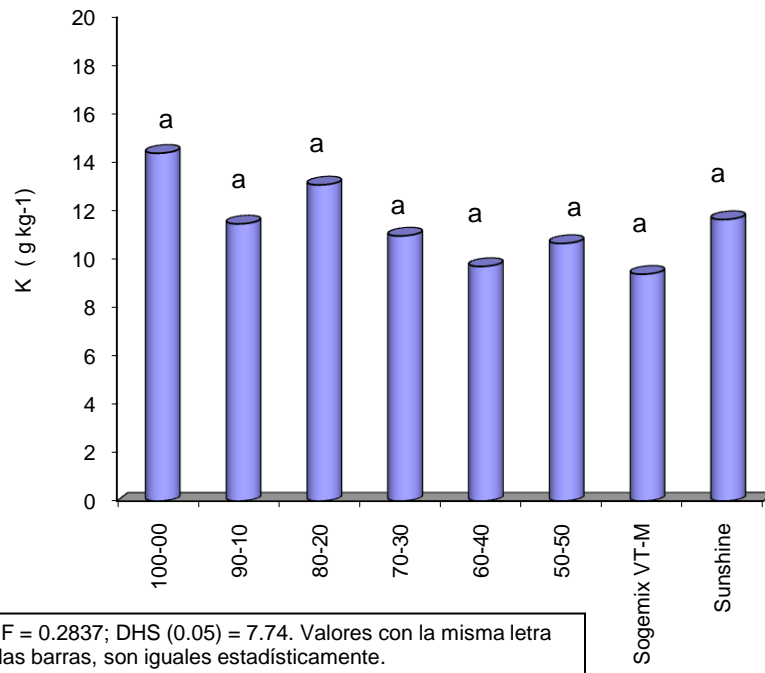


Figura 6. Concentración de K (g kg⁻¹) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra.

Aunque el análisis de varianza no detecta diferencias significativas en las concentraciones de K en los vástagos de las plántulas de brócoli en los sustratos evaluados, se observa que prácticamente todos los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo presentaron mayores concentraciones de K que los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M. La diferencia entre la mayor concentración de K en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato de paja de trigo con granulometría 100-00 y los vástagos de las plántulas que crecieron en el Sogemix VT-M fue de 5 g kg⁻¹.

5.3.8.4 Calcio

La concentración de Ca en los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos evaluados se presenta en la Figura 7. El análisis de varianza indica que hay diferencias altamente significativas en la concentración de Ca (P > F = 0.0138)

entre los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos evaluados.

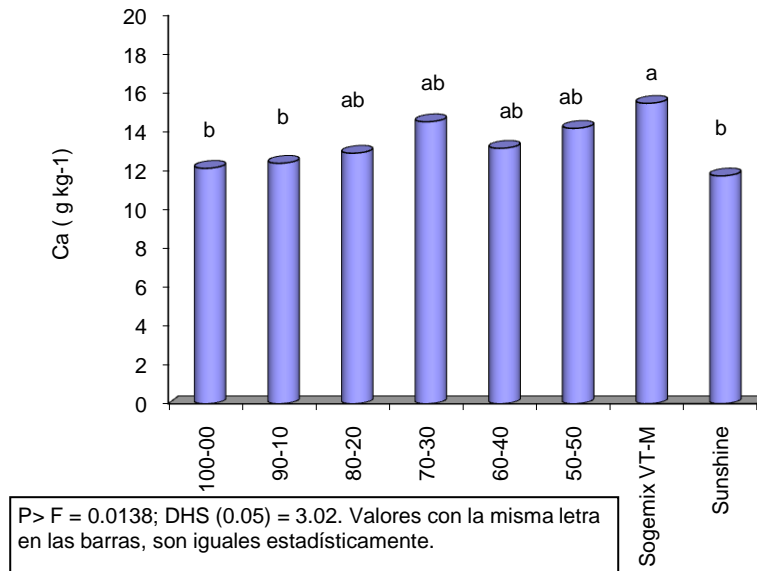


Figura 7. Concentración de Ca (g kg⁻¹) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra.

Los vástagos de las plántulas que presentaron las menores concentraciones de Ca y fueron estadísticamente diferentes a las concentraciones de Ca de los demás vástagos fueron los que crecieron en los sustratos 90-10 y 100-00, de paja de trigo y el testigo Sunshine, con concentraciones de 12.39 g kg⁻¹, 12.13 g kg⁻¹ y 11.74 g kg⁻¹ respectivamente. Visualmente no se detectaron deficiencias de calcio en las hojas de los vástagos de estas plántulas.

Es probable que en los casos de los sustratos 100-00 y 90-10 de paja de trigo, la menor concentración de Ca en los vástagos de las plántulas de brócoli probablemente fue consecuencia de una menor absorción de agua y al mismo tiempo de Ca, por las raíces de las plántulas que crecieron en estos sustratos, por el hecho de que a pesar de que estos sustratos de paja de trigo en las pruebas físicas presentan una mayor proporción de AFD que los demás sustratos de paja

de trigo, en realidad tuvieron menor cantidad de AFD para ser absorbida por las raíces debido a una mayor evaporación del agua (agua fácilmente evaporable).

De manera práctica, se observó que las plántulas que crecieron en los sustratos mencionados, presentaron síntomas de falta de agua primeramente que los otros sustratos de paja de trigo. Es importante señalar que aunque los datos de AFD, AR y ATD de los sustratos de paja de trigo indican igualdad estadística, es probable que la velocidad a la que el agua en los sustratos de paja de trigo se consumió fue diferente, tomando en consideración que el agua presente en el sustrato se consume por transpiración de la planta y por evaporación del sustrato. En estas circunstancias, se puede asumir que los sustratos con mayor granulometría pierden al agua más fácilmente por evaporación que los sustratos con menor granulometría. Tomando en consideración lo anterior se puede concebir que la menor concentración de Ca en los vástagos de las plántulas de brócoli fue consecuencia de una menor cantidad de agua total disponible para las plántulas en los sustratos 100-00 y 90-10 de paja de trigo.

La menor concentración de Ca en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine se atribuye al pH ácido, al cual las raíces de las plántulas de brócoli estuvieron sometidas al menos durante los primeros 23 DDS. La disponibilidad del Ca para ser absorbido en valores de pH menores a 5.0 disminuye (Bunt, 1988).

5.3.8.5 Magnesio

La concentración de Mg en los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos evaluados se presenta en la Figura 8. El análisis de varianza indica que no existen diferencias significativas en la concentración de Mg ($P > F = 0.9557$) en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos.

De acuerdo con los datos presentados en la Figura 8, ninguna de las variables independientes o condiciones de los sustratos inhibieron la absorción de Mg por las raíces y el transporte de Mg a los vástagos de las plántulas de brócoli al final del experimento, incluye a las CFST. Las concentraciones de Mg en los vástagos

variaron entre 7.29 g kg⁻¹ en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato 60-40 de paja de trigo y 8.08 g kg⁻¹ en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine.

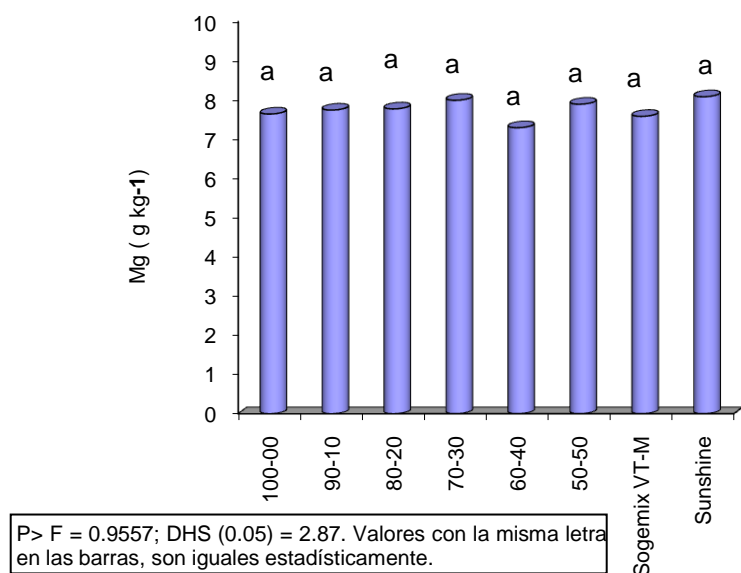


Figura 8. Concentración de Mg (g kg⁻¹) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra.

Aunque el análisis de varianza no detecta diferencias significativas en la concentración de Mg en los vástagos de las plántulas de brócoli en los sustratos, se observa, que con excepción del sustrato 60-40 de paja de trigo, los demás vástagos que crecieron en los sustratos de paja de trigo tuvieron concentraciones superiores a las determinadas en el sustrato Sogemix VT-M, el cual se señaló que fue el mejor sustrato de los dos testigos en relación con el peso seco de diez vástagos.

5.3.8.6 Hierro

La concentración de Fe en los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos evaluados se presenta en la Figura 9. El análisis de varianza indica que

no hay diferencia significativa en la concentración de Fe ($P > F = 0.2260$) en los tejidos de los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos. Sin embargo, aunque estadísticamente las concentraciones de Fe en los vástagos fueron iguales se observa una diferencia importante en las concentraciones de Fe. Los vástagos que crecieron en al menos tres sustratos de paja de trigo tuvieron concentraciones de Fe mayores que los vástagos de las plántulas que crecieron en el mejor sustrato testigo (Sogemix VT-M). La concentración de Fe en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato 90-10 fue de 21.21 % mayor que el de los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M.

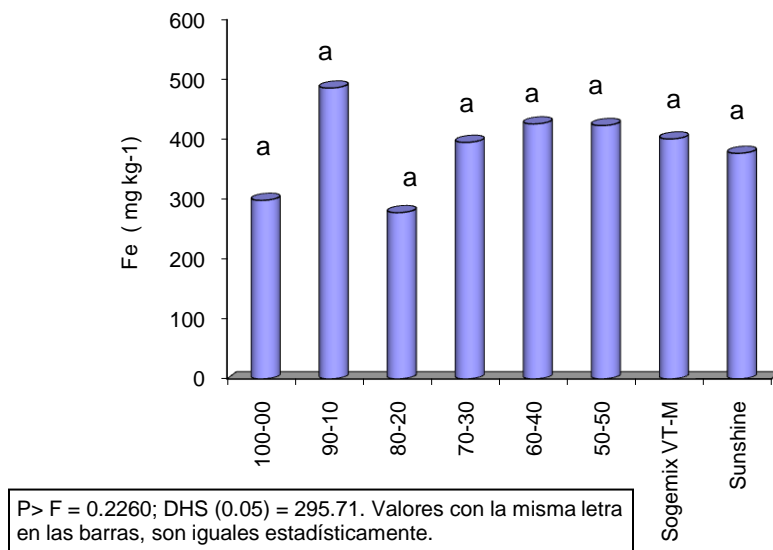


Figura 9. Concentración de Fe (mg kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra.

La diferencia entre la concentración de Fe en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato 90-10 y los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato 80-20 fue de $208.13 \text{ mg kg}^{-1}$, lo cual representa el 74.94 % de la concentración del Fe del primero. Ninguna de las variables independientes o condiciones de los sustratos, inhibieron la absorción de Fe por las raíces y su

transporte a los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo, incluyendo a las CFST.

5.3.8.7 Manganeso

La concentración de Mn en los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos se presenta en la Figura 10. El análisis de varianza indica que existen diferencias significativas en la concentración de Mn ($P > F = 0.0196$) en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos.

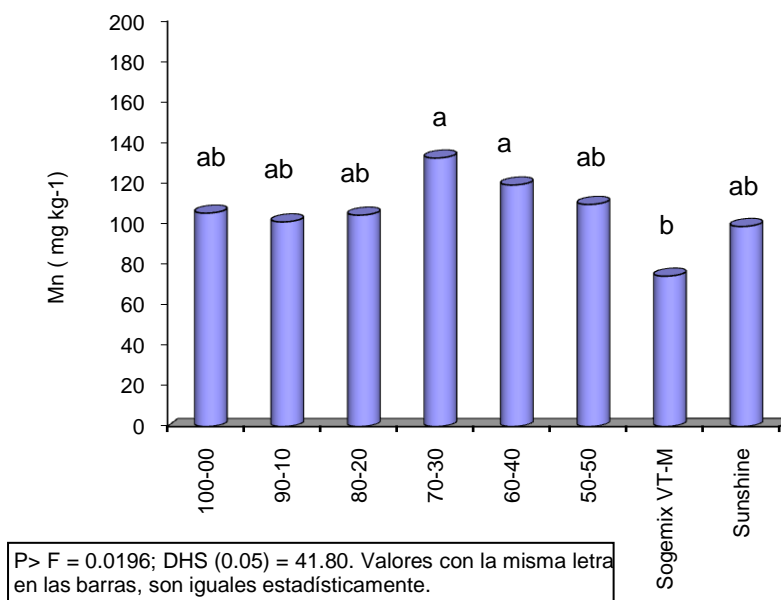


Figura 10. Concentración de Mn (mg kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv, Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la seimbra.

La comparación de medias muestra que con excepción de los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M (testigo) todos los demás vástagos de las plántulas de los sustratos evaluados presentaron concentraciones de Mn estadísticamente iguales.

La diferencia entre las concentraciones de Mn en los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo y los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M, se pueden explicar por la capacidad que

tienen las turbas para adsorber el Cu (II). La capacidad para adsorber el Cu (II) de las turbas se debe principalmente a los grupos carboxilos de las sustancias húmicas contenidas en estos sustratos y es dependiente del pH.

A mayor pH la adsorción es mayor (grupos carboxilos ionizados) (Gardea-Torresdey *et al.*, 1995). Las turbas pueden adsorber varios iones divalentes (Cu, Ni, Pb) y la adsorción depende de la concentración inicial del ión metálico, la dosis de la turba y la naturaleza del ión soluble (Ho y McKay, 2000).

El Cu y el Mn pertenecen al periodo 4 de la tabla periódica, ambos poseen una carga positiva de +2, pero el Mn es más electronegativo que el Cu, por lo que es muy probable que los compuestos húmicos de los sustratos con base en turba, hayan adsorbido parte del Mn suministrado en la solución nutritiva, de tal manera que la concentración de este nutrimento en la solución de la cual fueron tomados los elementos nutritivos, fue menor en relación con las concentraciones de Mn en las soluciones presentes en los sustratos de paja de trigo.

En este experimento la CIC de las pajas fue muy baja en relación con la CIC de las turbas (propiedades químicas iniciales de los sustratos), por lo que es poco probable que la paja de trigo haya adsorbido Mn al igual que lo hizo el sustrato Sogemix VT-M con base en turba.

Es probable que la vermiculita como constituyente del sustrato Sogemix VT-M haya también contribuido a la adsorción de Mn. Los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine presentaron una mayor concentración de este nutrimento; este sustrato no contiene vermiculita.

La concentración de Mn en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato 70-30 de paja de trigo fue casi el doble (1.78 veces) de la concentración de Mn determinado en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M (testigo).

5.3.8.8 Cobre

La concentración de Cu en los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos evaluados se presenta en la Figura 11. El análisis de varianza indica que

hay diferencias altamente significativas en la concentración de Cu ($P > F = 0.0109$) en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos.

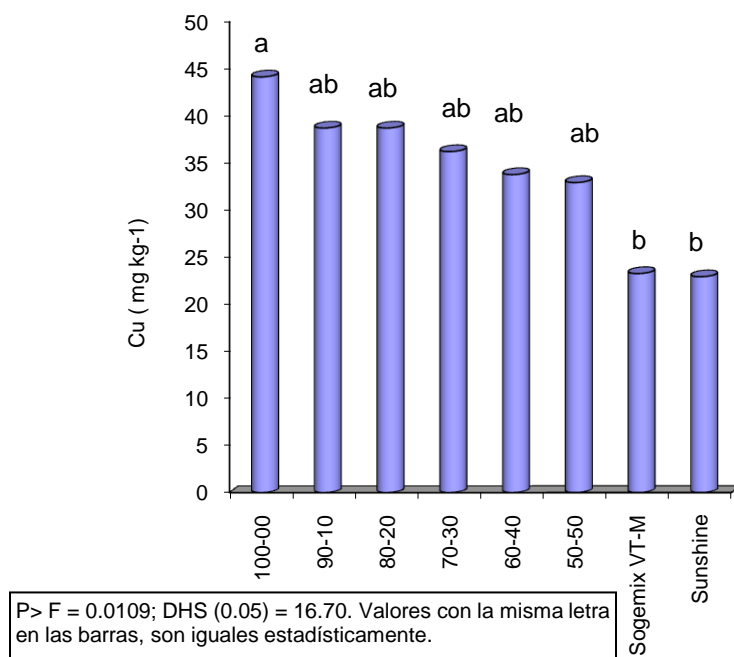


Figura 11. Concentración de Cu (mg kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra.

La comparación de medias indica que con excepción de los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato 100-00, todos los demás vástagos de las plántulas de los demás sustratos, incluyendo a los sustratos testigos, fueron estadísticamente iguales. Los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos testigos fueron los que mostraron las menores concentraciones de Cu. Sin embargo, aunque estadísticamente fueron iguales se observa una diferencia importante en las concentraciones de Cu entre los sustratos de paja de trigo y los sustratos testigos.

La concentración de Cu en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato 50-50 con la menor concentración de Cu entre los sustratos de paja de trigo, fue de 29.34 % mayor que la de los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M. La diferencia entre la concentración de Cu en los

vástagos de los sustratos de paja de trigo y el sustrato Sogemix VT-M se atribuye también a la adsorción de Cu (II) por las turbas o la vermiculita (ver manganeso). En el caso de la baja concentración de Cu en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine, no se puede explicar por el mismo fenómeno químico que ocurre en el Sogemix VT-M, por el hecho de que los compuestos húmicos presentes en esta turba no se presentan ionizados, debido al pH ácido (abajo de 5.0) que presentó este sustrato durante la mayor parte de los 30 días que las plantas estuvieron creciendo en los sustratos. La baja concentración de Cu en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine, tampoco se puede explicar por el efecto directo del pH; el Cu se absorbe mejor en pH ácidos.

5.3.8.9 Zinc

La concentración de Zn en los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos evaluados se presenta en la Figura 12.

El análisis de varianza indica que hay diferencias significativas en la concentración de Zn ($P > F = 0.0383$) entre los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos.

La comparación de medias indica que los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine tuvieron la mayor concentración de Zn entre los vástagos que crecieron en los demás sustratos y fue estadísticamente igual a las concentraciones de Zn en los vástagos que crecieron en los sustratos de paja de trigo, y diferente a la concentración de Zn que presentaron los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M, el cual presentó la menor concentración de este micronutriente.

Se puede sugerir que en general no hubo inhibición en la absorción de este nutriente debido a las propiedades físicas y/o químicas en los sustratos de paja de trigo sobre la absorción de Zn por las raíces de las plántulas de brócoli, incluyendo a las CFST. La diferencia entre la mayor concentración de Zn en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine y la concentración

de los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M fue de 38.04 mg kg^{-1} , lo que representa el 23.27 %. El incremento en la concentración de Zn en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en el sustrato Sunshine pudo haber sido consecuencia del pH más ácido en este sustrato, con respecto al Sogemix VT-M.

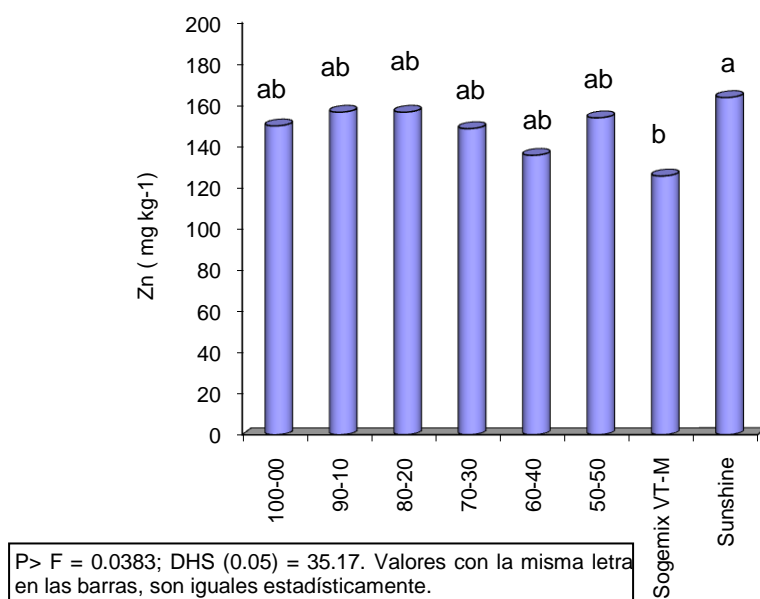


Figura 12. Concentración de Zn (mg kg^{-1}) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra.

5.3.8.10 Boro

La concentración de B en los vástagos de las plántulas que crecieron en todos los sustratos evaluados se presenta en la Figura 13.

El análisis de varianza indica que no hay diferencias significativas en la concentración de B ($P > F = 0.3966$) en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos.

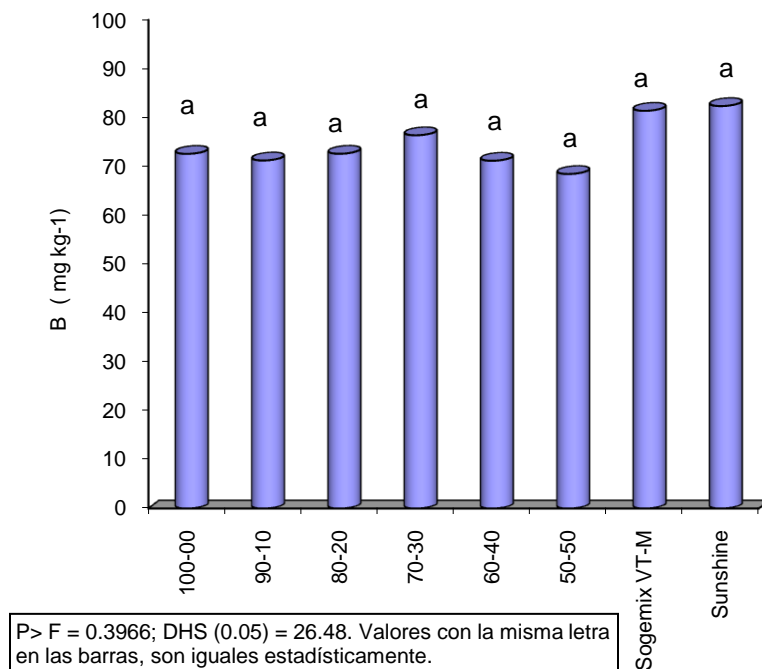


Figura 13. Concentración de B (mg kg⁻¹) en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot, desarrolladas en seis sustratos de paja de trigo y dos turbas comerciales, 30 días después de la siembra.

Aunque la comparación de medias indica que los vástagos de las plántulas que crecieron en todos los sustratos fueron iguales estadísticamente en la concentración de B, se observa que los sustratos testigos presentaron ligeramente mayores concentraciones de este nutriente.

Ninguna de las variables independientes o condiciones de los sustratos de paja de trigo inhibieron significativamente la concentración de B en los vástagos de las plántulas de brócoli, incluyendo la CFST.

5.4 CONCLUSIONES

1. Los sustratos Sogemix VT-M y Sunshine presentaron densidades aparentes mayores que los sustratos de paja de trigo.

2. La DA^1 y la DA^2 fueron ligeramente diferentes comparando los dos métodos de determinación, resultando mayor cuando se utilizó el método de la charola. De igual manera se comportó la porosidad total.

3. La PT de los sustratos calculada utilizando las DA^1 y DA^2 junto con la DR, mediante la fórmula $PT = (1-DA/DR) \times 100$, y las PT de los mismos sustratos utilizando el método de embudos de succión fueron similares.

4. La PT de los sustratos de paja de trigo disminuyó ligeramente de acuerdo con el aumento en la proporción de partículas menores de 1.00 mm y mayores e iguales a 0.5 mm.

5. El sustrato Sogemix VT-M presentó la menor porosidad de aire (PA), siendo significativamente diferente a las PA determinadas en los demás sustratos. La menor PA en el sustrato Sogemix VT-M se atribuye a la mayor proporción (en peso) de partículas menores de 0.5 mm.

6. A pesar de que las granulometrías entre los sustratos de paja de trigo y los sustratos testigos son diferentes, todos los sustratos evaluados presentaron características de AFD, AR, ATD, ADD y PAGUA iguales estadísticamente.

7. Los valores de PA determinados en los sustratos evaluados por los tres métodos utilizados se encuentran en el intervalo de valores de PA señalados por la norma inglesa British Standard BS 4156, para plantas de crecimiento de corta duración, como plantas de temporada en alvéolos y en sustratos de semillero, sin embargo sustratos con valores de PA menores a los señalados (Sogemix VT-M), proporcionaron un medio adecuado para el crecimiento de las raíces y los vástagos de las plántulas de brócoli. Lo anterior se pudo haber debido a que la porosidad de fractura es más importante que la PA total presentada por los sustratos.

8. Las concentraciones de fenólicos solubles totales, el pH y la CE en los sustratos de paja de trigo al inicio del experimento y hasta los nueve días después de la siembra, no afectaron negativamente el porcentaje de emergencia de las plántulas presentando valores similares y estadísticamente iguales a los que presentaron los sustratos testigos.

9. Los pH de los sustratos de paja de trigo y del sustrato Sogemix VT-M, se mantuvieron en el intervalo de 7.06 y 6.16 durante el experimento, valores que se consideran como normales para el desarrollo de las plantas. El pH del sustrato Sunshine permaneció abajo de 5.0 desde el inicio del experimento y hasta los 23 DDS.

10. La CE de los sustratos de paja de trigo se mantuvo en el intervalo de 3.4 dS m⁻¹ en el sustrato 80-20 a los 23 DDS y 1.01 dS m⁻¹ en el sustrato 90-10, a los 30 DDS. Los sustratos testigos presentaron CE superiores a la de los sustratos de paja de trigo, especialmente a los 13 DDS (3.48 dS m⁻¹), 15 DDS (3.26 dS m⁻¹) y 23 DDS (3.66 dS m⁻¹) para el caso del Sunshine y a los 23 (3.7 dS m⁻¹), 27 (3.67 dS m⁻¹) y 30 DDS (2.25 dS m⁻¹). Sin embargo, a pesar de que los sustratos testigos registraron valores de CE altos en relación con los sustratos de paja de trigo en los momentos señalados, las plántulas que crecieron en ellos, no mostraron síntomas del efecto de altas concentraciones de sales.

11. Todos los sustratos de paja de trigo disminuyeron sus CFST durante el experimento, siendo más acentuada durante los primeros 10 DDS. El intervalo de las CFST en los sustratos de paja de trigo al final del experimento fue de 5.42 mg L⁻¹ en el sustrato 80-20 y 6.24 mg L⁻¹ en el sustrato 60-40, disminuyendo 84.44 % y 86.00 % respectivamente, con respecto a las concentraciones iniciales. Probablemente en este intervalo el efecto inhibitorio sobre el crecimiento de las plántulas de brócoli es casi nulo y/o puede ser estimulante.

12. Aunque las CFST en los sustratos de paja de trigo se expresan en mg L^{-1} en realidad las raíces de las plántulas se encuentran expuestas a concentraciones presentes en volúmenes reducidos. El intervalo de CFST en los sustratos de paja de trigo se encontró entre $5.42 \mu\text{g mL}^{-1}$ y $6.24 \mu\text{g mL}^{-1}$. Si estas concentraciones las expresamos en equivalentes de ácido *p*-cumárico ($\text{PM} = 164.2 \text{ g mol}$) tendríamos concentraciones entre $0.033 \mu\text{M mL}^{-1}$ (0.033 mM L^{-1}) y $0.038 \mu\text{M mL}^{-1}$ (0.038 mM L^{-1}).

13. Los sustratos de paja de trigo presentaron altos porcentajes de materia orgánica al final del experimento, perdiendo muy poca materia orgánica durante el mismo, variando entre 0.37 % en los sustratos 90-10 y 60-40, y 1.50 % en el sustrato 70-30, teniendo 99.60 % de bioestabilidad para los dos primeros sustratos de paja de trigo y 98.39 % para el sustrato 70-30, considerándose todos en la categoría de “muy alta bioestabilidad”. Los sustratos testigos Sogemix VT-M y Sunshine perdieron 6.37 % y 3.62 % de materia orgánica, resultando mayor que la pérdida de materia orgánica que en los sustratos de paja de trigo, con 88.69 % y 96.24 % de bioestabilidad, ubicándose el primero en la categoría de “alta bioestabilidad” y el segundo en la categoría de “muy alta bioestabilidad”.

14. La “degradación microbiológica” de los sustratos de paja de trigo fue muy baja (1 en la escala, entre 1 y 10 % de degradación), tendiendo más hacia la no degradación, en el transcurso de 30 días de duración del experimento.

15. Tomando en consideración que la pérdida de MO en los sustratos de paja de trigo fue muy baja y que esta pérdida se atribuye principalmente a la lixiviación de compuestos orgánicos (fenómeno químico) y no por degradación biológica, se puede decir que bajo las condiciones de este experimento los sustratos de paja de trigo presentaron una alta “*estabilidad química o quimioestabilidad*”.

16. Al menos cuatro sustratos de paja de trigo (90-10, 80-20, 70-30 y 60-40) fueron estadísticamente iguales al mejor sustrato testigo (Sogemix VT-M) en las

variables de crecimiento determinadas en las plántulas de brócoli (vástagos y raíces), exceptuando la variable longitud de vástagos. De acuerdo con estos resultados, ninguna de las propiedades químicas como el pH, la CE y la CFST durante el experimento influyeron negativamente y de manera significativa en las variables de crecimiento de las plántulas que crecieron en estos sustratos de paja de trigo. Las diferencias en las variables de crecimiento de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos 100-00 y 50-50 con respecto al mejor de los sustratos testigos (Sogemix VT-M) se pueden explicar por la diferencia en las propiedades físicas de estos sustratos (pérdida de agua más fácilmente en el primero y menor pérdida de agua en el segundo-menor capacidad de respiración de las raíces).

17. Con excepción de los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato de paja de trigo 100-00, todos los demás vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo mostraron relaciones PMSV/PMSR estadísticamente iguales al mejor sustrato testigo (Sogemix VT.M).

18. Aunque estadísticamente los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos testigos fueron iguales a los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo (excepto el sustrato 100-00) en la relación PMSV/LV, estos presentaron relaciones mayores que los primeros, indicando que son relativamente más pesados por cm que los vástagos que crecieron en los sustratos testigos.

19. Los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo visualmente fueron de menor altura que los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos testigos, sin embargo, mostraron un aspecto más robusto sugiriendo que son plántulas de mejor calidad que las obtenidas en los sustratos testigos.

20. Las raíces de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo a los 13 DDS y 15 DDS mostraron raíces de color blanco pero sin pelos radicales. A los 23 DDS las raíces de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo mostraron mayor densidad de pelos radicales que a los 15 DDS, pero ligeramente menor que la densidad de pelos radicales de las raíces de las plántulas que crecieron en los sustratos testigos. A los 27 y 30 DDS la densidad de pelos radicales en las raíces de las plántulas de brócoli en los sustratos de paja de trigo fue similar o mayor que en las raíces de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos testigos.

21. El crecimiento de las raíces de las plántulas de brócoli en los sustratos de paja de trigo fue suficiente para que las raíces se distribuyeran a través de todo el perfil del sustrato, permitiendo la extracción completa del cepellón de las cavidades de la charola con facilidad, de manera similar a como se extrajeron en el sustrato Sogemix VT-M.

22. No hubo diferencias significativas en las concentraciones de N, P, K, Mg, Fe y B en los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo y los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos testigos.

23. Los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine presentaron menor concentración de Ca, siendo significativamente diferente a las concentraciones de Ca de los vástagos de las plántulas que crecieron en los demás sustratos. La causa de la menor concentración de Ca en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine es probable que haya sido el pH menor de 5.0 que las raíces de las plántulas soportaron al menos hasta los 23 DDS, o a la menor disponibilidad de AFD por la mayor evaporación de agua en este sustrato, o bien a la combinación de los dos factores.

24. El sustrato Sogemix VT-M presentó diferencias altamente significativas con respecto a los demás sustratos en la concentración de Mn, mostrando menor

concentración que los demás sustratos evaluados. Este efecto se puede explicar por la capacidad que tienen las sustancias húmicas de las turbas para adsorber cationes divalentes, especialmente cuando el pH de las mismas se incrementa. Es probable también que la vermiculita contenida en este sustrato haya contribuido a incrementar este efecto.

25. Los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos Sogemix VT-M y Sunshine tuvieron significativamente menores concentraciones de Cu que las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo, debido probablemente también a la capacidad que tienen las sustancias húmicas de las turbas para adsorber el Cu.

26. Los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M tuvieron significativamente menor concentración de Zn que los vástagos de las plántulas que crecieron en los demás sustratos evaluados, esto pudo haber sido consecuencia de la capacidad de adsorción de iones divalentes que tienen las sustancias húmicas contenidas en este sustrato. Este efecto se incrementó por el aumento en el pH de este sustrato durante el transcurso del experimento. El sustrato Sunshine no presentó este efecto debido a que la absorción de Zn se incrementa al disminuir el pH y a que la proporción de los grupos carboxilos ionizados es menor al disminuir el pH del medio.

27.- Cualquiera de los sustratos de paja de trigo con granulometrías 80-20, 70-30 y 60-40 pudieran utilizarse como sustitutos de los sustratos Sogemix VT-M y/o Sunshine en la producción de plántulas de brócoli.

5.5 LITERATURA CITADA

Abad B, M., y P. Noguera. 2000. Los sustratos en los cultivos sin suelo. pp. 137-183. *En:* M. Urrestarazu G. (eds.). Manual de cultivo sin suelo. Mundi-Prensa. Almería, España.

- Alcántar G, G., y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis e interpretación de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación especial No. 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo de México. México.
- Anon, T. (1990). Recommendations for peat for horticultural and landscape use. BS 4156. British Standard Institution. London, UK.
- Ansorena M, J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Editorial Mundiprensa. Bilbao, España.
- Baas, R., G. Wever., A. J. Koolen., E. Taribu., and K. J. Stol. 2000. Oxygen supply and consumption in soilless culture: evaluation of oxygen simulation model for cucumber. *Acta Horticulturae*. 554: 157-164.
- Baranov, V. I. 1980. Biological activity of oxidized phenolic compounds and their role in breakdown of indolyl-3-acetic acid. Plenum Publishing Corporation. pp. 551-557. Translated from *Fisiologiya Rastenii*, Vol, 28, No.4, pp. 688-695, July-August, 1979. Original article submitted September 29, 1978.
- Bilderback, T. E., and M. R. Lorscheider. 1997. Wetting agents used in container substrates, are they BMP'S?. *Acta Horticulturae*. 450: 313-319.
- Blanco M, J., and G. Almendros. 1995. Evaluation of parameters related to chemical and agrobiological qualities of wheat straw composts including different additives. *Bioresource Technology*. 51: 125-134.
- Bold, H. C., Alexoupoulos, C. J., y T. Develoryas. 1989. Morfología de las plantas y los hongos. Ed. Omega, S. A. Barcelona, España.
- Boodt De M., and O. Verdonck. 1972. The physical properties of substrates in horticulture. *Acta Horticulturae*. 20: 37- 44.
- Bremner, J. M., and C. S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. pp. 595-634. *In*: A. L. Page, R. H. Miller and D. R. Keeney, (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy 9. 2nd edition.* ASA. SSSA. Madison, Wi. USA.
- Buckman, A. 1991. Naturaleza y propiedades de los suelos. Editorial Limusa. D. F. México.
- Bunt, A. C. 1988. Media and mixes for container grown plants. Unwin Hyman. London, U. K.
- Burés P., S. 1997. Sustratos. Ediciones Agrotécnicas. Madrid, España.

- Camarero, S., G. C. Galletti., and A. T. Martínez. 1994. Preferential degradation of phenolic lignin units by two white rot fungi. *Applied and Environmental Microbiology*. 60: 4509-4516.
- Caraveo L, F. J. 1994. Relaciones nutrimentales en el cultivo hidropónico de jitomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) empleando el polvo de bonote de coco como sustrato. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. México.
- Enciclonet, 2009. (Disponible en línea en: <http://enciclonet.com/documento/antioxidante>. (Revisado el 17 febrero 2008).
- Esau, K. 1976. Anatomía vegetal. Ediciones Omega. Barcelona, España.
- Escudero, J. 1993. Cultivo hidropónico de tomate. pp. 261-297. *En*: F. Cánovas y J. R. Díaz. (ed.). Curso superior de especialización sobre cultivos sin suelo. I. E. A. / F.I.A.P.A. Almería, España.
- Gardea -Torresdey, J. L., L. Tang., and J. M. Salvador. 1995. Cooper adsorption by sphagnum peat moss and its different humic fractions. pp. 249-260. *In*: Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research. (Disponible en línea en: <http://engg.ksu.edu/HSRC/95proceed/tang.html>) (Revisado el 25 mayo de 2006).
- Gobierno del estado de Guanajuato. 2000. Ley de Protección y Preservación del Ambiente del estado de Guanajuato.
- Gómez V, P. y O. Grageda. S/F. Cuestionarios. (Investigación de campo). INIFAP. CEBAJ.
- Ho, Y. S., and G. McKay. 2000. The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat. *Wat. Res.* 34: 735-742. (Disponible en línea en <http://www.elsevier.com/locate/watres>). (Revisado el 30 de junio de 2006).
- Kikuzaki, H.; M. Hisamoto., K. Hirose., K. Akiyama., and H. Yaniguchi. 2002. Antioxidant properties of ferulic acid and its related compounds. *J. Agric. Food. Chem.* 50: 2161-2168.
- , 1949. Cellulose. pp. 342-369. *In*: Kirk, R. E., and D. F. Othmer (eds.). *Encyclopedia of chemical technology*. 3. The interscience encyclopedia, Inc. New York, USA
- Lemaire, F., A. Dartigues., L. M. Rivière., S. Charpentier., et P. Morel. 2003. Cultures en pots et conteneurs. Principes agronomiques et applications. 2^e éd. INRA Editions. Paris, Cedex, France.

- Lemaire, F. 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. *Acta Horticulturae*. 396: 273-284.
- Lemaire, F. 1997. The problem of the biostability in organic substrates. *Acta Horticulturae*. 450: 63-69.
- Lodhi, M. A. K., R. Bilal., and K. A. Malik. 1987. Allelopathy in agroecosystems: wheat phytotoxicity and its possible roles in crop rotation. *Journal of Chemical Ecology*. 13: 1881-1891.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Second Edition. Academic Press. San Diego, CA, USA.
- Muratalla L, S. 2003. Paja de maiz como sustrato alternativo en la producción de plántulas de jitomate y planta de frambuesa. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. Edo. de México.
- Narwal, S. S., M. K. Sarmah., and D. P. S. Nandal. 1997. Allelopathic effects of wheat residues on growth and yield of fodder crops. *Allelopathy Journal*. 4: 111-120.
- Opoku, G., T. J. Vyn., and R. P. Voroney. 1997. Wheat straw placement effects on total phenolic compounds in soil and corn seedling growth. *Canadian Journal of Plant Science*. 77: 301-305.
- Peat Moss de México, S. A. S/F. Folleto promocional.
- Premier, S/F. Folleto promocional.
- Reeves, W. D., P. L. Mask., C. W. Wood., and D. P. Delay. 1993. Determination of wheat nitrogen status with a handheld chlorophyll meter. Influence of management practices. *J. Plant Nutr.* 16: 7781-7796.
- Rhoades, J. D. 1982. Cation exchange capacity. pp 149-157. *In: A. L Page et al., (eds.). Methods of soil analysis. Agronomy 9. 2nd. ed. American Society of Agronomy. Madison, Wi, USA.*
- Rivière, L. M., J. C. Fourcard., and F. Lemaire. 1990. Irrigation of container crops according to the substrate. *Scientia Horticulturae*. 43: 339-349.
- Rodríguez M, Ma. De las N., G. Alcántar G., A. Aguilar S., J. D. Etchevers B., y J. A. Santizo R. 1998. Estimación de la concentración de nitrógeno y clorofila en tomate mediante un medidor portátil de clorofila. *Terra*. 16: 135-141.
- Rodríguez M, R. 2004. Desarrollo y caracterización de sustratos orgánicos a partir del bagazo de agave tequilero. Tesis de Doctor en Ciencias. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.

- Russell, R. S., and D. T. Clarkson. 1975. Ion transport in root systems. *In*: Sunderland N (ed.). *Perspectives in experimental biology*. 2: 401-411. Oxford, Pergamon Press. Oxford. U. K.
- Salas S, M. del C., y G. M. Urrestarazu. 2000. Métodos de riego y fertirrigación en cultivos sin suelo. pp. 185-253. *En*: M. Urrestarazu G. (ed.). *Manual de cultivo sin suelo*. Mundi-Prensa. Almería, España.
- Saviozzi, A., M. Levi., R. Riffaldi., and G. Vanni. 1997. Laboratory studies on the application of wheat straw and pig slurry to soil and the resulting environmental applications. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 61: 35-43.
- SDA (Secretaría de Desarrollo Agropecuario). Gobierno del estado de Guanajuato. (Disponible en línea en <http://www.sda.guanajuato.gob.mx>). (Revisado el 8 de febrero de 2009).
- SIAP (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera) 2010. Anuario estadístico de la producción agrícola. (Disponible en línea en http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=351) (Revisado el 15 de junio de 2011).
- Terés, V., V. Arrieta., J. Sánchez., M. Lucas., and E. Ritter. 1995. Evaluación de la densidad real de sustratos de cultivo por el método de inmersión. *Inv. Agr. Prod. Veg.* 10: 231-244.
- TLC Polyform, Inc. S/F. Contenedores y charolas ecológicas para la horticultura de plástico reciclado. Folleto promocional.
- Tomaszewski, M., and K. V. Thimann. 1966. Interactions of phenolic acids, metallic ions and chelating agents on auxin-induced growth. *Plant Physiology*. 41: 1443-1454.
- Vaughan, D., and B. Ord. 1990. Influence of phenolics acids on morphological changes in roots of *Pisum sativum*. *J. Sci. Food Agric.* 52: 289-299.
- Verdonck, O., D. De Vleeschauwer., and M. De Boodt. 1981. The influence of the substrate to plant growth. *Acta Horticulturae*. 126: 251-258.
- Verdonck, O. 1992. Reference method for the determination of physical properties of plant substrates. *Acta Horticulturae*. 302: 169-179.
- Wright, R. D. 1986. The pour-through nutrient extraction procedure. pp 227-229. *In*: Interpretation of extraction and nutrient determination procedures for organic potting substrates. *HortScience*. 21: 215-232.



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION
EN CIENCIAS AGRICOLAS

CAMPUS MONTECILLO

EDAFOLOGÍA

**PAJA DE TRIGO COMO SUSTRATO EN EL
CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI**

FIDEL RENÉ DÍAZ SERRANO

T E S I S

Volumen II

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

DOCTOR EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2011

PAGS 269-466

CAPÍTULO VI
TRANSFORMACIÓN BIOLÓGICA
DE COMPUESTOS FENÓLICOS EN PAJA DE TRIGO

TRANSFORMACIÓN BIOLÓGICA DE COMPUESTOS FENÓLICOS EN PAJA DE TRIGO

Fidel René Díaz Serrano, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2011

Se evaluaron seis tratamientos de transformación biológica (tres de compostaje y tres de vermicompostaje parciales) en paja de trigo con el objetivo de disminuir las concentraciones de fenólicos solubles totales (CFST) o transformarlos a compuestos fenólicos más complejos y de esta manera disminuir posteriormente los efectos de estos compuestos sobre el crecimiento de plántulas de brócoli, cuando se utilicen como sustratos. La duración de los tratamientos fue de 90 días. Las CFST en todos los tratamientos disminuyeron hasta los treinta días y posteriormente aumentaron considerablemente y en algunos tratamientos superaron las CFST cuantificadas inicialmente. Los extractos obtenidos de los tratamientos de paja de trigo para las determinaciones de las CFST cada 15 días aumentaron paulatinamente su coloración oscura. Los tratamientos T4 (lombrices + NH_4NO_3) y T1 (microorganismos + NH_4NO_3) mostraron las mayores CFST al final del experimento con 228.48 y 169.27 mg L^{-1} respectivamente.

Las bajas pérdidas de materia orgánica en los tratamientos (4.70 % a 8.63 %) y las concentraciones de celulosa, hemicelulosa y lignina en las pajas durante 90 días demuestran que la transformación biológica en sus tejidos fue muy baja.

De acuerdo con las CFST cuantificadas en los seis tratamientos de degradación biológica, se puede sugerir que los compuestos fenólicos presentes en la paja de trigo se transformaron en compuestos fenólicos complejos y se espera que al menos uno de los materiales de paja de trigo obtenidos por la degradación biológica parcial pueda utilizarse como sustrato sin inhibir el crecimiento de las raíces y vástagos de plántulas de brócoli.

Palabras clave: *transformación biológica, fenólicos, paja de trigo*

BIOLOGICAL TRANSFORMATION OF PHENOLIC COMPOUNDS IN WHEAT STRAW

Fidel René Díaz Serrano, Ph. D.

Postgraduate College, 2011

Six treatments of biological transformation (three of partial composting and three of partial vermicomposting) in wheat straw were evaluated with the aim to diminish the total soluble phenolic concentration (TSPC) or to transform them to a more complexes compounds so that they do not affect the growth of broccoli seedlings when these materials are going to be used as substrates.

The experiment was carried out by 90 days. The TSPC in all treatments diminish till thirty days and later they increased and in some treatments they surpass the TSPC initially determined.

The extracts obtained every 15 days increased gradually their dark coloration. The treatments T4 (earthworms + NH_4NO_3) and T1 (microorganisms + NH_4NO_3) showed the greatest TSPC at the end of the experiment with 228.48 and 169.27 mg L^{-1} respectively.

The low losses of organic matter in the treatments (4.70 % to 8.63 %) and the cellulose, hemicellulose and lignin content in the straws after 90 days of biological transformation demonstrate that degradation on the tissues were too low.

According with the TSPC quantified in the six treatments of biological transformation it is possible to suggest that the phenolic compounds in wheat straw at the beginning of the experiment were transformed into more complex phenolic compounds and it is hoped that at least one of the materials of wheat straw obtained by partial biological transformation could be used as substrate without no growing inhibition on roots and shoots of broccoli seedlings.

Key words: biological transformation, phenolics, wheat straw

6.1 INTRODUCCIÓN

La paja de trigo es un residuo orgánico que se produce en grandes cantidades en México y puede constituir la base para la elaboración de sustratos nacionales y/o regionales, que puedan utilizarse como material alternativo a las turbas comerciales importadas principalmente de Canadá, en la producción de plántulas para trasplante.

La paja de trigo contiene compuestos fenólicos que inhiben el crecimiento de las plantas (Guenzi y McCalla, 1966; Lodhi *et al.*, 1987; Narwal *et al.*, 1997; Opoku *et al.*, 1997). Los principales compuestos que se han identificado en paja de trigo como los causantes de estos efectos de inhibición son los ácidos *p*-cumárico, ferúlico, siríngico, vainílico y *p*-hidroxibenzoico tomando como base su concentración (Guenzi y McCalla, 1966).

Como parte de esta misma investigación en el Capítulo II, se identificaron los ácidos *p*-cumárico y ferúlico como los principales ácidos fenólicos presentes en paja de trigo variedad Saturno, además de los ácidos caféico, gentísico, siríngico y vainílico en el extracto acuoso, derivados de sus respectivos compuestos conjugados con azúcares.

Se indica que los ácidos *p*-cumárico y ferúlico (ácidos hidroxicinámicos) usualmente ocurren en las plantas en forma esterificada, unidos a los hidroxilos de moléculas de un azúcar, como metabolitos secundarios o como constituyentes de las paredes celulares (Waterman y Mole, 1994).

Se menciona que los ácidos siríngico, vainílico y *p*-hidroxibenzoico pueden estar asociados a la lignina combinados como grupos ésteres o pueden estar presentes en forma de simples glucósidos. Los compuestos fenólicos tienden a ser solubles en agua, toda vez que con frecuencia ocurren combinados con un azúcar como glucósidos y se localizan comúnmente en las vacuolas (Harborne, 1984).

El uso directo de la paja de trigo como sustrato alternativo para la producción de plántulas ha tenido algunos inconvenientes, toda vez que, aun a pesar de que los compuestos fenólicos presentes en la paja de trigo han sido extraídos con agua, los materiales derivados con menores concentraciones de fenólicos solubles

totales, siguen presentando cierto grado de inhibición en el crecimiento de plántulas de brócoli (Capítulos I, IV y V).

Abad *et al.*, (1997), señalan que la utilización directa de muchos materiales orgánicos frescos presentan diferentes inconvenientes como fitotoxicidad, inmovilización del nitrógeno, deficiencia de oxígeno a nivel de las raíces, etc. Mencionan además que entre los métodos de adecuación de los materiales orgánicos para fines hortícolas destaca el compostaje, que permite su transformación en un material orgánico maduro y estable, denominado *compost*, el cual puede ser utilizado en horticultura sin efectos negativos sobre las plantas.

Los ácidos fenólicos libres se encuentran en la solución del suelo, pero solo cuatro (ferúlico, *p*-hidroxibenzoico, *p*-cumárico y vainílico) se encuentran comúnmente comprendiendo menos del 0.01 % de la materia orgánica total del suelo (Vaughan y Ord, 1980).

Los microorganismos pueden usar los ácidos fenólicos libres como fuentes de carbón y energía (Blum y Shafer, 1988) o causar polimerización de los ácidos fenólicos a través de la actividad de polifenoloxidasas y peroxidasas (Haider y Martin, 1975).

La utilización microbiana de los ácidos fenólicos simples tales como el *p*-cumárico y ferúlico, conduce a la formación de otros ácidos fenólicos, como el vainílico, *p*-hidroxibenzoico y/o protocatecuico, antes de que la estructura del anillo aromático se rompa (Martin y Haider, 1976; Blum y Dalton, 1985; Blum y Shafer, 1988).

Por otro lado el vermicomposteo o vermicompostaje, es otro proceso de transformación de la materia orgánica fresca, por medio de lombrices de diversos géneros (*Eisenia foetida*, entre otras), que ayudan a la transformación de la materia orgánica por medio de ingestión y transformación de esta en su sistema digestivo e intestinal, involucrando a enzimas como amilasas, proteasas, quitinasas, celulasas, etc. (Edwards y Fletcher, 1988); proteasa, amidasa, ureasa y nitrogenasa (Quintero *et al.*, 2003), desechando material orgánico transformado a través de su ano, derivando un material sólido denominado "turrículo", el cual contiene moco de la lombriz y puede sufrir una posterior transformación con la intervención de microorganismos, incrementando la digestión de la materia

orgánica, con la posterior liberación de nutrimentos para el beneficio de la lombriz (Barois y Lavelle, 1986).

Las fracciones estables de alto peso molecular cuando se presentan en bajas concentraciones incrementan la iniciación y elongación de las raíces, especialmente los ácidos fúlvicos (Mylonas y McCants, 1980).

En este trabajo de investigación, se planteó como objetivo principal, disminuir las concentraciones de fenólicos solubles totales contenidos en paja de trigo variedad Saturno, a través de su transformación biológica por la vía respiratoria (CO_2 y H_2O) y/o su transformación en compuestos fenólicos complejos, a través del compostaje y vermicompostaje parciales, de tal manera que los nuevos materiales orgánicos derivados de su transformación no inhiban el crecimiento de las plántulas de brócoli.

6.2 MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio se llevó a cabo en una habitación adjunta a la sección de invernaderos perteneciente al Área de Microbiología, Programa de Edafología del Instituto de Recursos Naturales, Colegio de Postgraduados, en Montecillo, Texcoco, Edo. de México, durante el periodo comprendido del 19 de diciembre del año 2003 al 20 de marzo del año 2004.

6.2.1 Tratamientos evaluados

Los tratamientos de transformación biológica evaluados se presentan en el Cuadro 1.

Para la extracción de los compuestos fenólicos de la paja de trigo molida con molino de martillos, en los tratamientos 2, 3, 5 y 6, se midieron 20 L de paja de trigo molida con un vaso de precipitados de 2 L y se pusieron en una bandeja de plástico con capacidad para 24 L, con una profundidad aproximada de 20 cm. A la paja contenida en la bandeja se le agregó agua común y se fue humedeciendo hasta saturarla, y posteriormente sobresaturarla hasta observar un espejo de agua

sobre su superficie. La paja sobresaturada se dejó así por 12 horas, después de las cuales se decantó el líquido color café oscuro, con la ayuda de una tela de algodón para evitar la pérdida de material sólido.

Cuadro 1. Tratamientos evaluados en la transformación biológica de paja de trigo variedad Saturno.

Tratamiento	Material	Primera aplicación de nitrógeno 20/12/03	Segunda aplicación de nitrógeno ¹ 4/01/04
T1 (Descomposición microbiológica)	Paja de trigo molida sin extracción de compuestos fenólicos	8 g de NH ₄ NO ₃	8 g de NH ₄ NO ₃
T2 (Descomposición microbiológica)	Paja de trigo molida con extracción de fenólicos. Remojo 12 horas	8 g de NH ₄ NO ₃	8 g de NH ₄ NO ₃
T3 (Descomposición microbiológica)	Paja de trigo molida con extracción de fenólicos. Remojo 12 horas	Solución completa al 100 %. CE = 2.5 dS m ⁻¹	No se hizo segunda aplicación.
T4 (Descomposición por lombrices y microbiológica)	Paja de trigo molida sin extracción de compuestos fenólicos	8 g de NH ₄ NO ₃	8 g de NH ₄ NO ₃
T5 (Descomposición por lombrices y microbiológica)	Paja de trigo molida con extracción de fenólicos. Remojo 12 horas	8 g de NH ₄ NO ₃	8 g de NH ₄ NO ₃
T6 (Descomposición por lombrices y microbiológica)	Paja de trigo molida con extracción de fenólicos. Remojo 12 horas	Solución completa al 100 %. CE = 2.5 dS m ⁻¹	No se hizo segunda aplicación.

¹La segunda aplicación de las soluciones nitrogenadas se hizo después de tomar la muestra correspondiente a los 15 días después del inicio del experimento.

La paja se exprimió con la ayuda de la misma tela, quedando con una humedad aproximada de 50 %. Por un lado, se adicionaron 8 g de NH₄NO₃ por cada tratamiento, disolviéndolos primeramente en 1 L de agua común, vertiéndolos en

los tratamientos 2 y 5. La solución se mezcló manualmente con la paja y posteriormente se agregó agua común hasta obtener aproximadamente un 70 % de humedad.

Por otro lado, a los tratamientos 3 y 6 se les agregaron 15 L de solución completa al 100 %. El contenido de nutrimentos de la solución completa al 100 % en miliequivalentes por litro fue: NO_3^- - 8.4 meq L^{-1} , H_2PO_4^- - 1 meq L^{-1} , SO_4^{2-} - 10.4 meq L^{-1} , K - 7.0 meq L^{-1} , Ca - 5.4 meq L^{-1} , Mg - 4 meq L^{-1} , NH_4^+ - 3.6 meq L^{-1} , con una conductividad eléctrica de 2.50 dS m^{-1} , además de micronutrimentos (Capítulos I, IV y V).

En los tratamientos a los que no se les extrajeron los compuestos fenólicos (tratamientos 1 y 4), se les agregaron 5 L de la solución de NH_4NO_3 (disolución de 8 g de NH_4NO_3 en cinco litros de agua común) a las bandejas de plástico de 24 L con paja de trigo molida, mezclando manualmente la solución con la paja, y posteriormente se agregó un poco más de agua común hasta humedecerlas uniformemente y alcanzar un contenido de humedad aproximado de 70 %.

Después de la aplicación del N a las pajas de trigo, las bandejas de plástico con capacidad de 24 L se perforaron por la parte inferior para permitir un poco de drenaje y evitar la acumulación de humedad que pudiera propiciar condiciones anaeróbicas en los tratamientos.

Las relaciones C: N después de aplicar las soluciones con N a las pajas de trigo fueron aproximadamente de 62.88/1 para los tratamientos 1, 2, 4 y 5, y de 67.82/1 para los tratamientos 3 y 6. Una segunda aplicación de NH_4NO_3 a los 15 días después de la primera en los tratamientos 1, 2, 4 y 5, disminuyó la relación C: N a aproximadamente 51/1. Se consideró que inicialmente la paja de trigo en promedio tiene 0.66 % de N (determinación en laboratorio).

Las relaciones C: N se calcularon para no ajustarse a los valores recomendados de relaciones C: N 20 o 30/1, para llevar a cabo el proceso completo de compostaje, sino que más bien, se calculó con la finalidad de transformar biológicamente los compuestos solubles (entre ellos los fenólicos), conservar altos porcentajes de materia orgánica en la paja de trigo y no incrementar

excesivamente la conductividad eléctrica en el producto final resultante de la descomposición biológica.

Después de la adición del N en forma de NH_4NO_3 , en los tratamientos 4, 5 y de la solución completa al 100 % en el tratamiento 6, se agregaron 400 lombrices californianas (*Eisenia foetida* Andrei) cliteladas en cada bandeja de 24 L con paja de trigo.

De acuerdo con Santamaría y Ferrera (1998), la densidad de lombrices californianas debe ser de 1,000 lombrices por m^2 . Las lombrices se obtuvieron de vermicompostas pertenecientes al área de Microbiología, Programa de Edafología, del Instituto de Recursos Naturales (IRENAT) del Colegio de Postgraduados, en Montecillo, Texcoco, Edo. de México.

Las bandejas se pusieron en el piso de la habitación señalada, y se colocaron completamente al azar, identificando cada uno de los tratamientos con sus repeticiones, con un marcador indeleble de color negro. El experimento se estableció con seis tratamientos (Cuadro 1) y tres repeticiones. Las bandejas se taparon con un plástico negro grueso para evitar la pérdida de humedad y calor de las pajas.

6.2.2 Aireación de la paja de trigo

Con la finalidad de que las pajas de trigo de los tratamientos 1, 2 y 3, tuvieran suficiente oxígeno para los microorganismos contenidos en ellas, estas se movieron manualmente cada tercer día. Para realizar esta acción se movió primeramente un tratamiento con sus tres repeticiones. Las manos se lavaron entre el movimiento de cada uno de los tratamientos. Lo anterior se realizó con la finalidad de no mezclar los tratamientos con microorganismos o con material orgánico. Los tratamientos 4, 5 y 6 con lombrices no se movieron.

6.2.3 Temperatura del ambiente

La habitación se mantuvo relativamente caliente colocando un pequeño calentador con ventilador Marca De Longhi conectado a un controlador de tiempo (timer) para distribuir el calor. Las dimensiones de la habitación fueron de aproximadamente 4 m X 3 m X 2.50 m. Las temperaturas máximas, mínimas y ambientales durante el periodo del experimento (11 días de diciembre, enero, febrero y 22 días de marzo), se registraron diariamente a las 12:00 a.m., con un termómetro de máximas y mínimas y un termómetro de mercurio respectivamente.

6.2.4 Temperatura en las pajas de trigo

Las temperaturas de las pajas de trigo de los tratamientos se registraron cada tercer día, utilizando un termómetro de mercurio. El termómetro se introdujo verticalmente en el centro de cada bandeja y se colocó aproximadamente a la mitad de la altura de la columna de paja. Después de cada lectura, el termómetro se limpió con agua y una tela húmeda para evitar contaminación de un tratamiento con otro. Las lecturas de la temperatura de los sustratos se registraron un poco después de las 12:00 A. M.

6.2.5 Variables evaluadas en los materiales de paja de trigo a los 0, 15, 30, 45, 60 y 90 días después del inicio del experimento

6.2.5.1 Concentración de fenólicos solubles totales, pH y conductividad eléctrica

Las muestras para determinar las variables concentración de fenólicos solubles totales (CFST), pH, CE y materia orgánica (MO), se tomaron cada 15 días (excepto a los 60 días) después de mover manualmente el material de cada una de las repeticiones de los tratamientos con transformación microbiológica únicamente. Los tratamientos con lombrices (T4, T5 y T6) no se movieron. Las

muestras consistieron de aproximadamente 100 mL de material húmedo de cada repetición. El material se secó al aire libre, en un espacio contiguo a la habitación en donde se encontraban las bandejas con la paja de trigo, colocando las muestras sobre papel estraza. Las muestras secas (con un contenido de humedad aproximado de 5 %) se llevaron al Laboratorio de Nutrición vegetal y se determinaron las variables mencionadas.

Las determinaciones de las concentraciones de fenólicos solubles totales (CFST), el pH y la conductividad eléctrica (CE) se hicieron agregando 20 mL de paja de trigo seca en un frasco de vidrio de aproximadamente 100 mL y adicionando 40 mL de agua destilada (relación 1: 2; sustrato: agua, con base en volumen). El sistema se dejó reposar por una hora, el extracto se filtró, con embudo y papel filtro, recibiendo en otro frasco limpio y seco. Las determinaciones de pH, CE y CFST se realizaron en este filtrado, de acuerdo con lo señalado en Capítulos anteriores.

6.2.5.2 Materia orgánica

Para determinar el contenido de materia orgánica de los materiales en proceso de descomposición, se tomaron 2 g de la muestra seca, se pusieron en frascos de vidrio y se colocaron en la estufa a una temperatura de 80 °C, por 12 h, para extraer la humedad de los materiales. Una vez a peso constante, se pesaron 0.2 g de cada material y se pusieron en crisoles de porcelana debidamente identificados y puestos previamente a peso constante, y se introdujeron a una mufla. La temperatura de la mufla se fue aumentando paulatinamente hasta alcanzar 550 °C, permaneciendo a esta temperatura por cuatro horas (Ansorena, 1994), después de las cuales la mufla se apagó y se dejó enfriar hasta otro día.

Los crisoles de porcelana se sacaron de la mufla con pinzas para crisol y se colocaron en un desecador, de donde se fueron tomando uno a uno para pesarlos. La pesada, se hizo en una balanza analítica, con precisión hasta diezmilésimas de gramo.

6.2.5.3 Contenido de C, N y relación C: N a los 90 días después del inicio del experimento

El contenido de carbono de los tratamientos se calculó por medio de la fórmula % de carbono = % materia orgánica/1.724.

El contenido de N total de los materiales de paja de trigo en descomposición se determinó por el método propuesto por Bremner y Mulvaney (1982).

La relación C: N simplemente se calculó dividiendo el contenido de C en porcentaje entre el contenido de N en porcentaje.

6.2.5.4 Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina a los 90 días del inicio del experimento

Con el objetivo de identificar el tipo de compuestos químicos constituyentes de la paja de trigo (diferentes a los compuestos fenólicos solubles totales) que se transformaron en los tratamientos evaluados después de 90 días, se seleccionaron los tratamientos 3 y 6 (con solución completa al 100 %) y el testigo sin degradar, para realizar un análisis de celulosa, hemicelulosa y lignina. El procedimiento realizado para el análisis de estos compuestos fue el propuesto por Van Soest (Tejada, 1985). El análisis se hizo en el Laboratorio de Nutrición Animal del Colegio de Postgraduados, en Montecillo, Texcoco, Edo. de México.

6.2.5.5 Degradación física de paja de trigo en los tratamientos biológicos evaluados a los 90 días del inicio del experimento

La evaluación de la degradación física de los materiales biotransformados después de 90 días se hizo con la siguiente escala visual:

- 1) degradación poco apreciable (1-5 %), 2) degradación muy moderada (5-15 %), 3) degradación moderada (15-25 %), 4) degradación intensa (25-35 %), 5) degradación muy intensa (>35 %), y se estimó sobre el área

total de los tejidos de las partículas del material de paja de trigo, tomando como patrón la paja de trigo sin degradación y con la misma granulometría (80-20). Esta variable se reporta únicamente como cualitativa.

6.2.5.6 Color de los materiales transformados a los 90 días después del inicio del experimento

Con la finalidad de relacionar el grado de degradación de los materiales de paja de trigo con su color se utilizaron las tablas de Munsell para determinar la coloración de los mismos en estado seco y húmedo.

6.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

6.3.1 Temperatura ambiental y de los materiales de paja de trigo

6.3.1.1 Temperatura ambiental

Las temperaturas máximas, mínimas y promedio ambientales en los días correspondientes al mes de diciembre fueron: 27 °C, 18 °C y 22.5 °C, para el mes de enero fueron de 28 °C, 19 °C y 23.5 °C, para el mes de febrero fueron de 30 °C, 20 °C y 25 °C, y para los días correspondientes de marzo fueron de 30 °C, 21 °C y 26 °C.

6.3.1.2 Temperatura de las pajas de trigo

En general, las temperaturas registradas en todos los tratamientos o materiales de paja de trigo durante el transcurso del experimento oscilaron entre 24 °C y 29 °C.

6.3.2 Concentración de fenólicos solubles totales

Es conocido de antemano que la paja de trigo variedad Saturno, contiene principalmente y en estado natural glucósidos de los ácidos *p*-cumárico y ferúlico entre otros fenólicos (Capítulo II), y que al menos en el inicio de este estudio, algunos de estos se encuentran en forma esterificada, presentando al menos un grupo OH en el anillo bencénico para reaccionar con el reactivo de Folin y Ciocalteu, y dar positiva la prueba de detección y cuantificación de fenólicos.

Por otro lado, es posible que existan en la paja de trigo compuestos fenólicos “potenciales” que pueden estar unidos a un azúcar en forma éter, por medio del oxígeno del grupo OH del anillo bencénico (en caso de tener un solo grupo OH), por lo que su reacción no sería positiva con el reactivo de Folin y Ciocalteu.

Aunque no se encontró información específica sobre la transformación de los glucósidos de los compuestos fenólicos a compuestos fenólicos libres (ácidos *p*-cumárico y ferúlico principalmente), es de suponer que dicha transformación la realizan ciertos microorganismos. En la Figura 1, se muestra la dinámica de la concentración de fenólicos solubles totales (CFST) en los tratamientos de transformación biológica de paja de trigo durante 90 días.

Los estudios encontrados en la literatura sobre fenólicos en paja de trigo y otras especies se centran casi exclusivamente en los ácidos fenólicos “libres”.

En el Cuadro 1 del apéndice C se muestra la significancia de los análisis de varianza y la comparación de medias de las CFST determinadas en cada una de las fechas de muestreo.

6.3.2.1 Concentración de fenólicos solubles totales al inicio del experimento

Al inicio del experimento y después de extraer los compuestos fenólicos (entre otros compuestos) con agua común de las pajas correspondientes a los tratamientos 2, 3, 5 y 6, se observa que, las pajas disminuyeron sus CFST.

En promedio la disminución de la CFST en los tratamientos 2 y 5 fue de 63.07 mg L⁻¹, lo cual representa el 34.14 % de la concentración inicial de fenólicos solubles totales (tratamientos 1 y 4). La disminución de la concentración de fenólicos

solubles totales (CFST) en los tratamientos 3 y 6 fue de 54.54 mg L^{-1} y representa el 29.52 % de la CFST inicial. Lo anterior establece diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a los que se les extrajeron los fenólicos con agua común y los tratamientos sin extracción de fenólicos.

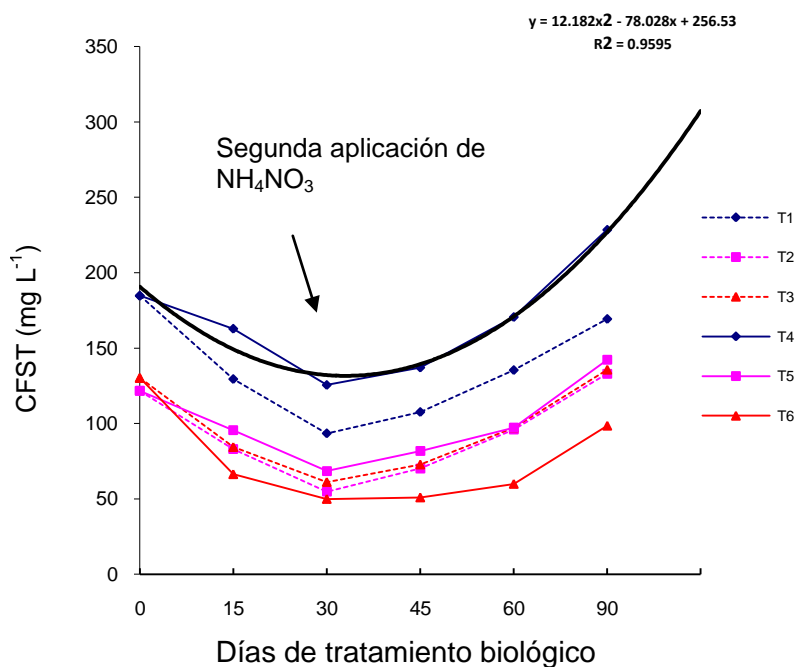


Figura 1. Dinámica de la transformación biológica de compuestos fenólicos de materiales de paja de trigo composteados y vermicomposteados parcialmente.

Las CFST promedio en los tratamientos 2 y 5, y 3 y 6, fueron estadísticamente iguales entre sí (Cuadro 1 del apéndice B). En este punto, es importante señalar que el tratamiento de extracción dado a las pajas con agua común, no incluyó el enjuague de las mismas, por lo que las CFST promedio son bastante mayores que las CFST promedio señaladas para las pajas de trigo a las cuales se les extrajeron los fenólicos a través del tratamiento con agua por una hora y su posterior enjuague tres veces (capítulos anteriores).

6.3.2.2 Concentración de fenólicos solubles totales a los 15 días después del inicio del experimento

Las CFST a los 15 días después del inicio del experimento (DDIE), disminuyeron en todos los tratamientos (Figura 1 y Cuadro 1 del apéndice C. Las mayores disminuciones se presentaron en los tratamientos 6 (lombrices + microorganismos) y 1 (microorganismos), disminuyendo 63.87 mg L^{-1} (49.06 %) y 55.35 mg L^{-1} (29.96 %) respectivamente, con relación a las CFST iniciales. Las disminuciones en las CFST en los tratamientos 2, 3, 4 y 5 fueron de 38.61 mg L^{-1} (31.73 %), 45.86 mg L^{-1} (35.22 %), 21.88 mg L^{-1} (11.84 %) y 26.38 mg L^{-1} (21.68 %) respectivamente, con respecto a las CFST iniciales de cada tratamiento.

Al comparar las medias de las CFST en los tratamientos 1, 2 y 3 (únicamente microorganismos), se aprecia que el tratamiento 1 sigue teniendo mayor CFST que los tratamientos 2 y 3, por efecto de la extracción de fenólicos en estos últimos al inicio del experimento, resultando sus medias estadísticamente diferentes. No hubo diferencia significativa en las CFST entre los tratamientos 2 y 3, con CFST promedio de 83.04 mg L^{-1} y 84.32 mg L^{-1} respectivamente. La adición de solución completa en el tratamiento 3 no contribuyó a la disminución de la CFST con respecto al tratamiento 2 (únicamente con nitrato de amonio).

Por otro lado, al comparar las CFST en los tratamientos 4, 5 y 6 (con lombrices), se observa también que el tratamiento 4, sin extracción de fenólicos, contiene mayor CFST que los tratamientos 5 y 6 a los que se les extrajeron los fenólicos con agua. Las medias de las CFST de los tratamientos 5 y 6 fueron estadísticamente diferentes a la media de la CFST del tratamiento 4 (Figura 1 y Cuadro 1 del apéndice C).

Cuando se comparan las medias de las CFST de los tratamientos microbiológicos (1, 2 y 3) con sus tratamientos equivalentes con lombriz (4, 5 y 6) se observa que estadísticamente no hubo una diferencia significativa entre ellos.

Lo anterior indica que las lombrices en las pajas de trigo no contribuyeron a disminuir significativamente las CFST con respecto a sus equivalentes microbiológicos a los 15 DDIE. En general, se observan menores CFST en los tratamientos únicamente microbiológicos (Cuadro 1 del apéndice C), con excepción del tratamiento 6, aunque estadísticamente son iguales.

6.3.2.3 Concentración de fenólicos solubles totales a los 30 DDIE

Las CFST en todos los tratamientos a los 30 DDIE (Figura 1) y Cuadro 1-C (Apéndice C) disminuyeron con respecto a las concentraciones registradas a los 15 DDIE. El tratamiento que presentó la mayor CFST fue el 4 y fue estadísticamente diferente a las demás medias de los tratamientos restantes. Las mayores disminuciones se presentaron nuevamente en los tratamientos 1 y 6, disminuyendo en promedio 91.39 mg L^{-1} (49.47 %) y 80.33 mg L^{-1} (61.70 %) con respecto a la CFST inicial de cada tratamiento. Los tratamientos 2, 3, 4 y 5 disminuyeron sus CFST en 66.93 mg L^{-1} (55.01 %), 69.03 mg L^{-1} (53.02 %), 59.21 mg L^{-1} (32.05 %) y 53.24 mg L^{-1} (43.76 %) respectivamente, con respecto a las concentraciones iniciales.

Comparando las medias de las CFST en los tratamientos con degradación por microorganismos, se aprecia que nuevamente el tratamiento 1 tiene una CFST promedio mayor y estadísticamente diferente a los otros dos tratamientos microbiológicos (2 y 3). Comparando las CFST entre los tratamientos 2 y 3, se observa que los valores de las medias son iguales estadísticamente (54.72 mg L^{-1} y 65.15 mg L^{-1} respectivamente). La adición de solución completa al 100 % en el tratamiento 3 no ayudó a disminuir significativamente las CFST a los 30 DDIE.

Asimismo, cuando se comparan los tratamientos a los que se les adicionaron lombrices, se aprecia que el tratamiento 4 sin extracción de compuestos fenólicos presentó la mayor CFST y en promedio es estadísticamente diferente a los promedios de las CFST en los dos tratamientos restantes con lombriz (T5 y T6).

Los valores promedio de las CFST en los tratamientos 5 y 6 fueron estadísticamente iguales. Nuevamente, en este caso, la aplicación de la solución nutritiva completa al 100 % en el tratamiento 6 no ayudó a disminuir significativamente las CFST en este tratamiento con respecto al tratamiento 5.

Al comparar los tratamientos microbiológicos (1, 2 y 3) con sus correspondientes tratamientos con lombriz (4, 5 y 6) se observa que las medias de las CFST de los tratamientos fueron iguales estadísticamente. Lo anterior indica también, que las lombrices en las pajas de trigo no disminuyeron significativamente las CFST con

respecto a las CFST en los tratamientos microbiológicos, a los 30 DDIE.

En general, se observan menores CFST en los tratamientos con únicamente microorganismos (Cuadro 1 del apéndice B), con excepción del tratamiento 6, aunque estadísticamente las medias son iguales.

La disminución en las CFST en los tratamientos con únicamente microorganismos a los 15 y 30 DDIE, se atribuye a la transformación biológica de estos compuestos por microorganismos similares fisiológicamente a bacterias del género *Pseudomonas* y hongos del género *Syncephalastrum* (Vaughan *et al.*, 1983) entre otros. Blum y Shafer (1988), encontraron que las poblaciones de bacterias y hongos se incrementaron en presencia de los ácidos *p*-cumárico, ferúlico, *p*-hidroxibenzoico o vainílico en concentraciones menores a $0.5 \mu\text{M g}^{-1}$ de suelo y las redujo en concentraciones mayores. Se encontró también que estos ácidos fenólicos fueron rápidamente utilizados como fuente de carbón por los microorganismos del suelo, disminuyendo sus concentraciones.

De acuerdo con Shindo y Kuwatsuka (1975b), los ácidos fenólicos como el *p*-cumárico y ferúlico ya sea como compuestos puros o como derivados de la paja de arroz, en los extractos de la paja o en el suelo, son transformados rápidamente por los microorganismos. Estos autores encontraron que en un periodo de 10 días las concentraciones iniciales de ácido *p*-cumárico y ferúlico disminuyeron en más del 50 %. Asimismo, mencionan que como productos de la degradación del ácido *p*-cumárico se detectaron casi las mismas concentraciones de ácido *p*-metoxicinámico (sin grupo OH) y pequeñas cantidades de ácido *p*-hidroxibenzoico posteriores a la aparición del ácido *p*-metoxicinámico, lo que sugiere que el ácido *p*-cumárico se transforma a ácido *p*-metoxicinámico y este a su vez en ácido *p*-hidroxibenzoico, este se transforma rápidamente en ácido protocatecuico, el cual puede ingresar al ciclo de los ácidos tricarboxílicos, a través del ácido mucólico por acción microbiana y ser convertido en CO_2 o bien se polimeriza rápidamente.

En el caso del ácido ferúlico se menciona que sucede algo parecido al caso del ácido *p*-cumárico. El ácido ferúlico es transformado rápidamente (10 días) por los microorganismos y casi en un 50 % a ácido 3, 4-dimetoxicinámico (sin grupos OH) y posteriormente este último se transforma en ácido vainílico, el cual puede seguir

la ruta metabólica mencionada anteriormente; en ambos casos, se sugiere que la fitotoxicidad puede desaparecer rápidamente.

En este experimento, la disminución de las CFST se puede explicar en buena medida con base en lo expresado con anterioridad, sin embargo, es importante mencionar que las CFST iniciales fueron muy superiores a las reportadas por Shindo y Kuwatsuka (1975b) (7.5 mg L^{-1} y 30 mg L^{-1}), por lo que es probable que este periodo de transformación biológica se haya extendido hasta los 30 días o un poco más, como lo muestra la Figura 1.

La disminución de las CFST se puede explicar también en relación a que en la paja de trigo existen compuestos derivados de la transformación de los ácidos *p*-cumárico y ferúlico, como los ácidos *p*-metoxicinámico y 3, 4-dimetoxicinámico, que no contienen grupos OH en su estructura, por lo que no dan positiva la reacción con el reactivo de Folin y Ciocalteu, por lo tanto las CFST disminuyen. La transformación de los compuestos fenólicos se da principalmente en la fase líquida en donde estos compuestos se encuentran en forma soluble.

6.3.2.4 Concentración de fenólicos solubles totales a los 45 DDIE

Las CFST se incrementaron en todos los tratamientos entre los 30 y los 45 DDIE. El tratamiento 4 fue el que presentó la mayor CFST (137.09 mg L^{-1}) y fue estadísticamente igual a las CFST de los tratamientos 1 y 5. Los incrementos en las CFST en los tratamientos 1, 2 y 3 fueron de 14.16 mg L^{-1} (15.17 %), 15.44 mg L^{-1} (28.21 %) y 11.59 mg L^{-1} (18.95 %) respectivamente en relación con las CFST registradas a los 30 DDIE. Las CFST en los tratamientos 1, 2 y 3 fueron iguales estadísticamente, aunque la diferencia entre las CFST fue superior a 30 mg L^{-1} (Figura 1) y Cuadro 1 (apéndice C). El coeficiente de variación (CV) fue relativamente alto con un 26.78 %.

Los tratamientos 4, 5 y 6 incrementaron sus CFST en 11.58 mg L^{-1} (9.22 %), 13.14 mg L^{-1} (19.20 %) y 1.01 mg L^{-1} (2.02 %) respectivamente. La CFST en tratamiento 4 fue estadísticamente diferente a las CFST en los tratamientos 5 y 6. Asimismo, el tratamiento 5 fue igual estadísticamente al tratamiento 6.

Al comparar los tratamientos con únicamente microorganismos (1, 2 y 3) con sus tratamientos equivalentes con lombriz (4, 5 y 6) se observa que las medias de las CFST de los tratamientos fueron iguales estadísticamente. Los incrementos en las CFST en los tratamientos con microorganismos fueron mayores que los incrementos que se presentaron en los tratamientos con lombriz aunque estadísticamente fueron iguales.

Lo anterior indica también, que a los 45 DDIE, la adición de lombrices en los tratamientos 4, 5 y 6, no aumentó significativamente las CFST con respecto a las CFST de los tratamientos con microorganismos. Se observan menores CFST en los tratamientos con únicamente microorganismos (Cuadro 1 del apéndice C), con excepción del tratamiento 6, aunque estadísticamente las medias son iguales.

6.3.2.5 Concentración de fenólicos solubles totales a los 60 DDIE

Las CFST a los 60 DDIE se incrementaron en todos los tratamientos con respecto a las CFST a los 45 DDIE. Las CFST en los tratamientos 1, 2 y 3, se incrementaron en 41.99 mg L^{-1} (44.99 %), 41.19 mg L^{-1} (28.21 %) y 36.05 mg L^{-1} (58.95 %) respectivamente, con referencia a las CFST registradas a los 30 DDIE, siendo significativamente superior y estadísticamente diferente el tratamiento 1 con respecto a los tratamientos 2 y 3 (Figura 1, y Cuadro 1 del apéndice C). Los promedios de las CFST en los tratamientos 2 y 3 fueron estadísticamente iguales entre sí. La adición de solución nutritiva completa al 100 % en el tratamiento 3 no ayudó significativamente a disminuir o aumentar las CFST con respecto al tratamiento 2.

Las CFST en los tratamientos con lombriz presentaron un comportamiento similar a sus correspondientes tratamientos con únicamente microorganismos. Los tratamientos 4, 5 y 6 presentaron incrementos de 45.05 mg L^{-1} (35.89 %), 28.79 mg L^{-1} (42.08 %) y 10.02 mg L^{-1} (20.10 %) con respecto a las concentraciones registradas a los 30 DDIE. La CFST del tratamiento 4 fue significativamente diferente a las CFST de los tratamientos 5 y 6. Las CFST en los tratamientos 5 y 6 fueron estadísticamente iguales, aunque la diferencia fue de 37.33 mg L^{-1} , lo que indica

que aparentemente la adición de solución completa al 100 % no contribuyó significativamente a aumentar la CFST.

Al comparar las CFST en los tratamientos 1 y 4, 2 y 5 y 3 y 6, se observa que no hubo diferencias significativas entre ellas. Los tratamientos con lombrices aparentemente no ayudaron a aumentar significativamente las CFST en las pajas de trigo con respecto a los tratamientos únicamente con microorganismos, al comparar los dos procesos de transformación biológica.

6.3.2.6 Concentración de fenólicos solubles totales a los 90 DDIE

Las CFST a los 90 DDIE (Figura 1 y Cuadro 1 del apéndice C), también se incrementaron con respecto a las CFST registradas a los 60 DDIE. El tratamiento 4 fue el que presentó la mayor CFST, y fue estadísticamente igual a todos los demás tratamientos restantes de acuerdo con la prueba de comparación de medias. El análisis de varianza no detectó diferencias significativas entre los seis tratamientos.

Aunque de acuerdo con el análisis de varianza los promedios de las CFST en todos los tratamientos son iguales, existen diferencias muy importantes entre ellos, por ejemplo, la diferencia entre el T4 con la mayor CFST y el T6 es de 129.99 mg L⁻¹. Esta situación, se debe probablemente a que el análisis de varianza para esta variable a los 90 DDIE presenta un coeficiente de variación relativamente alto (36.49 %). La diferencia entre el tratamiento 4 (con lombriz) y el tratamiento 1 (con únicamente microorganismos) fue de 59.20 mg L⁻¹.

Las CFST de los tratamientos 1, 2 y 3 incrementaron sus concentraciones en 75.94 mg L⁻¹ (81.36 %), 78.29 mg L⁻¹ (143.07 %) y 74.44 mg L⁻¹ (121.73 %) con referencia a las concentraciones registradas a los 30 DDIE y fueron estadísticamente iguales entre sí. Los tratamientos 2 y 3 fueron iguales estadísticamente; la adición de la solución completa al 100 % en el tratamiento 3 no contribuyó a aumentar significativamente la CFST con respecto al tratamiento 2 con únicamente NH₄NO₃.

Las CFST en los tratamientos 4, 5 y 6 con lombriz se incrementaron en 102.96 mg

L^{-1} (182.03 %), 73.84 mg L^{-1} (107.93 %) y 48.63 mg L^{-1} (97.55 %) respectivamente, con referencia a las CFST registradas a los 30 DDIE.

En promedio el porcentaje de incremento de las CFST fue mayor en los tratamientos con lombriz (129.17 %) que el incremento promedio en los tratamientos microbiológicos (99.62 %).

Comparando los tratamientos 1 y 4, 2 y 5 y 3 y 6, muestran que no hubo diferencias significativas entre ellos. Las lombrices no contribuyeron significativamente a incrementar las CFST en las pajas de trigo con respecto a los tratamientos únicamente microbiológicos.

De acuerdo con la Figura 1 y con los datos presentados en el Cuadro 1 del apéndice C, las CFST de los tratamientos evaluados a los 90 días de transformación biológica no disminuyeron las CFST, sino que se incrementaron en todos los tratamientos, presentando un comportamiento de una curva de una ecuación polinomial (Figura 1).

Al respecto, se señala que los compuestos fenólicos (principalmente ácidos fenólicos) se transforman en relación con el tiempo de degradación de los materiales que los contienen, sufriendo procesos de condensación, dando como resultado nuevos compuestos fenólicos más complejos (Blanco y Almendros, 1997). Asimismo, encontraron que la fitotoxicidad (porcentaje de germinación en berro) de los compuestos solubles presentes en paja de trigo en el proceso de compostaje, disminuye conforme el tiempo transcurre hasta aproximadamente 45 días después del inicio del compostaje, sin embargo, este porcentaje de germinación fue disminuyendo hasta llegar al final del experimento (60 días).

Lo anterior se puede entender como una disminución en las concentraciones de fenólicos simples (ácido *p*-cumárico y ferúlico) hasta los 45 DDIE, de tal manera que la fitotoxicidad disminuye. Los autores postulan que los estados de fitotoxicidad después de los 45 DDIE pueden ser atribuidos a la liberación de moléculas orgánicas microbianas (ácidos orgánicos volátiles), especialmente si existen microhábitats anaeróbicos.

Con respecto a esto, es probable que para el caso de los autores mencionados, el incremento en fitotoxicidad después de los 45 días de iniciado el experimento haya

sido debido más bien a la nueva aportación de compuestos fenólicos (ácido *p*-cumárico y ferúlico) derivados del rompimiento de los puentes fenólicos entre la lignina y/o polisacáridos (Fry, 1986; Lam *et al.*, 1990; Iiyama, *et al.*, 1990; Pan *et al.*, 1998), o bien provienen directamente de la degradación de la lignina (Shindo y Kuwatsuka, 1975a), la cual contiene unidades fenólicas constituidas de fenilpropano las cuales se cruzan unas con otras, con una variedad de enlaces químicos (Crawford, 1986; Basaglia *et al.*, 1992). Los hongos de la pudrición blanca descomponen la lignina primeramente, pero también los actinomicetos descomponen la lignina aunque comúnmente degradan menos del 20 % (Crawford, 1986; Basaglia *et al.*, 1992). Este incremento en la fitotoxicidad también pudo haberse debido a la síntesis de fenólicos a partir de carbohidratos tales como el almidón y la celulosa, fenómeno similar a lo que se reporta para la paja de arroz (Shindo y Kuwatsuka, 1975a).

En el caso del presente experimento, el incremento en las CFST después de los 45 DDIE se puede explicar más bien por la condensación de los compuestos fenólicos simples para formar macromoléculas más complejas (Blanco y Almendros, 1997), pero al mismo tiempo existe salida de nuevos compuestos fenólicos simples (glucósidos precursores de los ácidos *p*-cumárico y ferúlico principalmente), de la paja de trigo por solubilidad, de tal manera que las concentraciones de fenólicos solubles totales se incrementan.

Aunque no se realizaron pruebas de fitotoxicidad durante los procesos de biotransformación de los materiales orgánicos de la paja de trigo de los seis tratamientos, se puede establecer a manera de suposición que la fitotoxicidad debida a compuestos fenólicos disminuye al incrementarse la CFST (moléculas condensadas).

Se decidió no cuantificar las concentraciones de los ácidos *p*-cumárico y ferúlico en los materiales de paja de trigo de los tratamientos de transformación biológica debido a que las concentraciones de estos ácidos determinadas en la paja de trigo inicial sin degradar, en el extracto con agua común, fueron muy bajas en relación con la CFST (111.73 mg kg⁻¹ o 0.01173 % de una CFST de 8,353.5 mg kg⁻¹ o 0.83535 % con base en peso seco (Capítulo II).

Por otro lado, con respecto a los procesos de compostaje y vermicompostaje, Saavedra *et al.*, (2006) reportan disminuciones de 90 % en el contenido de compuestos fenólicos después de un periodo de cuatro meses, utilizando *Pleurotus ostreatus* (hongo de la pudrición blanca) y *Eisenia fetida* (lombriz californiana) en el residuo de la producción del aceite de olivo denominado alperujo, el cual contiene altas concentraciones de fenólicos, principalmente polifenoles. La concentración inicial de polifenoles en el alperujo fue de 42 g kg⁻¹. La disminución de las concentraciones de los polifenoles se atribuye en el primer caso a la síntesis y liberación de lacasas y manganeso peroxidasa determinadas en el medio, mientras que la reducción de los polifenoles cuando se utilizó *Eisenia fetida* se atribuye a la alta actividad microbiana registrada en este sustrato, favoreciendo la oxidación enzimática de estos compuestos tóxicos. La activación de organismos específicos con la capacidad de degradar los compuestos fenólicos, puede también explicar la reducción observada. También se detectó la presencia de catecol dioxigenasa solamente en el proceso de vermicompostaje; esta enzima cataliza la ruptura oxidativa del anillo aromático del catecol, y puede ser utilizada para medir la capacidad de la microflora en la vermicomposta para romper los compuestos aromáticos.

Lo anterior no concuerda con los resultados obtenidos en el presente experimento. Saavedra *et al.*, 2006, menciona que las concentraciones de fenólicos disminuyen, mientras que en este experimento las CFST aumentaron después de 45 DDIE. Lo anterior se puede explicar por la diferencia en la naturaleza de los compuestos fenólicos; en el caso de los fenólicos presentes en el alperujo son de naturaleza compleja, mientras que en la paja de trigo se reporta que la naturaleza de los fenólicos es simple (ácidos fenólicos derivados del ácido benzoico y del ácido cinámico).

Además, de acuerdo con los datos de las CFST presentados, muestran en general que estadísticamente no existen diferencias significativas entre los tratamientos con microorganismos y con lombriz + microorganismos, es probable que esto sea debido a que la transformación de los compuestos fenólicos se lleva a cabo principalmente en la fase líquida (compuestos solubles), mientras que las

lombrices se alimentan principalmente de materiales sólidos, de tal manera que los compuestos solubles en agua pasan a través de su tracto digestivo en cantidades no significativas y en realidad la transformación de los compuestos fenólicos se lleva a cabo por los microorganismos después de que los compuestos orgánicos del material sólido en degradación pasan a través del tracto digestivo de la lombriz (turrículos).

Por otro lado, la pérdida de materia orgánica en todos los tratamientos evaluados fue relativamente baja (ver pérdida de materia orgánica y análisis de celulosa, hemicelulosa y lignina), además de que los materiales vistos en estereoscopio después de 90 días de transformación, presentaron muy poca degradación en sus tejidos, por lo que se puede sugerir que una gran proporción de la pérdida de material orgánico se llevó a cabo por medio de la pérdida de carbono como CO₂ de los compuestos solubles en agua.

También se puede señalar que debido a que en los tratamientos de transformación biológica en donde se utilizaron lombrices no se observó una pérdida importante de materia orgánica, es probable que el medio de solamente paja de trigo con algo de N aplicado por medio de las soluciones no constituyó un medio adecuado para la alimentación y reproducción de las mismas.

Es importante señalar que los materiales de paja de trigo de todos los tratamientos no llegaron al estado final de los procesos de compostaje y vermicompostaje después de 90 días, mas bien, se piensa que las pajas de trigo sufrieron un “envejecimiento” o un compostaje o vermicompostaje parciales.

Se encontró una relación directa entre las CFST a los 90 DDIE con las CFST iniciales. ($R^2 = 0.9963$ para los tratamientos con degradación microbiológica y $R^2 = 0.8011$ para los tratamientos con lombrices + microorganismos), sugiriendo con esto que la transformación de los fenólicos se realizó fundamentalmente en medio líquido en donde los compuestos fenólicos se encuentran disueltos en agua.

Por otro lado, se pudo observar que el color café oscuro de los extractos para determinar las CFST se fue haciendo más intenso en relación con el tiempo de degradación transcurrido en los dos procesos de transformación biológica, lo que indica probablemente que conforme transcurrió el tiempo los compuestos solubles

(los fenólicos entre otros) se fueron oxidando paulatinamente, incrementando su relación O/C (Blanco y Almendros, 1997).

6.3.3 pH

La dinámica del pH en los materiales de paja de trigo composteados y vermicomposteados parcialmente durante el experimento se presenta en la Figura 2, la significancia de los análisis de varianza y las comparaciones entre medias se presentan en el Cuadro 2 del apéndice C).

Inicialmente el pH de los tratamientos, incluyendo a los que se les extrajeron los compuestos fenólicos, fue ligeramente ácido. Posteriormente, durante los procesos de transformación biológica, los tratamientos microbiológicos, y los tratamientos con lombrices tuvieron relativamente un comportamiento diferente en esta variable.

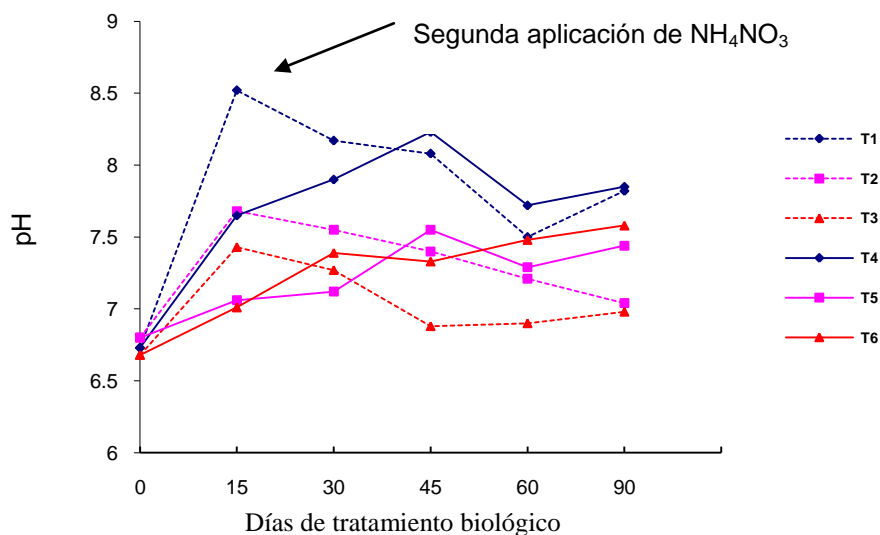


Figura 2. Dinámica del pH de materiales de paja de trigo composteados y vermicomposteados parcialmente.

En los primeros, se observa que el pH se incrementa durante los primeros 15 DDIE y a los 30 DDIE disminuye y mantiene este comportamiento hasta los 90 DDIE, mientras que en los segundos se observa un incremento de pH hasta los 45

DDIE, después de este tiempo el pH en el tratamiento 4 disminuyó hasta los 90 DDIE; el pH en el tratamiento 5 disminuye o permanece relativamente constante y en el tratamiento 6 aumenta ligeramente su pH entre los 60 y 90 DDIE.

El aumento en el pH de todos los materiales de paja de trigo hasta los 15 DDIE se puede atribuir probablemente a la actividad de los organismos nitrificantes (NH_4 -oxidante y NO_2 oxidante). Quintero *et al.*, 2000, señalan la presencia de poblaciones de organismos nitrificantes a los 23 DDIE en paja de avena “agotada” en tratamientos de compostaje y vermicompostaje, aunque sus máximas poblaciones se encontraron entre los 69 y 115 DDIE. Una diferencia importante en relación con las formas de N en los materiales tradicionalmente composteados, es que generalmente se encuentra en forma orgánica (estiércol), mientras que en el presente experimento se agregó en forma inorgánica y fácilmente disponible para los microorganismos, en este caso organismos nitrificantes.

La disminución del pH en los tratamientos con degradación microbiológica se atribuye tradicionalmente a la disminución de las emisiones de amonio de la pila de la composta (Blanco y Almendros, 1997).

El mayor decremento en el pH en el tratamiento 1 con respecto a los tratamientos 2 y 3 a los 15 DDIE pudo haberse debido a una mayor actividad de los organismos nitrificantes; se puede establecer que quizás las poblaciones de microorganismos nitrificantes (por ejemplo *Nitrosomonas* y *Nitrobacter*) fueron menores en los tratamientos a los cuales se les extrajeron ciertas proporciones de compuestos solubles en agua.

Se reporta que la paja de trigo a la que se le extrajeron los compuestos solubles durante 24 h a 25 °C, presentó únicamente una pérdida de peso de tan sólo 29 %, mientras que algunos otros tratamientos sin extracción de compuestos solubles presentaron pérdidas de peso de 42 % a 48 % (Blanco y Almendros, 1995). La diferencia en los porcentajes de pérdida de peso pudo haberse debido a la disminución de las poblaciones microbianas con la extracción de los compuestos solubles.

El aumento en el pH de los tratamientos con lombriz después de los primeros 15 DDIE, se atribuye fundamentalmente al incremento de CaCO_3 en el medio,

contenido en los turrículos (heces) que son el desecho de la lombriz.

El incremento de CaCO_3 en los turrículos se debe a la aportación de Ca proveniente de las glándulas calcígenas del tracto anterior de *Allobophora molleri*, una especie particular de lombriz, que influye en el pH del tracto digestivo y en la actividad microbiana en el mismo (Trigo y Lavelle, 1993).

Al final del experimento, el pH máximo registrado en los tratamientos evaluados correspondió al tratamiento 4 (lombriz + microorganismos) con un pH de 7.85 y el pH mínimo correspondió al tratamiento 3 con 6.98 (microbiológico).

En el Cuadro 2, se presentan los valores de R^2 , la significancia del análisis de varianza de la regresión y la ecuación de regresión de la relación entre el pH y la CFST tomando en consideración todas las fechas de muestreo para cada uno de los tratamientos.

Cuadro 2. Resultados del análisis de varianza de las regresiones entre el pH como variable dependiente y la CFST como variable independiente.

Tratamiento	R^2	P>F	Ecuación
T1	0.5256	0.0002	$Y = 9.57 - 0.0132X$
T2	0.6763	0.0001	$Y = 8.11 - 0.009X$
T3	0.3158	0.0010	$Y = 7.51 - 0.0051X$
T4	0.1162	0.0050	$Y = 8.47 - 0.0047X$
T5	0.0031	0.4500	$Y = 7.26 - 0.0006X$
T6	0.3197	0.0010	$Y = 7.69 - 0.006X$

El pH en los tratamientos 1, 2 y 3 tiene cierta relación con la CFST (Cuadro 2). Es probable que en la transformación de los compuestos fenólicos después de los 30 DDIE algunos de los nuevos compuestos (ácidos) puedan encontrarse en forma ionizada, proporcionando iones H al medio de tal manera que acidifica la solución obtenida de estos sustratos.

Para el caso de los tratamientos 4, 5 y 6 con lombriz + microorganismos se observa que no existe una asociación importante entre el pH y la CFST, por lo que a pesar de que las CFST se incrementaron, sin embargo, no influyeron en el pH

de los tratamientos, indicando que el pH del ambiente lo controla más fuertemente la generación de CaCO_3 por parte de las lombrices.

El pH de 7.85 registrado en el tratamiento 4 al final del experimento se considera que no es muy alto en su grado de alcalinidad para ser utilizado como un posible sustrato, además de que una propiedad química como el pH de un sustrato se puede ajustar fácilmente mediante la adición de soluciones ácidas o alcalinas según se requiera acidificarlo o alcalinizarlo.

6.3.4 Conductividad eléctrica

La dinámica de la conductividad eléctrica (CE) en los tratamientos evaluados en este experimento se muestra en la Figura 3, y los resultados de los análisis de varianza y las comparaciones entre medias se presentan en el Cuadro 3 del apéndice C.

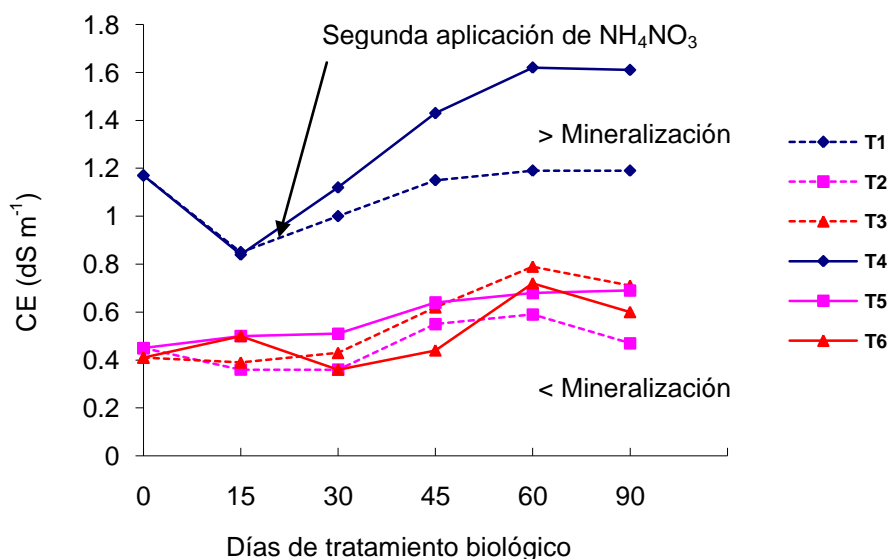


Figura 3. Dinámica de la conductividad eléctrica (CE) en materiales de paja de trigo composteados y vermicomposteados parcialmente.

Las CE en los tratamientos 2, 3, 5 y 6 a los que se les extrajeron los compuestos solubles (entre ellos los fenólicos) fueron menores y significativamente diferentes a

los tratamientos a los que no se les extrajeron los compuestos solubles (tratamientos 1 y 4), en las determinaciones realizadas al inicio del experimento. Lo anterior, sugiere que algunos iones presentes inicialmente en la paja de trigo se perdieron en el extracto.

A los 15 DDIE, la CE disminuyó en los tratamientos de degradación con únicamente microorganismos, aún después de haber adicionado inicialmente 8 g de NH_4NO_3 para los tratamientos 1 y 2 y la solución completa con 2.5 dS m^{-1} para el tratamiento 3. Lo anterior sugiere que una parte de los nutrientes suministrados (especialmente en el tratamiento 1) fue utilizada por las poblaciones de microorganismos para la degradación de compuestos orgánicos, o bien una parte de ellos (como el caso de los iones NH_4 y NO_3) reaccionan con algunos compuestos fenólicos en la paja de trigo (Kholdebarin y Oertli, 1994; Chabaca *et al.*, 2000) o reaccionan con la lignina (Nömmik y Vahtras, 1982). La CE en el tratamiento 1 fue significativamente diferente a las CE que presentaron los tratamientos 2 y 3, debido también a la extracción de los compuestos solubles en estos últimos.

Para el caso de los tratamientos 4, 5 y 6 (con lombrices) se observa que la CE en el tratamiento 4 tiene aproximadamente la misma CE que el tratamiento 1 (microorganismos) y es significativamente diferente a las CE de los tratamientos 5 y 6, presentando estos últimos un ligero incremento en su CE con respecto a la CE que presentaron al inicio del experimento. Esto se explica por la adición de NH_4NO_3 en los tratamientos 4 y 5 y la solución completa con CE de 2.5 dS m^{-1} respectivamente. Las CE de los tratamientos 2 y 3 con relación a las CE de los tratamientos 5 y 6 fueron estadísticamente iguales.

Después de los 15 DDIE, la CE de todos los tratamientos se incrementó en general hasta los 60 DDIE, siendo mayor el incremento en los tratamientos 1 y 4 que en los tratamientos 2, 3, 5 y 6. Las diferencias entre las CE de los tratamientos 2, 3, 5 y 6 no fueron estadísticamente diferentes, pero fueron estadísticamente diferentes a los tratamientos 1 y 4, los cuales tuvieron CE mayores y estos últimos fueron estadísticamente iguales entre sí.

Las CE de los tratamientos a los 90 DDIE disminuyeron ligeramente con respecto a las CE que presentaron los mismos a los 60 DDIE. Las diferencias entre las CE a los 60 y a los 90 DDIE fueron muy ligeras, sugiriendo que probablemente después de los 60 DDIE se inició un proceso de transformación biológica muy ligera, pudiendo haberse presentado de esta manera debido al incremento de las poblaciones de microorganismos en este periodo.

De lo anterior se puede sugerir que en los tratamientos 2, 3, 5 y 6, el proceso de mineralización fue muy similar, lo que indica que hubo una baja degradación de la materia orgánica de los tratamientos mencionados (mineralización). Por otro lado los tratamientos 1 y 4 presentaron mayor mineralización de la materia orgánica. Las diferencias se pudieron haber dado por la menor cantidad de compuestos fácilmente degradables en la fase líquida en los tratamientos a los cuales se les extrajeron los compuestos solubles y/o por la disminución de las poblaciones de organismos que pudieran haber degradado la materia orgánica en los tratamientos 2, 3, 5 y 6 por efecto de la extracción (Blanco y Almendros, 1995; Saviozzi *et al.*, 1997).

La diferencia en la CE entre los tratamientos 1 y 4 con respecto a los demás tratamientos se establece claramente desde la extracción de compuestos solubles en estos últimos.

Las CE de todos los sustratos se consideran bajas, tomando en cuenta que las compostas y/o vermicompostas generalmente presentan CE mayores.

Se reportan compostas con CE que fluctúan entre 8 dS m⁻¹ y 9.4 dS m⁻¹ (Santamaría, 2000). La CE es también una propiedad química de los sustratos que puede ajustarse relativamente con facilidad, ya sea lixiviando las sales en caso de exceso o bien adicionando sales o nutrimentos en el caso de carencia.

6.3.5 Materia orgánica

La dinámica del porcentaje de la materia orgánica (MO) en los tratamientos de transformación biológica durante 90 días de duración del experimento se presenta en la Figura 4. Los resultados del análisis de varianza y la comparación entre

medias entre los tratamientos en las diversas fechas de muestreo, se presentan en el Cuadro 4 del apéndice C. Se observa que los porcentajes de MO en las diferentes fechas de muestreo disminuyen con respecto a los contenidos de MO de los tratamientos al inicio del experimento.

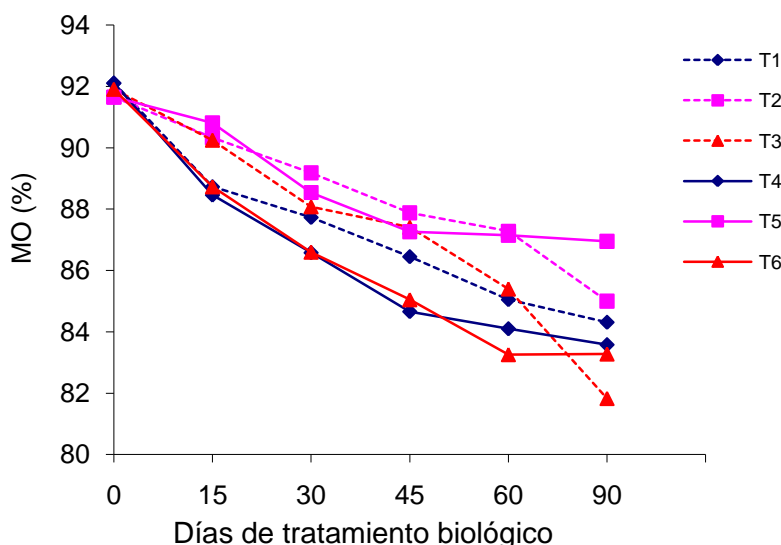


Figura 4. Dinámica del porcentaje de materia orgánica de materiales de paja de trigo composteados y vermicomposteados parcialmente.

Inicialmente, los porcentajes de materia orgánica (MO) en todos los tratamientos fueron estadísticamente iguales, aún después de que a los tratamientos 2, 3, 5 y 6 se les extrajeron ciertas cantidades de compuestos solubles. Los tratamientos 2 y 5, y 3 y 6 perdieron 0.53 % y 0.21 % de MO respectivamente, con el tratamiento de extracción de los compuestos solubles con agua común. Las pérdidas de MO con la extracción de compuestos solubles en esta investigación, son inferiores a las cuantificadas en el experimento de evaluación de la capacidad de extracción de compuestos fenólicos de 20 extractantes (Capítulo III), en donde la extracción de compuestos solubles en agua común fue de 6.05 %. La diferencia en las pérdidas de compuestos solubles de la paja de trigo en el tratamiento de extracción con agua común que se realizó en el experimento de evaluación de

extractantes y los tratamientos 2, 3, 4 y 5 en este experimento, se deben a las diferentes relaciones de extracción utilizadas; en el primer caso se utilizó una relación 1: 2, mientras que en el segundo caso la relación fue ligeramente mayor de 1: 1 (sustrato: agua).

Por otro lado, es posible que la temperatura de extracción en este experimento haya influido también en la solubilidad de algunos compuestos presentes en la paja de trigo, debido a que en el presente experimento las extracciones se realizaron durante la tarde-noche-madrugada, en donde las temperaturas exteriores fueron muy bajas (probablemente 4 °C o 5 °C) y la decantación de los compuestos solubles se hizo muy temprano en la mañana.

La disminución en el porcentaje de materia orgánica a los 15, 30, 45, 60 y 90 DDIE, se presenta en el Cuadro 3.

Cuadro. 3. Disminución de materia orgánica durante 90 días en seis tratamientos de degradación biológica.

	15	30	45	60	90	Disminución
	DDIE	DDIE	DDIE	DDIE	DDIE	total
Tratamiento	-----%-----					
T1	3.38	1.00	1.28	1.40	0.74	7.80
T2	1.32	1.15	1.30	0.60	2.28	6.65
T3	1.66	2.17	0.67	2.01	3.57	10.08
T4	3.65	1.88	1.92	0.56	0.52	8.53
T5	0.84	2.27	1.28	0.29	0.60	4.70
T6	3.18	2.37	1.31	0.79	0.98	8.63

DDIE = días después del inicio del experimento.

Se observa, que los porcentajes de disminución de MO fueron diferentes en las distintas fechas en que se tomaron las muestras para la determinación de las variables CFST, PH, CE y MO. El mayor porcentaje de disminución de MO se presentó a los 15 DDIE en el tratamiento 4 con lombrices, para posteriormente

disminuir su porcentaje de pérdida. La disminución de MO entre los 60 y 90 DDIE en este tratamiento fue de 0.52 %, presentando una disminución total de 8.53 %.

El tratamiento 1 disminuyó 3.38 % su MO durante los primeros 15 DDIE, 1.0 % a los 30 DDIE, 1.28 % a los 45 DDIE y 1.40 % a los 60 DDIE, y por último entre los 60 y 90 días disminuyó únicamente un 0.74 %, presentando una disminución total de MO de 7.80 %.

El tratamiento 3, mostró una dinámica diferente a las presentadas por los tratamientos 1 y 4 (Cuadro 3), presentando una disminución total de MO de 10.08 %. Los tratamientos 2 y 5 presentaron las menores disminuciones totales del contenido de MO, con 6.65 % y 4.70 % respectivamente.

Se hicieron regresiones entre las distintas variables (CFST, pH, CE y MO), en las diversas fechas en que se tomaron las muestras, sin embargo por la naturaleza de los datos (paja con extracción y sin extracción, tres tratamientos de aplicación de nitrógeno y dos tratamientos de degradación, microorganismos y lombrices + microorganismos), no fue posible encontrar relaciones lógicas y útiles que ayuden a establecer asociaciones entre estas variables, exceptuando la relación entre MO y CFST.

Se encontró una relación polinomial entre el porcentaje de MO y la CFST al relacionar estas dos variables en cada uno de los tratamientos evaluados en las seis fechas de toma de muestras (Figura 5).

Lo anterior significa que primeramente al disminuir el porcentaje de MO de los materiales de paja de trigo, las CFST también disminuyen hasta aproximadamente un contenido de MO de 88 %; posteriormente al disminuir el porcentaje de MO las CFST se incrementan. Se sugiere que primeramente se pierde MO por pérdida de CO₂ de los materiales de paja de trigo a una mayor tasa, después de alcanzar aproximadamente 88 % de MO la pérdida de esta es menor y se incrementa la CFST.

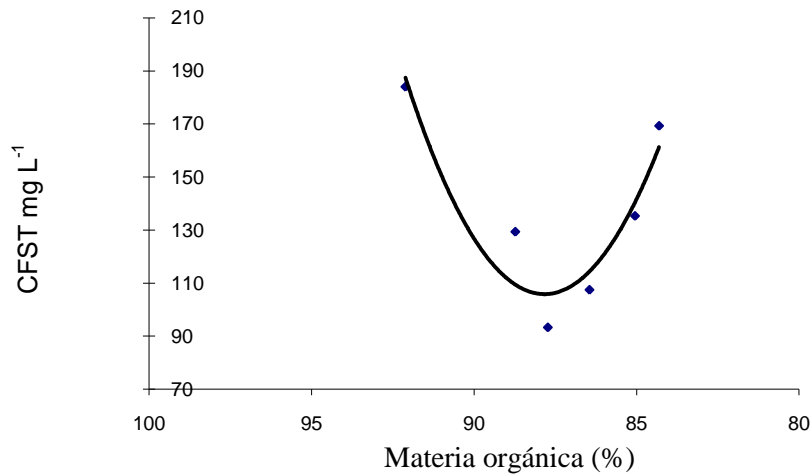


Figura 5. Relación entre materia orgánica (%) y CFST en el tratamiento 1, durante el proceso de transformación biológica de los compuestos fenólicos.

Los resultados de las R^2 y las ecuaciones que representan dichas relaciones derivadas del análisis gráfico, se presentan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Coeficientes de determinación (R^2) y ecuaciones de regresión obtenidas entre las variables materia orgánica (variable dependiente) y CFST en las diversas fechas de muestreo.

Tratamiento	R^2	Ecuación
T1	0.8841	$4.46X^2 - 783.95X + 34535$
T2	0.8659	$5.30X^2 - 939.67X + 41708$
T3	0.8686	$2.32X^2 - 405.32X + 17759$
T4	0.5196	$3.33X^2 - 585.84X + 25881$
T5	0.6921	$11.49X^2 - 2051.6X + 91628$
T6	0.9446	$3.29X^2 - 572.75X + 24911$

Los materiales de los seis tratamientos de paja de trigo transformados biológicamente durante 90 días se tamizaron utilizando tamices de 2.00 mm, 1.00 mm y 0.5 mm y una base de metal, separando las partículas iguales o menores de 2.00 mm y mayores de 1.00 mm, y partículas iguales o menores a 1.00 mm y mayores de 0.5 mm, y se elaboraron seis materiales, todos con granulometría 80-20. Sobre estos materiales preparados se determinaron los contenidos de C, N y la relación C: N.

6.3.6 Materia orgánica, C, N y relación C: N después de tamizar los materiales de paja de trigo

Las partículas menores de 0.5 mm se desecharon (material con mayor descomposición, de color negro, pero aún se podía distinguir el tejido de la paja de trigo), debido a que en experimentos anteriores se observó que partículas menores a 0.5 mm afectan la porosidad de aire en los sustratos elaborados con paja de trigo (material fibroso). Los contenidos de materia orgánica, C, N y la relación C: N se presentan en el Cuadro 5.

6.3.6.1 Materia orgánica

El porcentaje de MO en los seis tratamientos de paja de trigo con granulometría 80-20, aumentó con respecto al contenido de MO de estos tratamientos sin tamizar.

El análisis de varianza del contenido de MO (%) presenta diferencias altamente significativas entre tratamientos ($P > F = 0.001$).

La comparación entre medias (DHS; Tukey $\alpha = 0.05$) indica que los tratamientos en los que hubo mayor degradación fueron los tratamientos 3, 4 y 1, resultando iguales estadísticamente entre sí y diferentes a los demás tratamientos. El tratamiento 6 mostró una menor degradación que los tratamientos 3, 4 y 1 y los tratamientos 2 y 5 fueron los que tuvieron la menor degradación entre todos los tratamientos evaluados.

Cuadro 5. Características químicas de la materia orgánica en seis tratamientos de paja de trigo con 90 días de degradación microbiológica y después de ser tamizados.

Tratamiento	MO	Dif. de MO	C	N	C: N
-----%-----					
T1	85.56 c	1.25	49.63 c	1.78 a	27.90 abc
T2	88.84 a	3.84	51.53 a	1.67 a	30.86 ab
T3	84.54 c	2.71	49.03 c	2.29 a	21.51 d
T4	84.54 c	0.96	49.03 c	2.10 a	23.83 cd
T5	89.45 a	2.50	51.88 a	1.63 a	32.07 a
T6	86.76 b	3.48	50.32 b	1.89 a	26.63 bcd
P>F	0.001	----	0.001	0.001	0.001
DHS	1.06	----	0.621	1.23	5.41
CV (%)	0.4467		0.4514	7.52	7.29

Dif. = diferencia. MO = materia orgánica. DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

La diferencia entre el contenido de MO entre los tratamientos de paja de trigo antes de ser tamizados y después de ser tamizados (Cuadro 5), se debe a que a través del tamiz de 0.5 mm pasaron partículas menores a este tamaño, dichas partículas son las que presentaron la mayor degradación biológica entre las partículas que componen los materiales de paja de trigo. Al extraer estas partículas con mayor grado de degradación la materia orgánica restante contiene menor degradación y por lo tanto los materiales de paja de trigo con partículas superiores a 0.5 mm después de ser tamizados, poseen mayor porcentaje de MO. Las diferencias entre los porcentajes de MO en los tratamientos sin tamizar y tamizados son relativamente bajos, fluctuando entre 0.96 % en el tratamiento 4 y 3.84 % en el tratamiento 2 (Cuadro 5).

Es conveniente señalar que no en todos los tratamientos de transformación biológica, el material de paja de trigo tamizado con partículas menores a 0.5 mm presentaron el mismo grado de degradación a simple vista.

6.3.6.2 Carbono

El análisis de varianza muestra que existen diferencias altamente significativas ($P > F = 0.001$) en el contenido de C entre los tratamientos biológicos de paja de trigo. Los tratamientos que conservaron la mayor cantidad de C y resultaron iguales estadísticamente fueron los tratamientos 5 (paja con extracción de fenólicos + NH_4NO_3 + lombrices + microorganismos) y 2 (paja con extracción de fenólicos + NH_4NO_3 + microorganismos).

Los resultados anteriores indican que la descomposición tanto por lombrices + microorganismos, como por microorganismos únicamente (T5 y T2), fue menor en relación con los demás tratamientos.

Por otro lado el tratamiento 6 (paja con extracción de fenólicos + solución completa 100 % + lombrices + microorganismos) presentó una ligera diferencia con los tratamientos 2 y 5 en el contenido de C. Los tratamientos 1 (paja sin extracción de fenólicos + NH_4NO_3 + microorganismos), 3 (paja con extracción de fenólicos + solución completa 100 % + microorganismos) y 4 (paja sin extracción de fenólicos + NH_4NO_3 + lombrices + microorganismos) resultaron estadísticamente iguales en la prueba de comparación entre medias (DHS Tukey $\alpha = 0.05$) con los menores contenidos de carbono.

El contenido de C en los tratamientos evaluados presentó el mismo comportamiento estadístico que el contenido de la materia orgánica de los mismos.

6.3.6.3 Nitrógeno

El contenido de N (%) en los seis tratamientos biológicos evaluados se presenta en el Cuadro 5. El análisis de varianza muestra una diferencia altamente significativa entre los tratamientos ($P > F = 0.001$), sin embargo la comparación entre medias de tratamientos señala que en promedio todos los tratamientos fueron iguales estadísticamente (DHS Tukey $\alpha 0.05 = 1.23$), percibiéndose ligeras

diferencias. La diferencia entre el tratamiento 3 con el mayor contenido de N (2.29 %) y el tratamiento 5 con el menor contenido de N (1.63 %) es de 0.66 %.

Cabe señalar que las formas de N presentes en los materiales de los tratamientos biológicos evaluados pueden encontrarse en las siguientes formas: fijado en las pajas de trigo (lignina), fijado en los compuestos fenólicos solubles (ácidos *p*-cumárico y ferúlico por ejemplo), presentes en los cuerpos de los microorganismos que utilizaron el N, N soluble que no fue utilizado por los microorganismos presentes en la paja de trigo (NH_4 o NO_3), o N soluble derivado de la transformación del N orgánico presente en la paja de trigo antes de la aplicación de las soluciones con N.

Con la determinación de N total en los seis tratamientos biológicos en las pajas de trigo no podemos determinar las formas en que este se encuentra en dichos materiales, sin embargo, de acuerdo con información de algunos autores (Blanco y Almendros, 1995; Blanco y Almendros, 1997), cuando se tienen relaciones C: N entre 10: 1 y 30: 1, significa que los materiales orgánicos han tenido una transformación biológica importante, obteniendo entre otros compuestos sustancias húmicas bioestables, por lo tanto es probable que el nitrógeno se encuentre en mayor proporción en los cuerpos de los organismos o bien como nitrógeno soluble y fácilmente disponible para las plantas como resultado de la transformación del N orgánico en inorgánico.

Es posible que las formas de N presentes en los tratamientos de paja de trigo evaluados en este experimento se encuentren principalmente como formas ligadas a compuestos orgánicos o bien formando parte de los cuerpos de los microorganismos que lo utilizaron (ya señalado con anterioridad), de acuerdo con los datos que se presentan de conductividad eléctrica.

6.3.6.4 Relación C: N

La relación C: N de los tratamientos evaluados se presenta también en el Cuadro 5. El análisis de varianza indica que hay diferencia altamente significativa entre los tratamientos ($P > F = 0.001$). Los tratamientos 5, 2 y 1 fueron los que presentaron

las mayores relaciones C: N, mientras que los tratamientos 6, 4 y 3 presentaron las menores relaciones C: N. La relación C: N es solamente un indicador del grado de degradación de la materia orgánica.

Para la degradación de materiales orgánicos (compostaje) es necesario tener inicialmente cantidades adecuadas de C y N. La proporción ideal de C: N para el compostaje es de 30: 1; 30 partes de C por 1 parte de N con base en porcentaje. En menores relaciones el nitrógeno se suministrará en exceso y se perderá como gas amoníaco, causando olores indeseables. Relaciones mayores significan que no hay suficiente N para el crecimiento óptimo de los microorganismos, de tal manera que la composta permanecerá relativamente fría y la degradación procederá lentamente (Dickson *et al.*, 1991).

Esto último es lo más probable que haya sucedido en este experimento, si tomamos en consideración las cantidades de N aplicadas a las pajas de trigo y a las relaciones C: N iniciales. En este punto, es importante señalar que uno de los objetivos principales fue el degradar los compuestos fenólicos solubles que inhiben el crecimiento de las plantas, sin degradar apreciablemente la materia orgánica sólida de la paja de trigo, para conservar mayor cantidad de la misma.

Generalmente las compostas una vez que se encuentran maduras tienen una relación C: N baja alrededor de 20: 1, 10: 1. Blanco y Almendros (1995), reportan compostas de paja de trigo que presentan relaciones C: N de 13.3, 24.4 y 28.7 después de un periodo de transformación de 90 días, con porcentajes de germinación de 104 %, 117 % y 91 % utilizando 1 kg de suelo con 1 % de materia orgánica de las compostas señaladas.

La relación C: N es solo un indicador que puede ayudar a definir la madurez de una composta, sin embargo no es suficiente, es necesario considerar las formas bioquímicas de C en los materiales orgánicos. Los materiales con un alto contenido de lignina tienen mayor bioestabilidad que aquellos materiales conteniendo hemicelulosa y celulosa (Bunt, 1976). Entre otros métodos para la evaluación de la madurez de una composta se pueden citar, los ensayos de toxicidad (Mathur *et al.*, 1993), respirometría y caída del pH después de

incubación en condiciones anaeróbicas y capacidad de auto producción de calor (Popp y Fischer, 1997).

De acuerdo con los objetivos planteados al inicio de este experimento se sugiere que la mejor manera de evaluar la toxicidad de una composta o algún otro material orgánico es a través de bioensayos específicos, especialmente si los materiales composteados se van a utilizar directamente en el crecimiento de plantas.

La paja de trigo original utilizada para la transformación biológica tuvo un porcentaje de MO de 94 %, 54.52 % de C y 0.665 % de N, con una relación C: N de 81.99.

Considerando que el peso de 20 L de paja de trigo es de 2 kg, el peso molecular del NH_4NO_3 es 80 g mol^{-1} , que este mol tiene 28 g de N, que se agregaron 16 g de NH_4NO_3 a 2 kg de paja de trigo, que la paja de trigo de antemano tenía un 0.665 % de N, que se agregaron 5.6 g de N a 2 kg de paja de trigo, y que en 100 g tendríamos 0.28 g de N, tendríamos 0.945 % de N. Se considera que inicialmente se tuvo una relación C: N aproximada de 57.69 en los tratamientos 1, 2, 4 y 5.

El contenido de N total en el tratamiento 1 fue de 1.78 % al final del experimento. Se observa que el porcentaje de N total al inicio del experimento y después de adicionar el N inorgánico, es menor que la cantidad de N al final del experimento. El incremento en el contenido de N total en los tratamientos de paja de trigo al final del experimento se explica por la conservación de N en la paja de trigo, pero en menor cantidad de MO, lo que significa que existe un efecto de concentración del N. Por otro lado es probable que cierta parte de dicho incremento de N se pueda atribuir a la acción de fijación de N por organismos fijadores libres de N. Quintero *et al.*, 2000, señalan la presencia de organismos fijadores de N libres, encontrando mayor cantidad de estos organismos en los tratamientos con lombrices que sin lombrices a los 46 y 69 días del inicio del experimento ($221.88 \text{ ufc} \times 10^6 \text{ g}^{-1}$ y $41.81 \text{ ufc} \times 10^6 \text{ g}^{-1}$), mientras que en los tratamientos sin lombrices reporta la mayor cantidad de estos organismos a los 69 días de muestreo con $28.32 \text{ ufc} \times 10^6 \text{ g}^{-1}$ en paja de avena molida. Es probable que la proliferación de organismos fijadores de N libres haya sido consecuencia de una falta de N en las pajas de

trigo, para contribuir a la descomposición o transformación biológica de la misma (altas relaciones C: N iniciales).

Las relaciones C: N de los tratamientos evaluados a los 90 DDIE son bajas (Cuadro 5), lo que hace pensar que después de este tiempo de degradación biológica los tratamientos deberían de presentar un mayor grado de transformación, sin embargo no fue así. Lo anterior se refuerza con la verificación ocular en el estereoscopio en los materiales tamizados, en donde se observó que estos tenían muy poco grado de transformación biológica, observando mayor degradación en el parénquima, el cual está compuesto principalmente de celulosa. El N total puede encontrarse en forma inorgánica en forma soluble como iones, inorgánica en forma fijada, o en forma orgánica en compuestos orgánicos o formando parte de los cuerpos de los microorganismos. De acuerdo con la CE presentada por los tratamientos durante el experimento lo más probable es que una alta proporción de los iones inorgánicos de N se hayan fijado por reacción con compuestos fenólicos del tipo ácido *p*-cumárico o ferúlico (Kholdebarin y Oertli, 1994; Chabaca *et al.*, 2000) o reaccionado con la lignina (Nömmik y Vahtras, 1982). Se reportan diferentes grados de inmovilización de N en 14 materiales orgánicos, encontrando que materiales como la fibra de madera y la corteza se catalogan como materiales no estables por fijar cantidades importantes de N (Prasad, 1997), sin embargo, no se explica o determina la forma en que el N puede ser fijado.

6.3.7 Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina

En el Cuadro 6, se muestran fundamentalmente los resultados de los contenidos de celulosa, hemicelulosa y lignina, de solamente dos pajas de trigo en los tratamientos evaluados, tomados como muestras para determinar y cuantificar el tipo de compuestos químicos constituyentes de la paja de trigo que fueron biodegradados.

Los tratamientos seleccionados para este fin fueron los tratamientos T3 (degradación por microorganismos) y T6 (degradación con lombrices +

microorganismos), por ser los tratamientos que visualmente presentaron la mayor degradación en sus partículas y presentaron un color más oscuro que los demás tratamientos.

La diferencia en el porcentaje de celulosa entre el tratamiento T0 (sin degradar) y el T3 (degradación microbiológica) fue de solamente de 1.22 %, mientras que la disminución de este compuesto en el tratamiento 6 (lombrices + microorganismos) fue de 14.64 %. Se observa que la diferencia en el contenido final de celulosa en los tratamientos 3 y 6 se debe a la actividad de degradación (consumo) de las lombrices en relación con la degradación realizada únicamente por los microorganismos.

Cuadro 6. Contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina en paja de trigo sin degradar y paja de trigo con 90 días de degradación en dos tratamientos.

Muestra	Materia seca	Cenizas	FDN	FDA	Celulosa	Hemicelulosa	Lignina
-----%-----							
T0	93.25	10.48	80.85	57.73	50.12	23.12	7.61
T3	91.00	12.35	82.97	65.49	48.90	17.48	16.59
T6	90.74	16.44	82.08	66.47	35.48	15.61	20.99

T0 = paja de trigo sin degradación, FDN = fibra detergente neutra, FDA = fibra detergente ácida, % de hemicelulosa = FDN – FDA, % de celulosa = FDA – Lignina.

El porcentaje de hemicelulosa en el tratamiento 3 disminuyó 5.64 %, mientras que en el tratamiento 6 disminuyó 7.51 %. El consumo de hemicelulosa por parte de las lombrices + microorganismos fue ligeramente superior en el tratamiento 6 con respecto al tratamiento 3.

El porcentaje de lignina en los tratamientos 3 y 6 se incrementó 8.98 % y 13.88 % respectivamente con respecto al tratamiento sin degradación. El incremento de lignina en los tratamientos 3 y 6 se debe principalmente al efecto de concentración; al disminuir los otros componentes como la celulosa y

hemicelulosa, aumenta el porcentaje de lignina. Es obvio que no hubo degradación significativa de lignina en ambos tratamientos.

De acuerdo con los datos proporcionados en el Cuadro 6, la degradación en el tratamiento 3, se presentó principalmente a través de la hemicelulosa, mientras que en el tratamiento 6 la mayor degradación se presentó vía celulosa.

6.3.8 Degradación física de las pajas de trigo

Los resultados de la degradación física de los materiales de paja de trigo sometidos a los diferentes tratamientos se presentan en el Cuadro 7.

De acuerdo con la escala utilizada, todos los tratamientos presentaron aproximadamente el mismo grado de degradación (valor de 1 en la escala correspondiente entre 1 y 5 % de degradación). El valor de 1 en la escala coincide aproximadamente con los porcentajes de pérdida de materia orgánica en los materiales de paja de trigo en los tratamientos evaluados, teniendo un máximo de degradación de 3.84 % en el tratamiento 2 (Cuadro 5).

6.3.9 Color de los materiales de acuerdo con la notación de Munsell

Los resultados del color de los materiales de paja de trigo que conformaron cada uno de los seis tratamientos evaluados para su descomposición hasta los 90 DDIE, se presentan también en el Cuadro 7.

El color de todos los materiales de paja de trigo que constituyeron los tratamientos de degradación o descomposición biológica de acuerdo con la notación de Munsell fue igual; perteneciente a un color 5 Y 3/2, correspondiente al color café grisáceo en seco, y 2.5 Y N 2/0 correspondiente al color negro en húmedo, aunque visualmente existieron algunas diferencias entre los mismos, siendo los tratamientos 3 y 6 los que mostraron tener colores más oscuros con respecto a los demás tratamientos.

Por otro lado, cuando las partículas de paja de trigo seca de cada uno de los tratamientos se observaron bajo el estereoscopio, las partículas se percibieron de

color tendiendo a negro, mostrando un color más oscuro en la parte exterior de las partículas, esto es, en el lado en donde se encontraba (no se distingue) la epidermis exterior y más hacia adentro en los tejidos en donde se encuentra el esclerénquima. El parénquima, más interior, se mostró un poco más claro en color que el correspondiente a la epidermis exterior y el esclerénquima.

Cuadro 7. Algunas características físicas de los tratamientos de paja de trigo evaluados en su degradación por los procesos de compostaje y vermicompostaje parciales.

Tratamiento	Degradación Física	Color con notación Munsell en seco	Color con notación Munsell en húmedo
T1	1	5 Y 3/2 Café grisáceo muy oscuro.	2.5 Y N 2/0 Negro
T2	1	Igual al anterior	Igual al anterior
T3	1	Igual al anterior	Igual al anterior
T4	1	Igual al anterior	Igual al anterior
T5	1	Igual al anterior	Igual al anterior
T6	1	Igual al anterior	Igual al anterior

Los bioensayos correspondientes a los tratamientos evaluados en este experimento para determinar la inhibición del crecimiento, se realizarán en el próximo experimento, en condiciones normales de producción de plántulas de brócoli en charolas.

6.4 CONCLUSIONES

1. Las CFST en los tratamientos 2 y 3, y 5 y 6, disminuyeron 34.14 % y 29.52 % respectivamente, con el tratamiento de extracción con agua común.

2. Todos los tratamientos mostraron una disminución en las CFST a los 15 DDIE. Los tratamientos 1 y 6 presentaron las mayores disminuciones en las CFST (49.06 % y 55.35 %) con respecto a las CFST iniciales, siendo estadísticamente diferentes a las CFST de los tratamientos 2, 3, 4 y 5.

3. Las CFST presentadas por los tratamientos 1, 2 y 3 a los 15 DDIE, fueron similares a las presentadas por los tratamientos 4, 5 y 6, lo que indica que las lombrices, no ayudaron significativamente en la disminución o aumento de las CFST en los tratamientos con estos organismos.

4. El tratamiento 4 fue el que tuvo la mayor CFST entre todos los tratamientos a los 30 DDIE. Las CFST en los tratamientos 1 y 6 disminuyeron en mayor proporción con respecto a los demás tratamientos. Los tratamientos con degradación con únicamente microorganismos y con lombrices + microorganismos presentaron CFST similares y estadísticamente iguales.

5. La disminución en las CFST hasta los 30 DDIE en los tratamientos evaluados, se atribuye a la transformación de fenólicos simples, como los ácidos *p*-cumárico y ferúlico, a compuestos tales como el ácido *p*-metoxicinámico y ácido 3, 4, dimetoxicinámico, los cuales no tienen grupos OH para reaccionar con el reactivo de Folin y Ciocalteu, de tal manera que aparentemente las CFST disminuyen o posteriormente fueron utilizados en la respiración de los microorganismos perdiéndose el carbono como CO₂.

6. A los 40 DDIE todos los tratamientos presentaron un incremento en las CFST, continuando Esta tendencia hasta los 90 DDIE. El incremento en las CFST en todos los tratamientos evaluados se atribuye a la condensación de los compuestos fenólicos en compuestos más complejos, y al mismo tiempo la salida de más compuestos fenólicos simples de los materiales de paja de trigo a la solución y su posterior condensación.

7. La hipótesis de la disminución de las CFST al final del experimento no resultó acertada, se acepta la hipótesis de la formación de compuestos condensados complejos a partir de la transformación de los compuestos fenólicos simples contenidos en la paja de trigo, tales como el ácido *p*-cumárico y ferúlico, los cuales como parte de esta investigación en conjunto se determinaron como los ácidos fenólicos iniciales más importantes en la paja de trigo variedad Saturno.

8. Los tratamientos 1 y 4 después de 90 días de transformación biológica fueron los que mostraron las mayores CFST con 169.27 mg L^{-1} y 228.47 mg L^{-1} , respectivamente, y fueron estadísticamente diferentes a los demás tratamientos a los cuales se les extrajeron ciertas cantidades de compuestos solubles en agua.

9. Aunque estadísticamente los tratamientos 1 y 4 fueron iguales en las CFST, el tratamiento 4 presentó mayor CFST, sugiriendo que las lombrices ayudaron a la transformación de los fenólicos simples en fenólicos complejos, sin embargo, se establece que directamente las lombrices no contribuyeron a dicha transformación después de ingerir material sólido de la paja de trigo de los tratamientos, sino que más bien la contribución fue indirecta, a través del incremento de microorganismos que transformaron los fenólicos simples en complejos, en los alrededores de las heces de la lombriz (turrículos).

10. Las CFST al final del experimento dependieron estrechamente de las CFST iniciales, obteniendo coeficientes de determinación (R^2) de 0.9963 para el caso de los tratamientos con únicamente degradación microbiológica, mientras que los tratamientos con lombrices + microorganismos presentaron una R^2 de 0.8011.

11. El pH en los tratamientos 1, 2 y 3, después de los 15 DDIE y hasta los 90 DDIE, disminuyó, atribuyendo este efecto al aumento de la nitrificación y en cierta manera también a la formación de ácidos orgánicos.

12. El pH de los tratamientos 4, 5 y 6 (con lombrices), se incrementó con respecto a los pH iniciales, registrando pH que variaron entre 7.44 y 7.85 a través del experimento. El aumento en el pH de estos tratamientos se asigna a la formación de CaCO_3 a partir del calcio que expelen las lombrices de sus glándulas calcígenas.

13. A los 90 días de transformación biológica la conductividad eléctrica (CE) en los tratamientos 1 y 4 fueron superiores y estadísticamente diferentes a las CE de los tratamientos restantes, debido a que estos tratamientos no se les extrajeron los compuestos solubles.

14. Las conductividades eléctricas de los tratamientos 2, 3, 5 y 6 a los 90 DDIE fueron muy bajas, variando entre 0.47 dS m^{-1} en el tratamiento 2 y 0.71 dS m^{-1} en el tratamiento 3, indicando que en general no hubo una mineralización importante de la materia orgánica.

15. Los tratamientos 2 y 3, y 5 y 6, a los que se les extrajeron los compuestos solubles perdieron con el tratamiento de extracción con agua común únicamente 0.53 % y 0.21 % de materia orgánica.

16. La disminución en el porcentaje de materia orgánica en los tratamientos evaluados a través del experimento, fue ligeramente diferente en las diversas fechas de muestreo.

17. La paja de trigo a la cual se le adicionó solución completa al 100 % (T3) tuvo la mayor degradación o pérdida de MO con 10.08 %, mientras que los tratamientos 1, 2, 4, 5 y 6 tuvieron pérdidas de MO de 7.80 %, 6.65 %, 8.53 %, 4.70 % y 8.63 % respectivamente, al final del experimento.

18. Se encontró una relación polinomial, altos coeficientes de determinación y alta significancia entre los porcentajes de MO y las CFST en cada uno de los tratamientos evaluados, en las seis fechas de muestreo.

19. Los porcentajes de materia orgánica en los tratamientos se incrementaron al seleccionar por tamizado partículas menores de 2 mm y mayores e iguales a 1 mm, y menores a 1 mm y mayores e iguales a 0.5 mm, elaborando tratamientos con partículas en proporción 80-20 en porcentaje de cada una de las partículas señaladas, aunque los incrementos fueron relativamente bajos fluctuando entre 3.84 % en el tratamiento 2 y 0.96 % en el tratamiento 4.

20. Los tratamientos 3 y 4 (tamizados) presentaron las menores relaciones C: N (21.51 y 23.83 respectivamente) y también fueron los tratamientos que presentaron las menores pérdidas de materia orgánica (84.54 % en ambos casos).

21. El tratamiento 6 (lombrices + microorganismos) presentó mayor degradación de celulosa (14.64 %) que el tratamiento 3 (microorganismos) con 1.22 %, mientras que la pérdida o transformación de hemicelulosa fue muy similar (5.64 y 7.51 respectivamente).

22. El porcentaje de lignina se incrementó 8.98 % y 13.88 % en los tratamientos 3 y 6 respectivamente, con respecto al contenido de lignina de la paja de trigo sin degradación, esto se explica por el mismo contenido de lignina, pero en menor porcentaje de materia orgánica (efecto de concentración), lo que sugiere que no hubo degradación de la lignina en estos tratamientos y se infiere que tampoco la hubo en los otros tratamientos restantes.

23. La observación bajo el estereoscopio de las partículas seleccionadas con los tamices en los tratamientos evaluados y con granulometría 80-20, indican que no hubo una degradación física importante en los tejidos de las pajas de trigo después de 90 días de transformación biológica, clasificando a los seis

tratamientos en la escala de 1 (entre 1 y 5 % de degradación), coincidiendo aproximadamente con la pérdida de materia orgánica (2.81 % en el tratamiento 2 y 7.57 % en el tratamiento 4). La degradación se observó principalmente en el tejido interior formado principalmente por parénquima.

24. Todos los tratamientos de paja de trigo después de 90 días de transformación biológica se denotaron como 5 Y 3/2 en seco, correspondiendo a un color café grisáceo muy oscuro, mientras que se clasificaron como 2.5 Y N 2/0, correspondiente al negro en húmedo en la escala de Munsell.

25. Durante los primeros 15 días después del inicio del experimento se detectaron algunas semillas en germinación, sin embargo en el transcurso del experimento y principalmente durante los siguientes 15 días (30 DDIE) ya no se observaron semillas en germinación en los materiales de paja de trigo, sugiriendo su muerte probablemente por efecto del alto contenido de compuestos fenólicos presentes en los materiales en el proceso de transformación biológica.

6.5 LITERATURA CITADA

- Abad, M., P. Noguera., V. Noguera., A. Roig., J. Cegarra., y C. Paredes. 1997. Reciclado de residuos orgánicos y su aprovechamiento como sustratos de cultivo. *Actas de Horticultura*. 19: 92-109.
- Ansorena M, J. 1994. *Sustratos. Propiedades y caracterización*. Editorial Mundi-Prensa. Bilbao, España.
- Barois, I., and P. Lavelle. 1986. Changes in respiration rate and physicochemical properties of a tropical soil during transit through *Pontoscolex corethrurus* (Glossoscolecidae: Oligochaeta). *Soil Biol. Biochem.* 18: 539-541.
- Basaglia, M., G. Conchieri., S. Cardinali., M. B. Pasti-Grigsby., and M. P. Nuti. 1992. Enhanced degradation of ammonium-pretreated wheat straw by lignocellulolytic *Streptomyces* spp. *Canadian Journal of Microbiology*. 38: 1022-1025.

- Blanco, M. J., and G. Almendros. 1995. Evaluation of parameters related to chemical and agrobiological quantities of wheat straw compost including different additives. *Bioresource Technology*. 51: 131-134.
- Blanco; M. J., and G. Almendros. 1997. Chemical transformation, phytotoxicity and nutrient availability in progressive composting stages of wheat straw. *Plant and Soil*. 196: 15-25.
- Blum, U., and B. R. Dalton. 1985. Effects of ferulic acid, an allelopathic compound, on leaf expansion of cucumber seedlings in nutrient culture. *J. Chem. Ecol.* 11: 279-301.
- Blum, U., and S. R. Shafer. 1988. Microbial populations and phenolic acids in soil. *Soil Biol. Biochem.* 20: 793-800.
- Bremner, J. M., and C. S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. pp. 595-634. *In*: A. L. Page, R. H. Miller and D. R. Keeney, (eds.). *Methods of Soil Analysis*. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy 9. 2nd edition. ASA. SSSA. Madison, WI, USA.
- Bunt, A. C. 1976. *Modern potting composts. A manual on the preparation and use of growing media for pot plants.* George Allen and Unwin Ltd. London, U.K.
- Chabaca, R., A. Larwence., M. Paynot., et J. L. Tisserand. 2000. Effet de diverses conditions de traitement à l'ammoniac d'une paille de blé sur les teneurs en acides *p*-coumarique et férulique et sur la dégradabilité de l'azote mesurée in situ. *Ann. Zootech.* 49: 29-38.
- Crawford, D. L. 1986. The role of actinomycetes in the decomposition of lignocellulose. *FEMS. Symp.* 34: 715-728.
- Disckson, N., T. Richard., and R. Kozlowski. 1991. *Composting to reduce the waste stream. A guide to small scale food and yard waste composting.* Cornell University. Norwest Regional Agricultural Engineering Service. Ithaca, N.Y. USA.
- Edwards, C. A., and K. E. Fletcher. 1988. Interactions between earthworms and microorganisms in organic matter breakdown. *Agric. Ecosys. Environ.* 24: 235-247.
- Fry, S. C. 1986. Cross-linking of matrix polymers in the growing cell walls of angiosperms. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 37: 165-186.
- Guenzi, W. D., and T. M. McCalla. 1966. Phenolic acids in oats, wheat, sorghum, and corn residues and their phytotoxicity. *Agronomy Journal*. 58: 303-304.
- Haider, K., and J. P. Martin. 1975. Decomposition of specifically carbon-14 labelled

- benzoic and cinnamic acid derivatives in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 39: 657-662.
- Harborne, J. B. 1984. Phenolic compounds. pp. 37-99. *In: Phytochemical Methods: A guide to modern techniques in plant analysis.* 2nd. Ed. Chapman & Hall. London, U.K.
- Iiyama, K., T. B. T. Lam., and B. A. Stone. 1990. Phenolic acid bridges between polysaccharides and lignin in wheat internodes. *Phytochemistry.* 29: 733-737.
- Kholdebarin, B., and J. J. Oertli. 1994. Nitrification: interference by phenolic compounds. *Journal of Plant Nutrition.* 17: 1827-1837.
- Lam, T. B. T., K. Iiyama., and B. A. Stone. 1990. Distribution of free and combined phenolic acids in wheat internodes. *Phytochemistry.* 29: 429-433.
- Lodhi, M. A. K., R. Bilal., and K. A. Malik. 1987. Allelopathy in agroecosystems: wheat phytotoxicity and its possible roles in crop rotation. *Journal of Chemical Ecology.* 13: 1881-1891.
- Martin, J. P., and K. Haider. 1976. Decomposition of specifically carbon14-labeled ferulic acid: free and linked into model humic acid-type polymers. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40: 337-380.
- Mathur, S. P., G. Owen., H. Dinel., and M. Schnitzer. 1993. Determination of compost biomaturity. I. Literature Review. *Biol. Agric. Hort.* 10: 65-85.
- Mylonas, V. A., and C. B. McCants. 1980. Effects of humic and fulvic acids on growth of tobacco. I. Root initiation and elongation. *Plant Soil.* 54: 485-490.
- Narwal, S. S., M. K. Sarmah., and D. P. S. Nandal. 1997. Allelopathic effects of wheat residues on growth and yield of fodder crops. *Allelopathy Journal.* 4: 111-120.
- Nömmik, H., and K. Vahtras. 1982. "Retention and fixation of ammonium in soils. pp. 198-258. *In: G. J. Stevenson, (ed.). Nitrogen in agricultural soils.* American Society of Agronomy. Madison. Wi, USA.
- Opoku, G., T. J. Vyn., and R. P. Voroney. 1997. Wheat straw placement effects on total phenolic compounds in soil and corn seedling growth. *Canadian Journal of Plant Science.* 77: 301-305.
- Pan, G. X., J. L. Bolton., and G. J. Leary. 1998. Determination of ferulic and *p*-coumaric acids in wheat straw and the amounts released by mild acid and alkaline peroxide treatment. *J. Agric. Food Chem.* 46: 5283-5288.
- Popp, L., and P. Fisher. 1997. New methods for rapid determination of compost maturity. *Acta Horticulturae.* 450: 237-244.

- Prasad, M. 1997. Nitrogen fixation of various materials from a number of european countries by three nitrogen fixation tests. *Acta Horticulturae*. 450: 353-362.
- Quintero L, R., R. Ferrera-Cerrato., J. D. Etchevers B., N. E. García C., R. Rodríguez-Kabana., G. Alcántar G., y A. Aguilar S. 2000. Vermicomposteo, composteo y su dinámica microbiana. pp. 417-428. *In: La Edafología y sus Perspectivas al siglo XXI*. Tomo 1. R. Quintero L., T. Reina T., L. Corlay Ch., A. Ibáñez H., N. E. García C. (Eds.). Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas, Universidad Nacional Autónoma de México, Universidad Autónoma Chapingo. México.
- Quintero L, R., R. Ferrera-Cerrato., J. D. Etchevers B., N. E. García C., R. Rodríguez K., G. Alcántar G., y A. Aguilar S. 2003. Enzimas que participan en el proceso de vermicompostaje. *Terra*. 21: 73-80.
- Saavedra, M., E. Benítez., C. Cifuentes., and R. Nogales. 2006. Enzyme activities and chemical changes in wet olive cake after treatment with *Pleurotus ostreatus* or *Eisenia fetida*. *Biodegradation*. 17: 93-102.
- Santamaría R, S., y R. Ferrera C. 1998. Contenido nutrimental de vermicompostas producidas de diferentes desechos orgánicos. *Memorias XXVII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo*. Cd. Obregón, Sonora. México.
- Santamaría, R. S. 2000. Escalamiento de los procesos de composteo y vermicomposteo: aspectos biológicos y nutrimentales. Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, México.
- Saviozzi, A., M. Levi., R. Riffaldi., and G. Vanni. 1997. Laboratory studies on the application of wheat straw and pig slurry to soil and the resulting environmental applications. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 61: 35-43.
- Shindo, H., and S. Kuwatsuka. 1975a. Behavior of phenolic substances in the decaying process of plants. II. Changes of phenolic substances in the decaying process of rice straw under various conditions. *Soil Sci. Plant Nutr*. 21: 215-225.
- Shindo, H., and S. Kuwatsuka. 1975b. Behavior of phenolic substances in the decaying process of plants. III. Degradation pathway of phenolic acids. *Soil Sci. Plant Nutr*. 21: 227-238.
- Tejada, De H. I. 1985. Manual de laboratorio para análisis de ingredientes utilizados en la alimentación animal. Patronato de Apoyo a la Investigación y Experimentación Pecuaria en México. A. C.

- Trigo, D., and P. Lavelle. 1993. Changes in respiration rate and some physicochemical properties of soil during gut transit through *Allobophora mollerii* (Lumbricidae: Oligochaeta). *Biol. Fertil. Soils*. 15: 185-188.
- Vaughan; D., and B. G. Ord. 1980. An effect of soil organic matter on invertase activity in soil. *Soil Biology & Biochemistry*. 12: 449-451.
- Vaughan, D. G. P. Sparling., and B. G. Ord. 1983. Amelioration of the phytotoxicity of phenolic acids by some soil microbes. *Soil Biol. Biochem.* 15: 613-614.
- Waterman, P. G., and S. Mole. 1994. Structure and biosynthesis of phenolic compounds. pp. 1-35. *In: Analysis of Phenolic Plant Metabolites*. J. H. Lawton and G. E. Likens (eds.). Blackwell Scientific Publications. Oxford, U. K.

CAPÍTULO VII

SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO CON DEGRADACION BIOLÓGICA PARCIAL Y DOS TURBAS COMERCIALES EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI

**SUSTRATOS DE PAJA DE TRIGO CON DEGRADACION BIOLÓGICA
PARCIAL Y DOS TURBAS COMERCIALES
EN EL CRECIMIENTO DE PLÁNTULAS DE BRÓCOLI**

Fidel René Díaz Serrano, Dr.
Colegio de Postgraduados, 2011

Se evaluaron 11 sustratos de paja de trigo (3 con compostaje parcial, 3 con vermicompostaje parcial, 3 con transformación biológica por solamente 15 días y dos con extracción de fenólicos) y dos turbas comerciales en el crecimiento de plántulas de brócoli durante 30 días.

Los análisis de regresión lineal simple y múltiple indican que las propiedades físicas, el pH y la conductividad eléctrica de los sustratos de paja de trigo, no influyeron significativamente en el crecimiento de las raíces y los vástagos de plántulas de brócoli que crecieron en estos sustratos. La regresión múltiple indica que no existe una relación significativa entre las concentraciones de fenólicos solubles totales y las variables de crecimiento. Las diferencias en algunas de las variables de crecimiento entre las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo con respecto a las que crecieron en los testigos se atribuyen a los diversos estados de transformación biológica de los compuestos fenólicos. Los dos mejores sustratos de paja de trigo (Nos. 5 y 8) produjeron plántulas de brócoli estadísticamente iguales en todas las variables de crecimiento a las plántulas que crecieron en el mejor sustrato testigo con base en turba. Estos sustratos de paja de trigo podrían utilizarse como sustratos sustitutos de los sustratos con base en turba (testigos) en la producción de plántulas de brócoli.

Palabras clave: *sustratos, paja de trigo, transformación biológica parcial, plántulas de brócoli.*

WHEAT STRAW SUBSTRATES WITH PARTIAL BIOLOGICAL DEGRADATION AND TWO COMMERCIAL PEAT MOSSES IN THE GROWING OF BROCCOLI SEEDLINGS

Fidel René Díaz Serrano. Ph. D.
Postgraduate College, 2011

They were evaluated 11 wheat straw substrates (3 partial composting, 3 partial vermicomposting, 3 with biological degradation just for 15 days, two with phenolics extraction) and two commercial peat moss substrates as growing media for broccoli seedlings. According with the simple and multiple regression analysis the substrate physical properties, pH and electric conductivity of wheat straw substrates during the experiment did not affect significantly the growing of shoots and roots of broccoli seedlings. The multiple regression analysis indicates that there is not a significant relationship among the total phenolic concentrations and the growing variables. The differences in some growing variables among seedlings that growth in wheat straw substrates in relationship to those that growth on control substrates are attributed to the diverse biological transformation stages of the phenolics compounds and their concentrations. The best two wheat straw substrates (Nos. 5 and 8) produced seedlings statistically equal in practically all the growth variables to the seedlings that grown in the best control substrate based on peat moss. These wheat straw substrates could be utilized as substitute substrates of the peat moss substrates used as controls in the production of broccoli seedlings.

Key words: *substrates, wheat straw, partial biological transformation, broccoli seedlings.*

7.1 INTRODUCCIÓN

Los sustratos o medios de crecimiento más utilizados en México para la producción de plántulas de hortalizas para trasplante se preparan con base en turba y se importan a nuestro país principalmente de Canadá.

Se han realizado algunos intentos de desarrollar nuevos sustratos orgánicos sustitutos de las turbas, para disminuir su uso en la producción de plántulas y otros usos, con fines de conservación ambiental.

Se han evaluado zeolita (Cativello, 1995), mezclas de zeolita con turba y composta (Marković *et al.*, 1995), fibra de madera (Toresa-Nova) impregnada con N (Gruda y Schnitzler, 1997), mezclas de turba con lombricomposta, cachaza y bagacillo (Osorio, 1999) y mezclas de turba con 20 % de composta (Granberry *et al.*, 2001), como alternativas para sustituir a la turba o disminuir su volumen en mezclas para el crecimiento de plántulas de hortalizas.

En general las compostas o vermicompostas solas o combinadas, como productos de la degradación biológica de materiales residuales no se han utilizado con éxito en condiciones comerciales en la producción de plántulas de hortalizas en contenedores debido a diversos problemas, entre los que se pueden mencionar: pH altos, alta salinidad, alta concentración de iones y moléculas orgánicas fitotóxicas, infestación con organismos patógenos (Raviv, 1998), falta de uniformidad en la calidad de las compostas, condiciones físicas deficientes, falta de formación de un cepellón compacto en las raíces (raíces parcialmente desnudas al extraer el cepellón), falta de uniformidad de las plántulas, alta densidad aparente y presencia de semillas de malezas, entre otras.

Por otro lado, se ha tratado de utilizar la fibra de coco fresca para el desarrollo de plántulas, sin embargo, aún se tienen ciertos problemas por efectos fitotóxicos de compuestos principalmente fenólicos en el crecimiento de las plántulas.

Se han realizado algunos esfuerzos para utilizar los residuos de la paja de maíz sin degradar, sola o combinada con tezontle (Muratalla, 2003) y el bagazo de agave tequilero composteado o vermicomposteado (Rodríguez, 2004) para el crecimiento de plántulas de hortalizas. Este último reporta éxito en el crecimiento

de plántulas de brócoli y jitomate, con crecimientos de plántulas similares o mejores que aquellas que crecieron en los sustratos importados Sogemix VT-M y Sunshine 3.

Sin embargo, a pesar del éxito de varios sustratos en la producción de plántulas de hortalizas en el ámbito de la investigación, se tienen problemas de diversa índole (entre ellos de relación costo-beneficio) para ser utilizados como sustratos comerciales en la producción de plántulas de hortalizas, además de que la zona de influencia para su utilización puede limitarse a municipios, estados y regiones fundamentalmente, tomando en consideración la disponibilidad de material primario para su elaboración (volumen de materia prima).

La presente investigación se enfocó a la utilización de paja de trigo con diversos grados de degradación parcial como sustratos para el desarrollo de plántulas de brócoli.

Los objetivos del presente experimento fueron:

1. Establecer si existe diferencia significativa en el crecimiento entre plántulas de brócoli cv. Patriot que se desarrollen en los sustratos de paja de trigo con degradación biológica parcial, y plántulas de brócoli desarrolladas en los sustratos testigos con base en turba.
2. Evaluar si se presenta diferencia significativa en las variables de crecimiento de plántulas de brócoli que se desarrollen en los sustratos de paja de trigo con degradación biológica parcial y plántulas de brócoli desarrolladas en los sustratos testigos, por efecto de las propiedades físicas.
3. Definir si el pH, la conductividad eléctrica y/o las concentraciones de compuestos fenólicos solubles totales, determinadas en el transcurso del experimento, inhiben significativamente el crecimiento de plántulas de brócoli en los sustratos de paja de trigo con degradación biológica parcial, en relación con los sustratos testigos.

4. Establecer el intervalo de concentraciones de fenólicos solubles totales en los sustratos de paja de trigo, en el que la presencia y densidad de los pelos radicales de las raíces de las plántulas no se vean afectadas.

5. Definir si los compuestos fenólicos presentes en los sustratos de paja de trigo después de la degradación biológica parcial afectan el crecimiento de las plántulas de brócoli en relación a los fenólicos no transformados biológicamente, presentes en las pajas de trigo a las cuales únicamente se les extrajeron los fenólicos y se enjuagaron tres veces.

6. Establecer si existen diferencias significativas en la concentración de nutrimentos entre los vástagos de las plántulas de brócoli que crezcan en los sustratos de paja de trigo y los de las plántulas que crezcan en los sustratos testigos, debido a algún efecto físico, químico o biológico de los mismos.

7. Constatar, bajo las condiciones específicas de este experimento, que los sustratos de paja de trigo parcialmente degradados por 90 días poseen alta bioestabilidad en el transcurso de 30 días de crecimiento de las plántulas de brócoli en estos sustratos.

7.2 MATERIALES Y METODOS

7.2.1 Sustratos evaluados

En el Cuadro 1, se presenta el material orgánico base y la granulometría de los trece sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot.

Se incluyeron dos sustratos de paja de trigo con extracción de fenólicos con agua común por una hora y enjuague tres veces con agua común, metodología descrita en el Capítulo V, para comparar el crecimiento de las plántulas de brócoli en sustratos de paja de trigo sin degradar, con sustratos de paja de trigo con

degradación parcial, tomando como base los resultados obtenidos en el experimento descrito en el Capítulo V.

Cuadro 1. Sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot.

Sustrato	Material orgánico	Granulometría
1	Paja de trigo (extracción de fenólicos)	80-20
2	Paja de trigo (extracción de fenólicos)	60-40
3	Paja de trigo. Degradación parcial (T1 E. A)	80-20
4	Paja de trigo. Degradación parcial (T2 E. A)	80-20
5	Paja de trigo. Degradación parcial (T3 E. A)	80-20
6	Paja de trigo (Degradación parcial (T4 E. A)	80-20
7	Paja de trigo (Degradación parcial (T5 E. A)	80-20
8	Paja de trigo (Degradación parcial (T6 E. A)	80-20
9	Paja de trigo (15 DTM- T1 E. A)	80-20
10	Paja de trigo (15 DTM- T2 E. A)	80-20
11	Paja de trigo (15 DTM- T3 E. A)	80-20
12	Sogemix VT-M (Premier). Turba	Capítulo V
13	Sunshine 3 (Sun Gro. Horticulture). Turba	♣

TX E. A. = tratamiento correspondiente al experimento descrito en el Capítulo V. DTM = días de transformación microbiológica. ♣) 9.28 % -- 2.0 mm; 12.18 % -- 1.0 mm; 28.02 % -- 0.5; 50.52 % -- <0.5 mm. Se utilizaron tamices de 2 mm, 1 mm y 0.5 mm.

La selección de los sustratos de paja de trigo sin degradar con granulometrías 80-20 y 60-40, también se hizo tomando en consideración los resultados anteriores del crecimiento de los vástagos y las raíces de las plántulas de brócoli en estos sustratos (Capítulo V).

También se incluyeron tres sustratos de paja de trigo, los cuales únicamente tuvieron un periodo de degradación parcial con microorganismos por 15 días. A los tratamientos 9, 10 y 11 en este experimento con degradación parcial por 15 días no se les aplicó N por segunda vez como a los originales (tratamientos 1, 2 y 3 del

Capítulo V), porque la degradación fue únicamente por 15 días, y a los sustratos originales se les aplicó N por segunda ocasión hasta los 30 días.

Seis tratamientos se derivaron de los tratamientos 1, 2, 3, 4, 5 y 6 del experimento de transformación biológica de compuestos fenólicos (Capítulo VI) y dos testigos con base en turba (Sogemix VT-M y Sunshine 3), que se utilizan comercialmente para el crecimiento de plántulas de hortalizas en charolas.

La evaluación de los 13 sustratos en el crecimiento de plántulas de brócoli, se llevó a cabo en un invernadero del Área de Nutrición Vegetal, en el Colegio de Postgraduados, en Montecillo, Texcoco, Edo. de México, durante el periodo del 13 de abril al 13 de mayo de 2004.

7.2.2 Propiedades físicas iniciales de los sustratos

7.2.2.1 Densidad aparente

La densidad aparente (g cm^{-3}) se determinó en una probeta de vidrio graduada de 250 mL. Primeramente, los sustratos se secaron en estufa a una temperatura de $80\text{ }^{\circ}\text{C}$. Los sustratos secos se vertieron sobre la probeta hasta llenar un volumen aproximado de 50 mL. Posteriormente, se aplicaron seis golpeteos sobre la base de la probeta teniendo cuidado de que el nivel del sustrato permaneciera horizontal. Se anotó el volumen ocupado por el sustrato adicionado. La probeta y el sustrato se pesaron. El peso del sustrato se obtuvo por diferencia entre el peso de la probeta + sustrato y el peso de la probeta vacía (previamente pesada). El peso del sustrato se dividió entre el volumen del mismo y se obtuvo la densidad aparente (DA) en g cm^{-3} (Buckman, 1991). Se hicieron cuatro repeticiones por sustrato.

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño completamente al azar con 13 sustratos y cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.2.2 Densidad real

La densidad real (DR) (g cm^{-3}) se determinó por medio de uno de los tres métodos evaluados por Téres *et al* (1995), y se describió en el Capítulo V.

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño completamente al azar con 13 tratamientos y tres repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.2.3 Porosidad total

Con los datos de DA y DR obtenidos en los dos puntos anteriores se calculó la porosidad total de los sustratos por medio de la fórmula:

$$PT = (1 - DA/DR) \times 100$$

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño completamente al azar con 13 sustratos y tres repeticiones, y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.2.4 Propiedades físicas determinadas en embudos de succión y columnas colgantes

La metodología para la determinación de estas variables se describió en el Capítulo V. Con esta metodología se determinaron: porosidad total, espacio sólido, porosidad de aire, agua fácilmente disponible, agua de reserva, agua total disponible, agua difícilmente disponible y porosidad de agua.

Los datos de estas variables se analizaron por medio de análisis de varianza de un diseño completamente al azar con 13 tratamientos y dos repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.3 Llenado de charolas y siembra

Las charolas utilizadas fueron de plástico de alta densidad de color negro con 432 celdas cuadradas con una configuración de 12 X 36, de 67 cm de largo X 23 cm de ancho, con celdas de 8.5 mL de volumen, cada una de 1.5 cm X 1.5 cm de lado, 6.2 cm de altura y 9 mm de ancho en la base, con un orificio de salida de 6.0 mm. Las charolas descritas anteriormente se utilizan comercialmente en la compañía Gigante Verde y Cía. S. en N. C. de C. V, en Irapuato, Gto., para la producción de plántulas de brócoli.

Los sustratos se humedecieron ligeramente con agua destilada para permitir un llenado más uniforme de las charolas. Estas, se llenaron manualmente y se presionaron ligeramente con la parte inferior de otra charola para obtener mayor uniformidad en el llenado de las celdas. Se dejó aproximadamente un cm entre la parte superior de la charola y la superficie del sustrato, con el fin de hacer la siembra lo más uniforme posible. Se sembraron 48 celdas por repetición (dos repeticiones por charola) con dos semillas por celda. Se dejaron diez hileras de la charola como espacio libre entre sustratos en cada charola. Se utilizó el cv. híbrido de brócoli Patriot (Sakata Seeds). La semilla se tapó con vermiculita de tamaño mediano hasta llenar la charola. El experimento se estableció con 13 sustratos y cuatro repeticiones en un diseño de bloques al azar. La siembra del experimento se hizo el 13 de abril del año 2004.

7.2.4 Propiedades químicas iniciales de los sustratos

7.2.4.1 Mojabilidad

La mojabilidad es una propiedad física de un sustrato, principalmente orgánico, con la que se estima la capacidad de absorber humedad en relación con el tiempo en minutos, generalmente 10 mL de agua destilada. El nivel óptimo es igual o inferior a 5 minutos (Abad *et al.*, 1996).

Sin embargo, por no disponer de medios para la realización de alguna de las metodologías más sofisticadas, reportadas en la literatura para evaluar esta variable, la mojabilidad de los sustratos se realizó de acuerdo con lo siguiente.

7.2.4.1.1 Mojabilidad sin agitación

Se midieron 20 mL de sustrato de sustrato seco (aproximadamente 2 g para el caso de los sustratos de paja de trigo) y se colocaron en frascos de 100 mL. Se adicionaron 10 mL de agua destilada y se dejó reposar el sistema frasco – sustrato - agua (relación 1: 2; sustrato: agua). El punto final de la absorción del agua adicionada se determinó cuando no se observó agua libre en el sistema (absorción total del agua adicionada por el sustrato). El tiempo transcurrido desde la adición del agua hasta la absorción total de la misma se registró en minutos con un cronómetro (Abad *et al.*, 1996).

7.2.4.1.2 Mojabilidad con agitación

Esta prueba se realizó tomando en consideración que en condiciones comerciales, los sustratos con base en turba primeramente se humectan o mojan adicionando agua y se agitan manualmente o mecánicamente para que absorban el agua, y posteriormente se colocan en las cavidades de las charolas.

Para esta prueba también se midieron 20 mL de sustrato y se adicionaron 10 mL de agua destilada. Inmediatamente el sistema agua-sustrato se agitó con una varilla de vidrio. El punto final de la absorción total del agua adicionada se determinó cuando no se observó agua libre en el sistema. El tiempo transcurrido desde la adición del agua hasta la absorción total de la misma se registró en segundos con un cronómetro.

Las dos variables anteriores se analizaron en un diseño completamente al azar con 13 tratamientos y tres repeticiones, y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.4.2 Concentración inicial de nutrimentos solubles

Se midieron 20 mL de sustrato y se colocaron en un frasco de vidrio de 100 mL. Se adicionaron 40 mL de agua destilada y se dejaron reposar por una hora.

Después el extracto se filtró con embudo y papel filtro. Se cuantificaron los siguientes nutrientes: P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn y B, por espectroscopia de emisión acoplada a plasma en un equipo ICP-AES Plasma 96 de Varian.

7.2.4.3 pH, conductividad eléctrica y concentración de fenólicos solubles totales

Los sustratos en las charolas, se regaron con agua destilada con una aspersora manual hasta “capacidad de contenedor”, y se dejaron reposar por una hora, posteriormente se adicionaron 5.0 mL de agua destilada (relación 1: 1.7 agua: sustrato; v/v) en cada una de cuatro celdas, y los lixiviados se colectaron en bolsas de plástico pequeñas. Los lixiviados de cada una de las celdas de cada sustrato se mezclaron y en esta solución se determinaron el pH, la conductividad eléctrica (CE - dS m^{-1}) y la concentración de fenólicos solubles totales (CFST - mg L^{-1}) de los sustratos al inicio del experimento. La metodología para la cuantificación de las CFST se describió en capítulos anteriores. Estas variables se analizaron por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con 13 tratamientos y cuatro repeticiones y la comparación entre medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

Después de tomar las muestras para la cuantificación del pH, la CE y la CFST, las charolas con los sustratos se regaron con agua a pH 5.5, se cubrieron con un plástico negro y se pusieron en la sombra hasta un poco antes de la emergencia de las plántulas. Las charolas se regaron una vez más, con agua a pH 5.5 antes de la emergencia de las plántulas.

7.2.4.4 Materia orgánica

Con la finalidad de cuantificar la posible degradación biológica de los sustratos de paja de trigo, en el transcurso del experimento, se determinaron en los 13 sustratos el contenido inicial y final de materia orgánica. La metodología para la cuantificación de esta variable se describió en el Capítulo V.

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con 13 tratamientos y cuatro repeticiones, y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.4.5 Capacidad de intercambio catiónico

La cuantificación de esta propiedad se realizó por medio de la metodología descrita en el Capítulo V.

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño completamente al azar con 13 tratamientos y tres repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.4.6 Contenido de C, N y relación C: N

Los datos se tomaron directamente de los resultados obtenidos en el experimento descrito en el Capítulo VI. Estas variables se analizaron por medio de un análisis de varianza de un diseño completamente al azar con 13 tratamientos y tres repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.5 Porcentaje de plántulas emergidas a los seis días después de la siembra

Se contó el número de plántulas emergidas en los sustratos a los seis días después de la siembra (6 DDS) y se calculó el porcentaje de emergencia con base en el número total de plántulas sembradas por repetición (48 plántulas). Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.6 Solución nutritiva

Los nutrimentos en los sustratos se suministraron a partir de los seis días después de la siembra con una solución nutritiva al 100 % y con un pH de 5.5. La solución nutritiva que se utilizó como fuente de nutrimentos para las plántulas de brócoli y su concentración, es la misma que se utilizó en el experimento realizado en el Capítulo V. La solución nutritiva al 100 % se suministró a todos los sustratos una vez al día. Los demás riegos (2 o 3 más dependiendo de las condiciones ambientales) se hicieron con agua acidulada a pH 5.5.

El cambio en la frecuencia de aplicación de la solución nutritiva al 100 %, se hizo asumiendo de antemano que los compuestos fenólicos presentes en los sustratos de paja de trigo parcialmente degradados (compostaje y vermicompostaje parciales) no inhiben el crecimiento de las raíces y la parte aérea de las plántulas de brócoli.

En el caso del experimento descrito en el Capítulo V se utilizó la solución nutritiva al 100 % en cada uno de los riegos, tomando como fundamento que la concentración de la solución nutritiva disminuye los efectos de inhibición de los compuestos fenólicos sobre las plántulas de brócoli.

Los últimos cinco días antes de la colecta de las plántulas, a los 30 DDS (días después de la siembra), las plántulas se regaron únicamente con agua acidulada con pH 5.5, con la finalidad de realizar el proceso de “endurecimiento” o acondicionamiento, necesario para las plántulas que se trasplantan.

7.2.7 Propiedades químicas de los sustratos a los 10, 20 y 25 DDS

Con el objetivo de cuantificar los posibles cambios de las propiedades químicas iniciales de los trece sustratos durante el experimento también se cuantificaron el pH, la CE y la CFST a los 10, 20 y 25 DDS. Los datos por sustrato se obtuvieron de las cuatro repeticiones. La metodología para obtener los extractos en donde se determinaron estas propiedades químicas fue la misma que la utilizada para obtener estas propiedades al inicio del experimento.

7.2.8 Densidad de pelos radicales a los 15, 20 y 25 DDS

A los 15 DDS, 20 DDS y 25 DDS en cinco cepellones de cada sustrato se realizaron observaciones de la densidad de pelos radicales con la ayuda de una lupa. Como las raíces de los sustratos no se habían desarrollado lo suficiente hasta los 15 DDS y 20 DDS, los cepellones se extrajeron con la ayuda de una espátula delgada. La densidad de pelos radicales presentes en las raíces que crecieron en los sustratos se evaluó de acuerdo con la siguiente escala visual:

1) alta densidad, 2) moderada densidad, 3) baja densidad y 4) nula densidad.

Una vez realizada la observación con la lupa los cepellones se regresaron a las charolas.

7.2.9 Variables evaluadas a los 30 días después de la siembra (colecta de las plántulas)

7.2.9.1 Propiedades químicas de los sustratos

7.2.9.1.1 pH y conductividad eléctrica

Procedimiento similar al señalado para la cuantificación de estas propiedades a los 0, 15, 20 y 25 DDS (cuatro repeticiones).

7.2.9.1.2 Concentración de fenólicos solubles totales

Procedimiento similar al señalado para la cuantificación de estas propiedades a los 0, 15, 20 y 25 DDS (cuatro repeticiones).

Estas tres variables, se analizaron por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con 13 sustratos y cuatro repeticiones y la comparación de

medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.9.1.3 Materia orgánica y bioestabilidad

Procedimiento similar al señalado para la cuantificación de la materia orgánica (MO) en los sustratos al inicio del experimento. Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones, y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS). La bioestabilidad de los sustratos, se calculó, dividiendo el porcentaje de MO final entre el porcentaje de MO inicial y se multiplicó por 100.

7.2.9.1.4 Capacidad de amortiguamiento del pH de los sustratos 5 y 8 de paja de trigo parcialmente degradada

Con base en los valores de pH registrados en los sustratos de paja de trigo en las fechas de muestreo durante los 30 días en que las plántulas de brócoli crecieron en los sustratos, se determinó en laboratorio la capacidad de amortiguamiento del pH de los sustratos 5 y 8.

Se midieron 20 mL de paja de cada uno de los sustratos mencionados y se colocaron en seis frascos de 100 mL y se les adicionaron 40 mL de agua desionizada con valores de pH de 7, 6, 5, 4, 3 y 2. Las lecturas de pH se registraron a las dos y 12 horas después de adicionar el agua.

También se determinó la capacidad de amortiguamiento de paja de trigo sin degradar, con extracción de fenólicos solubles y tres enjuagues, con granulometría 80-20, adicionando agua desionizada con un pH de 5.37.

Se tomaron únicamente los sustratos 5 y 8 como ejemplos de la capacidad de amortiguamiento de los sustratos de paja de trigo parcialmente degradados.

7.2.9.2 Variables evaluadas en vástagos

7.2.9.2.1 Deficiencias nutrimentales

Visualmente durante el experimento se revisaron las hojas de las plántulas que crecieron en los 13 sustratos evaluados, observando si existían deficiencias nutrimentales.

7.2.9.2.2 Lecturas SPAD

En diez plántulas tomadas al azar en cada repetición, en la hoja más desarrollada se tomaron diez lecturas con un medidor de clorofila SPAD-502. El promedio de las diez lecturas se tomó como valor de cada repetición.

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con 13 sustratos y cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.9.2.3 Longitud de vástagos

Se colectaron diez plántulas al azar de la parte central de cada bloque, de las cuales se separó el cepellón del vástago con unas tijeras, y se cuantificó en los vástagos de las plántulas de brócoli.

Esta variable se evaluó desde la inserción de la raíz en el tallo (cuello de la raíz) hasta el borde superior de la hoja más larga (cm).y se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con 13 tratamientos y cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.9.2.4 Longitud de la base a las hojas embrionarias

Con la finalidad de establecer si alguna de las variables como el pH, la

concentración de fenólicos solubles totales (CFST) y/o la conductividad eléctrica (CE), o algunas variables físicas de los sustratos de paja de trigo inhiben el crecimiento de las plántulas de brócoli dependiendo de su grado de desarrollo, se determinó la longitud de la base a las hojas embrionarias en diez plántulas con una regla común de aluminio.

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con 13 tratamientos y cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.9.2.5 Longitud de la base a la primera hoja verdadera

También con la finalidad de establecer si alguna de las variables como el pH, la CFST y/o la CE o alguna de las propiedades físicas de los sustratos de paja de trigo inhiben el crecimiento de las plántulas de brócoli dependiendo del grado de desarrollo, se determinó la longitud de la base a la primera hoja verdadera.

Se tomaron diez plántulas y con una regla común de aluminio se midió esta longitud. Las plántulas de brócoli se colectaron cuando tenían tres hojas verdaderas bien desarrolladas y venía emergiendo la cuarta hoja verdadera.

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con 13 tratamientos y cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.9.2.6 Diámetro de tallo

Esta variable se evaluó a los dos o tres mm abajo de las hojas embrionarias de la plántula (mm) y se midió con un vernier digital.

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con 13 tratamientos y cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.9.2.7 Peso de materia seca de vástagos

Se tomaron los diez vástagos de las diez plántulas de brócoli colectadas, se introdujeron en una bolsa de papel previamente identificada por tratamiento y repetición, y se pusieron en una estufa a 105 °C para su secado hasta peso constante. Se pesó la materia seca (g).

Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con 13 tratamientos y cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

Con la finalidad de explicar mejor el fenómeno de la posible inhibición de los compuestos fenólicos presentes en los sustratos de paja de trigo sobre las variables de crecimiento en las plántulas de brócoli, se corrieron análisis de regresión simple y múltiple tomando como variables dependientes la longitud de plántula, el diámetro y el peso de materia seca de vástago y como variables independientes el pH, la CE y la CFST a los 0, 15, 20, 25 y 30 DDS. Se utilizó el paquete Statistical Analysis System (SAS) versión 6.12.

7.2.9.3 Variables evaluadas en raíces

En las diez plántulas colectadas para la determinación de las variables en los vástagos, estos se separaron de la raíz, cortando en la base con tijeras y se evaluaron el volumen de raíz y el peso seco de raíces.

7.2.9.3.1 Volumen de raíces

Los cepellones de las plántulas de brócoli se lavaron en el chorro de la llave de agua para desprender las partículas de sustrato y dejar únicamente las raíces de las plántulas. Cada una de las raíces de los cepellones se secó ligeramente con un papel absorbente limpio y se introdujeron a una probeta de 10 mL en donde se registro el incremento en el volumen inicial del agua (mL) contenida en la probeta. Esta variable se analizó por medio de análisis de varianza de un diseño de

bloques al azar con 13 tratamientos y cuatro repeticiones y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.9.3.2 Peso de materia seca de raíces

Las raíces de las plántulas de brócoli libres de partículas de sustrato, después de que se les midió el volumen, se secaron ligeramente con un papel absorbente y se pusieron en una bolsa pequeña de papel y se secaron a 105 °C hasta peso constante. Las diez raíces secas de las cuatro repeticiones de los 13 sustratos se pesaron. Los datos se analizaron por medio de un análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con 13 tratamientos y cuatro repeticiones, y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS). Se realizaron análisis de regresión simple y múltiple tomando como variables dependientes el volumen de raíz y el peso de materia seca de raíces y como variables independientes el pH, la CE y la CFST a los 0, 15, 20, 25, y 30 DDS. Se utilizó el paquete Statistical Analysis System (SAS) versión 6.12.

7.2.9.3.3 Relación peso de materia seca de vástagos/ peso de materia seca de raíces

Con los datos del peso de materia seca de diez vástagos y peso de materia seca de diez raíces se calculó la relación entre estas dos variables. Los datos se analizaron por medio de un análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con 13 sustratos y cuatro repeticiones, y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

7.2.10 Variables cualitativas determinadas en raíces y en sustratos a los 30 DDS

7.2.10.1 En raíces

7.2.10.1.1 Color de raíces

Esta variable se calificó visualmente por medio de la extracción manual de cinco plántulas extras a las diez utilizadas para evaluar el desarrollo de las plántulas, por medio de la siguiente escala:

- 1) blancas, 2) ligeramente amarillas y 3) café-amarillento

7.2.10.1.2 Densidad de pelos radicales

Después de extraer el cepellón, este se llevó a un estereoscopio para observar la densidad de pelos radicales presentes en las raíces que crecieron en los sustratos evaluados de acuerdo con la siguiente escala visual:

- 1) alta densidad, 2) moderada densidad, 3) baja densidad y 4) nula densidad

7.2.10.1.3 Facilidad para extraer el cepellón

Esta variable se calificó también en las cinco plantas tomadas para evaluar la variable anterior, utilizando la siguiente escala: 1) fácil de extraer, 2) moderadamente fácil de extraer y 3) difícil de extraer. La evaluación de esta variable se realizó después de un riego con agua corriente.

7.2.10.2 En sustratos

7.2.10.2.1 Degradación microbiológica

Para la cuantificación de esta variable, se tomaron tres cepellones por repetición en cada tratamiento, los cuales se secaron en una estufa a 80 °C; una vez secos, los cepellones se abrieron con los dedos por uno de sus lados y se desmenuzaron, evitando que el sustrato llevara raíces secas y se mezclaron para obtener una muestra homogénea. Se tomó una muestra de 0.1 g de sustrato, y se distribuyó primeramente en el campo visual del estereoscopio en el aumento de menor magnitud y posteriormente se observó con los de mayor magnitud. La evaluación se hizo con la siguiente escala visual:

- 1) degradación poco apreciable (1-5 %), 2) degradación muy moderada (5-15 %), 3) degradación moderada (15-25 %), 4) degradación intensa (25-35 %), 5) degradación muy intensa (>35 %), y se estimó sobre el área total de los tejidos de las partículas del sustrato, tomando como patrón o referencia la paja de trigo con granulometría 80-20 sin degradación.

Las variables cualitativas únicamente se reportan de acuerdo a la calificación asignada en la escala utilizada.

7.2.11 Análisis químico de vástagos

Para realizar el análisis químico del tejido de los vástagos, estos una vez secos, se molieron en un mortero de porcelana con pistilo, hasta dejar las partículas de tejido reducidas a polvo y se homogeneizaron en una pequeña bolsa de plástico. Para evitar realizar los análisis en las cuatro repeticiones, se mezclaron las repeticiones 1 y 2 y las repeticiones 3 y 4 de cada tratamiento para formar únicamente las repeticiones 1 y 2. De aquí se tomaron 0.1 g para el análisis de N y

0.5 g para el análisis de otros nutrimentos (P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn y B). El método para el análisis de N total en el tejido molido fue el propuesto por Bremner y Mulvaney (1982).

Para la determinación de los otros nutrimentos se siguió el procedimiento de digestión húmeda convencional (Alcántar y Sandoval, 1999) y se cuantificaron por espectroscopia de emisión acoplada a plasma en un equipo ICP-AES Plasma 96 de Varian.

Los datos se analizaron por medio de un análisis de varianza de un diseño de bloques al azar con 13 tratamientos y dos repeticiones, y la comparación de medias se hizo con la prueba de Tukey con una $\alpha = 0.05$ (DHS).

Todos los análisis de varianza, las comparaciones entre medias, las correlaciones y regresiones simples o múltiples que se realizaron se hicieron con el paquete de Software SAS (Statistical Analysis System) versión 6.12.

7.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

7.3.1 Propiedades físicas iniciales de los sustratos

7.3.1.1 Densidad aparente, densidad real y porosidad total

La densidad aparente, la densidad real y la porosidad total determinadas en los sustratos se presentan en el Cuadro 2.

La densidad “aparente” de un sustrato se define como la masa o peso de las partículas contenidas en un volumen determinado (g cm^{-3} , kg m^{-3} , etc.) y su valor depende de lo compacto o suelto que se encuentre el sustrato en un contenedor.

De acuerdo con el análisis de varianza hubo diferencias altamente significativas entre los sustratos evaluados para esta variable determinada en probeta ($P > F = 0.0001$). El sustrato Sunshine 3 fue el que presentó la mayor DA (0.1536 g cm^{-3}) seguido en segundo lugar por el sustrato Sogemix VT-M (0.1430 g cm^{-3}), ambos

utilizados como testigos, y estadísticamente iguales entre sí, e iguales también a los sustratos 5 y 6 de paja de trigo con degradación biológica por 90 días.

Cuadro 2. Densidad aparente, densidad real y porosidad total de 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot.

Sustrato	DA	DR	PT
	gr cm ⁻³	gr cm ⁻³	%
1	0.1003 c	1.5391 h	93.47 a
2	0.1033 bc	1.5431 gh	93.29 a
3	0.1126 bc	1.5991 cd	92.95 a
4	0.1070 bc	1.5758 e	93.20 a
5	0.1297 ab	1.6078 c	91.97 ab
6	0.1274 abc	1.6079 c	92.06 ab
7	0.1048 bc	1.5718 e	93.32 a
8	0.1046 bc	1.5915 d	93.42 a
9	0.1060 bc	1.5752 e	93.42 a
10	0.1042 bc	1.5525 gf	91.99 ab
11	0.1046 bc	1.5607 f	93.29 a
12 (Sogemix VT-M)	0.1430 a	1.7944 a	92.02 ab
13 (Sunshine 3)	0.1536 a	1.6426 b	90.64 b
P> F	0.0001	0.0001	0.0001
DHS	0.0281	0.0098	1.7797

DA = densidad aparente; DR = densidad real; PT = porosidad total. DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Las DA en los sustratos 1 y 2 de paja de trigo sin degradar fueron de 0.1003 g cm⁻³ y 0.1033 g cm⁻³ respectivamente, y fueron estadísticamente diferentes a las DA de los sustratos testigos. Se observa también que la DA en los sustratos de paja de trigo sin degradar aumenta en relación con el incremento en la proporción de partículas menores de 1.0 mm y mayores e iguales a 0.5 mm. Este comportamiento se debe a que al incrementarse las proporciones del segundo de

los componentes, se incrementa el peso en el mismo volumen, por lo que la DA también se incrementa.

Los sustratos derivados de paja de trigo con algún grado de descomposición (90 días ó 15 días) presentaron DA estadísticamente iguales entre sí y la mayoría de ellos, con excepción del sustrato 5, tuvieron DA estadísticamente iguales a las DA que presentaron los sustratos 1 y 2 constituidos por paja de trigo sin degradar. Lo anterior establece que la mayoría de los sustratos que tuvieron degradación biológica por 90 días, no presentaron una degradación estadísticamente significativa con respecto a las pajas sin degradar.

Los sustratos 5 y 6 presentaron las mayores DA entre los sustratos de paja de trigo con 90 días de degradación. La diferencia estadística en la DA de estos sustratos con respecto a los otros de paja de trigo pudo haber sido consecuencia de una mayor degradación de estos materiales con respecto a sus similares de paja de trigo con 90 y 15 días de degradación biológica. De acuerdo con datos del porcentaje de materia orgánica presentados en el Cuadro 7, los sustratos 5 y 6 fueron los que presentaron la mayor pérdida de materia orgánica, ambos con 84.54 % de MO, porcentaje menor que los demás sustratos de paja de trigo con menor degradación.

Lo anterior sugiere que al haber mayor degradación en los sustratos 5 y 6, el número de partículas que caben en un determinado volumen se incrementa, aumentando por lo tanto la DA de estos sustratos.

La mayor DA de los sustratos testigos con respecto a los sustratos de paja de trigo es consecuencia de una mayor proporción de partículas de tamaño más pequeño contenidas en estos, lo cual se relaciona directamente con la granulometría. Los sustratos de paja de trigo no tienen partículas menores de 0.5 mm.

La densidad real (DR) de un sustrato se define como la masa o peso de sus partículas en un volumen determinado, sin tomar en consideración el espacio poroso. La DR de los sustratos se presenta también en el Cuadro 2.

Hubo diferencias altamente significativas entre los sustratos en esta variable ($P > F = 0.0001$). Los sustratos que presentaron las mayores densidades reales fueron los testigos, lo cual se explica porque estos contienen altos porcentajes de

partículas menores de 0.5 mm (Cuadro 1). El Sogemix VT-M tuvo mayor DR que el Sunshine por tener mayor proporción de partículas menores de 0.5 mm. Los sustratos 1 y 2 de paja de trigo incrementaron su DR en la medida en que aumentó el porcentaje de partículas menores de 1.00 mm e iguales a 0.5 mm, debido al mayor número de partículas en un mismo volumen. En los sustratos de paja de trigo con degradación biológica también hubo diferencias significativas, presentando menores DR que los sustratos testigos.

Tomando en consideración los valores de DA y DR de los sustratos, se determinó la porosidad total (Cuadro 2). El análisis de varianza para la porosidad total (PT), indica que existen diferencias altamente significativas entre los sustratos ($P > F = 0.0001$). Con excepción del testigo Sunshine 3, que presentó la menor PT (90.64 %), todos los demás sustratos fueron estadísticamente iguales entre sí, presentando PT en el intervalo de 91.97 % en el sustrato 5 y 93.47 % en el sustrato 1, con una diferencia de 1.5 %.

La PT de los sustratos 1 y 2 de paja de trigo en este experimento fueron muy similares a los valores reportados en el Capítulo V.

7.3.1.2 Propiedades físicas iniciales determinadas en los sustratos utilizando embudos de succión y columnas colgantes

7.3.1.2.1 Porosidad total

Los resultados del análisis de varianza y la comparación entre medias de las propiedades físicas determinadas en los embudos de succión con columnas colgantes se presentan en el Cuadro 3. Las propiedades físicas de los sustratos 1 y 2 se tomaron de los resultados de estos sustratos obtenidos por la misma metodología del experimento descrito en el Capítulo V.

Los valores mayores de PT se obtuvieron en los sustratos 1 y 2 de paja de trigo sin degradar, siendo estadísticamente diferentes a los sustratos testigos y a cinco de los seis sustratos que tuvieron degradación biológica por 90 días, exceptuando el sustrato 6, que fue estadísticamente igual. Los sustratos de paja de trigo con 15

Cuadro 3. Propiedades físicas de 13 sustratos, obtenidas en embudos de succión y columnas colgantes. Experimento de crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot.

	PT	ES	PA	AFD	AR	ATD	ADD	PAGUA
Sustrato	% base en volumen							
1	93.20 a	6.80 e	6.39 a	38.47 abcd	8.38 b	46.85 a	39.96 a	86.81 abc
2	92.30 abc	7.70 cde	5.00 ab	33.93 cd	7.20 b	41.13 a	46.17 a	87.30 ab
3	89.50 e	10.50 ab	6.00 a	38.19 abcd	7.93 b	46.12 a	37.38 a	83.50 d
4	90.75 cde	9.25 abc	5.50 a	36.00 abcd	7.00 b	43.00 a	42.25 a	85.25 bcd
5	91.10 bcde	8.90 bcd	5.26 a	36.25 abcd	6.75 b	43.00 a	42.84 a	85.84 abcd
6	91.50 abcd	8.50 bcd	6.02 a	39.45 ab	6.47 b	45.92 a	39.56 a	85.48 bcd
7	90.25 de	9.75 abc	6.25 a	34.34 bcd	6.36 b	40.70 a	43.30 a	84.00 cd
8	90.00 de	10.00 ab	5.70 a	39.84 a	6.70 b	46.54 a	37.76 a	84.30 bcd
9	93.05 a	6.95 e	5.72 a	38.47 abcd	7.87 b	46.34 a	40.99 a	87.33 ab
10	93.00 a	7.00 e	6.20 a	39.00 abc	7.97 b	46.97 a	39.83 a	86.80 abc
11	92.84 ab	7.16 de	6.90 a	37.85 abcd	8.12 b	45.97 a	39.97 a	85.94 abcd
13 Sogemix VT-M	89.25 e	10.75 a	2.93 bc	33.50 d	9.75 b	43.25 a	43.07 a	86.32 abcd
14 Sunshine 3	89.75 de	10.25 ab	0.96 c	33.84 cd	14.15 a	47.99 a	40.80 a	88.79 a
P>F	0.0001	0.0001	0.0001	0.004	0.0001	0.099	0.127	0.001
DHS	1.87	1.82	2.30	5.42	3.67	8.20	8.46	3.29

PT = porosidad total; ES = espacio sólido; PA = porosidad de aire; AFD = agua fácilmente disponible; AR = agua de reserva; ATD = agua total disponible; ADD = agua difícilmente disponible; PAGUA = porosidad de agua; DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

días de degradación microbiológica presentaron estadísticamente la misma porosidad total que los sustratos 1 y 2 sin degradación biológica.

Lo anterior, sugiere que la degradación parcial de los sustratos de paja de trigo por 15 días no fue suficiente para causar cambios en los tejidos de la paja de trigo, de tal manera que influyera en la porosidad total de estos sustratos.

Exceptuando el sustrato 6, los sustratos con 90 días de degradación microbiológica fueron estadísticamente diferentes a los sustratos de paja de trigo sin degradación biológica en la PT, presentando un intervalo entre 89.50 % en el sustrato 3 y 91.10 % en el sustrato 5. El sustrato 6 presentó 91.50 % de PT.

Lo anterior sugiere que en la mayoría de los sustratos de paja de trigo con 90 días de degradación biológica, esta, influyó significativamente en la PT de los sustratos, disminuyéndola con respecto a sus similares de paja de trigo sin degradar.

Los sustratos Sogemix VT-M y Sunshine, presentaron las menores PT entre los sustratos evaluados (Cuadro 3), sin embargo, fueron estadísticamente iguales a las presentadas por algunos de los sustratos con degradación biológica por 90 días. Las PT de los sustratos se presentaron en el intervalo de 93.20 % en el sustrato 1 y 89.25 % en el sustrato Sogemix VT-M.

Comparando las PT obtenidas por medio de la fórmula utilizando las densidades aparentes y reales con las obtenidas por medio de los embudos de succión y columnas colgantes, se observa que son similares, con una diferencia máxima de 3.45 % en el sustrato 3. La PT determinada por medio de los embudos de succión y columnas colgantes en todos los casos fue menor que la obtenida utilizando la DA y DR. La razón de esta diferencia pudo haber sido que al colocar los sustratos en los embudos de succión se aplicó una ligera presión para acomodar el sustrato, disminuyendo ligeramente la porosidad total de los sustratos.

7.3.1.2.2 Espacio sólido

El espacio sólido (ES) es simplemente el espacio que realmente ocupan las partículas, sin tomar en consideración los espacios ocupados por poros (macroporos

y microporos). Este valor es complementario al obtenido de la porosidad total, el cual describe la relación entre ellos en un volumen determinado.

Al contrario de los valores de PT, los mayores porcentajes de espacio sólido se presentaron en los sustratos testigos y en los sustratos 3, 4, 7 y 8 con degradación por 90 días, siendo estadísticamente iguales entre sí, y los menores en los sustratos 1 y 2 y en los sustratos 9, 10 y 11 con degradación biológica por 15 días. La degradación microbiológica por 90 días de los sustratos 3, 4, 7 y 8, aunque se estima que fue muy reducida (ver propiedades químicas iniciales de los sustratos), si influyó de manera significativa en el espacio sólido que presentaron estos sustratos con respecto a los sustratos 1 y 2 sin degradación y los sustratos 9, 10 y 11 con 15 días de degradación microbiológica, aunque varios de ellos fueron estadísticamente iguales a los porcentajes de ES presentados por los sustratos testigos. El intervalo de valores de ES en los sustratos evaluados se encuentra entre 10.75 % en el sustrato Sogemix VT-M y 6.80 % en el sustrato 1 (Cuadro 3).

7.3.1.2.3 Porosidad de aire

La porosidad de aire (PA) o capacidad de aireación de un sustrato se entiende como el espacio ocupado por aire, después de que este ha sido saturado con agua y posteriormente se deja drenar libremente. Este espacio se encuentra ocupado por macroporos que no retienen el agua. Lo anterior, equivale al volumen de agua que se libera al aplicar una tensión de 10 cm de columna de agua (-1 kPa = -1 kilopascal) sobre el sustrato contenido en los embudos de succión, o bien equivale al porcentaje de aire en volumen que queda en el espacio del agua desplazada.

La capacidad de aireación es una de las propiedades físicas más importantes en un sustrato, debido a que el proceso de respiración de las raíces de las plantas se encuentra relacionado directamente con la concentración de O₂ presente, primeramente en la fase gaseosa y posteriormente este O₂ se difunde hacia la fase líquida, de la cual las raíces de las plantas lo obtienen para su respiración (Burés, 1997; Baas *et al.*, 2000).

El análisis de varianza de esta variable (Cuadro 3) muestra que todos los sustratos de paja de trigo, estadísticamente, presentaron la misma porosidad de aire, sugiriendo que la degradación biológica parcial por 15 o 90 días de los sustratos de paja de trigo, no influyó significativamente sobre esta variable, indicando que la PA es determinada por el arreglo o empaquetamiento de las partículas, y no por la microporosidad que se encuentra dentro de las partículas, que fue en donde se presentó la mayor degradación parcial de algunos tejidos de la paja de trigo (contenido de celulosa, hemicelulosa y lignina, Capítulo VI).

Con excepción del sustrato 2 de paja de trigo con granulometría 60-40, los demás sustratos de paja de trigo tuvieron granulometría 80-20. La PA presentada por los sustratos testigos fue menor y significativamente diferente a la PA de la mayoría de los sustratos de paja de trigo.

Entre todos los sustratos evaluados el Sunshine 3 fue el que presentó la menor PA (0.96 %), esto se explica por la alta proporción de partículas menores de 0.5 mm con base en peso seco. El intervalo de PA determinado en los sustratos de paja de trigo fue entre 5 % en el sustrato 2 y 6.90 % en el 11.

De Boodt y Verdonck (1972) establecieron que un “sustrato ideal” para plantas ornamentales debe de tener una porosidad total igual o superior al 85 %, una capacidad de aireación entre 20 % y 30 %, agua fácilmente disponible entre 20 % y 30 %, mientras que el volumen de agua de amortiguamiento tiene que ser pequeño (entre 4 % y 10 %), el resto de la humedad pertenece al agua difícilmente disponible. Lo anterior, lo establecieron estos autores para macetas de 10 cm de altura y para plantas ornamentales, en donde las raíces permanecen en el sustrato una buena parte de su ciclo de vida, además de que estos valores se obtuvieron para las condiciones de Gante en Bélgica.

Sin embargo, con los resultados de las variables de crecimiento que se muestran posteriormente, se considera cuestionable que estos valores se tomen como referencia de ser adecuados tanto para sustratos utilizados en la producción de hortalizas en invernadero en donde se utilizan contenedores de mayores dimensiones que las dimensiones del contenedor especificado por estos autores, como para sustratos utilizados en celdas o alvéolos para la producción de plántulas para

trasplante (Muratalla, 2003; Rodríguez, 2004).

De acuerdo con Anon (1990), en la norma British Standard BS 4156 se recomienda que los sustratos con base en turba para la producción de plantas de temporada en alvéolos y sustratos de semillero tengan una porosidad de aire entre 5 % y 11 %, teniendo precaución para evitar el sobre riego. Menciona además que estos valores han sido calibrados por medio de la experiencia de agricultores y técnicos y se han distribuido en aplicaciones tanto en campo como en laboratorio. La norma antes citada presenta valores de PA diferentes a los señalados por De Boodt y Verdonck (1972), con relación a la porosidad de aire.

En México, es importante tomar también con precaución los valores de la norma inglesa, debido a que las condiciones del Reino Unido son diferentes. Es probable, que debido a que la mayor parte del año en el Reino Unido tienen condiciones de nubosidad, las plántulas tengan menores tasas de evapotranspiración, con lo cual, si las raíces de las plantas están sujetas a altos contenidos de humedad en el sustrato por un tiempo largo, las raíces pueden tener problemas de respiración (falta de O₂), por lo tanto, se necesitan sustratos con capacidades de aireación mayores a las que pueden requerir las raíces de las plántulas en las condiciones de México, para realizar la respiración. Se asume que la tasa de respiración de las raíces y la transpiración de las plántulas en el Reino Unido son menores que en México.

Al respecto, se reporta que el consumo medio de agua en el mes de junio por plantas de jitomate en plena producción en el Reino Unido (1978 y 1996) y en el sur de España fueron de 1.58 L⁻¹ planta día⁻¹ (1978), 1.33 L⁻¹ planta día⁻¹ (1996), y 2.25 L⁻¹ planta día⁻¹ respectivamente debido a la evapotranspiración (Salas y Urrestarazu, 2000), esto, demuestra que las tasas de evapotranspiración son diferentes en ambientes distintos.

De acuerdo con lo anterior, es muy probable que las raíces de las plántulas y las plántulas en general en México, funcionen adecuadamente en sustratos con porosidades de aire menores que las reportadas en la norma BS 4156, por la razón de que la tasa de intercambio de gases entre el sustrato y la atmósfera en México se puede dar con mayor rapidez que en el Reino Unido.

De Boodt y Verdonck (1972) mencionan que las raíces de las plantas ornamentales

deben de encontrar en el sustrato una gran cantidad de agua fácilmente disponible en los poros y al mismo tiempo un gran volumen de aire en contacto con la atmósfera libre, por lo que es necesario tener una buena proporción aire: agua, la cual está en función de la planta a cultivar.

Por ejemplo, se tiene la PA de los testigos Sogemix VT-M y Sunshine 3 con valores promedio de 2.96 %, y 0.96 % con base en volumen (Cuadro 3), los cuales, de acuerdo con los lineamientos señalados por la norma BS 4156 (1990), podrían considerarse como sustratos no aptos para ser usados en la producción de plántulas en alvéolos, sin embargo, en las condiciones en donde se evaluó este sustrato (Montecillo, Texcoco, Edo. de México), estas porosidades de aire fueron suficientes para proporcionar buen crecimiento a plántulas de brócoli en este experimento (Cuadros 13 y 14). Por otro lado, probablemente, la proporción de aire en volumen de estos sustratos en la celda de una charola en condiciones comerciales, sea menor a los valores determinados en los embudos y columnas colgantes, porque los sustratos en las celdas se introducen con presión, con la finalidad de que la celda quede completamente llena y sin grandes espacios de aire, para obtener una uniformidad del sustrato en la celda. También se puede pensar que la PA de los sustratos Sogemix VT-M y Sunshine 3, bajo condiciones normales de manejo puede ser mayor a la calculada, por la razón de que los sustratos no llegan a saturarse completamente.

Asimismo, es conveniente considerar la porosidad de fractura, especialmente en sustratos contenidos en alvéolos, en la interfase sustrato-contenedor y en planchas de cultivo (Burés, 1997).

Con excepción de los valores de 2.93 % en el sustrato Sogemix y de 0.96 % en el sustrato Sunshine 3, todos los demás, presentaron valores en el intervalo señalado por la norma BS 4156.

Se menciona también que sustratos con valores de porosidad de aire menores a 7.0 % se pueden utilizar para plantas de ciclo corto en maceta y para plantas de temporada, teniendo cuidado de regar cuidadosamente, especialmente en condiciones de baja transpiración (Bragg y Chambers, 1987, citados por Ansorena, 1994).

De acuerdo con lo señalado por De Boodt y Verdonck (1972), los valores de porosidad de aire o capacidad de aireación encontrados en los sustratos evaluados no serían adecuados para el crecimiento ideal de las plántulas de brócoli, porque muestran valores muy bajos, sin embargo, en la práctica las raíces de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos testigos (sin efecto de compuestos fenólicos) no presentaron problemas de anoxia, mostrando raíces blancas y vigorosas.

7.3.1.2.4 Agua fácilmente disponible

Hubo diferencias significativas ($P > F = 0.004$) entre los sustratos en el contenido de agua fácilmente disponible (AFD) (Cuadro 3). Los sustratos 6, 8 y 10 de paja de trigo tuvieron los mayores contenidos de AFD y fueron significativamente diferentes a los sustratos testigos.

Exceptuando a los sustratos de paja de trigo señalados anteriormente, los demás sustratos de paja de trigo fueron estadísticamente iguales a los testigos en el contenido de AFD. Este parámetro (AFD) se concibe como el porcentaje de agua con base en peso o volumen que se libera de un sustrato al aplicar una tensión de 50 cm de columna de agua (-5 kPa), después de aplicar una tensión de 10 cm de columna de agua, partiendo del nivel medio del sustrato en el embudo, utilizando el método de columnas colgantes.

De Boodt y Verdonck (1972), establecieron el intervalo de tensiones entre 10 y 50 cm de columna de agua como el adecuado para que el agua de un sustrato pueda ser absorbida por las raíces de las plantas con la menor inversión de energía y para que puedan desarrollarse sin problemas de disponibilidad de agua. Lo anterior, indica que esta agua no se encuentra fuertemente adherida o retenida por el sustrato, ocupando macroporos no percolantes ($> 416 \mu$), principalmente interparticulares. Asimismo, señalan que el AFD debe ocupar entre 20 % y 30 % del volumen total ocupado por el sustrato y debe representar entre 75 % y 90 % del agua total disponible (De Boodt y Verdonck, 1972).

Los contenidos de AFD obtenidos en los sustratos sobrepasan el valor de 30 %

(Cuadro 3).

Es importante mencionar que el volumen en el que se desarrolla una plántula en una celda de una charola es muy pequeño; en el presente trabajo se utilizaron charolas con celdas de 8.5 mL. Si tenemos que el sustrato Sogemix VT-M posee una cantidad de AFD de 33.50 %, en la celda de la charola tendríamos 2.84 mL de AFD, mientras que siguiendo el valor de referencia de 20 % a 30 % de AFD tendríamos como máximo 2.55 mL. El 20 % o 30 % de AFD que señalan los autores es suficiente o no para un cultivo determinado, dependiendo del volumen del contenedor. Un sustrato en una maceta de 15 L con una capacidad de AFD de 30 %, tendría disponible 4.5 L de agua.

Los sustratos Sogemix VT-M y Sunshine 3, poseen poros más pequeños que hacen que el agua fácilmente disponible no se encuentre en las mismas proporciones que en el caso de los demás sustratos, aunque sus medias fueron iguales estadísticamente a varios de los sustratos de paja de trigo.

7.3.1.2.5 Agua de reserva

El agua de reserva (AR) o de amortiguamiento se entiende como el porcentaje de agua en volumen que se libera de un sustrato al aplicar tensiones mayores de 50 cm y hasta 100 cm de columna de agua (-5 kPa y -10 kPa). Las plantas pueden obtener agua adicional cuando la succión se realiza arriba de 50 cm de columna de agua (-5 kPa), el agua de amortiguamiento es considerada una medida de la reserva de agua en el sustrato, necesaria cuando ocurren ondas repentinas de calor, trayendo como consecuencia una muy intensa transpiración (De Boodt y Verdonck, 1972). El AR en un sustrato debe representar al menos entre el 4 % y 5 % del volumen con la finalidad de que esta sea óptima. El tamaño de los poros en los cuales se aloja el agua de reserva es menor en relación con los poros en donde se aloja el agua fácilmente disponible. El tamaño de los poros (mesoporos) se encuentra entre 416 μ y 10 μ . (Drzal *et al.*, 1999).

El análisis de varianza para esta variable (Cuadro 3), muestra que existen diferencias altamente significativas entre los sustratos evaluados ($P > F = 0.0001$). Todos los

sustratos tuvieron estadísticamente el mismo contenido de AR, exceptuando al sustrato Sunshine 3, que presentó el mayor porcentaje de AR (14.15 %). El intervalo de AR en los sustratos que fueron estadísticamente iguales entre sí, fue entre 6.36 % en el sustrato 7 y 8.38 % en el sustrato 1, ambos de paja de trigo, valores de AR ligeramente superiores a los señalados por De Boodt y Verdonck (1972).

7.3.1.2.6 Agua total disponible

El agua total disponible es simplemente la suma del AFD y el AR. En el Cuadro 3, se muestran los resultados de esta variable. De acuerdo con el análisis de varianza no hubo diferencias significativas entre los sustratos ($P > F = 0.099$). Las medias de ATD de todos los sustratos fueron estadísticamente iguales entre sí. El intervalo de valores de ATD en los sustratos se encuentra entre 40.70 % en el sustrato 7 y 47.99 % en el sustrato Sunshine 3.

El conocimiento del porcentaje de agua total disponible es importante, ya que afecta la frecuencia de riego, que puede espaciarse a medida que aumenta el valor de agua disponible (Ansorena, 1994). La producción de plántulas con sustratos en contenedores, en volúmenes reducidos, exige la aplicación de agua con cierta frecuencia (de dos a cuatro riegos diarios, dependiendo del ambiente).

7.3.1.2.7 Agua difícilmente disponible

El agua difícilmente disponible (ADD) se define como el porcentaje de agua en volumen, retenida en el sustrato después de aplicar una tensión de 100 cm de columna de agua (-10 kPa). El ADD se encuentra almacenada en poros de menor tamaño (microporos $< 30 \mu$), localizados en los espacios interparticulares de partículas muy pequeñas ($< 0.5 \text{ mm}$) y en los espacios intraparticulares de las mismas (porosidad abierta). Este volumen de agua se encuentra fuertemente retenido por el sustrato, de tal manera que para ser obtenida por las raíces de las plántulas es necesario invertir mayor cantidad de energía en relación con el AFD o el AR.

De acuerdo con los resultados presentados en el Cuadro 3, no hubo diferencia significativa en esta variable entre los sustratos ($P > F = 0.127$). Todos ellos presentaron estadísticamente el mismo contenido de ADD, mostrando que aunque los sustratos de paja de trigo tienen únicamente partículas superiores a 0.5 mm (mayor porosidad interparticular), también poseen un alto porcentaje de porosidad interna abierta (microporos intraparticulares), lo cual hace que una proporción importante del agua en el sustrato no esté disponible para ser absorbida por las raíces de las plántulas.

Para el caso de los sustratos testigos que contienen mayores porcentajes de partículas menores de 0.5 mm, (50.52 % en el sustrato Sunshine 3 y 59.49 % en el sustrato Sogemix VT-M), era de esperarse que una alta proporción del agua retenida en estos sustratos estuviera en calidad de ADD. La contribución más importante en la proporción de ADD en los sustratos testigos se atribuye principalmente a los microporos localizados entre las partículas menores de 0.5 mm, aunque también se reporta que los musgos del género *Sphagnum* poseen un tallo y ramas constituidas por células de córtex, las cuales son hialinas y grandes en las que se almacena principalmente agua (Bold, 1989). Lo anterior, hace suponer que una parte del ADD en los sustratos testigos (turbas) se encuentra dentro de las células corticales, no estando fácilmente disponible para ser absorbida por las raíces de las plántulas.

Al igual que en el experimento descrito en el Capítulo V, se observó que las plántulas que crecieron en los sustratos testigos presentaron primeramente síntomas de deficiencia de agua en comparación con las plántulas que crecieron en cualquiera de los sustratos de paja de trigo, al menos en dos o tres ocasiones en el transcurso del experimento, indicando que los sustratos de paja de trigo proveen de mayor cantidad de AFD y AR (agua total disponible) a las plántulas de brócoli que los sustratos testigos, aunque en los resultados de ATD obtenidos por medio de embudos y columnas colgantes todos los valores hayan sido estadísticamente iguales y muy cercanos unos a otros.

También en este experimento es probable que los valores de ATD en los sustratos de paja de trigo sean mayores que los determinados por medio de embudos de succión y columnas colgantes, situación similar a lo que aconteció en el experimento

descrito en el Capítulo V, en donde se encontró que las plántulas de brócoli presentaron los primeros síntomas de deficiencia de agua en contenidos de humedad de 4.24 % con base en volumen. Este valor es mucho menor que el que se calculó por medio de las columnas colgantes correspondiente al agua difícilmente disponible en este sustrato, el cual fue de 46.17 %, lo que significa que las plántulas de brócoli aún obtienen agua sobrepasando los límites establecidos por De Boodt y Verdonck (1972).

7.3.1.2.8 Porosidad de agua

Los resultados de los valores correspondientes a la porosidad de agua se presentan también en el Cuadro 3, indicando la diferencia entre la porosidad total y la porosidad de aire, o bien el agua total retenida después de que el sustrato se satura y se deja drenar libremente. De acuerdo con el análisis de varianza para esta variable, hubo diferencias significativas entre los sustratos ($P > F = 0.001$). Desde el punto de vista práctico, esta variable no es de mucha utilidad para la interpretación de los grados de tensión con que el agua se encuentra retenida en el sustrato. Las variables más importantes se consideran la PA, AFD, AR y ATD.

7.3.2 Propiedades químicas iniciales de los sustratos

7.3.2.1 Mojabilidad

La mojabilidad es una propiedad física de un sustrato, principalmente orgánico, con la que se estima la capacidad de absorber agua en relación con el tiempo (minutos), generalmente 10 mL de agua destilada. El nivel óptimo es igual o inferior a 5 minutos (Abad *et al.*, 1996).

La característica de mojabilidad de un sustrato depende directamente de la naturaleza química de los compuestos presentes en las superficies de los sustratos. El ángulo de contacto de una gota de agua con la superficie de una partícula determina si una sustancia es hidrófila, es decir, el líquido moja al sólido (ángulo

menor de 90°) o hidrófoba (ángulo mayor de 90°). En los materiales turbosos y derivados de la madera el ángulo de contacto de una gota de agua con la superficie de las partículas suele ser mayor de 90°, y por lo tanto se consideran materiales hidrófobos (Burés, 1997; Michel *et al.*, 1999).

En el Cuadro 4, se presenta la mojabilidad de los sustratos evaluados, determinada sin agitación y con agitación en el sistema sustrato-agua destilada.

7.3.2.1.1 Mojabilidad sin agitación

El análisis de varianza indica que existe diferencia altamente significativa en la variable mojabilidad sin agitación entre los sustratos evaluados ($P > F = 0.0001$). (Cuadro 4).

El menor tiempo de mojado entre los sustratos se registró en el sustrato Sunshine 3 con un tiempo de 2.19 minutos y fue significativamente diferente a la mojabilidad registrada en los demás sustratos.

Es probable que el menor tiempo de este sustrato para absorber 10 mL de agua destilada sea consecuencia directa del humectante (hidrofílico) que se adiciona a esta turba comercial, sin embargo, otro factor que pudo haber intervenido en la rápida humectación de este sustrato es la granulometría, la cual pudo influir en la mojabilidad como consecuencia de la alta proporción de partículas menores de 0.5 mm, propiciando la capilaridad, o movimiento del agua a través de los microporos existentes entre las partículas sólidas.

Las turbas naturales se humectan muy lentamente. Los fabricantes de los sustratos con base de turba no indican en la bolsa de envasado del sustrato, o en los folletos promocionales, el tipo de humectante adicionado (patentado), ni las proporciones de este en la mezcla.

Por otro lado, el tiempo de mojabilidad del sustrato Sogemix VT-M, fue 5.33 veces mayor que el sustrato Sunshine 3. Analizando las granulometrías de los dos sustratos con base en turba, se puede sugerir que el aumento en el tiempo de mojabilidad del sustrato Sogemix VT-M con respecto al sustrato Sunshine 3, pudo haber sido consecuencia principalmente del tipo de humectante (menor capacidad

para humectar) utilizado en este sustrato y a la proporción de este en la mezcla (menor cantidad de humectante) y no tan dependiente de la granulometría.

Cuadro 4. Mojabilidad de 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot.

Sustrato	Mojabilidad sin	Mojabilidad con
	agitación	agitación
	Minutos	Segundos
1	4.22 d	10.00 b
2	3.83 de	8.33 bc
3	3.33 f	6.00 cde
4	11.47 bc	5.33 de
5	4.22 d	7.66 bcd
6	3.33 f	4.66 e
7	11.25 c	4.66 e
8	17.22 a	15.00 a
9	3.69 ef	6.00 cde
10	3.69 ef	5.33 de
11	3.74 ef	6.00 cde
12 (Sogemix VT-M)	11.69 b	10.00 b
13 (Sunshine 3)	2.19 g	5.33 de
P > F	0.0001	0.0001
DHS	0.4429	2.89

DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Los sustratos 1 y 2 de paja de trigo mostraron tiempos de mojabilidad superiores a los que presentó el sustrato Sunshine 3, pero menores al tiempo presentado por el sustrato Sogemix VT-M, con tiempos de 4.22 minutos, 3.83 minutos, y 11.69 minutos respectivamente. La diferencia en el tiempo para mojarse entre estos dos sustratos de paja de trigo sin degradar se puede explicar por la mayor proporción de partículas

menores a 1.0 mm y mayores e iguales a 0.5 mm en el sustrato 2; esto es, al aumentar la proporción de partículas más pequeñas se establece una mayor capilaridad entre las partículas del sustrato, trayendo como consecuencia un menor tiempo de mojado.

Los tiempos de mojabilidad entre los sustratos 3 y 6 de paja de trigo con 90 días de degradación biológica, fueron iguales con 3.33 minutos. Los sustratos 4 y 7 también fueron estadísticamente iguales entre sí, con 11.47 minutos y 11.25 minutos para absorber los 10 mL de agua adicionados. La igualdad en los tiempos de mojabilidad de los sustratos mencionados anteriormente puede explicarse en primer lugar por la misma granulometría y paralelamente, por aproximadamente el mismo contenido de compuestos orgánicos (celulosa, hemicelulosa, lignina u otros) como componentes estructurales de estos sustratos.

Los sustratos 5 y 8 fueron estadísticamente diferentes en los tiempos para humectarse, con 4.22 minutos y 17.22 minutos respectivamente. La diferencia entre el tiempo de mojabilidad de estos sustratos puede considerarse consecuencia de la diferencia en los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina entre los dos sustratos. De acuerdo con los resultados presentados en el Cuadro 6 del Capítulo VI, los porcentajes de celulosa, hemicelulosa y lignina del sustrato 5 fueron 48.90 %, 17.48 % y 16.59 % respectivamente (mayor porcentaje de celulosa), mientras que en el sustrato 8 fueron de 35.48 %, 15.61 % y 20.99 % (mayor porcentaje de lignina). La celulosa es un compuesto orgánico que tiene la propiedad de humectarse (Gou *et al.*, 2004; Liu, 2004) o tener higroscopicidad (Papkov, 1996), y proporcionar humedad a la atmósfera que la rodea hasta que se alcanza el equilibrio (Staniforth, 1986).

Por otro lado, la lignina es un compuesto químico que posee propiedades hidrofóbicas (Jung y Deetz, 1993; Bastos *et al.*, 2000).

Los sustratos 9, 10 y 11 de paja de trigo con 15 días de degradación microbiológica, presentaron tiempos de mojabilidad menores (3.69, 3.69 y 3.74 minutos respectivamente) y estadísticamente diferentes al sustrato 1 de paja de trigo sin degradar con granulometría 80-20, indicando que las transformaciones biológicas de los compuestos estructurales (celulosa, hemicelulosa, lignina, ceras, etc.) y/o compuestos solubles de estos sustratos fueron significativas.

De acuerdo con lo señalado por Abad *et al* (1996), los tiempos de mojabilidad de los sustratos 4, 7, 8 y del Sogemix VT-M, no se encuentran en el nivel óptimo establecido, que debe de ser menor o igual a cinco minutos, lo que de acuerdo con estos autores puede provocar un retraso y una reducción en el crecimiento de las plantas.

Esto no coincide con los resultados obtenidos en las variables de crecimiento de las plántulas de brócoli que crecieron en algunos de estos sustratos, por ejemplo, el Sogemix VT-M que tuvo el mayor tiempo de mojabilidad sin agitación, fue el que presentó uno de los mejores crecimientos, denotado por el peso de materia seca de vástagos; lo mismo se puede aplicar para el sustrato 8 de paja de trigo (Cuadro 14).

7.3.2.1.2 Mojabilidad con agitación

En condiciones de producción comercial de plántulas de brócoli o alguna otra especie de hortaliza, los sustratos con base en turba primeramente se humectan (aunque ya contienen más de 50 % de humedad con base en peso) mediante agitación o mezcla con agua, ya sea de forma manual o mecánica, hasta alcanzar un contenido de humedad suficiente (aproximadamente 70 %) para ser colocado en las cavidades de las charolas, por lo que en este experimento se consideró realizar la prueba de mojabilidad agitando el sistema sustrato-agua.

El análisis de varianza para esta variable (Cuadro 4), muestra diferencias altamente significativas entre los sustratos ($P > F = 0.0001$). El que tardó más tiempo en humectarse fue el sustrato 8 de paja de trigo con 15 s (segundos), seguido por los sustratos 1 y Sogemix VT-M, ambos con 10 s.

En los sustratos restantes, aunque la comparación entre medias indica que existen diferencias significativas entre ellos, es importante señalar que quizás en condiciones comerciales una diferencia de 2.89 s, establecida como diferencia significativa (Tukey $\alpha = 0.05$), no sea tan importante. El intervalo de tiempos de mojabilidad de los sustratos restantes fue entre 4.66 s en los sustratos 6 y 7 y 8.33 s en el sustrato 2.

El sustrato Sunshine 3 tardó 5.33 s en humectarse, mientras que los sustratos 6 y 7 mostraron tiempos menores (4.66 s), aún a pesar de no tener humectante, lo que,

puede considerarse como una buena característica de estos sustratos.

Los tiempos de mojabilidad de los sustratos con agitación (segundos) y sin agitación (minutos) no mostraron una relación directa. Se encontró una baja relación entre los tiempos de mojabilidad de los sustratos sin agitación y con agitación, aunque resultó significativa ($R^2 = 0.2718$; $P > F = 0.0391$). Los sustratos 4 y 7, que mostraron unos de los mayores tiempos de humectación en condiciones estáticas, no fueron los que presentaron los mayores tiempos de humectación en condiciones de agitación. Por ejemplo, el sustrato 4 presentó un tiempo de humectación de 11.28 minutos en condiciones de no agitación y 5.33 s en condiciones de agitación. El sustrato 5 que en condiciones estáticas, presentó un tiempo menor para humectarse (4.22 minutos) que el sustrato 4, tardó más tiempo para humectarse que el sustrato 4 (7.66 s) en condiciones de agitación. Por otro lado, los sustratos 8 y Sogemix VT-M que presentaron mayores tiempos de humectación en condiciones estáticas, también presentaron tiempos altos para humectarse en condiciones de agitación.

La diferencia en el comportamiento de mojabilidad sin agitación y con agitación se puede explicar porque en condiciones estáticas el movimiento del agua se rige por el tamaño de los poros que son determinados por el tamaño de las partículas, y la naturaleza hidrófila o hidrofóbica de los componentes químicos de los sustratos, y mientras más pequeños son (hasta cierto límite), el movimiento del agua por capilaridad se realiza más rápido, y mientras más hidrofílicos sean estos compuestos el movimiento del agua es más rápida y viceversa.

La agitación del sistema sustrato-agua, permite aumentar el área superficial de contacto entre la fase líquida y la fase sólida, así el tiempo de mojabilidad de los sustratos disminuye.

Se puede considerar a las partículas de paja de trigo sin degradación o ligeramente degradadas como bipolares; por un lado hidrofílicas y absorben humedad (tejido parenquimático interno compuesto principalmente de celulosa) y por otro lado hidrofóbicas (cutícula externa cerosa) que no permite la retención de humedad.

Los resultados de mojabilidad con agitación en este experimento son diferentes a lo estipulado por Abad *et al* (1996), que contempla la prueba de mojabilidad únicamente en condiciones estáticas y la medida del tiempo en minutos.

Aunque existen diferencias altamente significativas entre los sustratos en los tiempos para humectarse, la mojabilidad de los sustratos aparentemente no influyó de manera directa en las variables de crecimiento de las plántulas de brócoli (Cuadros 13 y 14). Esto se tratará posteriormente cuando se aborde el tema de las variables de crecimiento de las plántulas de brócoli.

7.3.2.2 Concentración inicial de nutrimentos solubles

En el Cuadro 5, se presenta el análisis químico de los nutrimentos presentes en la paja de trigo natural, sin extracción de fenólicos ni degradación biológica previa. El análisis de los nutrimentos presentes en la paja de trigo sin degradación utilizada para elaborar los sustratos de paja de trigo evaluados en este experimento, ayudará a explicar las concentraciones de nutrimentos iniciales en los mismos.

Cuadro 5. Nutrimentos solubles en paja de trigo sin tratamiento previo de extracción de fenólicos solubles ni degradación biológica, en un extracto con relación 1: 2 (sustrato: agua destilada).

Nutrimentos (mg L ⁻¹)									
P	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	B
597	21,221	399.49	565.46	1,167.9	nd	6.96	2.42	10.80	4.72

Los valores de concentración de los nutrimentos presentados, son el promedio de dos repeticiones; nd – no detectado.

7.3.2.2.1 Fósforo

Las concentraciones de P en los sustratos al inicio del experimento se presentan en la Figura 1. El análisis de varianza muestra que hubo diferencias altamente significativas en el contenido inicial de P en los sustratos ($P > F = 0.0001$).

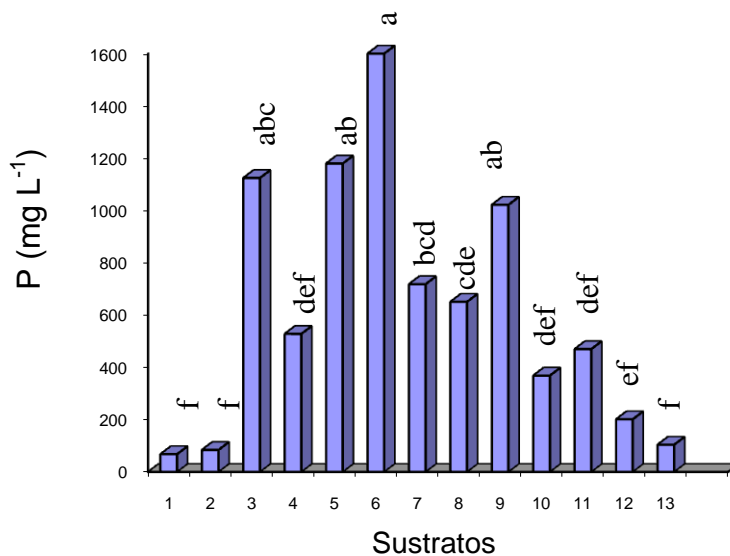


Figura 1. Concentración inicial de P (mg L⁻¹) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 491.73 mg L⁻¹.

Los sustratos 1 y 2 de paja de trigo presentaron concentraciones muy bajas de P: 67.8 mg L⁻¹ y 84.1 mg L⁻¹ con respecto a las concentraciones de P de los demás sustratos.

Las concentraciones de P en los sustratos 1 y 2 son bajas tomando como referencia las concentraciones sugeridas para sustratos obtenidas por el método holandés (relación 1: 1.5 sustrato: agua con base en volumen) (Cuadro 6).

Por otro lado, la concentración inicial de P en paja de trigo sin ningún tratamiento (597.0 mg L⁻¹), se ubica en el nivel normal de acuerdo con lo señalado en el Cuadro 6. Las concentraciones iniciales de P de los sustratos 1 y 2 disminuyeron debido a la extracción y enjuague de la paja de trigo con agua común.

El sustrato 3 con degradación microbiológica parcial, incrementó su concentración de P (1,124.3 mg L⁻¹), con respecto a la concentración de P en la paja de trigo sin tratamiento (natural), como resultado de la degradación biológica parcial. En este

tratamiento no se agregó fósforo en la solución con nitrógeno para su degradación (nivel muy alto, Cuadro 6).

En el sustrato 4, con extracción de fenólicos pero sin enjuague, la concentración de P soluble fue de 528 mg L⁻¹, similar a la presentada por la paja de trigo sin tratamiento (597.00 mg L⁻¹) y se ubica en el nivel normal de P de acuerdo al método holandés (Cuadro 6). Este sustrato al parecer no tuvo una degradación biológica importante, por lo tanto no se incrementó sustancialmente la concentración de P soluble.

En el sustrato 5 (degradación parcial con adición de solución completa conteniendo fósforo), se observa que la concentración de P soluble en el extracto fue superior (1,178.4 mg L⁻¹) a la que presentó el sustrato 4 y a los dos tratamientos que se les extrajeron los compuestos fenólicos solubles, sin embargo la concentración de P en el sustrato 5 es superior a la que presenta el sustrato 4 por la razón de que este sustrato presentó mayor degradación (menor contenido de MO) que el sustrato 4, además de que se le adicionó P a través de la solución completa (1 meq L⁻¹ de H₂PO₄ = 97 mg L⁻¹) suministrada para la degradación de la paja de trigo (nivel muy alto, Cuadro 6).

Cuadro 6. Interpretación de niveles de nutrimentos obtenidos por el método holandés en una relación de extracción 1: 1.5 (Ansorena, 1994).

Nivel	Nutrimentos		
	mg L ⁻¹		
	P	K	Mg
Bajo	< 248	< 31.2	> 17.01
Bastante bajo	248 - 434	31.2 - 54.6	17.01-29.16
Normal	465 - 651	58.8 - 81.9	31.59-43.74
Bastante alto	682 - 868	85.8 - 109.2	46.17-58.32
Alto	899 - 1,085	113.1 - 136.5	60.75-72.9
Muy alto	> 1,085	> 136.5	> 72.9

Los valores de este cuadro fueron reformados; los valores originales se expresan en meq L⁻¹. 1 meq L⁻¹ de P = 31 mg L⁻¹.

El sustrato 6 (degradación con lombriz), presentó una concentración de P de 1,600 mg L⁻¹, superior a todos los sustratos y estadísticamente igual a las concentraciones de P presentadas por los sustratos 3 y 9 (sin extracción de fenólicos) y al sustrato 5 (mayor degradación) (nivel muy alto, Cuadro 6).

Los sustratos 7 y 8, con extracción de fenólicos, sin enjuague y con degradación por lombrices, estadísticamente presentaron una concentración de P similar (718.2 mg L⁻¹ y 650.6 mg L⁻¹) que el sustrato 4, también con extracción de fenólicos, sin enjuague pero con degradación por microorganismos. De acuerdo con lo anterior se podría pensar que la degradación ocurrida en estos tratamientos fue relativamente similar (nivel bastante alto, Cuadro 6).

El sustrato 9 (degradación microbiológica sin extracción de fenólicos por 15 días), presentó estadísticamente la misma concentración de P que los sustratos 3 y 6 (sin extracción de fenólicos). La concentración de P, estadísticamente no se alteró con el proceso de degradación por 90 días, con respecto a la concentración de P en el tratamiento 9 (nivel alto, Cuadro 6).

Los sustratos 10 y 11, con degradación microbiológica por 15 días, presentaron concentraciones de P estadísticamente similares a las presentadas por los sustratos 4, 7 y 8. Lo anterior también nos sugiere que la degradación biológica ocurrida a los 90 días en los tratamientos 4, 7 y 8, no aportó cantidades significativas de este nutrimento en comparación con los tratamientos 10 y 11 con únicamente 15 días de degradación microbiológica (niveles bastante bajo y normal respectivamente).

Los sustratos testigos, fueron los que junto con los sustratos 1 y 2 de paja de trigo, presentaron las menores concentraciones de P de todos los sustratos. Los sustratos 1, 2, 4, 10, 11, 12 y 13, estadísticamente presentaron la misma concentración de P (niveles bajos, Cuadro 6).

7.3.2.2.2 Potasio

El análisis de varianza muestra que hubo diferencias altamente significativas en la concentración inicial de K en los sustratos evaluados ($P > F = 0.0001$).

La concentración de K en los sustratos 1 y 2 de paja de trigo con extracción de fenólicos y enjuague tres veces (Figura 2), disminuyó drásticamente (376.3 mg L⁻¹ y 475.8 mg L⁻¹; el potasio de la paja de trigo es altamente soluble) con respecto a la concentración de K inicial en la paja de trigo sin extracción (21,221 mg L⁻¹) (Cuadro 5).

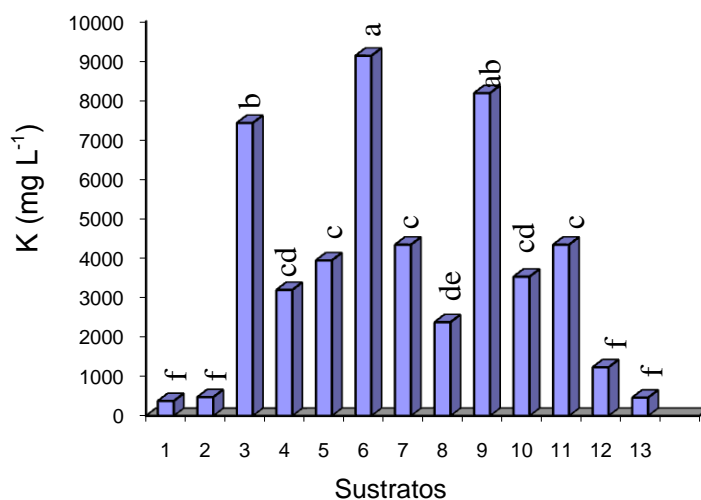


Figura 2. Concentración inicial de K (mg L⁻¹) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 1,392.1 mg L⁻¹.

Los sustratos 4, 5, 7, 8, 10 y 11 con extracción de fenólicos mostraron aproximadamente el mismo comportamiento; las concentraciones de K disminuyeron como consecuencia del tratamiento de extracción de fenólicos, y con excepción del sustrato 5, los demás sustratos mencionados fueron estadísticamente iguales.

Los sustratos 3, 6 y 9 sin extracción presentaron las mayores concentraciones de K. El sustrato 6 con la mayor concentración de K fue estadísticamente diferente a los sustratos 3 y 9.

Los sustratos 12 y 13 (testigos) presentaron concentraciones de K de 1,232.3 mg L⁻¹ y 463.1 mg L⁻¹ respectivamente, y fueron significativamente inferiores a la gran mayoría de los sustratos de paja de trigo, exceptuando a los sustratos 1 y 2, con extracción de fenólicos y enjuague tres veces. Las turbas naturales presentan

concentraciones relativamente altas de K; por ejemplo, el Sunshine (sin adición de algún aditivo) tuvo una concentración de 288.54 mg L^{-1} de K, utilizando la misma relación de extracción (1: 2; sustrato: agua destilada). El aumento en la concentración de K en los sustratos testigos se atribuye a la adición de fertilizantes potásicos por parte de las compañías que los elaboran.

Las concentraciones de K en los trece sustratos excedieron el límite de concentración de K establecido como máximo ($> 136.5 \text{ mg L}^{-1}$) para un sustrato de acuerdo con el método holandés (Cuadro 6).

7.3.2.2.3 Calcio

De acuerdo con el análisis de varianza para la concentración inicial de Ca en los sustratos, hubo diferencias altamente significativas (Figura 3).

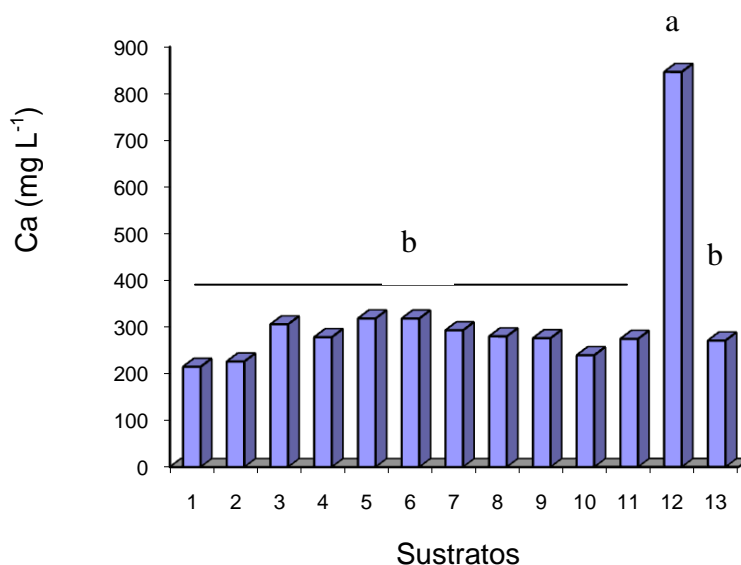


Figura 3. Concentración inicial de Ca (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0019$; DHS = 379.81 mg L^{-1} .

Las concentraciones de Ca en los sustratos de paja de trigo y el sustrato Sunshine 3, fueron estadísticamente iguales. El intervalo de concentraciones de Ca en los sustratos de paja de trigo fue entre 214.64 mg L⁻¹ en el sustrato 1 y 318.10 en el sustrato 5. La concentración promedio de Ca en la paja sin extracción de fenólicos y sin degradación biológica fue de 399.49 mg L⁻¹ (Cuadro 5) y fueron superiores a la concentración de >200 mg L⁻¹ señalada como óptima para un sustrato obtenida por medio de extracto de saturación (Ansorena, 1994). Las concentraciones de Ca en los sustratos de paja de trigo no fueron tan altas como en los casos de P y K, y su concentración no dependió directamente del tipo de tratamiento de degradación biológica administrado.

El sustrato Sogemix VT-M, presentó la más alta concentración de Ca en el extracto, con una concentración de 846.16 mg L⁻¹ y fue estadísticamente diferente a las concentraciones de Ca obtenidas en los extractos de los demás sustratos. Es conveniente señalar que, con la finalidad de contrarrestar el pH tan bajo que presentan las turbas de forma natural (< 4.0), normalmente se les agrega carbonato de calcio (CaCO₃) o carbonato doble de calcio y magnesio (CaMgCO₃-dolomita).

La diferencia entre las concentraciones de Ca en los dos sustratos testigos se atribuye a las diferentes cantidades de estos aditivos agregados a las mismas. Los folletos y la información disponible sobre las cantidades que se adicionan de carbonato de calcio o de calcio y magnesio a estos y a otros sustratos con base en turba, no están disponibles al público.

En el caso de las turbas, las concentraciones totales de Ca pueden ser superiores a las determinadas en el extracto acuoso, tomando en consideración que estas presentan CIC altas, además de que no todo el carbonato de calcio o carbonato de calcio y magnesio (dolomita) se disuelven rápidamente, su disolución es lenta y de acuerdo a las necesidades para contrarrestar el pH ácido de las mismas. Para determinar el contenido total de Ca o algún otro nutriente (catión) que pueda estar adsorbido en las superficies de intercambio de las turbas, es necesario utilizar extractantes, como el DTPA (ácido dietilen-triamino-pentacético).

7.3.2.2.4 Magnesio

De acuerdo con el análisis de varianza hubo diferencias significativas entre los sustratos en las concentraciones de Mg (Figura 4). El sustrato que presentó la mayor concentración de Mg fue el sustrato Sogemix VT-M con 634.34 mg L^{-1} , y fue estadísticamente diferente a las concentraciones de Mg en los demás sustratos.

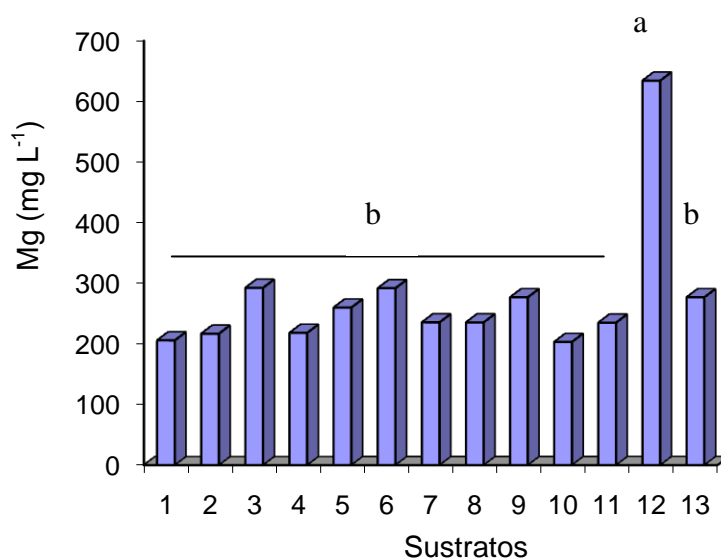


Figura 4. Concentración inicial de Mg (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 195.08 mg L^{-1} .

Las concentraciones de Mg determinadas en los sustratos restantes fueron estadísticamente iguales. El comportamiento de las concentraciones de Mg en los sustratos, fue similar al que presentó el Ca, presentando en general, concentraciones ligeramente menores que las de Ca.

La alta concentración de Mg en el sustrato Sogemix VT-M se atribuye también a la adición de dolomita (CaMgCO_3).

Las concentraciones de Mg de los sustratos 1 y 2 fueron ligeramente menores que las que presentaron los demás sustratos, por efecto de la extracción y enjuague, sin embargo fueron estadísticamente iguales a las concentraciones de Mg presentadas por los demás sustratos de paja de trigo, así también como a la concentración de Mg en el sustrato Sunshine 3. La concentración de Mg en la paja de trigo sin extracción y enjuague fue de 565.46 mg L⁻¹.

El intervalo de concentraciones que presentaron los sustratos de paja de trigo y el sustrato 13 fue entre 205.81 mg L⁻¹ en el sustrato 1 y 291.87 mg L⁻¹ en el sustrato 6. Todos los sustratos tuvieron concentraciones de Mg superiores a la señalada como muy alta para sustratos utilizando el método holandés que es mayor de 72.9 mg L⁻¹.

7.3.2.2.5 Sodio

Las concentraciones de Na en los trece sustratos de paja de trigo se presentan en la Figura 5. Hubo diferencias significativas entre los sustratos ($P > F = 0.0001$; DHS = 242.24 mg L⁻¹) en las concentraciones de Na.

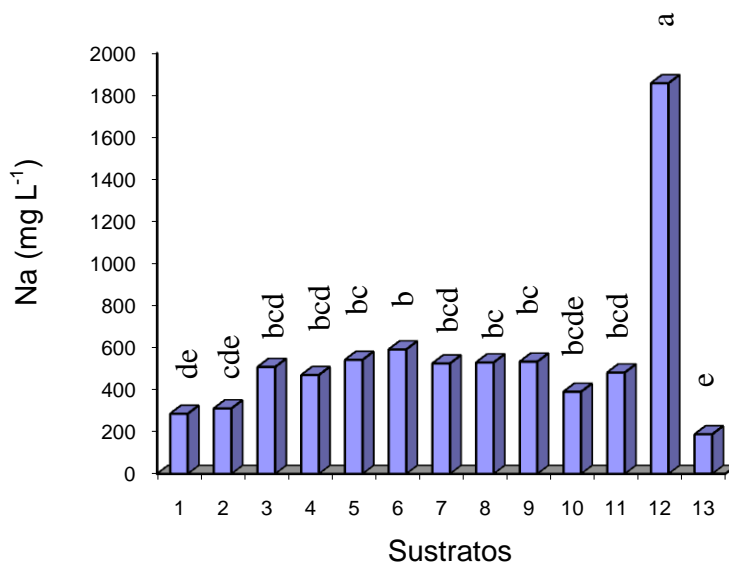


Figura 5. Concentración inicial de Na (mg L⁻¹) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 242.24 mg L⁻¹.

El sustrato Sogemix VT-M fue el que presentó la mayor concentración de Na entre los sustratos y fue estadísticamente diferente a la concentración de Na de los demás. Los sustratos 1 y 2 disminuyeron sus concentraciones de Na por efecto de la extracción de fenólicos y enjuague tres veces. La concentración de Na en la paja de trigo sin tratamiento de extracción fue de $1,167.9 \text{ mg L}^{-1}$ (Cuadro 5). El origen del Na en los sustratos de paja de trigo con algún grado de degradación es la paja misma (absorción del suelo). El agua común con la cual se humedeció la paja de trigo para su descomposición tuvo una baja concentración de Na (27.98 mg L^{-1}).

Con excepción de los sustratos Sogemix VT-M, 1, 2 y 10, todos los demás sustratos de paja de trigo presentaron estadísticamente la misma concentración de Na. El sustrato Sunshine 3 con base en turba tuvo una concentración de Na estadísticamente igual (188.17 mg L^{-1}) a la que presentaron los sustratos 1 y 2 después del tratamiento de extracción y enjuague (285.67 mg L^{-1} y 311 mg L^{-1} respectivamente).

No se tienen referencias sobre las concentraciones ideales o máximas de Na que deben presentarse en un sustrato para que no sean tóxicas para el crecimiento de plántulas de hortalizas, sin embargo, se pueden tomar como referencia las concentraciones de Na de los sustratos testigos. Siguiendo este camino, se aprecia que exceptuando el Sogemix VT-M, la mayoría de los sustratos de paja de trigo presentan concentraciones superiores a la del Sunshine 3, sin embargo se considera que estas concentraciones no representan un problema para la germinación de las semillas y el crecimiento de las plántulas de brócoli.

La diferencia en las concentraciones de Na entre los sustratos testigos con base en turba puede ser debido a que son materiales de diferente origen o lugar, es probable que la turba base del primer sustrato se haya extraído de depósitos cercanos al mar (costa este de Canadá). No se cree que los fabricantes adicionen Na en alguno de los fertilizantes que se aplican como aditivos.

7.3.2.2.6 Fierro

Hubo diferencias altamente significativas ($P > F = 0.0001$) en las concentraciones de Fe entre los sustratos de paja de trigo y los testigos (Figura 6).

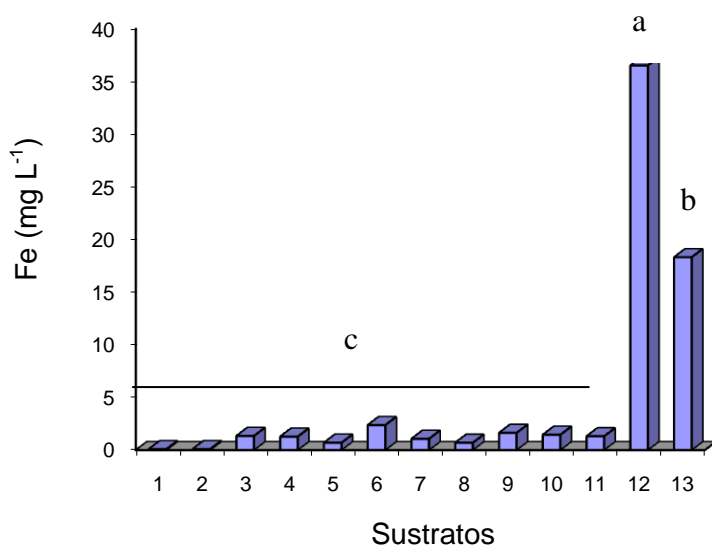


Figura 6. Concentración inicial de Fe (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 9.68 mg L^{-1} .

El sustrato Sogemix VT-M, tuvo una concentración de 36.51 mg L^{-1} y fue significativamente diferente a la concentración del Sunshine 3, con 18.31 mg L^{-1} .

El intervalo de concentraciones de Fe en los sustratos de paja de trigo se encuentra entre 0.1 mg L^{-1} en los sustratos 1 y 2, y 2.38 mg L^{-1} en el sustrato 6. De acuerdo con lo especificado por Sun Gro Horticulture Analytical Laboratories (S/F) el intervalo adecuado de Fe en un sustrato debe estar entre 0.3 mg L^{-1} y 3 mg L^{-1} en un extracto de saturación, por lo que las concentraciones de Fe en los sustratos testigos se pueden considerar como fuera de las recomendaciones, mientras que los de paja de trigo se encuentran dentro de las especificaciones.

De cualquier manera, las concentraciones de Fe determinadas en los sustratos evaluados se consideran como aceptables. Es de suponer que las concentraciones de Fe soluble encontradas en los sustratos preparados con turba (testigos) no son tóxicas para las plántulas, de lo contrario los fabricantes disminuirían las concentraciones de este elemento como componente de estos sustratos.

7.3.2.2.7 Manganeso

Hubo diferencias altamente significativas ($P > F = 0.0001$) en las concentraciones de Mn entre los sustratos evaluados (Figura 7). El Sogemix VT-M fue el que presentó la mayor concentración de Mn con una concentración de 5.77 mg L^{-1} .

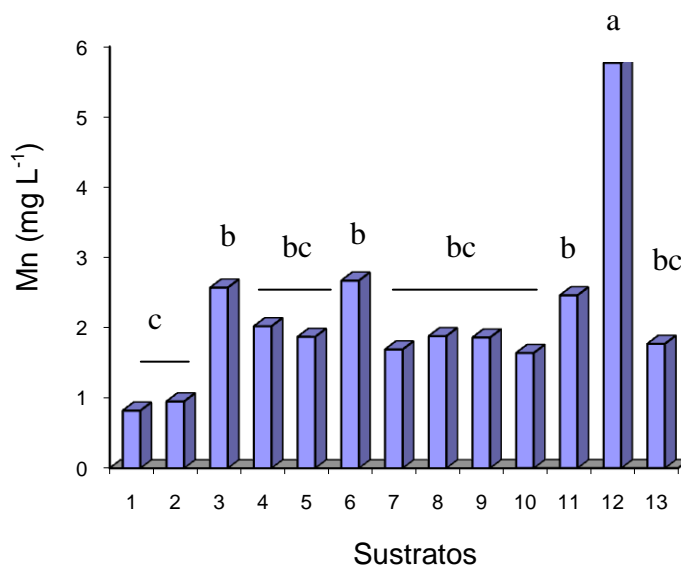


Figura 7. Concentración inicial de Mn (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 1.44 mg L^{-1} .

El Sunshine 3, presentó una concentración de Mn estadísticamente igual a los sustratos de paja de trigo con degradación microbiológica. Los sustratos 1 y 2 de paja de trigo sin degradación biológica tuvieron las menores concentraciones de Mn

con 0.82 mg L^{-1} y 0.95 mg L^{-1} respectivamente y disminuyeron por la extracción y lavado de las pajas. La concentración de Mn en la paja de trigo sin degradar fue de 6.96 mg L^{-1} . El intervalo de concentraciones de Mn en los sustratos de paja de trigo con degradación biológica se encuentra entre 1.64 mg L^{-1} en el sustrato 10 y 2.67 mg L^{-1} en el sustrato 6.

De acuerdo con lo especificado por Sun Gro Horticulture Analytical Laboratories (S/F) el intervalo adecuado de Mn en un sustrato es de 0.02 a 3.0 mg L^{-1} , por lo que tomando como fundamento este criterio, todos los sustratos, con excepción del sustrato Sogemix VT-M, que presentó una concentración de 5.77 mg L^{-1} , se encuentran dentro del intervalo señalado.

Sin embargo es importante indicar que la relación sustrato: agua destilada que menciona Sun Gro Horticulture Analytical Laboratories (S/F) es a punto de saturación, mientras que los extractos para la determinación de nutrimentos en los sustratos evaluados la relación fue de 1: 2. De cualquier manera, las concentraciones de Mn determinadas en los sustratos evaluados se consideran como aceptables. Se supone que las concentraciones de Mn soluble encontradas en los sustratos preparados con turba (testigos) no son tóxicas para las plántulas, de lo contrario los fabricantes disminuirían las concentraciones de este elemento como componente de estos sustratos.

7.3.2.2.8 Cobre

De acuerdo con el análisis de varianza, hubo diferencias altamente significativas ($P > F = 0.0001$) en la concentración de Cu entre los sustratos evaluados (Figura 8). El sustrato 11 de paja de trigo con degradación biológica por 15 días, fue el que presentó la mayor concentración de Cu con un valor de 6.54 mg L^{-1} . A este sustrato se le adicionó solución nutritiva con micronutrimentos, entre ellos cobre a una concentración de 0.045 mg L^{-1} .

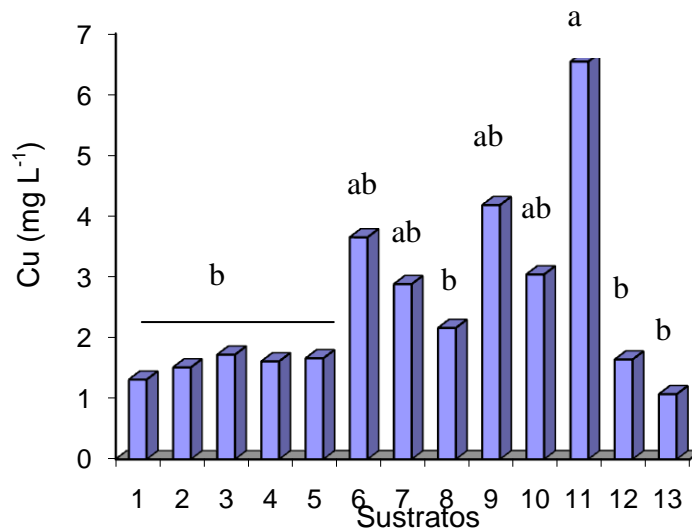


Figura 8. Concentración inicial de Cu (mg L⁻¹) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 4.06 mg L⁻¹.

Los sustratos 1 y 2 de paja de trigo sin degradación biológica y los sustratos 3, 4 y 5 provenientes de la degradación biológica únicamente con microorganismos, presentaron concentraciones de Cu estadísticamente iguales. La concentración de Cu en la paja de trigo sin extracción de compuestos o nutrientes solubles (paja original) fue de 2.42 mg L⁻¹ (Cuadro 5), concentración similar a la que presentaron los sustratos 1 al 5. Los sustratos 1 y 2 disminuyeron ligeramente su concentración de Cu con respecto a la paja de trigo original por efecto de la extracción de compuestos o nutrientes solubles.

Los sustratos Sogemix VT-M y Sunshine 3, con base en turba presentaron concentraciones de 1.64 mg L⁻¹ y 1.07 mg L⁻¹ respectivamente. De acuerdo con lo especificado por Sun Gro Horticulture Analytical Laboratories (S/F) el intervalo adecuado de Cu es de 0.01 mg L⁻¹ a 0.5 mg L⁻¹, por lo que con base en este criterio, todos los sustratos, se encuentran fuera del intervalo señalado. De cualquier manera, las concentraciones determinadas en los sustratos evaluados se consideran como

aceptables. Se supone que las concentraciones de Cu soluble encontradas en los sustratos preparados con turba (testigos) no son tóxicas para las plántulas, de lo contrario los fabricantes las disminuirían como componente de estos sustratos.

7.3.2.2.9 Zinc

De acuerdo con el análisis de varianza, hubo diferencias altamente significativas ($P > F = 0.0001$) en las concentraciones de Zn entre los sustratos evaluados (Figura 9).

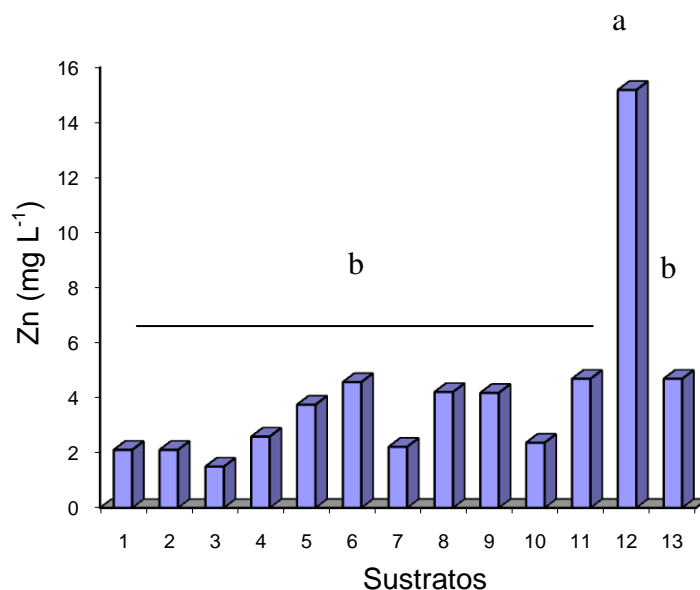


Figura 9. Concentración inicial de Zn (mg L^{-1}) en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.0001$; DHS = 6.21 mg L^{-1} .

El sustrato Sogemix VT-M, presentó la mayor concentración de Zn entre los sustratos (15.18 mg L^{-1}); las concentraciones de Zn en todos los demás fueron estadísticamente iguales y se encuentran en el intervalo de 1.5 mg L^{-1} en el sustrato 3 y 4.69 mg L^{-1} en los sustratos 11 y Sunshine 3 respectivamente.

De acuerdo con lo especificado por Sun Gro Horticulture Analytical Laboratories (S/F) el intervalo adecuado de Zn es de 0.3 mg L^{-1} a 3.0 mg L^{-1} , por lo que tomando como fundamento este criterio, los sustratos 5, 6, 8, 9, 11, 12 y 13, se encuentran fuera del intervalo señalado. De cualquier manera, las concentraciones determinadas en los sustratos evaluados se consideran como aceptables.

7.3.2.2.10 Boro

El análisis de varianza señala que no hubo diferencias significativas ($P > F = 0.1328$) entre las concentraciones de B soluble, determinadas en los sustratos (Figura 10).

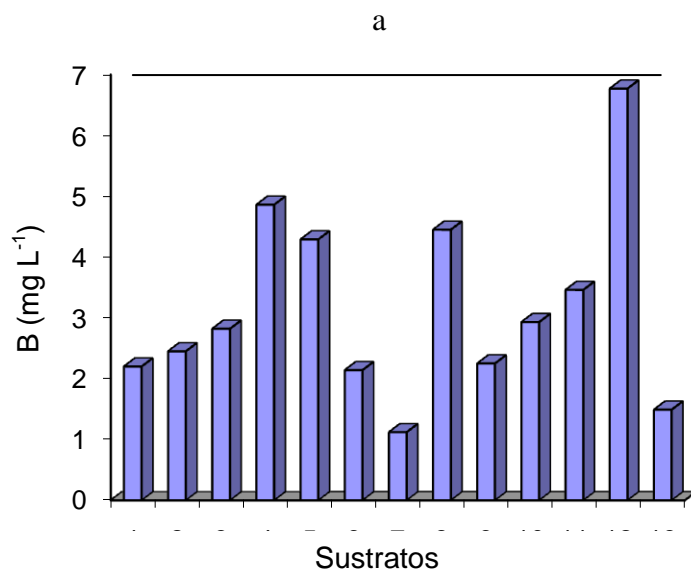


Figura 10. Concentración inicial de B (mg L^{-1}) en trece sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli. Barras con la misma letra son iguales estadísticamente (Tukey $\alpha = 0.05$). $P > F = 0.1328$; DHS = 6.03.

Aunque de acuerdo con el análisis de varianza y la comparación entre medias, no hay diferencias entre las concentraciones de B en los sustratos evaluados, es importante señalar que las diferencias entre las concentraciones son importantes. El intervalo de concentraciones de B en los sustratos se encuentra entre 1.12 mg L^{-1} y 6.97 mg L^{-1} .

De acuerdo con lo especificado por Sun Gro Horticulture Analytical Laboratories (S/F) el intervalo adecuado de B en un sustrato es entre 0.060 mg L^{-1} a 0.6 mg L^{-1} , por lo que con base en este criterio, todos los sustratos se encuentran fuera del intervalo señalado. Swartz (1975) señala en agua salina para cultivos hidropónicos una concentración de 5 ppm de B como tóxica. De cualquier manera, las concentraciones determinadas en los sustratos evaluados se consideran como aceptables.

Además, adelantándonos al efecto de este nutrimento sobre el crecimiento de las plántulas de brócoli, no se observaron efectos tóxicos sobre las plántulas de brócoli.

7.3.2.2.11 Resolución de la posible problemática de altas concentraciones de algunos nutrimentos en los sustratos

En general, varias concentraciones de algunos elementos como el P y K en los sustratos sobrepasan los valores estipulados como adecuados por algunas de las referencias mencionadas, sin embargo, no por esto se pueden considerar como inadecuados para ser utilizados en el crecimiento de plántulas de hortalizas.

Los sustratos de paja de trigo con degradación biológica por 90 días pueden adecuarse bajando las altas concentraciones de estos nutrimentos con la simple aplicación de un lavado o lixiviación de estos con agua común. Las aparentemente altas concentraciones de algunos elementos como el Fe, Mn, Zn y B en los sustratos testigos, son consecuencia de la adición de micronutrimentos por los fabricantes y se pueden disminuir sus concentraciones también a través de un lavado.

La alta concentración de Na en el sustrato Sogemix VT-M se puede disminuir con los riegos que normalmente se proporcionan a los sustratos como fuente de nutrimentos para las plantas (lixiviado). Como referencia, la turba Sunshine sin aditivos (no utilizada como sustrato en este experimento) presentó concentraciones de Fe, Mn, Zn y B de 0.266 mg L^{-1} , nd (no detectado), 0.547 mg L^{-1} y 1.48 mg L^{-1} respectivamente, en el extracto, utilizando una relación sustrato: agua destilada de 1: 2. La concentración de Na fue de 290.98 mg L^{-1} .

Por otro lado, se puede señalar que las concentraciones de los nutrimentos se encuentran muy relacionadas con las determinaciones de conductividad eléctrica

(CE) que se presentan más adelante, y de acuerdo con estas, las plántulas de alguna hortaliza que pudiera inicialmente germinar y emerger del sustrato, no tendría problemas para hacerlo.

7.3.2.3 pH y conductividad eléctrica

Los análisis de varianza para estas variables muestran que se encontró diferencia altamente significativa ($P > F = 0.0001$ en ambas variables) entre los sustratos evaluados (Cuadro 7). Aunque hubo diferencia significativa entre los sustratos en estas variables, de acuerdo con los valores determinados, se consideró que el pH y la CE en los sustratos iniciales no afectarían el porcentaje de emergencia de las plántulas de brócoli, con base en los resultados que se presentaron en los dos experimentos anteriores en donde se evaluó el crecimiento de plántulas de brócoli (Capítulos IV y V), por lo que únicamente se presentan en el Cuadro 7, a manera de valores iniciales o de referencia.

7.3.2.4 Concentración inicial de fenólicos solubles totales

Las concentraciones de fenólicos solubles totales (CFST) iniciales en los sustratos de paja de trigo se presentan también en el Cuadro 7. De acuerdo con el análisis de varianza, hubo diferencias altamente significativas en las CFST de los sustratos evaluados ($P > F = 0.0001$).

El sustrato de paja de trigo que presentó la mayor CFST inicial fue el sustrato 6 con 228.94 mg L^{-1} , el cual resultó estadísticamente diferente a los demás. En segundo y tercer lugar estuvieron los sustratos 3 y 11 con concentraciones de 118.91 mg L^{-1} y 117.63 mg L^{-1} respectivamente. Los testigos presentaron las menores CFST (fenólicos solubles complejos).

De acuerdo con las CFST determinadas en los sustratos 3 y 6 de paja de trigo, con las determinadas en sustratos de paja de trigo con extracción de fenólicos y enjuague tres veces (sustratos 1 y 2), las primeras fueron varias veces superiores en relación a las segundas, por lo que aparentemente por un lado se podría esperar

inhibición de la germinación y emergencia de plántulas de brócoli (altas concentraciones) y por otro, también se podría esperar que estas altas CFST no inhiban inicialmente la germinación y la emergencia de plántulas de brócoli, asumiendo que los fenólicos solubles que se encuentran en los sustratos de paja de trigo son fenólicos complejos, obtenidos por transformación microbiológica durante el periodo de 90 días.

Cuadro 7. Propiedades químicas iniciales de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot.

Sustrato	pH	CE dS m ⁻¹	CFST mg L ⁻¹	MO (%)	CIC cmoles (+) kg ⁻¹
1	6.20 de	0.50 f	33.95 cd	93.71 a	17.73 cd
2	6.30 de	0.55 ef	34.11 cd	92.78 ab	18.86 c
3	6.70 b	1.97 b	118.91 b	85.56 cd	12.04 ef
4	6.20 de	1.09 d	74.30 bc	88.84 bc	13.55 def
5	6.13 ef	1.21 d	75.51 bc	84.54 d	13.22 ef
6	7.41 a	2.59 a	228.94 a	84.54 d	11.47 ef
7	6.39 cd	1.17 d	101.53 b	89.45 bc	9.40 f
8	6.19 de	1.00 de	73.31 bc	86.76 cd	10.59 ef
9	6.61 bc	1.26 cd	80.67 bc	89.03 bc	14.53 cde
10	6.21 de	1.18 d	86.47 b	92.23 ab	14.83 cde
11	6.53 bc	1.72 bc	117.63 b	91.25 ab	12.87 ef
12 (Sogemix VT-M)	5.91 f	1.90 b	25.25 d	58.25 f	62.80 a
13 (Sunshine 3)	5.43 g	1.97 b	16.46 d	77.58 e	46.93 b
P>F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
DHS	0.2233	0.4762	46.94	4.24	4.41

CE = conductividad eléctrica; CFST = concentración de fenólicos solubles totales; MO = materia orgánica; CIC = capacidad de intercambio catiónico; DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Asimismo, en los sustratos con extracción de fenólicos, y considerando que las CFST iniciales que se presentaron en los sustratos de paja de trigo en el experimento

anterior de evaluación de sustratos en el crecimiento de plántulas de brócoli (Capítulo V), no afectaron significativamente y en forma negativa la emergencia de las plántulas, en este experimento también se asumió que las CFST en los sustratos 1 y 2 de paja de trigo no afectarían la germinación y por consecuencia la emergencia de las plántulas de brócoli.

Con base en los resultados de las características químicas determinadas en los sustratos 1 y 2, se consideró al igual que en el experimento anterior de evaluación de sustratos en el crecimiento de plántulas de brócoli (Capítulo V), que ni el pH, ni la CE, ni la CFST de estos sustratos afectarían la germinación y emergencia de las plántulas de brócoli.

7.3.2.5 Materia orgánica

El análisis de varianza indica que existe diferencia altamente significativa para esta variable ($P > F = 0.0001$). Los sustratos 1 y 2 tuvieron los contenidos de MO más altos y estadísticamente diferentes a los de la mayoría de los sustratos (excepto el 10 y el 11). La materia orgánica inicial en los sustratos 1 y 2 de paja de trigo con extracción de fenólicos solubles fue muy alta debido a que en estos materiales esta fracción se encuentra sin degradar (Cuadro 1). Lo anterior sugiere que la degradación en los sustratos 10 y 11 después de la extracción de los fenólicos, no fue significativa en relación con el contenido de MO en los sustratos 1 y 2. El sustrato 9, sin extracción de fenólicos y degradación microbiológica por 15 días, presentó menor contenido de MO que los sustratos 10 y 11, esto puede ser consecuencia de una mayor conservación de sales minerales solubles en este sustrato, además de una mayor pérdida de MO, probablemente como CO_2 , a través de la transformación microbiológica, en relación a los sustratos 10 y 11, por contener mayores poblaciones de microorganismos.

Se reporta que la paja de trigo a la que se le extrajeron los compuestos solubles durante 24 h a 25 °C, presentó únicamente una pérdida de peso de tan sólo 29 %, por degradación microbiológica, mientras que algunos otros tratamientos sin extracción de compuestos solubles presentaron pérdidas de peso de 42 % a 48 %

(Blanco y Almendros, 1995). La diferencia en los porcentajes de pérdida de peso pudo haber sido debida a que la extracción de sustancias lábiles de la paja de trigo disminuyó los valores de carbono rápidamente mineralizable y la cantidad de biomasa microbiana (Saviozzi *et al.*, 1997).

Los sustratos del 3 al 8 elaborados con material de paja de trigo con 90 días de transformación biológica, presentaron porcentajes de MO relativamente altos, debido a la baja transformación o degradación de esta, por lo que se considera que la transformación biológica ocurrida en estos materiales de paja de trigo es parcial y muy baja. La transformación de la MO de estos sustratos fue ampliamente discutida en el Capítulo VI. La diferencia entre el contenido de MO del sustrato de paja de trigo sin degradar con mayor contenido de MO (93.71 % en el sustrato 1) y el sustrato de paja de trigo con mayor degradación (sustratos 5 y 6, ambos con 84.54 % de MO) fue tan sólo de 9.17 %.

Las turbas comerciales tienen poca degradación y se clasifican generalmente entre H2 y H3 en la escala de Von Post (Caraveo, 1994). Las turbas utilizadas en este experimento como sustratos testigos, se acondicionan con aditivos tales como la vermiculita y cal calcítica y/o dolomítica, además de un agente humectante, por lo que presentan contenidos de materia orgánica bajos (58.25 % en el Sogemix VT-M y 77.58 % en el Sunshine 3), precisamente por la presencia de estos materiales, que con excepción del humectante son inorgánicos y no son capaces de tener combustión, al menos hasta los 550 °C que es la temperatura a la cual se lleva a cabo la combustión de la MO, cuando se determina por medio de la combustión seca de materiales orgánicos (Ansorena, 1994).

Existe diferencia estadísticamente significativa entre el contenido de MO en el sustrato Sogemix VT-M y el sustrato Sunshine 3, con una diferencia de 13.67 % de MO a favor del segundo, esta diferencia se puede establecer por los distintos contenidos de vermiculita y cal principalmente (Sogemix VT-M, 30 % de vermiculita fina y cal calcítica y dolomítica, macro y micronutrientes (Premier, S/F). Para el caso del Sunshine 3, los fabricantes (Sun Gro Horticulture, S/F) no especifican las cantidades de ingredientes como la vermiculita y la cal.

7.3.2.6 Capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónico (CIC), es una propiedad de las superficies de las arcillas del suelo cargadas negativamente y de algunos sustratos para adsorber cationes e intercambiarlos con la solución. Esta propiedad en los sustratos es importante en la reserva de nutrientes disponibles para las plantas (Verdonck *et al.*, 1981).

Abad y Noguera (2000), señalan que en materiales a los que se aplican soluciones nutritivas en forma periódica es recomendable utilizar sustratos de origen orgánico con CIC menores a 20 meq 100 g⁻¹ (cmoles (+) kg⁻¹). La CIC de los sustratos evaluados en este experimento se presenta en el Cuadro 7.

De acuerdo con el análisis de varianza para la CIC hubo diferencias altamente significativas ($P > F = 0.0001$). Los sustratos 1 y 2 de paja de trigo presentaron CIC bajas y estadísticamente iguales entre sí, con 17.73 cmoles (+) kg⁻¹ y 18.86 cmoles (+) kg⁻¹. Las CIC de los sustratos 9 y 10 con 15 días de degradación microbiológica también fueron bajas y estadísticamente iguales a las CIC presentadas por los sustratos 1 y 2 de paja de trigo sin degradar, con CIC de 14.53 cmoles (+) kg⁻¹ y 14.83 cmoles (+) kg⁻¹ respectivamente.

La transformación microbiológica por 15 días que tuvieron los sustratos 9 y 10 no afectó significativamente la CIC de estos con relación a los sustratos 1 y 2 sin degradación biológica. El sustrato 11 resultó con una CIC menor y significativamente igual a la presentada por los sustratos 9 y 10.

Los sustratos de paja de trigo con transformación biológica por 90 días, presentaron CIC menores y en la mayoría de los casos significativamente diferentes a los sustratos 1 y 2 con extracción de fenólicos y sin degradación biológica. El tratamiento biológico en los sustratos del 3 al 8, disminuyó la CIC de la paja de trigo, tomando como resultados iniciales las CIC presentadas por los sustratos 1 y 2.

Los testigos con base en turba, presentaron CIC mucho mayores y estadísticamente diferentes a las CIC de los sustratos de paja de trigo. El Sogemix VT-M tuvo una CIC de 62.80 cmoles (+) kg⁻¹ mientras que el Sunshine 3, presentó una CIC de 46.893 cmoles (+) kg⁻¹. Se señala que una turba tiene una CIC de 120 meq 100 g⁻¹ del

sustrato (Peat Moss de México, S. A., S/F). Lemaire *et al* (2003), señalan una CIC de 115 eq m^{-3} , equivalente a 115 meq L^{-1} para una turba rubia.

La diferencia de CIC entre los dos sustratos testigos, se puede atribuir al alto contenido de vermiculita expandida en el Sogemix VT-M (30 % en volumen-Premier, S/F) y probablemente también al efecto de los agentes humectantes.

Se reporta, que los agentes humectantes en sustratos con base en turba incrementan la capacidad para lixiviar nutrientes en sistemas de frecuente irrigación y que la longevidad de los agentes humectantes fluctúa entre tres y cuatro semanas (Bilderback y Lorscheider, 1997). Lo anterior puede estar vinculado a la interacción que ejerce el agente humectante sobre las superficies de los componentes de la turba, que normalmente muestran una alta CIC (sustrato Sunshine, Capítulo IV), disminuyendo la misma.

Es importante también señalar que la CIC en los sustratos orgánicos se incrementa al aumentar el pH debido al aumento de las cargas negativas de los grupos carboxilo por efecto de ionización (Ansorena, 1994). La determinación de la CIC de los sustratos se realizó a pH 7.0, por lo que las CIC presentadas en el Cuadro 7, hubieran sido inferiores si estas determinaciones se hubieran realizado a pH inferiores. Se considera lo mismo cuando los sustratos se manejan con soluciones nutritivas a pH inferiores.

Por otro lado, y en relación con los sustratos de paja de trigo, que contienen celulosa, se reporta que los materiales celulósicos parecen zeolitas en su habilidad para tomar parte en reacciones de intercambio, en las cuales los iones metálicos son intercambiados unos por otros, o por iones de hidrógeno. La capacidad de intercambio de fibras de celulosa no purificadas es debida en su mayor parte a las impurezas que contiene, mientras que en celulosas purificadas la capacidad de intercambio es probablemente debida a los grupos ácidos (tales como los carboxilos) en las moléculas de celulosa (Kirk y Othmer, 1949).

Por otro lado se reporta, que la CIC de las especies dicotiledóneas es mucho mayor que en las especies monocotiledóneas. La CIC para raíces de trigo, maíz, frijol y jitomate fueron de $23 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$, $29 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$, $54 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$ y $62 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$ (Keller y Deuel, 1957; citados por Marschner, 1995). La CIC de $23 \text{ meq } 100 \text{ g}^{-1}$ (23

cmoles (+) kg⁻¹) reportada para raíces de trigo es relativamente similar a las CIC que se determinaron en las pajas de trigo (consistentes principalmente de tallos) con valores entre 16.33 cmoles (+) kg⁻¹ a 18.86 cmoles (+) kg⁻¹.

De acuerdo con los resultados obtenidos para esta variable, se consideró que aunque los sustratos de paja de trigo presentaron CIC bajas, no por esto el crecimiento de las plántulas de brócoli debe ser menor que en los sustratos testigos con mayor CIC (Cuadro 7), lo anterior se suple con una mayor frecuencia en el suministro de solución nutritiva (Abad y Noguera, 2000).

7.3.2.7 Contenido de C, N, y relación C: N

En el Cuadro 8, se presentan los resultados de las determinaciones de las concentraciones iniciales de C y N en porcentaje, y la relación C: N de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot.

7.3.2.7.1 Contenido de carbono

El % de C se presenta únicamente como valor para el cálculo de la relación C: N. El valor de C se encuentra ligado al valor de MO presentado anteriormente.

7.3.2.7.2 Concentración de nitrógeno

El N en la paja de trigo se encuentra principalmente en forma de proteínas (Staniforth, 1986), por lo que se sugiere que el N en los sustratos 1 y 2 se encuentran en forma orgánica, sin embargo, a los demás sustratos de paja de trigo se les agregó N en forma inorgánica (Capítulo VI), para la biotransformación de los compuestos orgánicos (compuestos fenólicos, celulosa, hemicelulosa, lignina, etc.).

Sin un análisis de las formas de N presentes en los sustratos de paja de trigo, no se puede saber con exactitud las formas y concentraciones en que se encuentra el N en estos sustratos.

Cuadro 8. Concentraciones iniciales de C, N y relaciones C: N de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot.

	C	N	C: N
	%		
1	54.35 a	0.61 e	88.62 a
2	53.81 ab	0.60 e	89.20 a
3	49.63 cd	1.78 bc	27.90 ef
4	51.52 bc	1.67 bcd	30.86 def
5	49.03 d	2.29 a	21.51 f
6	49.03 d	2.10 ab	23.38 f
7	51.88 bc	1.63 cd	32.07 def
8	50.32 cd	1.89 abc	26.63 ef
9	51.63 bc	1.28 d	41.13 cd
10	53.49 ab	1.55 cd	35.61 de
11	52.92 ab	1.73 bc	30.47 def
12 (Sogemix VT-M)	33.78 f	0.67 e	50.27 bc
13 (Sunshine 3)	44.99 e	0.83 e	54.26 b
P>F	0.0001	0.0001	0.0001
DHS	2.4605	0.4454	10.94

C = carbono; N = nitrógeno; C/N = relación Carbono/Nitrógeno.
DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Es probable que el N inorgánico aplicado a las pajas haya sido aprovechado por los microorganismos presentes en estas, como fuente nitrogenada para la formación de sus cuerpos o somas. Si fue este el caso, el N aplicado en forma inorgánica se encontrará en forma orgánica y el análisis de N total lo cuantifica.

El N inorgánico también pudo haber reaccionado con algunos componentes químicos de la paja de trigo. Se reporta que se sintetizaron nuevos compuestos químicos nitrogenados entre los ácidos *p*-cumárico y ferúlico presentes en las pajas de trigo al tratarlas con amoniaco anhidro (Chabaca *et al.*, 2000). También se señala que hay reacción entre compuestos nitrogenados (NH₃ y NO₂) con las turbas, aserrín y

residuos con lignina. La fijación está asociada con oxidación (utilización de O_2), y se favorece por valores de pH alcalino (Nömmik y Vahtras, 1982).

Los compuestos nitrogenados inorgánicos una vez que reaccionan con los compuestos fenólicos o forman parte de los cuerpos de los microorganismos no contribuyen a la CE de los sustratos (no electrolitos).

Otra posibilidad, y la menos probable, es que el N presente en los sustratos se encuentre aún en forma inorgánica después del periodo de biotransformación por 90 días.

El análisis de varianza para esta variable, señala que existen diferencias significativas entre los porcentajes de N de los sustratos al inicio del experimento ($P > F = 0.0001$). Las diferencias entre el contenido de N en los sustratos de paja de trigo con extracción de compuestos solubles (sustratos 1 y 2) y los sustratos con transformación biológica se atribuye a la adición de N inorgánico a los segundos, y al efecto de concentración del N en un contenido menor de MO en los sustratos por efecto de pérdida como CO_2 .

Las diferencias estadísticas en el contenido de N en los sustratos de paja de trigo con algún grado de degradación biológica pueden imputarse a las diferencias en las cantidades de N aplicado como N inorgánico y a la diferente degradación biológica que se llevó a cabo en cada uno de ellos. A los sustratos 12 y 13 (testigos) los fabricantes les agregan fertilizantes nitrogenados inorgánicos, por lo que aparentemente las formas en que se encuentra el N son inorgánicas y fácilmente disponibles para que las plantas las absorban.

El intervalo en el porcentaje de N en los sustratos de paja de trigo se encuentra entre 0.60 % en el sustrato 2 y 2.29 % en el sustrato 5.

7.3.2.7.3 Relación C: N

El análisis de varianza señala que existe diferencia altamente significativa en la relación C: N entre los sustratos ($P > F = 0.0001$).

Las mayores relaciones C: N de los sustratos evaluados se encontraron en los sustratos 1 y 2 con 88.62 y 89.20 respectivamente. Lo anterior claramente nos indica

que estos sustratos poseen mayor cantidad de C y por lo tanto su grado de degradación microbiológica es nulo.

Los sustratos testigos tuvieron relaciones C: N de 57.27 y 54.26 respectivamente. En este caso es difícil establecer la degradación de estos sustratos utilizando la relación C: N por el hecho de que contienen aditivos como la vermiculita, calcita y dolomita. Lo que sí conocemos, es que estos tienen una degradación parcial y se encuentran clasificados de acuerdo a su grado de degradación entre H2 y H3 (Caraveo, 1994). La escala de Von Post comprende valores desde H1 hasta H10; representando H1 una turba totalmente sin descomponer y H10 una turba totalmente descompuesta. Cada punto de la escala representa aproximadamente un 10 % de descomposición (Canadian Sphagnum Peat Moss Association, 1996), por lo que el componente orgánico de estas turbas puede tener entre un 20 % y 30 % de degradación.

Los sustratos 9, 10 y 11 con 15 días de degradación biológica presentan relaciones C: N de 41.13, 35.61 y 30.47 respectivamente. Estas relaciones son menores que las que presentan los sustratos 1 y 2 sin degradación biológica debido a la adición de nitrógeno inorgánico, sin embargo, son mayores que las relaciones C: N de los sustratos 3 a 8 con degradación biológica por 90 días, debido a la escasa degradación sufrida durante 15 días.

Los sustratos del 3 al 8 con degradación biológica durante 90 días presentaron relaciones C: N entre 21.51 en el sustrato 5 y 32.07 en el sustrato 7.

Se encontró una relación inversa entre el contenido de C y el contenido de N en estos materiales. El coeficiente de determinación (R^2) entre estas dos variables fue de 0.74 con un coeficiente de correlación de $r = -0.86$, lo cual indica que al disminuir el porcentaje de C aumenta el porcentaje de N.

La relación C: N es un parámetro que se puede utilizar para determinar la madurez de una composta, sin embargo Bunt (1976), señala que la relación C: N no es un parámetro confiable para la determinación de la madurez de una composta y que es necesario considerar las formas bioquímicas de C; materiales con alto contenido de lignina tienen mayor bioestabilidad que aquellos con celulosa y hemicelulosa.

Los resultados de la relación C: N en los sustratos 3 a 8 reafirman lo señalado por Bunt (1976).

En general, estos sustratos poseen relaciones C: N bajas, e iguales o cercanas a las relaciones C: N reportadas en la literatura para las compostas derivadas de materiales que han sufrido un proceso intenso de degradación biológica, sin embargo, los sustratos de paja de trigo presentan partículas con muy poca degradación, haciendo hincapié de que poseen una relación C: N similar a la de una composta madura, pero no presentan una degradación biológica importante.

Guerrero y Polo (1992) señalan que en materiales que han sufrido degradación una relación C: N menor de 20 es buena, entre 20 y 25 es aceptable, entre 25 y 30 es deficiente y mayor de 30 es mala. Lo anterior, con la finalidad de señalar directrices tendientes a la utilización de N extra por los microorganismos en los materiales utilizados como sustratos cuando las relaciones C: N no son adecuadas.

De acuerdo con lo anterior, en algunos sustratos de paja de trigo, como los casos de los sustratos 3, 4, 7 y 8 se esperaba que al ser utilizados como sustratos en el crecimiento de plántulas de brócoli, presenten una degradación importante al agregar soluciones nutritivas con nitrógeno fácilmente aprovechable por los microorganismos. Asimismo, se esperaba una degradación mayor en los sustratos con relaciones C: N mayores. Sin embargo esto no aconteció, y se tratará con mayor profundidad en un apartado más adelante.

7.3.3 Porcentaje de plántulas emergidas a los seis días después de la siembra

De acuerdo con los datos presentados en el Cuadro 9, no hubo diferencia significativa en el porcentaje de plántulas emergidas en los sustratos a los seis días después de la siembra (DDS) ($P > F = 0.128$); todos los sustratos estadísticamente presentaron el mismo porcentaje de plántulas emergidas.

Aunque no se observaron efectos de las CFST sobre la emergencia de las plántulas en los sustratos de paja de trigo, en las raíces de las plántulas en los sustratos 3 y 6 se detectó una coloración café intensa en las raíces de 4 o 5 plántulas de una repetición, probable síntoma de inhibición sobre el crecimiento de las raíces de estas plántulas.

Cuadro 9. Porcentaje de emergencia de plántulas en 13 sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot, seis días después de la siembra.

Sustrato	Plántulas emergidas
	%
1	96.87 a
2	97.91 a
3	97.39 a
4	97.91 a
5	98.95 a
6	97.91 a
7	98.95 a
8	99.47 a
9	97.91 a
10	97.39 a
11	97.39 a
11 (Sogemix VT-M)	96.35 a
12 (Sunshine 3)	96.87 a
P>F	0.128
DHS	3.57

DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en la columna son iguales estadísticamente.

El efecto de inhibición sobre las raíces de las plántulas de brócoli, es muy probable que haya sido debido a las altas concentraciones de fenólicos solubles totales (CFST) en forma de fenólicos simples o no tan complejos, presentes aún en estos sustratos, los cuales no se condensaron lo suficiente durante el tratamiento biológico de los mismos (Cuadro 7).

A los tratamientos 3 y 6 no se les extrajeron los compuestos fenólicos, en el proceso

de transformación biológica, por lo que sus concentraciones fueron las mayores al inicio del experimento en relación con los demás sustratos de paja de trigo (Cuadro 7).

Para disminuir el efecto de inhibición de los compuestos fenólicos sobre las raíces de las plántulas de brócoli detectadas en la emergencia y su probable inhibición posteriormente, en los tratamientos 3 y 6, se aplicó agua a pH 5.5 con una aspersora de mochila hasta obtener drenaje. Los síntomas de inhibición desaparecieron a los dos días después de la aplicación del agua. No se observaron síntomas de inhibición similares en los demás sustratos de paja de trigo.

Los promedios de los porcentajes de emergencia de plántulas de brócoli de todos los tratamientos fueron iguales estadísticamente. Lo anterior, sugiere que, con excepción de lo señalado para los sustratos 3 y 6, ninguna de las propiedades físicas (p. ej. porosidad de aire) o químicas iniciales de los sustratos (pH, CE y CFST, etc.) afectaron negativamente la germinación de las semillas y por consecuencia la emergencia de las plántulas.

7.3.4 Propiedades químicas de los sustratos a los 10, 20 y 25 días después de la siembra

7.3.4.1 pH

En las Figuras 11 y 12, se muestra la dinámica de los valores de pH registrados en los sustratos a los 0, 10, 20, 25 y 30 DDS. La dinámica del pH para los sustratos de paja de trigo del 1 al 11, muestra que presentaron valores ligeramente arriba de 6.0 al menos durante 25 días, de los 30 en que estuvieron las plántulas creciendo en los sustratos en las charolas. En varios de los sustratos de paja de trigo se observa que el pH aumentó ligeramente en relación al inicial.

En los últimos cinco días de crecimiento de las plántulas de brócoli en los sustratos de paja de trigo, el pH de estos sustratos disminuyó ligeramente con respecto al pH a los 25 DDS.

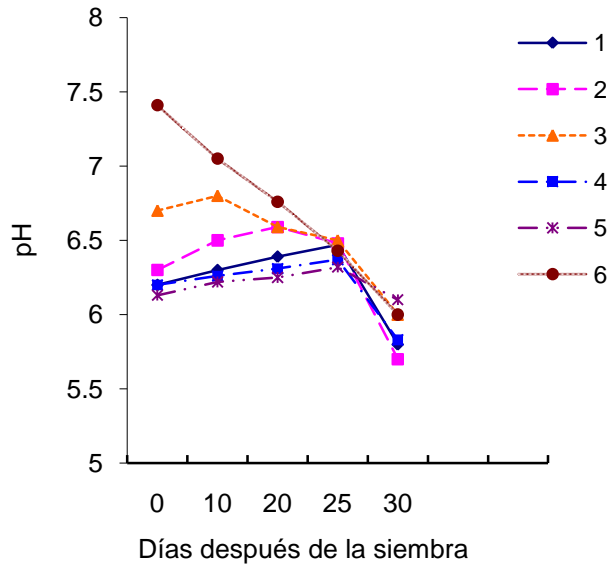


Figura 11. Dinámica del pH en los sustratos 1-6 durante el experimento.

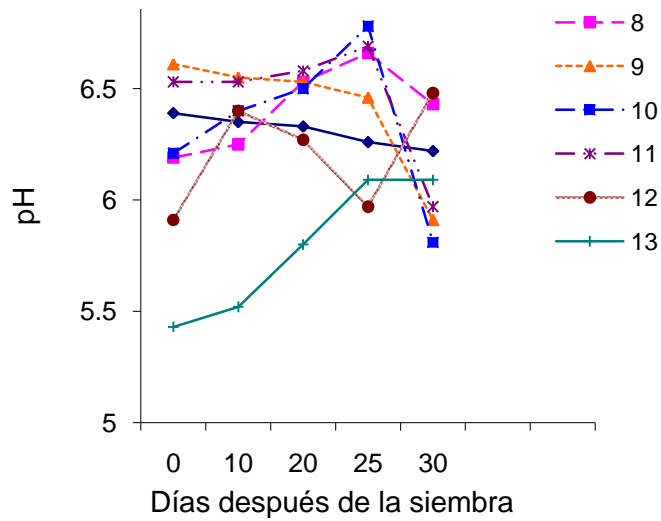


Figura 12. Dinámica del pH en los sustratos 7-13 durante el experimento.

Por ejemplo, el sustrato 8 de paja de trigo presentó una diferencia entre el pH inicial (6.19) y el registrado a los 25 DDS (6.66) de 0.47 unidades.

El pH de los sustratos testigos también aumentó, sin embargo, este incremento fue superior al que se observó en los sustratos de paja de trigo; en el sustrato 12 (Sogemix VT-M) el máximo incremento del pH se presentó a los 30 días después de la siembra (DDS) alcanzando 0.57 unidades de diferencia, mientras que el sustrato

Sunshine 3 alcanzó una diferencia de 0.66 unidades entre el pH inicial y el registrado a los 30 DDS.

Los fabricantes de los sustratos testigos con base en turba derivada de la degradación parcial de musgos del género *Sphagnum*, señalan que de acuerdo a los ingredientes adicionados a la turba para el control del pH en estos sustratos (calcita, dolomita, o ambos, y en el caso del Sunshine 3, CaSO_4) el pH del sustrato permanece en el intervalo de 5.5 a 6.5 (Premier, S/F; Sun Gro Horticulture Analytical Laboratories, S/F).

En las Figuras 11 y 12 se observa que con excepción del sustrato 6 de paja de trigo, todos los demás sustratos de paja de trigo presentaron un pH bastante estable. SE considera que los valores de pH fueron adecuados para el crecimiento de las plantas. Escudero (1993), señala que el pH más adecuado para el crecimiento de las plantas se encuentra entre 5.5 y 6.8. Premier (S/F) señala que un pH adecuado para el crecimiento de las plántulas es entre 5.2 y 6.2, Sun Gro Horticulture Analytical Laboratories (S/F) señalan que el intervalo normal de pH en un sustrato debe de encontrarse entre 5.2 y 6.30.

Los valores de pH en los sustratos durante las diferentes fechas de muestreo en el experimento, los cuales se utilizaron para la elaboración de las Figuras 11 y 12, la significancia de los análisis de varianza y la comparación entre medias se presentan en el Cuadro 1 del apéndice D.

7.3.4.2 Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica (CE- dS m^{-1}) de los sustratos evaluados a los 0, 10, 20, 25 y 30 DDS se muestra en las Figuras 13 y 14. Con excepción del sustrato 6 de paja de trigo con una CE de 2.59 dS m^{-1} , la CE inicial de todos los demás sustratos se encuentra en el intervalo considerado por Ansorena (1994) como adecuado para el establecimiento de semilleros y medios con mucha materia orgánica (0.75 dS m^{-1} y 1.99 dS m^{-1} obtenidos en el extracto de saturación).

A los 10 DDS la CE de todos los sustratos se incrementó por efecto de la aplicación de la solución nutritiva al 100 % con una CE aproximada de 2.5 dS m^{-1} considerando

también que durante este periodo las plántulas de brócoli demandan pocos nutrientes.

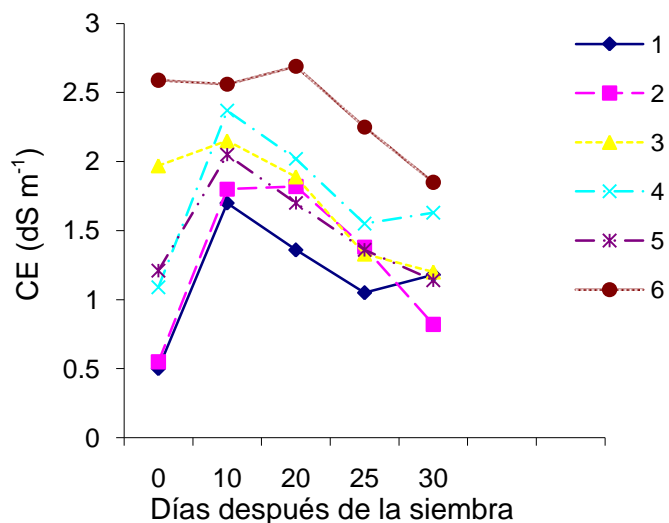


Figura 13. Conductividad eléctrica (dS m⁻¹) en los sustratos 1-6 durante el experimento.

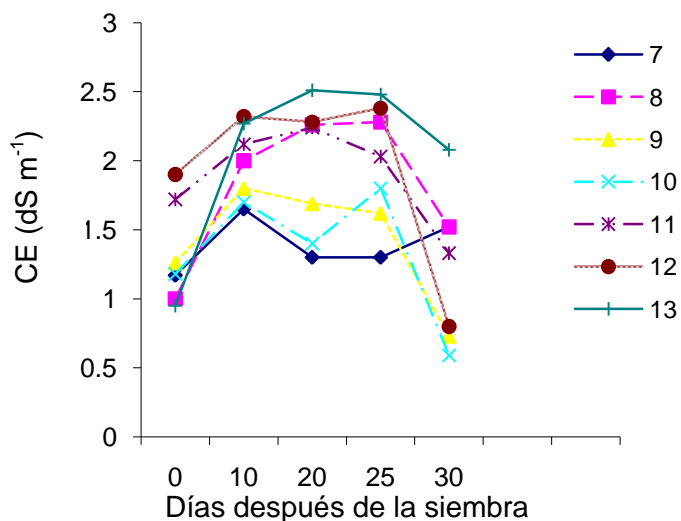


Figura 14. Conductividad eléctrica (dS m⁻¹) en los sustratos 7-13 durante el experimento.

Después de los 10 DDS, la CE de los sustratos 1 al 7, 9, 11 y 12 mostró en general una tendencia a disminuir hasta los 25 DDS, la CE en el sustrato 8 mostró una

tendencia a incrementarse hasta los 25 DDS, la CE en el sustrato 10 fue muy variable y en el sustrato 13 (Sunshine 3) aumentó sustancialmente hasta alcanzar un valor de 2.27 dS m^{-1} . La gran mayoría de los sustratos permanecieron abajo de 2.50 dS m^{-1} .

A los 25 DDS y después de tomar la muestra para medir la CE en los sustratos, se regó únicamente con agua a pH 5.5 para disminuir la CE y al mismo tiempo iniciar el proceso de “curado o endurecimiento” de las plántulas. Los riegos a los 25 DDS y hasta los 30 DDS se hicieron con agua a pH 5.5. Los valores de CE en los sustratos durante las diferentes fechas de muestreo en el experimento, las cuales se utilizaron para la elaboración de la Figuras 13 y 14, la significancia de los análisis de varianza y la comparación entre medias, se presentan en el Cuadro 2 del apéndice D.

7.3.4.3 Concentración de fenólicos solubles totales

En las Figuras 15 y 16 se muestra la dinámica de las CFST en los sustratos a los 0, 10, 20, 25 y 30 DDS.

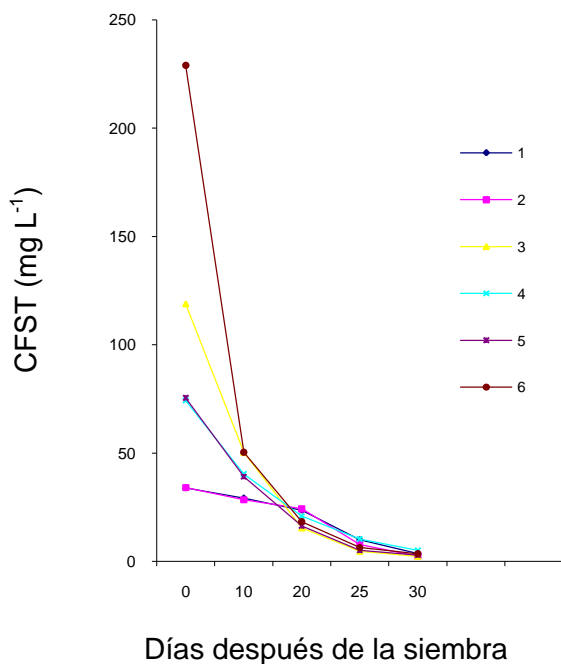


Figura 15. Dinámica de la concentración de fenólicos solubles totales (mg L^{-1}) en los sustratos 1-6 durante el experimento.

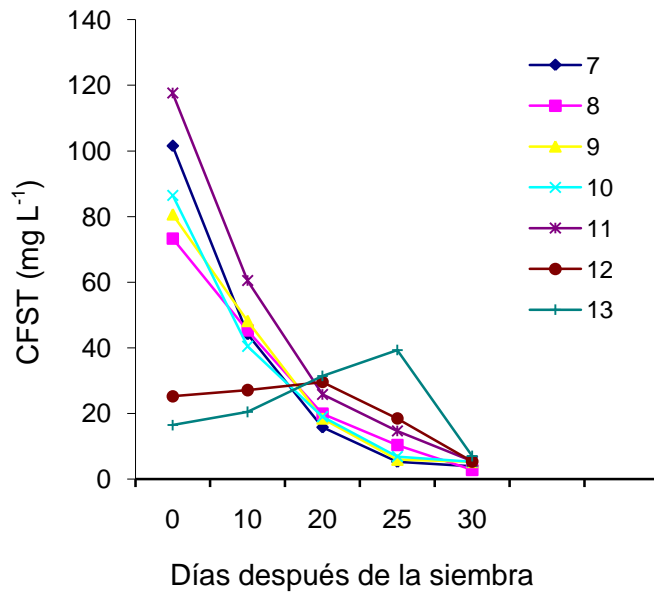


Figura 16. Dinámica de la concentración de fenólicos solubles totales (mg L^{-1}) en los sustratos 7-13 durante el experimento.

Las CFST en los sustratos de paja de trigo disminuyeron en relación con el tiempo transcurrido, presentando la mayor disminución durante los primeros 10 DDS. El sustrato 12 (Sogemix VT-M) mostró un ligero incremento en las CFST hasta los 20 DDS, para después disminuir a los 30 DDS. El sustrato 13 (Sunshine 3), presentó incrementos sustanciales en las CFST a partir de los 10 DDS y hasta los 25 DDS para posteriormente disminuir a los 30 DDS.

Los incrementos en la CFST en los sustratos testigos se podrían atribuir a ligeras descomposiciones o transformaciones biológicas de algunos compuestos constituyentes de estos sustratos. Las turbas no son completamente bioestables. La bioestabilidad de los sustratos se abordará posteriormente con mayor profundidad.

En el Cuadro 10, se presentan las disminuciones o incrementos en las CFST en los sustratos evaluados, con respecto a las CFST determinadas inicialmente, expresados en porcentaje, en las muestras tomadas a los 10, 20, 25 y 30 DDS.

Como se mencionó anteriormente la mayor disminución de las CFST en los sustratos de paja de trigo se presentó en los primeros 10 DDS. La segunda mayor disminución de fenólicos solubles totales se presentó entre los 10 y 20 DDS. Después de los 20

DDS los decrementos en la CFST fueron relativamente menores. A los 25 DDS varios de los sustratos de paja de trigo disminuyeron su CFST hasta porcentajes mayores a 90 %.

Cuadro 10. Disminución o aumento de las concentraciones de fenólicos solubles totales en trece sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot.

Sustratos	10 DDS	20 DDS	25 DDS	30 DDS
% de disminución o incremento acumulado				
1	13.69	30.25	70.42	89.27
2	16.44	28.78	77.19	91.54
3	57.69	86.97	96.04	97.96
4	45.72	72.27	86.04	93.14
5	48.21	78.28	93.13	96.11
6	77.98	91.99	97.20	98.42
7	56.46	84.45	94.78	96.09
8	38.20	72.81	85.81	96.13
9	40.25	77.06	92.61	93.47
10	53.16	78.02	92.03	93.91
11	48.56	78.04	87.52	95.40
12 (Sogemix VT-M)	+ 8.11	+ 17.26	26.81	78.61
13 (Sunshine 3)	+ 24.54	+ 91.06	+ 139.55	57.10

DDS = días después de la siembra. Los valores con signo + representan incrementos. Los valores sin signo representan disminuciones.

La disminución de las CFST en todos los sustratos evaluados se atribuye a la pérdida de estos compuestos por lixiviación o drenaje, ocasionada por los riegos con solución nutritiva y agua a pH 5.5 sobre los sustratos.

Los lixiviados de los sustratos en las charolas, inicialmente presentaron un color café oscuro o muy oscuro y en el transcurso del tiempo el color fue cambiando hacia colores menos oscuros, ligeramente amarillo y amarillo casi translúcido al final del experimento.

Aunque la cuantificación de las CFST se realizó por medio de espectrofotometría

(colorimetría) utilizando el reactivo de Folin y Ciocalteu desarrollando una coloración azul oscura o clara dependiendo de la concentración, en este caso de las pajas de trigo se puede deducir, que sin hacer la prueba de reactividad con el reactivo de Folin y Ciocalteu y registrar su lectura en absorbancia en el espectrofotómetro, se podría decir a *grosso modo* si un determinado lixiviado tiene mayor o menor CFST, esto es, con la intensidad del color que presente el lixiviado se infiere la CFST.

La disminución, o la no detección de los fenólicos (dependiendo de su estructura) por falta de reacción con el reactivo de Folin y Ciocalteu, también se puede atribuir a reacciones de los fenólicos con los compuestos nitrogenados aplicados en la solución nutritiva, situación mencionada con anterioridad (Capítulo IV).

Los sustratos testigos también presentaron disminuciones importantes en el contenido de compuestos fenólicos (78.51 % en el sustrato Sogemix VT-M y 57.10 % en el sustrato Sunshine 3).

Aparentemente, y en ciertos sustratos, la disminución en la CFST es benéfica para el crecimiento de las raíces y parte aérea de las plántulas, sin embargo, este aspecto se profundizará posteriormente cuando se trate el tema relacionado al desarrollo de raíces y pelos radicales.

Los valores de las CFST en los sustratos durante las diferentes fechas de muestreo en el experimento, los cuales se utilizaron para la elaboración de las Figuras 15 y 16, la significancia de los análisis de varianza y la comparación entre medias, se presentan en el Cuadro 3 del apéndice D.

7.3.5 Propiedades químicas de los sustratos a los 30 DDS

7.3.5.1 pH

De acuerdo con el análisis de varianza hubo diferencia altamente significativa ($P > F = 0.0001$) en el pH entre los sustratos a los 30 DDS (Cuadro 11). Los sustratos 3, 5, 6, 7, 8, 9, 11 presentaron los valores de pH más altos entre los sustratos. En este apartado no se hablará más en relación al efecto del pH sobre el crecimiento de las

plántulas de brócoli. Este aspecto se abordó anteriormente en el apartado de dinámica del pH de los sustratos.

7.3.5.2 Conductividad eléctrica

De acuerdo con el análisis de varianza hubo diferencia significativa entre los sustratos en esta variable (Cuadro 11).

Aunque el análisis de varianza señala diferencias altamente significativas en la CE de los sustratos, las CE de estos se encuentran en el intervalo de 0.75 y 1.99 dS m⁻¹ (extracto de saturación), señalado por Bunt (1988) como adecuado para el crecimiento de las plantas en sustratos.

7.3.5.3 Concentración de fenólicos solubles totales

Las CFST en los sustratos al final del experimento también se presentan en el Cuadro 11. De acuerdo con el análisis de varianza hubo diferencias altamente significativas en las CFST entre los sustratos ($P > F = 0.0001$). El intervalo de CFST en los sustratos de paja de trigo al final del experimento fue entre 2.42 mg L⁻¹ en el sustrato 3 de paja de trigo y 5.46 mg L⁻¹ para el sustrato 11.

De acuerdo con las CFST obtenidas en el experimento descrito en el Capítulo V se contempla que en este experimento las CFST a los 30 DDS no inhiben el crecimiento de los pelos radicales, aun considerando que estos fenólicos pudieran ser de estructura simple, por lo que se considera que no afectan negativamente el crecimiento general de las plántulas de brócoli, sino que por el contrario, estas concentraciones pueden producir efectos estimulantes en el crecimiento.

Los sustratos testigos presentaron CFST de 5.46 mg L⁻¹ para el Sogemix VT-M y 7.06 mg L⁻¹ para el sustrato Sunshine 3. Los fenólicos solubles totales en los sustratos testigos representan fenólicos solubles complejos o de alto peso molecular, por lo que no causan inhibición en el crecimiento de las raíces y parte aérea de las plántulas de brócoli.

Cuadro 11. Propiedades químicas de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot, a los 30 DDS.

Sustrato	pH	CE	CFST
		dS m ⁻¹	mg L ⁻¹
1	6.80 c	1.18 dce	3.64 de
2	6.45 cd	0.82 def	2.48 e
3	7.00 abc	1.20 dce	2.42 e
4	6.83 bc	1.63 abc	5.09 bc
5	7.10 ab	1.14 cdef	2.93 de
6	7.00 abc	1.85 ab	3.60 de
7	7.22 ab	1.52 abc	3.96 cd
8	7.43 a	1.52 abc	2.83 de
9	6.91 abc	0.73 ef	5.26 bc
10	6.81 bc	0.59 f	5.26 bc
11	6.97 abc	1.33 bcd	5.46 b
12 (Sogemix VT-M)	6.48 cd	0.80 def	5.46 b
13 (Sunshine 3)	6.09 d	2.08 a	7.06 a
P>F	0.0001	0.0001	0.0001
DHS	0.55	0.57	1.32

CE = conductividad eléctrica; CFST = concentración de fenólicos solubles totales; DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

7.3.5.4 Materia orgánica

En el Cuadro 12, se presenta el contenido de materia orgánica (MO) de los sustratos a los 30 DDS. El análisis de varianza muestra que existe diferencia altamente significativa entre los sustratos evaluados ($P > F = 0.0001$).

Los sustratos 1 y 2 tuvieron los mayores porcentajes de materia orgánica al final del experimento con 89.95 % y 88.11 % respectivamente, y fueron estadísticamente diferentes a los demás.

Los sustratos 9, 10 y 11 de paja de trigo con 15 días de degradación biológica también presentaron altos porcentajes de MO, por tener poca degradación, y fueron estadísticamente iguales entre sí.

Cuadro 12. Materia orgánica, pérdida de materia orgánica, bioestabilidad y categoría de bioestabilidad de los sustratos evaluados en el crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot, a los 30 DDS.

Sustrato	MO	Pérdida de MO	B	CB
	%	%	%	
1	89.95 a	3.76	95.98	Muy alta
2	88.11 ab	4.66	94.96	Alta
3	80.88 de	4.68	94.52	Alta
4	81.56 de	7.28	91.80	Alta
5	80.05 ef	4.50	94.67	Muy alta
6	78.71 ef	5.83	93.09	Alta
7	83.76 cd	5.68	93.64	Alta
8	80.18 ef	6.58	92.41	Alta
9	84.08 cd	4.95	94.44	Muy alta
10	85.43 bc	6.80	92.62	Alta
11	85.61 bc	5.63	93.82	Alta
12 (Sogemix VT-M)	55.63 g	2.61	95.50	Muy alta
13 (Sunshine 3)	77.08 f	0.50	99.35	Muy Alta
P>F	0.0001	_____	_____	_____
DHS	1.90	_____	_____	_____

DDS = días después de la siembra. MO = materia orgánica; B = bioestabilidad; CB = categoría de bioestabilidad. DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Los sustratos del 3 al 8, presentaron estadísticamente el mismo porcentaje de MO y menor que el porcentaje de MO del sustrato 7.

Los sustratos testigos tuvieron el menor contenido de MO debido a los aditivos que contienen. Este aspecto se mencionó anteriormente cuando se trató el tema del contenido de MO de los sustratos, en las propiedades químicas iniciales.

Tomado como base el contenido de MO inicial y final de los sustratos, se observa que los porcentajes de MO en los sustratos de paja de trigo al final del experimento no disminuyeron apreciablemente, aunque hubo diferencia altamente significativa entre los sustratos.

Los porcentajes de pérdida de MO en los sustratos 1 y 2 fueron menores que en la gran mayoría de los sustratos de paja de trigo con algún grado de degradación previo, incluyendo a los de paja de trigo derivados de la degradación microbiológica por únicamente 15 días. Los porcentajes de disminución de materia orgánica en los sustratos de paja de trigo con degradación biológica, variaron entre 4.50 % en el sustrato 5 y 7.28 % en el sustrato 7. Los testigos perdieron menores porcentajes de MO; 2.61 % en el Sogemix VT-M y 0.5 % en el Sunshine 3.

La pérdida o disminución de MO en los sustratos de paja de trigo se atribuye principalmente, no exclusivamente, a la lixiviación de compuestos solubles (entre ellos los compuestos fenólicos) por la aplicación de los riegos.

Es conveniente señalar, que en pruebas de extracción de compuestos fenólicos de la paja de trigo, la pérdida inicial de compuestos solubles en agua común fue de 6.05 % y la paja tratada con agua a pH 5.5 perdió 6.28 % de MO (Capítulo III).

Por otro lado, Lemaire (1997), señala que la paja de trigo perdió aproximadamente un 22 % de MO a los 15 días, 24 % a los 30 días, 50 % a los 60 días, 55 % a los 90 días y 80 % a los 180 días después del inicio de la degradación microbiológica. La pérdida de MO se realizó sin la adición de N extra, al ya contenido en la paja de trigo. Los bajos porcentajes de pérdida de MO en los sustratos de paja de trigo encontrados en el presente trabajo no coinciden con lo reportado por Lemaire (1997), en donde la paja de trigo se consideró como un material poco bioestable después de 180 días (índice de bioestabilidad 0-70) de exposición a la degradación microbiológica, perdiendo el 24 % de su peso en 30 días, porque las condiciones de transformación biológica son diferentes y se atribuye a la lixiviación de los compuestos solubles y quizás también de microorganismos, por lo que no hubo

microorganismos específicos para degradar sustancialmente los constituyentes químicos de la paja de trigo (celulosa, hemicelulosa y lignina).

Por otro lado, los sustratos 3, 6 y 9 a los cuales no se les extrajeron los compuestos solubles, tampoco mostraron una pérdida importante de MO, ni físicamente en los tejidos de las partículas de estos sustratos al final del experimento se observó degradación. Blanco y Almendros (1995), señalan que en la paja de trigo a la que se le extrajeron los compuestos solubles por remojo durante 24 horas y posteriormente fue sometida a compostaje, únicamente perdió el 29 % de su peso, en comparación con otras pajas de trigo, las cuales no se sometieron a un pretratamiento de extracción de compuestos solubles en agua, las que perdieron entre el 42 % y 50 % de su peso en un periodo de 90 días.

Lo anterior, no concuerda exactamente con lo sucedido en el presente trabajo. Los sustratos a los que no se les extrajeron los compuestos solubles (3, 6 y 9) en el proceso de transformación biológica parcial, sin embargo perdieron compuestos solubles por los riegos proporcionados al ser usados como sustratos, y en el caso señalado por Blanco y Almendros (1995) los materiales de paja de trigo a los cuales no se les extrajeron los compuestos solubles, tuvieron una degradación entre 42 % y 50 %.

Los sustratos de paja de trigo a los cuales se les extrajeron los compuestos solubles y se sometieron a degradación por un periodo de 90 días, si sufrieron transformación biológica, por lo que no se puede atribuir que estos sustratos no tenían poblaciones de microorganismos para realizar la degradación de estos sustratos cuando se adicionaron con frecuencia fuentes de N fácilmente disponibles para los estos, simplemente las poblaciones probablemente disminuyeron con los riegos o no hubo suficientes microorganismos específicos para realizar la transformación, o simplemente murieron con las concentraciones de fenólicos solubles presentes en los sustratos.

Asimismo, se puede comentar que si los microorganismos no actuaron en la degradación de la MO disponible en los sustratos de paja de trigo durante los 30 días del experimento, podría existir la posibilidad de que exista algún otro factor que intervenga en el desarrollo de los microorganismos e influya de manera negativa en

la degradación.

A manera de sugerencia, se puede comentar que es probable que las raíces de las plántulas de brócoli puedan interactuar con el ambiente de los microorganismos presentes en los sustratos de paja de trigo, evitando la degradación de las partículas de paja, esto puede ser por exudación de sustancias que inhiben el crecimiento de los microorganismos, o bien las poblaciones de microorganismos disminuyeron o desaparecieron debido al proceso de humectación (riegos) y pérdida de humedad (evapotranspiración), que tuvieron los sustratos y que en algunas ocasiones este ciclo se llegó a realizar por cuatro veces en un día.

Los valores de pH, CE y CFST en los sustratos de paja de trigo no se consideran como factores que pudieran haber inhibido el crecimiento de los microorganismos. Otra posibilidad, tratando de explicar la poca pérdida de MO en los sustratos de paja de trigo, es que los microorganismos presentes en los sustratos de paja de trigo degradaron únicamente los pocos compuestos orgánicos solubles, los que relativamente se presentan en menor proporción en relación con los compuestos orgánicos presentes en la fase sólida.

Sin embargo, esta posibilidad podría no ser muy acertada, debido a que los microorganismos necesitan de oxígeno para realizar la degradación y de haber sido así, probablemente las raíces de las plántulas de brócoli hubieran sufrido de anoxia severa por falta de oxígeno, situación que aparentemente no se observó en las raíces en crecimiento en los sustratos de paja de trigo.

Por otro lado una de las características más importantes de un material orgánico para ser utilizado como sustrato en el crecimiento de plantas es que tenga suficiente bioestabilidad, esto es, que debe de perder poca materia orgánica y conservar sus propiedades físicas y químicas durante varios meses, o simplemente durante el periodo en el que la planta se desarrolle en el sustrato (Lemaire, 1997).

Tomando como única característica la pérdida de materia orgánica, la bioestabilidad de los sustratos de paja de trigo que se evaluaron, se ubicó en la categoría entre alta y muy alta bioestabilidad (Cuadro 12), condición similar a la que presentaron los sustratos testigos, indicando así que la pérdida de MO durante los 30 días del crecimiento de las plántulas es muy baja.

Las consecuencias de falta de bioestabilidad son: pérdida de volumen, trayendo como consecuencia compactación del sustrato, disminución de la porosidad, disminución del contenido de aire y de agua a pF1 (- 1kPa - contenido de agua en un sustrato después de aplicar una succión de 10 cm de columna de agua), alteración del tamaño de partículas, cambio en la composición de la fase gaseosa debido a la producción de CO₂, incremento del pH, conductividad eléctrica y salinidad debida a la mineralización, síntesis de nuevos compuestos orgánicos con efectos fitotóxicos o estimulantes (Lemaire, 1995).

La metodología para determinar la bioestabilidad de acuerdo con Lemaire (1997), se hace con los materiales orgánicos guardados en contenedores de plástico negro de dos litros, los cuales se humedecen hasta capacidad de campo y se cubren con una bolsa plástica de color negro y se colocan en un invernadero. Se deja que los microorganismos contenidos en el sustrato actúen durante un tiempo predeterminado, generalmente largo, situación diferente a lo acontecido en este trabajo.

Durante este experimento no se observó disminución importante en el volumen de los sustratos de paja de trigo en las celdas de las charolas, ni aumento en la CFST (compuestos fitotóxicos) como posibles productos de la degradación microbiológica de la lignina de la paja de trigo (Camarero *et al.*, 1994).

7.3.5.5 Capacidad de amortiguamiento del pH de los sustratos 5 y 8 de paja de trigo parcialmente degradada

Con la finalidad de conocer la capacidad de amortiguamiento del pH de los sustratos de paja de trigo, de acuerdo al comportamiento del pH presentado por estos durante los 30 días en que las plántulas de brócoli crecieron en los sustratos evaluados (Figuras 11 y 12), se realizó una prueba de amortiguamiento del pH en los sustratos 5 y 8, después de un tiempo de reposo de la solución por dos y 12 horas. En la Figura 17, se presentan los resultados de esta prueba, observando que las soluciones de los sustratos presentan resistencia a cambiar drásticamente su pH.

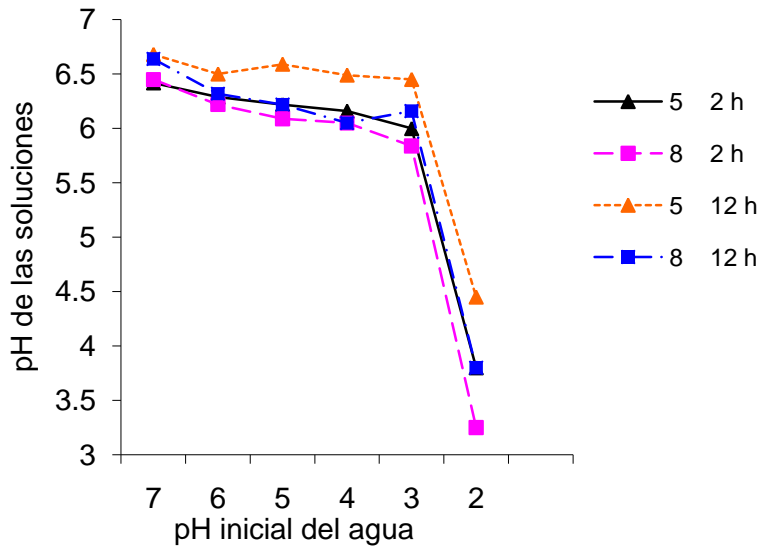


Figura 17. Curvas de amortiguamiento del pH en los sustratos 5 y 8 de paja de trigo, a las dos y doce horas después de su inicio.

Cuando se adicionó agua a pH 7.0, el pH resultante de los sustratos después de dos y 12 horas fue de 6.42 y de 6.68 para el sustrato 5, y 6.45 y 6.64 para el sustrato 8. Cuando el agua que se adicionó fue con pH de 3, los sustratos 5 y 8 aún pudieron mantener sus pH relativamente estables en valores ligeramente por arriba de 5.5. El pH de la solución de los sustratos disminuyó drásticamente hasta que a los sustratos se les adicionó agua con pH 2, obteniendo valores en el intervalo de 4.45 para el sustrato 8 después de 12 horas de equilibrio y de 3.25 para el sustrato 8 después de dos horas de equilibrio.

El cambio de pH de los sustratos fue moderado en relación a la concentración de iones hidrógeno adicionada con el agua a los valores de pH mencionados. Por ejemplo, el sustrato 5 con dos horas de equilibrio, cambió su pH inicial de 6.42 (con agua a pH 7) a 6.0 al adicionar agua a pH 3, con una diferencia de 0.42 unidades, mientras que el sustrato 8 después de dos horas, cambió de un pH inicial de 6.45 a 5.84, al adicionar agua a pH de 3, con una diferencia de 0.61 unidades. La diferencia en concentraciones en iones de H entre el agua a pH 7 y el agua a pH 3 es de 10,000 veces más en el segundo, por lo que se puede inferir que los sustratos tienen una gran capacidad de amortiguamiento o de neutralización de los iones H. La

capacidad de amortiguamiento del pH de los sustratos 5 y 8 de paja de trigo con degradación parcial se puede atribuir a los compuestos húmicos o prehúmicos presentes en los sustratos de paja de trigo con 90 días de transformación biológica.

El resultado de la capacidad de amortiguamiento de la paja de trigo o cambio de pH del sustrato con granulometría 80-20, con extracción de compuestos fenólicos y la paja pura sin extracción previa de compuestos solubles se presenta en la Figura 18.

El pH de la solución en la paja de trigo con granulometría 80-20, después de aplicar agua desionizada a pH 5.37, inicialmente se incrementó de manera drástica durante los primeros 10 minutos alcanzando un valor de 6.83, y posteriormente los incrementos fueron más ligeros.

Para el caso de la paja pura, sin degradación, se observa también que el pH inicial de 5.10 del agua desionizada se incrementó rápidamente en los primeros 10 minutos alcanzando un valor de 6.74, sin embargo, el comportamiento después de 10 minutos fue diferente al de la paja de trigo con granulometría 80-20; los valores de pH disminuyeron ligeramente hasta llegar a 6.45 después de 60 minutos.

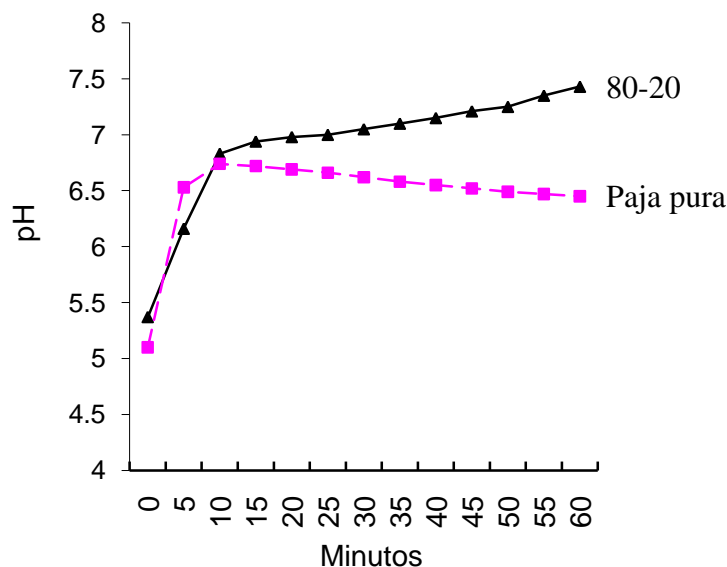


Figura 18. Cambio de pH del sustrato 80-20 de paja de trigo y paja pura. pH inicial del agua desionizada = 5.37 y 5.10 respectivamente.

La disminución del pH en la paja de trigo pura después de 10 minutos, se puede atribuir quizás a los fosfatos (597.05 mg L^{-1} de P) los cuales influyen en la disminución del pH, sin embargo en el sustrato 80-20 con extracción de compuestos solubles y enjuague tres veces, puede tener menor concentración de P (fosfatos) que la paja pura, por lo que el pH se incrementa.

Es probable, que al no existir fosfatos que puedan acidificar este sustrato, los iones H presentes en el agua desionizada reaccionen con alguno o algunos de los componentes químicos de la paja de trigo (celulosa, hemicelulosa y/o lignina), presentándose una disminución de la concentración de iones H y por lo tanto el pH se incrementa. No se encontró información relacionada con este aspecto en la paja de trigo.

Por otro lado, también es probable que los HCO_3 presentes en el agua común con la que se trataron los sustratos de paja de trigo contribuyan ligeramente al incremento del pH de estos.

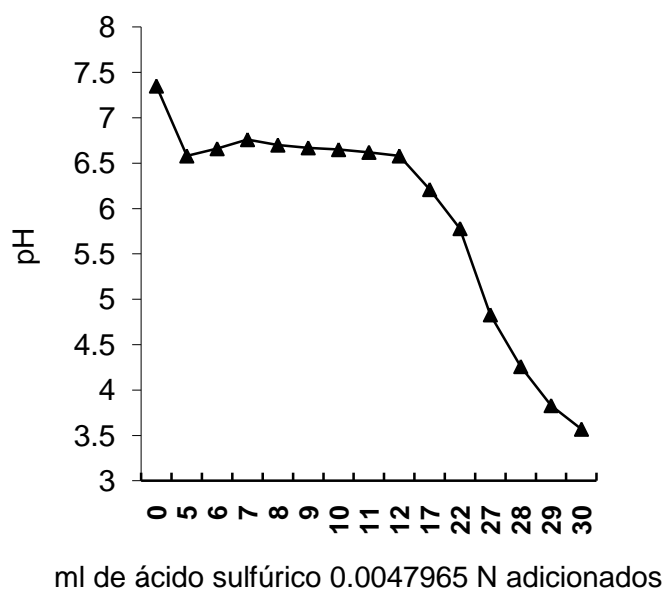


Figura 19. Curva de amortiguamiento del pH del agua corriente del Laboratorio de Nutrición Vegetal. pH inicial = 7.35.

La Figura 19 muestra que el agua común del Laboratorio de Nutrición Vegetal, Programa de Edafología del Colegio de Posgraduados, tiene cierto grado de amortiguamiento, cuando se le aplicó una solución de ácido sulfúrico 0.0047965 N.

7.3.6 Variables evaluadas en vástagos y raíces de plántulas de brócoli a los 30 DDS

7.3.6.1 Deficiencias nutrimentales

Visualmente no se detectaron deficiencias de ningún nutrimento en las hojas de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos durante el experimento.

Los resultados de las variables evaluadas en los vástagos o en raíces de las plántulas de brócoli se presentan en los Cuadros 13 y 14.

Cuando se mencione alguna variable de crecimiento de las plántulas, se entiende que el valor señalado es el promedio de diez plántulas.

7.3.6.2 Lecturas SPAD

El análisis de varianza indica que no hay diferencias significativas ($P = 0.05$) en las lecturas SPAD tomadas en las hojas más desarrolladas de las plántulas de brócoli, que crecieron en los sustratos ($P > F = 0.07$).

El intervalo de valores para esta variable se encuentra entre 50.67 en el sustrato 8 y 46.60 en el sustrato 10. Lo anterior significa que específicamente, las hojas de las plántulas en las que se tomaron las lecturas presentan estadísticamente el mismo contenido de N y/o clorofila, los que se encuentran íntimamente relacionados.

De acuerdo con lo anterior ningún factor de los sustratos o del medio ambiente exterior influyó negativamente en esta variable. Las lecturas SPAD, determinan el estado nutrimental específico y momentáneo de N y/o contenido de clorofila en las hojas más desarrolladas en este caso, sin embargo, no se desecha la posibilidad de que en etapas anteriores (hojas más viejas) haya habido problemas de deficiencias

de N entre los vástagos de las plántulas, aunque visualmente no se percibieron estas posibles deficiencias (posible hambre oculta).

Cuadro 13. Lecturas SPAD y algunas variables de crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot a los 30 DDS.

Sustrato	SPAD	LV	LBHE	LBPHV
		-----cm-----		
1	49.95 a	14.17 cd	1.64 ef	3.38 gh
2	46.80 a	15.81 c	2.01 cde	4.33 cdef
3	46.90 a	18.01 ab	2.20 bcd	4.52 cde
4	47.75 a	13.93 d	1.41 f	3.19 h
5	50.45 a	19.57 a	2.49 ab	5.54 ab
6	47.75 a	15.40 cd	1.74 def	3.84 efgh
7	50.05 a	15.87 c	1.72 ef	4.17 def
8	50.67 a	18.02 ab	2.25 bc	5.07 bc
9	50.02 a	17.70 b	1.76 def	4.68 cd
10	46.60 a	15.89 c	1.69 ef	4.13 defg
11	49.52 a	14.00 d	1.64 ef	3.58 fgh
12 (Sogemix VT-M)	48.55 a	18.95 ab	2.86 a	6.10 a
13 (Sunshine 3)	47.45 a	18.32 ab	2.55 ab	5.67 ab
P>F	0.07	0.0001	0.0001	0.0001
DHS	4.84	1.75	0.47	0.77

SPAD = lecturas SPAD; LV = longitud de vástagos; LBHE = longitud de la base a las hojas embrionarias; LBPHV = longitud de la base a la primera hoja verdadera. DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

El contenido de N total en los vástagos nos puede ayudar a comprender lo sucedido nutrimentalmente con el N, con anterioridad a la etapa en la que se tomaron las lecturas SPAD.

7.3.6.3 Longitud de vástagos

El análisis de varianza para esta variable señala que hubo diferencias altamente

significativas entre la longitud de los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los diversos sustratos ($P > F = 0.001$). Las mayores longitudes de vástago se obtuvieron en plántulas que crecieron en los sustratos 5, Sogemix VT-M, Sunshine 3, 8 y 3, los cuales fueron estadísticamente iguales con longitudes de 19.57 cm, 18.95 cm, 18,32 cm, 18.02 cm y 18.01 cm respectivamente, y fueron estadísticamente diferentes a los demás sustratos evaluados.

De acuerdo con los resultados anteriores, los sustratos de paja de trigo mencionados, aparentemente suministraron a las raíces de las plántulas de brócoli un medio de crecimiento similar al del Sogemix VT-M y al del Sunshine 3, lo que permitió a la parte aérea de las plántulas tener longitudes de vástago similares.

En el caso de los demás sustratos de paja de trigo, los menores valores en la longitud de vástago con respecto al testigo Sogemix VT-M se atribuyen principalmente al efecto de las CFST presentes en los sustratos de paja de trigo en el periodo comprendido entre los 9 ó 10 DDS y quizás 15 DDS (este efecto se explicará con mayor detalle posteriormente), y se encuentra relacionado con la presencia y densidad de pelos radicales en las raíces de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo.

Los análisis de regresión simple y múltiple de las variables independientes en las siete fechas en que se registraron el pH, la CE y la CFST, muestran que únicamente la variable CFST, a los 10 DDS tuvo una relación importante y significativa con la longitud de vástagos de las plántulas ($R^2 = 0.649$ y $P > F = 0.0158$). Esta misma variable en las demás fechas de registro de las variables independientes mostró valores de R^2 muy bajos y no significativos tomando como nivel de confianza un $\alpha = 0.05$.

7.3.6.4 Longitud de la base a las hojas embrionarias y longitud de la base a la primera hoja verdadera

Los análisis de varianza para estas variables señalan que existe diferencia altamente significativa entre los sustratos (ambas $P > F = 0.001$). Las plántulas de brócoli que presentaron las mayores longitudes de la base a las hojas embrionarias y de la base

a la primera hoja verdadera, fueron las que crecieron en los sustratos testigos y en los sustratos 5 y 8 de paja de trigo y fueron estadísticamente iguales entre sí (Cuadro 13).

Las plántulas de brócoli que crecieron en los demás sustratos se vieron afectadas, al mostrar menores longitudes con relación a los sustratos testigos y los sustratos 5 y 8 de paja de trigo.

No se encontró una relación entre el tipo de fenólicos y el grado de inhibición en estas variables, esto es, se esperaba que los fenólicos “simples” solubles presentes en los sustratos 1 y 2, causaran mayor grado de inhibición del crecimiento que los compuestos fenólicos “complejos” presentes en los demás sustratos de paja de trigo derivados de un proceso de degradación biológica.

Lo anterior sugiere que los compuestos fenólicos presentes en los sustratos de paja de trigo (excepto los sustratos 5 y 8) inhibieron el crecimiento del tallo entre la emergencia de las plántulas y probablemente hasta los 15 DDS en la primer variable y hasta los 18 DDS en la segunda, tiempo aproximado en el que se observó en primer lugar el máximo crecimiento del tallo hasta la hojas embrionarias y la aparición de la primera hoja verdadera en el segundo. Los porcentajes de inhibición en estas variables en los sustratos de paja de trigo con respecto al valor del sustrato Sogemix VT-M, oscilaron entre 12.93 % en el sustrato 5 y 50.69 % en el sustrato 4 en la primer variable, y 9.18 % y 47.70 % en los mismos sustratos anteriores en la segunda variable. Aparentemente el efecto de inhibición fue mayor sobre la longitud de la base a las hojas embrionarias (LBHE) que en la longitud de la base a la primera hoja verdadera (LBPHV) y se atribuye directamente a las concentraciones y clase de fenólicos solubles totales en los sustratos de paja de trigo.

7.3.6.5 Diámetro de tallo

El análisis de varianza señala que hubo diferencia altamente significativa ($P > F = 0.003$) entre los diámetros de tallo de los vástagos que crecieron en los sustratos.

Las plántulas de brócoli que presentaron los mayores diámetros de tallo y resultaron estadísticamente iguales, fueron las que crecieron en los sustratos testigos y seis de

los sustratos de paja de trigo, entre ellos los sustratos 5 y 8 (Cuadro 14).

Las plántulas de brócoli que crecieron en los demás sustratos se vieron afectadas al mostrar menores valores a los presentados por los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos señalados con anterioridad.

Los porcentajes de inhibición en esta variable con respecto al valor obtenido en el sustrato Sogemix VT-M, oscilaron entre 1.79 % en el sustrato 5 y 13.17 % en el sustrato 4. De acuerdo con los datos presentados en el Cuadro 14, el diámetro de tallo fue afectado en menor grado que las variables LBHE y LBPHV. Se observaron efectos estimulantes en esta variable principalmente en el sustrato 8. No se observó tampoco una relación entre el tipo de fenólicos y el grado de inhibición sobre esta variable.

7.3.6.6 Peso de materia seca de vástagos

El peso de materia seca de vástagos (PMSV) se presenta también en el Cuadro 14. El análisis de varianza indica diferencias altamente significativas en esta variable entre los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos ($P > F = 0.0001$). Los mayores PMSV lo presentaron las plántulas que crecieron en los sustratos 5 (2.03 g), Sunshine 3 (1.93 g), 8 (1.90 g), Sogemix VT-M (1.87), 6 (1.85 g) y 7 (1.65 g), los cuales fueron estadísticamente iguales. No se encontraron relaciones importantes (R^2) ni significativas entre el PMSV y las propiedades físicas y/o propiedades químicas (incluyendo a las CFST) de los sustratos en las diferentes fechas de muestreo.

Muy probablemente las diferencias que se presentaron en el PMSV de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo se pueden atribuir al efecto de inhibición del crecimiento, causado por las CFST en las primeras etapas de crecimiento de las mismas.

Si tomamos en consideración al PMSV como la variable principal de crecimiento en las plántulas de brócoli se puede decir que los sustratos 5, 6, 7 y 8 de paja de trigo, con degradación biológica parcial, produjeron plántulas de brócoli de la misma calidad que las plántulas que crecieron en los sustratos testigos.

Cuadro 14. Variables de crecimiento de plántulas de brócoli cv. Patriot a los 30 DDS.

Sustrato	DIAM	VR	PMSR	PMSV	PMSV/ PMSR
	mm	mL	-----g-----		
1	1.55 bc	0.71 bc	0.39 bcd	1.55 bcdef	3.94 a
2	1.58 abc	0.81 ab	0.39 bcd	1.42 def	3.64 a
3	1.59 abc	0.86 ab	0.42 bc	1.77 abcde	4.26 a
4	1.45 c	0.58 cd	0.38 bcd	1.44 cdef	3.77 a
5	1.70 ab	0.84 ab	0.46 b	2.03 a	4.37 a
6	1.71 ab	0.73 bc	0.38 bcd	1.85 abcd	4.81 a
7	1.70 ab	0.74 abc	0.36 cd	1.65 abcde	4.60 a
8	1.78 a	0.84 ab	0.43 bc	1.90 ab	4.50 a
9	1.62 abc	0.74 abc	0.39 bcd	1.56 bcdef	4.03 a
10	1.56 bc	0.77 abc	0.37 cd	1.34 ef	3.63 a
11	1.57 abc	0.50 d	0.33 d	1.16 f	3.51 a
12 (Sogemix VT-M)	1.67 ab	0.93 a	0.57 a	1.87 abc	3.29 a
13 (Sunshine 3)	1.57 abc	0.86 ab	0.44 bc	1.93 ab	4.36 a
P>F	0.0003	0.0001	0.0001	0.0001	0.041
DHS	0.21	0.19	0.084	0.4412	1.58

DIAM = diámetro de tallo; VR = volumen de raíz; PMSR = peso de materia seca de raíz; PMSV = peso de materia seca de vástagos; PMSV/PMSR = relación peso de materia seca de vástagos/peso de materia seca de raíces. DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Las disminuciones esta variable con respecto al PMSV del sustrato Sunshine 3, variaron entre 1.60 % en el sustrato 8 y 37.96 % en el sustrato 11.

7.3.6.7 Volumen de raíz

La P> F del análisis de varianza y la comparación entre medias para esta variable se presentan en el Cuadro 14. El análisis de varianza señala que hubo diferencia altamente significativa entre los sustratos evaluados (P> F = 0.0001).

La comparación entre medias establece que los sustratos testigos y los sustratos 2, 3, 5, 7, 8, 9 y 10 de paja de trigo, estadísticamente tuvieron el mismo volumen de raíz y presentaron los mayores valores, mostrando el valor más alto el sustrato Sogemix VT-M con un volumen de raíz de 0.93 mL.

El efecto de los compuestos químicos solubles provenientes de la degradación de la paja de trigo fue más drástico en el volumen de raíz en las plántulas que crecieron en el sustrato 11 que en las raíces de las plántulas que crecieron en los sustratos 1 y 2 sin degradación, y que en los sustratos 9 y 10 con 15 días de degradación (mayor concentración de fenólicos que inhiben el crecimiento o mayor toxicidad).

El intervalo de valores de volumen de raíz se encontró entre 0.93 mL en el sustrato Sogemix VT-M y 0.50 mL en el sustrato 11. El menor crecimiento de las raíces en algunos de los sustratos de paja de trigo que estadísticamente no fueron iguales a los sustratos testigos, se atribuye principalmente al efecto de inhibición causado por compuestos fenólicos simples y/o no tan complejos, presentes en ellos durante las primeras etapas de crecimiento. Los porcentajes de inhibición del crecimiento sobre la variable volumen de raíz estuvieron entre 9.67 % en el sustrato 5 y 46 % en el sustrato 11 de paja de trigo.

7.3.6.8 Peso de materia seca de raíces

El peso de la materia seca de raíces (PMSR) de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos evaluados se presenta en el Cuadro 14. El análisis de varianza muestra que hubo diferencia altamente significativa entre los sustratos en esta variable ($P > F = 0.0001$). El sustrato que permitió el mayor PMSR fue el sustrato Sogemix VT-M con 0.57 g y fue estadísticamente diferente al PMSR obtenido en las plántulas que crecieron en los demás sustratos. En segundo lugar se ubica el PMSR obtenido en las plántulas que crecieron en el sustrato Sunshine 3, junto con los sustratos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 y 9. La disminución en el PMSR de las raíces de las plántulas que crecieron en los sustratos varió entre 22.80 % en el sustrato Sunshine 3 y 42.10 % en el sustrato 11 de paja de trigo.

El PMSR es una variable que indica el crecimiento de las raíces y es deseable que las plántulas desarrollen una raíz abundante para poder soportar el trasplante. En este punto, se establece una situación especial y polémica; las raíces de las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M desarrollaron mayor peso en sus raíces en comparación con los demás sustratos y, probablemente un agricultor podría decidir elegir este sustrato como el mejor de los evaluados, sin embargo, es importante señalar que esta situación se puede ver desde otro punto de vista. Los PMSR de los sustratos 5, 6, 7 y 8 aunque estadísticamente fueron diferentes al PMSR del sustrato Sogemix VT-M, se puede señalar que la funcionalidad de las raíces es similar, de acuerdo con los resultados de la variable peso de materia seca de vástagos (PMSV), esto es, que aunque el PMSR sea diferente, estas proporcionan a la parte aérea de la plántula las mismas materias primas que las que demandan las plántulas en el sustrato Sogemix VT-M. Es probable que lo señalado anteriormente se pueda extrapolar a las condiciones de campo en el momento del trasplante.

Una causa probable del mayor crecimiento de las raíces en el sustrato Sogemix VT-M, pudo haber sido el mayor tiempo de mojabilidad (Cuadro 4) de este sustrato en condiciones de la charola, por lo que al no hidratarse bien, pudo haber afectado la proporción de agua retenida, así las raíces de estas plántulas tuvieron que desarrollarse más para obtener la humedad de mayor profundidad.

Las diferencias estadísticas presentadas en el PMSR entre los sustratos de paja de trigo evaluados (excepto los sustratos 5 y 8) y el sustrato Sunshine 3, se pueden atribuir principalmente al efecto de los compuestos fenólicos sobre el crecimiento de las raíces de las plántulas.

No se encontraron R^2 altas, ni significativas al realizar regresiones simples o múltiples entre el PMSR y las propiedades físicas de los sustratos de paja de trigo (porosidad total, espacio sólido, porosidad de aire, agua fácilmente disponible, agua de reserva, agua total disponible y agua difícilmente disponible), toda vez, que los sustratos de paja de trigo evaluados tuvieron la misma granulometría, con excepción del sustrato 2 de paja de trigo con extracción de fenólicos, con una granulometría 60-40.

No se encontraron R^2 altas, ni significativas al realizar regresiones entre el PMSR con las propiedades químicas de los sustratos (pH, CE, CFST, etc.).

7.3.6.9 Relación peso de materia seca de vástagos/ peso de materia seca de raíces

Los resultados de esta relación se presentan en el Cuadro 14. El análisis de varianza señala que no existe diferencia significativa en esta variable, por lo que en la comparación de medias todos los sustratos presentaron relaciones PMSV/PMSR estadísticamente iguales. El intervalo de valores para esta variable se encuentra entre 3.29 para el sustrato Sogemix VT-M y 4.81 en el sustrato 6 de paja de trigo. Las relaciones PMSV/PMSR mostradas en el Cuadro 14, se sujetan a lo señalado en el apartado de PMSR, con relación a la funcionalidad de las raíces.

7.3.7 Variables cualitativas evaluadas en raíces y sustratos a los 30 días después de la siembra

7.3.7.1 Color de raíces

El color de las raíces de las plántulas de brócoli en todos los sustratos a los 30 DDS fue blanco (valor de 1 en la escala sugerida), indicando buena respiración y sin efecto de compuestos fenólicos (color amarillo o café - indicador de mal funcionamiento) (Cuadro 15).

7.3.7.2 Densidad de pelos radicales

Se realizaron observaciones del crecimiento de los pelos radicales en la raíz a los 10, 20, 25, y 30 DDS. Las raíces de las plántulas que crecieron en los sustratos 1, 2, 9, 10 y 11 de paja de trigo, a los 10 DDS, se observaron de color blanco (normal), pero sin pelos radicales. Los demás sustratos de paja de trigo presentaron una coloración

blanca en las raíces pero con una densidad de pelos radicales similar a la que presentaron las raíces de los sustratos testigos.

Cuadro 15. Variables cualitativas en los sustratos, en las raíces de las plántulas de brócoli cv. Patriot y en el cepellón, a los 30 DDS.

Sustrato	CR	DPR	FEC	DM
1	1	1	1	1
2	1	1	1	1
3	1	1	1	1
4	1	1	1	1
5	1	1	1	1
6	1	1	1	1
7	1	1	1	1
8	1	1	1	1
9	1	1	1	1
10	1	1	1	1
11	1	1	1	1
12 (Sogemix VT-M)	1	1	1	nd
13 (Sunshine 3)	1	1	1	nd

CR = color de raíz; DPR = densidad de pelos radicales; FEC = facilidad para extraer el cepellón; DM = degradación microbiológica; nd = no determinada.

A los 20 DDS las raíces de las plántulas de brócoli que estuvieron creciendo en los sustratos de paja de trigo con degradación biológica tuvieron una densidad de pelos radicales similar a la de los sustratos testigos. Las raíces de las plántulas que estuvieron creciendo en los sustratos 1, 2, 9, 10 y 11, presentaron una mayor densidad de pelos radicales que a los 10 DDS, pero ligeramente menor que en las raíces de las plántulas de brócoli que estuvieron creciendo en los demás sustratos.

La densidad de pelos radicales en las raíces de las plántulas de brócoli que estuvieron creciendo en los sustratos de paja de trigo, con degradación biológica, a los 25 DDS fue similar a la densidad de pelos radicales de las raíces de las plántulas

que estuvieron creciendo en los sustratos testigos y con una coloración blanca en sus raíces.

La densidad de pelos radicales en las raíces de las plántulas que estuvieron creciendo en los sustratos 1, 2, 9, 10 y 11, de paja de trigo, a los 30 DDS, fue igual o superior a la que presentaron las raíces de las plántulas que estuvieron creciendo en los sustratos testigos y con una coloración blanca en sus raíces.

El incremento en la densidad de pelos radicales en las raíces de las plántulas en los sustratos de paja de trigo 1, 2, 9, 10 y 11, fue paulatino y al parecer se relacionó directamente con las CFST que se registraron en el transcurso del experimento, esto es, la aparición de nuevos pelos radicales se fue presentando conforme las CFST en los sustratos de paja de trigo fueron disminuyendo con el tiempo.

Una mayor cantidad de pelos radicales en las raíces de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo 1, 2, 9, 10 y 11, se presentó a los 20 DDS cuando los sustratos de paja de trigo tuvieron menos de 30 mg L^{-1} de compuestos fenólicos, (0.18 mM (milimoles) L^{-1} equivalentes de ácido *p*-cumárico). Vaughan y Ord (1990), mencionan que concentraciones de 0.1 mM de ácido *p*-cumárico inhibieron aproximadamente un 6.34 % el peso de vástagos e incrementó aproximadamente un 1 % el peso fresco de la raíz de plántulas de chícharo, de 15 días de desarrollo.

De acuerdo con las observaciones realizadas en las raíces de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo, es probable que el efecto de inhibición más importante de las CFST presentes en los sustratos 1, 2, 9, 10 y 11, de paja de trigo sobre el crecimiento de las plántulas se haya presentado durante solo unos cinco días (entre 7 DDS - un día después de la emergencia de las plántulas y 12 DDS), después de los cuales su efecto fue menor. El efecto más drástico de los compuestos fenólicos sobre el crecimiento de las plántulas de brócoli, se observó cuando estas presentaron solamente las dos hojas embrionarias y la primera hoja verdadera aún no emergía del macollo.

El efecto de inhibición de los fenólicos en los sustratos de paja de trigo se observó que fue menor cuando las plántulas de brócoli comenzaron a mostrar su primera hoja verdadera y en etapas posteriores.

Los pelos radicales son estructuras unicelulares que se originan o se desarrollan de las células epidérmicas de la raíz y entre sus funciones se menciona el ayudar en la absorción de agua y nutrimentos del suelo. Sin embargo, también se ha demostrado que los pelos radicales no son necesarios en sistemas hidropónicos (Russell y Clarkson, 1975).

La inhibición en la formación de pelos radicales en las raíces de las plántulas de brócoli pudo haber disminuido la capacidad de las raíces para la absorción de agua y nutrimentos, influyendo directamente y de manera negativa en el crecimiento de la de la raíz y la parte aérea entre los 7 DDS y 12 DDS, suceso que influyó definitivamente en el desarrollo posterior de las raíces y vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos 1, 2, 9, 10 y 11. La transformación biológica previa de los compuestos fenólicos durante 15 días en los sustratos 9, 10 y 11 no fue suficiente para disminuir el efecto de inhibición de los compuestos fenólicos sobre el crecimiento de las plántulas.

Por otro lado, es conveniente señalar que tanto en los sustratos testigos, como en los sustratos de paja de trigo, el crecimiento de las raíces con sus pelos radicales se presentó casi de forma exclusiva en la parte exterior de los sustratos. No se observaron cantidades de raíces importantes en los espacios de los sustratos en las zonas más internas. Lo anterior sugiere que las raíces de las plántulas de brócoli prefieren crecer en ambientes mejor oxigenados, esto es, utilizando la porosidad de fractura (Burés, 1997), que es la porosidad que se presenta entre la superficie exterior de los sustratos y las paredes de los contenedores en donde se encuentra el sustrato.

7.3.7.3 Facilidad para extraer el cepellón

Todos los sustratos evaluados desarrollaron plántulas de brócoli con suficiente raíz extendiéndose desde un poco más abajo de la superficie del sustrato hasta el fondo de las celdas de las charolas, por lo que no hubo problema para extraer el cepellón completo, otorgando a todas las plántulas que se extrajeron manualmente de los sustratos en la charola el valor de 1 (Fácil de extraer) (Cuadro 15).

7.3.7.4 Degradación microbiológica

La degradación microbiológica (DM) de los sustratos de paja de trigo, evaluada visualmente con la ayuda de un estereoscopio, fue muy poca (valor de 1, corresponde a una degradación entre 1 % y 5 %) en todos los sustratos de paja de trigo) tendiendo más hacia la no degradación (Cuadro 15). Esto se relaciona directa y de manera aproximada con los resultados presentados en el Cuadro 12, en donde se muestra que los porcentajes de materia orgánica, determinados en los sustratos a los 30 DDS fueron altos y que la disminución de la MO en los sustratos de paja de trigo fue muy baja (entre 3.76 % en el sustrato 1 y 7.28 % en el sustrato 4), registrando mayores pérdidas de MO que los sustratos testigos elaborados con base en turba (2.61 % en el Sogemix VT-M y 0.50 % en el Sunshine 3); además, los sustratos de paja de trigo junto con los sustratos testigos se categorizaron como materiales con alta o muy alta bioestabilidad.

La disminución de MO en los sustratos durante el experimento se atribuye a la pérdida de compuestos orgánicos solubles en agua, que se lixiviaron con la aplicación de los riegos con agua o solución nutritiva y no a la transformación microbiológica de la materia orgánica sólida de los sustratos. Con lo anterior se concluye que, aunque la paja de trigo está considerada como un material orgánico con una alta probabilidad de degradación microbiológica (Lemaire, 1997), en el presente trabajo no hubo degradación microbiológica apreciable en ninguno de los 11 sustratos de paja de trigo evaluados.

Las razones atribuibles a este fenómeno se explicaron con anterioridad en el punto en donde se trató lo referente a la materia orgánica al final del experimento. No se observó disminución aparente en los volúmenes de los sustratos de paja de trigo que ocuparon las celdas de las charolas, confirmando aún más que la degradación en los sustratos de paja de trigo no fue significativa.

7.3.8 Análisis químico de los vástagos de las plántulas de brócoli colectadas a los 30 DDS

Los resultados de los análisis químicos de N, P, K, Ca, Mg (macronutrientes), Fe, Mn, Cu, Zn y B (micronutrientes) en los vástagos de las plántulas colectadas a los 30 DDS se presentan en los Cuadros 16 y 17 respectivamente.

7.3.8.1 Nitrógeno

El análisis de varianza indica que hubo diferencia significativa en el contenido de N ($P > F = 0.0098$) en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos. Con excepción de la concentración de N del sustrato 4, la concentración de N en todos los demás sustratos, incluyendo a los testigos, fueron estadísticamente iguales.

Lo anterior sugiere que en general ninguna de las variables independientes o factores de los sustratos inhibieron la absorción de N por las raíces de las plántulas, su transporte a los vástagos de las plántulas de brócoli y su utilización en las hojas, al final del experimento. Lo anterior incluye como factor a las concentraciones de compuestos fenólicos solubles totales (CFST), las que en primer término se consideraron como limitantes en el crecimiento de las plántulas de brócoli. Las concentraciones de N en los vástagos de las plántulas variaron entre 30.35 g kg^{-1} en el sustrato Sunshine 3 y 40.06 g kg^{-1} en el sustrato 4 de paja de trigo.

Todos los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo presentaron concentraciones de N que se encuentran dentro del intervalo de concentraciones de N recomendado por Jones *et al* (1991), para plántulas de brócoli. Las concentraciones de N de los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos testigos se encuentran ligeramente abajo de lo recomendado en el límite inferior del intervalo.

Con relación a lo señalado por Rodríguez (2004), las concentraciones de N de los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos en este experimento, fueron similares a las reportadas por él.

Cuadro 16. Concentración de macronutrientos en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot que crecieron en trece sustratos.

Sustratos	Macronutrientos				
	N	P	K	Ca	Mg
	-----g kg ⁻¹ -----				
1	33.33 ab	6.25 a	41.04 a	11.36 a	7.04 ab
2	36.60 ab	6.15 a	40.67 a	10.66 a	6.32 ab
3	36.50 ab	8.59 a	38.78 a	14.31 a	7.49 ab
4	40.60 a	8.17 a	38.27 a	12.19 a	8.71 a
5	39.00 ab	6.91 a	39.37 a	11.82 a	6.33 ab
6	31.55 ab	8.34 a	36.08 a	11.85 a	8.00 ab
7	32.20 ab	8.52 a	33.30 a	14.96 a	8.28 ab
8	38.40 ab	7.58 a	40.25 a	13.03 a	8.19 ab
9	35.95 ab	9.64 a	37.27 a	12.69 a	6.10 b
10	36.75 ab	7.92 a	34.38 a	12.04 a	7.01 ab
11	35.95 ab	8.21 a	34.72 a	13.13 a	8.01 ab
12 (Sogemix VT-M)	31.05 b	6.82 a	34.82 a	11.14 a	6.23 ab
13 (Sunshine 3)	30.35 b	6.75 a	33.56 a	9.96 a	5.75 b
P>F	0.0098	0.056	0.7630	0.4767	0.0045
DHS	9.1	3.67	19.42	7.73	2.54
Intervalo recomendado ¹	32–55	3.0–7.5	20.0–40.0	10.0–25.0	2.5–7.5
Intervalo indicado por Rodríguez ²	23.0– 51.0	4.71– 7.59	10.87-32.76	6.95–14.65	4.95– 7.59

¹Jones *et al.*, (1991). ²Rodríguez (2004). – Intervalo indicado para los mejores tratamientos, utilizando la misma solución nutritiva que se aplicó en este experimento para los sustratos evaluados. DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Es importante señalar que las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de bagazo de agave tequilero (Rodríguez, 2004), y las que crecieron en los sustratos de paja de trigo se les adicionó exactamente la misma solución nutritiva. Los ciclos de producción de las plántulas de brócoli fueron diferentes; Rodríguez (2004) produjo sus plántulas de brócoli en Noviembre de 2003 y este experimento se llevó a cabo del 13 de abril al 13 de mayo de 2004.

7.3.8.2 Fósforo

El análisis de varianza indica que no hubo diferencias significativas en la concentración de P ($P>F = 0.056$) en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos. Esto sugiere que en general ninguna de las variables independientes o factores en los sustratos inhibieron la absorción de P por las raíces

y como consecuencia el contenido de P en los vástagos de las plántulas de brócoli al final del experimento, incluye a las CFST. Las concentraciones de P en los vástagos de las plántulas variaron entre 6.15 g kg⁻¹ en el sustrato 2 y 9.64 g kg⁻¹ en el sustrato 9. Los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos 1 y 2 (con extracción de fenólicos) presentaron las menores concentraciones de este nutrimento.

Las concentraciones de P en los vástagos de las plántulas de brócoli en este experimento son en algunos casos superiores al intervalo señalado por Jones *et al* (1991), y también ligeramente superiores a los reportados por Rodríguez (2004), para plántulas de brócoli que crecieron en sustratos derivados de bagazo de agave tequilero utilizando la misma solución nutritiva (Cuadro 16).

7.3.8.3 Potasio

El análisis de varianza indica que no existen diferencias significativas en la concentración de K ($P > F = 0.7630$) en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos evaluados.

Esto sugiere que en general ninguna de las propiedades físicas, químicas y/o biológicas de los sustratos inhibieron la absorción de K por las raíces de las plántulas, y como consecuencia la concentración de K en los vástagos de las plántulas de brócoli al final del experimento, incluye a las CFST. Los contenidos de K en los vástagos de las plántulas variaron entre 33.30 g kg⁻¹ en el sustrato 7 y 41.04 g kg⁻¹ en el sustrato 1.

Las concentraciones de K en los vástagos de las plántulas de brócoli en este experimento se encuentran dentro del intervalo señalado por Jones *et al* (1991), y fueron ligeramente superiores a las reportadas por Rodríguez (2004).

7.3.8.4 Calcio

El análisis de varianza indica que no hay diferencias significativas en la concentración de Ca ($P > F = 0.4767$) entre los vástagos de las plántulas de brócoli

que crecieron en los sustratos. Esto sugiere, que en general ninguna de las propiedades físicas, químicas y/o biológicas de los sustratos inhibieron la absorción de Ca por las raíces de las plántulas, y como consecuencia la concentración de Ca en los vástagos de las plántulas de brócoli al final del experimento, incluye a las CFST.

El intervalo de concentraciones de Ca en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos se encuentra entre 9.96 mg kg^{-1} en el sustrato Sunshine 3 y 14.96 mg kg^{-1} en el sustrato 7. Las concentraciones de Ca se encuentran dentro del intervalo recomendado por Jones *et al* (1991) y fueron similares a las reportadas por Rodríguez (2004).

7.3.8.5 Magnesio

El análisis de varianza indica que existe diferencia significativa en la concentración de Mg ($P > F = 0.0045$) en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos. Con excepción del sustrato 4 que fue el que presentó la mayor concentración de Mg entre los sustratos y fue estadísticamente diferente únicamente con los sustratos 9 y 13, los sustratos restantes fueron iguales estadísticamente.

Las concentraciones de Mg en los vástagos de las plántulas variaron entre 5.75 g kg^{-1} en el sustrato Sunshine 3 y 8.71 g kg^{-1} en el sustrato 4. Algunas de las concentraciones de Mg en los vástagos de las plántulas de brócoli se encuentran ligeramente arriba del intervalo de concentraciones recomendadas por Jones *et al* (1991), y también fueron superiores a las reportadas por Rodríguez (2004).

7.3.8.6 Fierro

La concentración de Fe en los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos evaluados se presenta en el Cuadro 17. El análisis de varianza indica que no hay diferencia significativa en la concentración de Fe ($P > F = 0.5010$) en los tejidos de las plántulas de brócoli.

El intervalo de la concentración de Fe se encontró entre $156.35 \text{ mg kg}^{-1}$ en el sustrato

9 y 248.27 mg kg⁻¹ en el sustrato 4. Las concentraciones de este nutrimento están dentro del intervalo recomendado por Jones *et al* (1991), que es entre 70 mg kg⁻¹ y 300 mg kg⁻¹ y fueron menores a algunas de las concentraciones de este nutrimento indicadas por Rodríguez (2004).

Cuadro 17. Concentración de micronutrientos en vástagos de plántulas de brócoli cv. Patriot que crecieron en trece sustratos.

Sustratos	Micronutrientos				
	Fe	Mn	Cu	Zn	B
	-----mg kg ⁻¹ -----				
1	178.83 a	50.06 b	49.37 a	127.33 a	68.06 a
2	202.20 a	48.43 b	46.84 ab	122.33 a	75.42 a
3	230.98 a	64.28 b	42.63 ab	136.81 a	70.32 a
4	248.27 a	47.57 b	48.18 ab	149.96 a	69.12 a
5	174.93 a	43.11 b	30.63 bcde	129.01 a	65.26 a
6	163.85 a	70.70 ab	37.78 abc	150.79 a	72.02 a
7	179.96 a	68.83 ab	32.69 abcd	158.56 a	78.01 a
8	174.56 a	48.49 b	36.38 abc	144.57 a	64.47 a
9	156.35 a	58.10 b	25.81 cde	122.68 a	70.48 a
10	214.89 a	66.13 b	26.96 cde	137.62 a	81.59 a
11	192.92 a	68.85 ab	36.72 abc	153.12 a	85.07 a
12 (Sogemix VT-M)	195.15 a	103.19 a	13.98 e	141.73 a	75.61 a
13 (Sunshine 3)	200.15 a	57.82 b	14.17 de	130.05 a	58.59 a
P>F	0.5010	0.0011	0.0001	0.3410	0.3573
DHS	148.79	35.05	18.65	60.42	36.87
Intervalo recomendado ¹	70-300	25-200	5-15	35-200	30-100
Intervalo indicado por Rodríguez ²	210.95-	13.61-	62.24-	86.38-	29.32-
	422.13	63.66	89.26	118.75	78.39

¹Jones *et al.*, (1991). ²Rodríguez (2004). – Intervalo indicado para los mejores tratamientos, utilizando la misma solución nutritiva que se aplicó en este experimento para los sustratos evaluados. DHS = diferencia honesta significativa. Medias con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Ninguna de las variables independientes evaluadas y las no consideradas de los sustratos, afectaron negativamente la concentración de Fe en los vástagos de las plántulas de brócoli.

7.3.8.7 Manganeso

El análisis de varianza indica que existe diferencia altamente significativas (P>F = 0.0011) entre las concentraciones de Mn en los vástagos de las plántulas de brócoli

que crecieron en los sustratos.

La comparación de medias muestra que el sustrato que presentó la mayor concentración de Mn en los vástagos de las plántulas de brócoli fue el sustrato 12 y fue estadísticamente igual a la concentración de Mn de los sustratos 6, 11 y 7 de paja de trigo y diferentes a los demás sustratos evaluados. Sin embargo, el valor de $103.19 \text{ mg kg}^{-1}$ en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en el sustrato 12 es muy elevado y muy probablemente es el resultado de un error analítico o de contaminación, tomando en consideración las concentraciones de este elemento en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los demás sustratos. Se puede asociar con el alto contenido de Mn que presentó el sustrato Sogemix VT-M (5.77 mg L^{-1}) al inicio del experimento.

Con base en lo anterior, el intervalo de las concentraciones de este nutrimento en los vástagos de las plántulas en este experimento se puede establecer entre 43.11 mg kg^{-1} en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en el sustrato 5 y 70.70 mg kg^{-1} en los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustrato 6. Las concentraciones de Mn determinadas en los vástagos de las plántulas de brócoli en este experimento se encuentran dentro del intervalo recomendado por Jones *et al* (1991), y el intervalo indicado por Rodríguez (2004).

No se encontraron diferencias significativas entre las concentraciones de Mn en los vástagos de las plántulas de los sustratos de paja de trigo y el sustrato Sunshine 3 como se señaló en el Capítulo V.

7.3.8.8 Cobre

El análisis de varianza indica que hay diferencia altamente significativa en las concentraciones de Cu ($P > F = 0.0001$) en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos. La comparación entre medias indica que las concentraciones de los sustratos 1, 4, 2, 3, 6, 11, 7 y 8, fueron los que presentaron las mayores concentraciones de este nutrimento y fueron estadísticamente diferentes a los demás sustratos.

Los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos testigos

tuvieron las menores concentraciones de Cu entre los vástagos de las plántulas de todos los sustratos. El intervalo de las concentraciones de Cu en los vástagos de las plántulas de brócoli se puede establecer entre 13.98 mg kg⁻¹ en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato Sogemix VT-M y 49.37 mg kg⁻¹ en los vástagos de las plántulas que crecieron en el sustrato 1.

Las concentraciones de Cu reportadas en los vástagos de las plántulas de brócoli en este experimento son superiores al intervalo recomendado por Jones *et al* (1991), e inferiores a las concentraciones de Cu indicadas por Rodríguez (2004) en vástagos de plántulas de brócoli (62.24 mg kg⁻¹–89.26 mg kg⁻¹) que crecieron en sustratos de bagazo de agave tequilero.

Es probable que los intervalos recomendados por Jones *et al* (1991), para vástagos de plántulas de brócoli, se hayan establecido en plántulas que crecieron en algún sustrato con base en turba, lo anterior con fundamento en las concentraciones de Cu determinadas en los sustratos Sogemix VT-M y Sunshine 3 y su comparación con las concentraciones de este nutrimento en los sustratos de agave tequilero y los sustratos de paja de trigo.

La notable diferencia entre las concentraciones de Cu en las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos testigos y las que crecieron en los sustratos de paja de trigo, se puede explicar por la capacidad que tienen las turbas para adsorber el Cu (II). La capacidad para adsorber el Cu (II) de las turbas se debe principalmente a los grupos carboxilos de las sustancias húmicas contenidas en estos sustratos y es dependiente del pH. A mayor pH la adsorción es mayor (grupos carboxilos ionizados) (Gardea-Torresdey *et al.*, 1995). Las turbas pueden adsorber varios iones divalentes (Cu, Ni, Pb) y la adsorción depende de la concentración inicial del ión metálico, la dosis de la turba y la naturaleza del ión soluble (Ho y McKay, 2000).

7.3.8.9 Zinc

El análisis de varianza indica que no hay diferencias significativas en el contenido de Zn ($P > F = 0.3410$) en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos evaluados.

El intervalo de concentraciones de Zn en los vástagos de las plántulas de brócoli se encuentra entre 122.33 mg kg⁻¹ y 158.56 mg kg⁻¹. Las concentraciones de este nutrimento se encuentran dentro del intervalo recomendado por Jones *et al* (1991), que es entre 35 mg kg⁻¹ y 200 mg kg⁻¹ y fueron mayores a las concentraciones de Cu indicadas por Rodríguez (2004). Las medias de las concentraciones de Zn en los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo fueron estadísticamente iguales a las medias de las concentraciones de Cu en los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos testigos, por lo que se puede establecer que en general no hubo inhibición por parte de alguna de las propiedades físicas, químicas y/o biológicas de los sustratos de paja de trigo sobre la absorción de Zn por las raíces de las plántulas de brócoli y su transporte a la parte aérea, incluyendo las CFST.

7.3.8.10 Boro

El análisis de varianza indica que no hay diferencias significativas en la concentración de B ($P > F = 0.3573$) en los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos evaluados. La comparación de medias indica que los vástagos de las plántulas que crecieron en todos los sustratos fueron iguales estadísticamente en el contenido de B. Ninguna de las variables independientes de los sustratos de paja de trigo afectó negativamente y de manera significativa el contenido de B de los vástagos de las plántulas de brócoli, incluyendo las CFST en los sustratos de paja de trigo.

El intervalo de la concentración de B en los vástagos de las plántulas de brócoli se encuentra entre 58.59 mg kg⁻¹ en los que crecieron en el sustrato Sunshine 3 y 85.07 mg kg⁻¹ en los que crecieron en el sustrato 11. Las concentraciones de este nutrimento se encuentran dentro del intervalo recomendado por Jones *et al* (1991), que es entre 30 mg kg⁻¹ y 100 mg kg⁻¹ y fueron similares a las concentraciones de Cu indicadas por Rodríguez (2004).

Aunque hubo diferencias altamente significativas en las concentraciones de algunos nutrimentos entre los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los

sustratos evaluados (Cuadros 16 y 17), es importante mencionar que varios de estos nutrientes constituyen las cenizas de los tejidos, las cuales pueden representar aproximadamente un seis por ciento de la materia orgánica seca, por lo que el resto (la mayor parte) la constituyen compuestos de carbono, N, y S principalmente, siendo los compuestos de carbono los que predominan sobre los de N y S. De lo anterior, se puede señalar que es probable que la inhibición de los compuestos fenólicos presentes en los sustratos de paja de trigo hayan actuado directamente sobre la asimilación de compuestos de carbono (asimilación de CO₂), y por lo tanto sobre el proceso de fotosíntesis y probablemente sobre la respiración de las plántulas de brócoli y sobre sustancias reguladoras de crecimiento (Rice, 1979; Rice 1984).

En los Cuadros 1 a 5 del apéndice E, se presenta el concentrado de las características generales, propiedades físicas, químicas, aditivos y propiedades biológicas de los sustratos testigos y de los sustratos 5 y 8 como los mejores sustratos que proporcionaron un crecimiento adecuado a plántulas de brócoli cv. Patriot (Sakata Seeds).

7.4 CONCLUSIONES

1. Los sustratos Sogemix VT-M y Sunshine 3 presentaron densidades aparentes mayores que los sustratos de paja de trigo.
2. Los sustratos testigos con base en turba, se comercializan necesariamente en húmedo con contenidos de humedad ligeramente superiores al 50 % por lo que las densidades de estos sustratos pueden aproximarse a un valor alrededor de 0.2304 g cm³.
3. No hubo diferencia significativa en el porcentaje de plántulas emergidas a los seis días después de la siembra, indicando que ninguna de las propiedades físicas, químicas o biológicas de los sustratos de paja de trigo influyó de manera negativa y significativa en esta variable.

4. En los sustratos 3 y 6 se observaron síntomas de quemaduras (raíces cafés) en algunas plántulas al momento de la emergencia, debido probablemente a las altas concentraciones de fenólicos solubles totales no condensados, sin embargo el efecto desapareció al aplicar un riego más que a los otros sustratos, para lixiviar el exceso de estos compuestos.

5. Las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos 3, 5, 6, 7 y 8 de paja de trigo con degradación biológica parcial fueron estadísticamente iguales en varias de las variables de crecimiento a las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos Sogemix VT-M y Sunshine 3 (testigos).

6. De acuerdo con la información obtenida por análisis de regresión lineal simple y múltiple, las propiedades físicas de los sustratos de paja de trigo, no influyeron de manera significativa en la inhibición del crecimiento de las raíces y de los vástagos de plántulas de brócoli que crecieron en estos sustratos.

7. El pH y la CE de los sustratos de paja de trigo registrados durante el experimento, no influyeron significativamente en la inhibición del crecimiento de las raíces y los vástagos de las plántulas de brócoli observada en algunos de los sustratos de paja de trigo.

8. Aunque de acuerdo con los resultados de los análisis de regresión múltiple no existe una relación importante y significativa entre las concentraciones de fenólicos solubles totales y las variables de crecimiento, las diferencias en algunas de las variables de crecimiento entre las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo con respecto a las que crecieron en los testigos se atribuyen a los diversos estados de transformación biológica de los compuestos fenólicos y a sus concentraciones.

9. En todos los sustratos de paja de trigo se observó una disminución en la concentración de fenólicos solubles totales conforme transcurrió el tiempo del experimento.

10. La inhibición de algunas variables de crecimiento en las plántulas de brócoli se presentó de manera más visible en las plántulas que crecieron en los sustratos 1 y 2, en comparación con los sustratos de paja de trigo con transformación biológica por 90 días.

11. Se considera que una CFST menor de 20 mg L^{-1} en los sustratos 1 y 2 no inhibe significativamente el crecimiento de la raíz y de la parte aérea de las plántulas, de acuerdo con las observaciones realizadas de densidad de pelos radicales.

12. Los análisis químicos de los vástagos de las plántulas de brócoli que crecieron en los sustratos de paja de trigo, en general no mostraron diferencias significativas importantes en relación con los de los sustratos testigos, sugiriendo que ningún factor o variable de los primeros inhibió la absorción de nutrimentos en la raíz y el transporte de los mismos en los vástagos.

13. Los sustratos de paja de trigo mostraron alta o muy alta bioestabilidad, igual a la que presentaron los sustratos testigos.

14. Aunque hubo diferencias significativas en los tiempos de mojabilidad (sin agitación y con agitación), entre algunos de los sustratos de paja de trigo y los sustratos testigos, no se encontró una relación significativa entre esta variable y las variables de crecimiento de las plántulas de brócoli.

15. Los sustratos de paja de trigo presentaron una alta capacidad de amortiguamiento del pH.

16. Los valores de PA, AFD, ATD y ADD determinados en los sustratos evaluados son diferentes a los reportados por De Boodt y Verdonck (1972) como valores para un sustrato "ideal".

17. Los valores de PA determinados en los sustratos evaluados, se encuentran en el intervalo de valores señalados por la norma inglesa BS 4156, tanto para plantas de crecimiento de corta duración, como para plantas de temporada en alvéolos y sustratos de semillero, sin embargo, sustratos con valores de PA menores a los señalados (Sogemix VT-M y Sunshine 3), proporcionaron un medio adecuado para el crecimiento de las raíces y vástagos de las plántulas de brócoli.

18. Los sustratos de paja de trigo presentaron crecimientos de raíces similares al crecimiento obtenido en el mejor de los sustratos testigos, permitiendo también una extracción completa y fácil del cepellón de las cavidades de las charolas.

19. El crecimiento de las plántulas de brócoli en los mejores sustratos de paja de trigo con degradación parcial, fue muy uniforme y similar a la que presentaron las plántulas que crecieron en los sustratos Sogemix VT-M y Sunshine 3.

20. Los vástagos de las plántulas que crecieron en los sustratos Sogemix VT-M y Sunshine 3 tuvieron significativamente menores contenidos de Cu que las plántulas que crecieron en los sustratos de paja de trigo.

21. De acuerdo con los resultados obtenidos en el crecimiento de plántulas de brócoli en los sustratos 5 y 8, se puede sugerir que alguno de ellos podría utilizarse como sustituto de las turbas comerciales.

22. Aunque los resultados obtenidos en el crecimiento de las plántulas de brócoli en el sustrato 8 fue muy similar al crecimiento obtenido en plántulas de brócoli en el sustrato 5, se desecharía la idea de elaborar el sustrato 8 debido principalmente a los gastos que representarían la adquisición y manejo de las lombrices en el sustrato.

7.5 LITERATURA CITADA

- Abad B, M., P. Noguera M., y V. Noguera M. 1996. "Turberas para semilleros". pp. 79-101. *En: II Jornadas sobre semillas y semilleros hortícolas. Congresos y Jornadas.* Junta de Andalucía. Consejería de Agricultura y Pesca. Sevilla. España.
- Abad B, M., y P. Noguera M. 2000. Los sustratos en los cultivos sin suelo. pp. 137-183. *En: M. Urrestarazu G. (ed.). Manual de cultivo sin suelo.* Mundi-Prensa. Almería, España.
- Alcántar G, G., y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis e interpretación de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación especial No. 10. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Centro de Edafología. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Edo. de México. México.
- Anon, T. (1990). Recommendations for peat for horticultural and landscape use. BS 4156. British Standard Institution. London, UK.
- Ansorena M, J. 1994. Sustratos. Propiedades y caracterización. Editorial Mundi-Prensa. Bilbao, España.
- Baas, R., G. Wever., A. J. Koolen., E. Taribu., and K. J. Stol. 2000. Oxygen supply and consumption in soilless culture: evaluation of oxygen simulation model for cucumber. *Acta Horticulturae.* 554: 157-164.
- Bastos S, R., E. de Sá, Mendonça., V. H. Alvarez V., *et al.* 2005. Soil aggregate formation and stabilization as influenced by organic compounds with different hydrophobic characteristics. *Rev. Bras. Ciênc. Solo (on line).* 2005. 29: 11-20. Disponible en: <<http://www.scielo.br/scielo.php>. (Revisado 10 de diciembre 2006).
- Bilderback, T. E., and M. R. Lorscheider. 1997. Wetting agents used in container substrates, are they BMP'S?. *Acta Horticulturae.* 450: 313-319.
- Blanco M, J., and G. Almendros. 1995. Evaluation of parameters related to chemical and agrobiological qualities of wheat straw composts including different additives. *Bioresource Technology.* 51: 125-134.
- Bold, H. C., Alexoupoulos, C. J., and T. Develoryas. 1989. Morfología de las plantas y los hongos. Ed. Omega, S. A. Barcelona, España.
- Boodt De M., and O. Verdonck. 1972. The physical properties of substrates in horticulture. *Acta Horticulturae.* 20: 37- 44.

- Bremner, J. M., and C. S. Mulvaney. 1982. Nitrogen-total. pp. 595-634. *In*: A. L. Page, R. H. Miller and D. R. Keeney, (eds.). *Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Agronomy 9. 2nd edition.* ASA. SSSA. Madison, Wi. USA.
- Buckman, A. 1991. *Naturaleza y propiedades de los suelos.* Editorial Limusa. D. F. México.
- Bunt, A. C. 1976. *Modern potting composts. A manual on the preparation and use of growing media for pot plants.* George Allen and Unwin Ltd (ed.). London, U. K.
- Bunt, A. C. 1988. *Media and mixes for container – grown plants. 2nd Ed,* Unwin Hyman Ltd. London, U.K.
- Burés P, S. 1997. *Sustratos.* Ediciones Agrotécnicas. Madrid. España.
- Camarero, S., G. C. Galletti., and A. T. Martínez. 1994. Preferential degradation of phenolic lignin units by two white rot fungi. *Applied and Environmental Microbiology.* 60: 4509-4516.
- Canadian Sphagnum Peat Moss Association. 1996. *A Horticultural Teaching Plan.* (Disponible en línea en <http://www.peatmoss.com/hortprog1.php>). (Revisado el 8 de noviembre de 2003).
- Caraveo L, F. J. 1994. *Relaciones nutrimentales en el cultivo hidropónico de jitomate (Lycopersicon esculentum Mill.) empleando el polvo de bonote de coco como sustrato.* Tesis de Maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Edo. de México. México.
- Cattivello, C. 1995. Use of substrates with zeolitas for seedling vegetables and pot plant production. *Acta Horticulturae.* 401: 251-257.
- Chabaca, R., A. Larwence., M. Paynot., et J. L. Tisserand. 2000. Effet de diverses conditions de traitement à l'ammoniac d'une paille de blé sur les teneurs en acides *p*-coumarique et férulique et sur la dégradabilité de l'azote mesurée in situ. *Ann. Zootechnie.* 49: 29-38.
- Drzal, M. S., K. D. Cassel., and W. C. Fonteno. 1999. Pore fraction analysis. A new tool for substrate testing. *Acta Horticulturae.* 481: 43-54.
- Escudero, J. 1993. *Cultivo hidropónico de tomate.* pp. 261-297. *En*: F. Cánovas y J. R. Díaz. (ed.). *Curso superior de especialización sobre cultivos sin suelo.* I. E. A. /F.I.A.P.A. Almería, España.
- Gardea-Torresdey, J. L., L. Tang., and J. M. Salvador. 1995. Cooper adsorption by sphagnum peat moss and its different humic fractions. *Proceedings of the 10th Annual Conference on Hazardous Waste Research.* pp. 249-260. (Disponible en

línea en <http://engg.ksu.edu/HSRC/95proceed/tang.html>) (Revisado el 25 mayo de 2006).

- Gou, M., F. Corrales., F. Vilasea., M. F. Llop., and P. Mutje. 2004. Chemical modification of cellulose in order to increase the wettability and adhesion in composites. *Afinidad*. 61: 393-392.
- Granberry, D. M., W. T. Kelley., D. B. Langston Jr., K. S. Rucker., and J. C. Díaz P. 2001. Testing compost value on pepper transplants. *BioCycle*. 42: 60-62.
- Gruda, N., and H. Schnitzler. 1997. The influence of organic substrates on growth and physiological parameters of vegetable seedlings. *Acta Horticulturae*. 450: 487-493.
- Guerrero, F. y A. Polo. 1990. Usos, aplicaciones y evaluación de las turbas. *Ecología*. 4: 3-13.
- Ho, Y. S., and G. McKay. 2000. The kinetics of sorption of divalent metal ions onto sphagnum moss peat. *Wat. Res.* 34: 735-742. (Disponible en línea en <http://www.elsevier.com/locate/watres>). (Revisado el 30 de junio de 2006).
- Jones, B. Jr., B. Wolf., and H. A. Mills. 1991. *Plant Analysis Handbook*. Library of Congress Cataloguing. Georgia, USA.
- Jung, H. G., and D. A. Deetz. 1993. Cell wall lignification and degradability. pp. 315-339. *In*: H. G. Jung., D. Buxton., R. D. Hatfield., and J. Ralph (eds.). *Forage cell wall structure and digestibility*. ASA-CSSSA-SSSA. Madison, WI, USA.
- 1949. Cellulose. pp. 342-369. *En*: *Encyclopedia of Chemical Technology* 3. The interscience encyclopedia. Kirk, R. E., y D. F. Othmer (ed.). Inc. New York, USA.
- Lemaire, F. 1995. Physical, chemical and biological properties of growing medium. *Acta Horticulturae*. 396: 273-284.
- Lemaire, F. 1997. The problem of the biostability in organic substrates. *Acta Horticulturae*. 450: 63-69.
- Lodhi, M. A. K., R. Bilal., and K. A. Malik. 1987. Allelopathy in agroecosystems: wheat phytotoxicity and its possible roles in crop rotation. *Journal of Chemical Ecology*. 13: 1881-1891.
- Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. Second Edition. Academic Press. San Diego, CA. USA.

- Muratalla L, S. 2003. Paja de maíz como sustrato alternativo en la producción de plántulas de jitomate y planta de frambuesa. Tesis de maestría. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. Edo. de México.
- Narwal, S. S., M. K. Sarmah., and D. P. S. Nandal. 1997. Allelopathic effects of wheat residues on growth and yield of fodder crops. *Allelopathy Journal*. 4: 111-120.
- Opoku, G., T. J. Vyn., and R. P. Voroney. 1997. Wheat straw placement effects on total phenolic compounds in soil and corn seedling growth. *Canadian Journal of Plant Science*. 77: 301-305.
- Peat Moss de México, S. A. S/F. Folleto promocional.
- Premier,S/F. Folleto promocional.
- Reeves, W. D., P. L. Mask., C. W. Wood., and D. P. Delay. 1993. Determination of wheat nitrogen status with a handheld chlorophyll meter. Influence of management practices. *J. Plant Nutr.* 16: 7781-7796.
- Rhoades, J. D. 1982. Cation exchange capacity. 149-157. *In: A. L Page et al., (ed.). Methods of soil analysis. Agronomy 9. 2nd. ed. American Society of Agronomy. Madison, Wi, USA.*
- Rivière, L. M., J. C. Fourcard., and F. Lemaire. 1990. Irrigation of container crops according to the substrate. *Scientia Horticulturae*. 43: 339-349.
- Rodríguez, M, Ma. De las N., G. Alcántar G., A. Aguilar S., J. D. Etchevers B., y J. A. Santizo R.1998. Estimación de la concentración de nitrógeno y clorofila en tomate mediante un medidor portátil de clorofila. *Terra*. 16: 135-141.
- Salas S, M. del C., y Urrestarazu G, M. 2000. Métodos de riego y fertirrigación en cultivos sin suelo. pp. 185-253. *En: M. Urrestarazu G. (ed.). Manual de cultivo sin suelo. Mundi-Prensa. Almería, España.*
- Saviozzi, A., M. Levi., R. Riffaldi., and G. Vanni. 1997. Laboratory studies on the application of wheat straw and pig slurry to soil and the resulting environmental applications. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 61: 35-43.
- Terés, V., V. Arrieta., J. Sánchez., M. Lucas., y E. Ritter. 1995. Evaluación de la densidad real de sustratos de cultivo por el método de inmersión. *Inv. Agr. Prod. veg.* 10: 231-244.
- TLC Polyform, Inc. S/F. Contenedores y charolas ecológicas para la horticultura de plástico reciclado. Folleto promocional.

- Tomaszewski, M., and K. V. Thimann. 1966. Interactions of phenolic acids, metallic ions and chelating agents on auxin-induced growth. *Plant Physiology*. 41: 1443-1454.
- Vaughan, D., and B. Ord. 1990. Influence of phenolic acids on morphological changes in roots of *Pisum sativum*. *J. Sci. Food Agric*. 52: 289-299.
- Verdonck, O., D. De Vleeschauwer., and M. De Boodt. 1981. The influence of the substrate to plant growth. *Acta Horticulturae*. 126: 251-258.
- Verdonck, O. 1992. Reference method for the determination of physical properties of plant substrates. *Acta Horticulturae*. 302: 169-179.
- Wright, R. D. 1986. The pour-through nutrient extraction procedure. pp 227-229. *In: Interpretation of extraction and nutrient determination procedures for organic potting substrates*. HortScience. 21: 215-232.

7.6 CONCLUSIONES GENERALES

1. Es probable que además de las concentraciones de fenólicos solubles totales en los sustratos de paja de trigo en el experimento de mezclas de sustratos la porosidad de aire de los sustratos con paja de trigo haya influido en la inhibición del crecimiento de las raíces y los vástagos de las plántulas de brócoli.
2. Los principales ácidos fenólicos identificados en los extractos metanólicos obtenidos de los extractos acuosos de paja de trigo por cromatografía de capa fina y cromatografía líquida de alta resolución fueron los ácidos *p*-cumárico y ferúlico.
3. Los ácidos fenólicos identificados y cuantificados por CLAR no son los fenólicos solubles más importantes en concentración entre los compuestos fenólicos presentes en la paja de trigo y por lo tanto, es posible que no representen los compuestos fenólicos más importantes que inhiben el crecimiento de las raíces y de la parte aérea de las plantas, como comúnmente se ha reportado en la literatura.
4. Aunque en la primera extracción de los compuestos fenólicos de la paja de trigo varios de los extractantes diferentes al agua común extrajeron mayores concentraciones, en la segunda extracción con agua común las diferencias en

las CFST entre los extractos no fue tan significativa, indicando aparentemente que no existe ninguna ventaja al utilizar algún otro extractante diferente al agua común.

5. En la evaluación del crecimiento de plántulas de brócoli sobre sustratos elaborados con paja de trigo a la cual se le extrajeron los compuestos fenólicos con varios extractantes, el mejor crecimiento se obtuvo en el sustrato al cual se le extrajeron los compuestos fenólicos con agua común.
6. En el experimento de evaluación de granulometrías de paja de trigo en el crecimiento de plántulas de brócoli, los sustratos con granulometría 80-20 y 60-40 produjeron plántulas con crecimientos de raíz y tallo estadísticamente iguales a los sustratos testigos con base en turba. Un factor determinante en este logro fue probablemente la porosidad de aire y la disponibilidad de agua, aunque en las pruebas físicas iniciales de estas variables no existe diferencia estadística significativa entre los sustratos de paja de trigo.
7. En el experimento de transformación biológica de los compuestos fenólicos presentes en la paja de trigo, se observó que durante los primeros 30 días las concentraciones de fenólicos solubles totales disminuyeron, sin embargo a los 45 y hasta los 90 días después del inicio del experimento se observó en todos los tratamientos un aumento significativo de las concentraciones de fenólicos solubles totales. Lo anterior se atribuye a una transformación de los compuestos fenólicos de naturaleza simple a compuestos fenólicos complejos a través de un proceso de condensación.
8. En el experimento de evaluación de sustratos con tratamiento biológico por 15 y 90 días, en los sustratos 5 y 8 de paja de trigo se desarrollaron plántulas de brócoli con crecimientos estadísticamente iguales a los obtenidos en plántulas de brócoli que se desarrollaron en los sustratos testigos con base en turba.
9. Se establece que al menos los sustratos 5 y 8 de paja de trigo con degradación biológica parcial pueden sustituir a las turbas comerciales en el crecimiento de plántulas de brócoli.
10. De acuerdo con estimaciones preliminares sobre el costo de producción del sustrato 5 para ser utilizado comercialmente en la producción de plántulas de

brócoli o alguna otra hortaliza, este puede tener un precio 2/3 partes más barato que los sustratos importados principalmente de Canadá.

APÉNDICE A

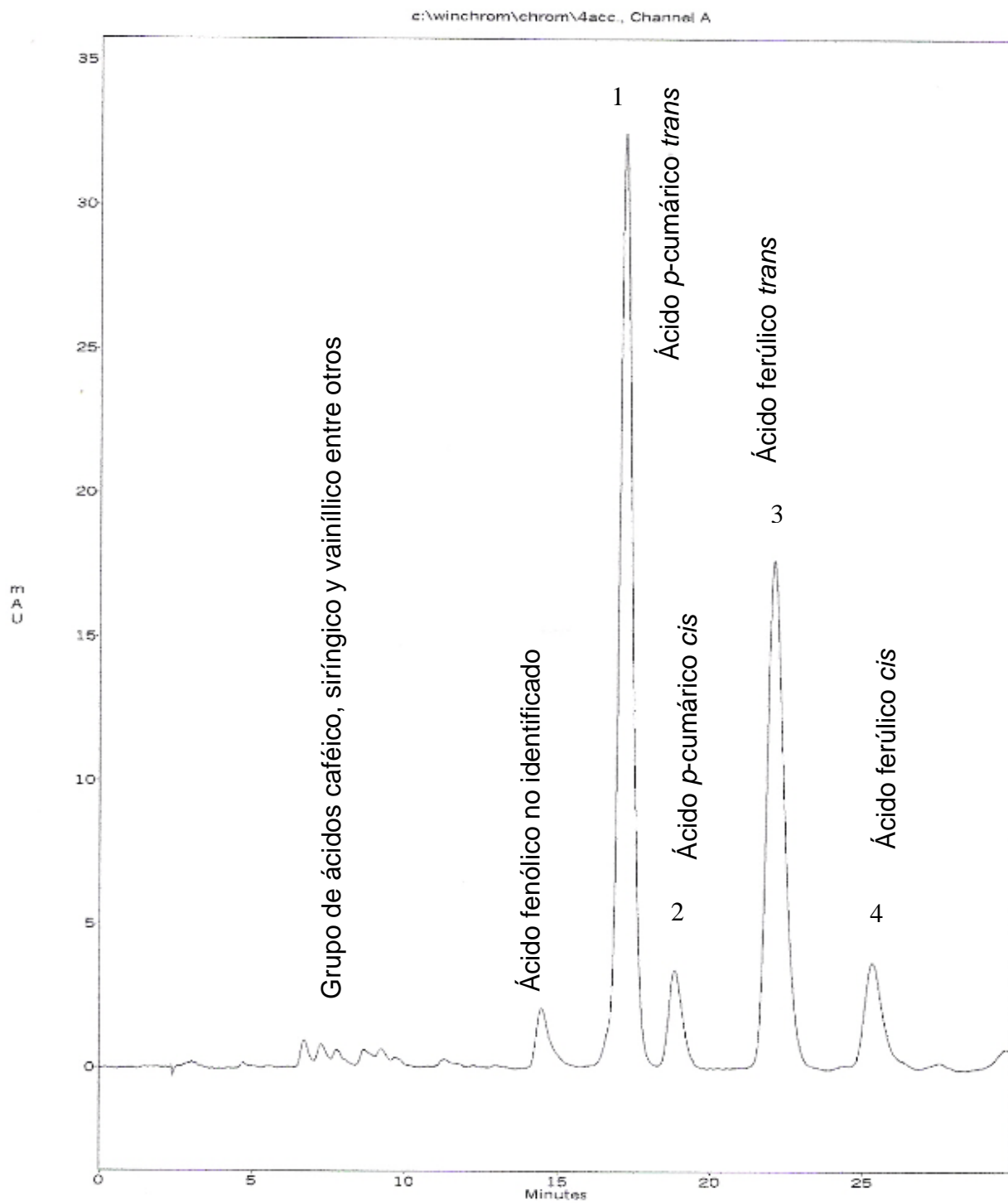


Figura 1. Cromatograma del extracto metanólico obtenido del extracto de agua común y corriente.

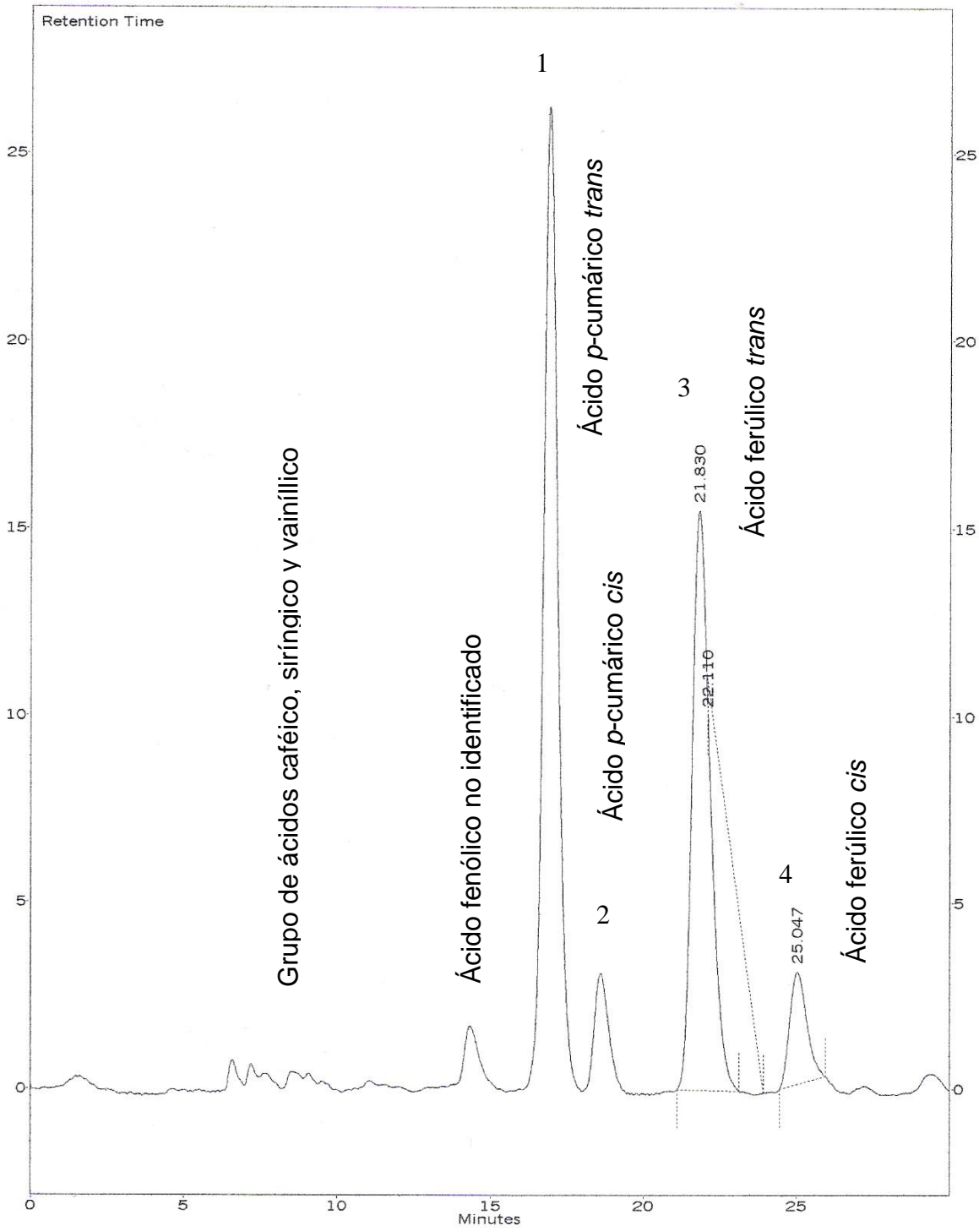


Figura 2. Cromatograma del extracto metanólico obtenido del extracto de agua común a 60 °C.

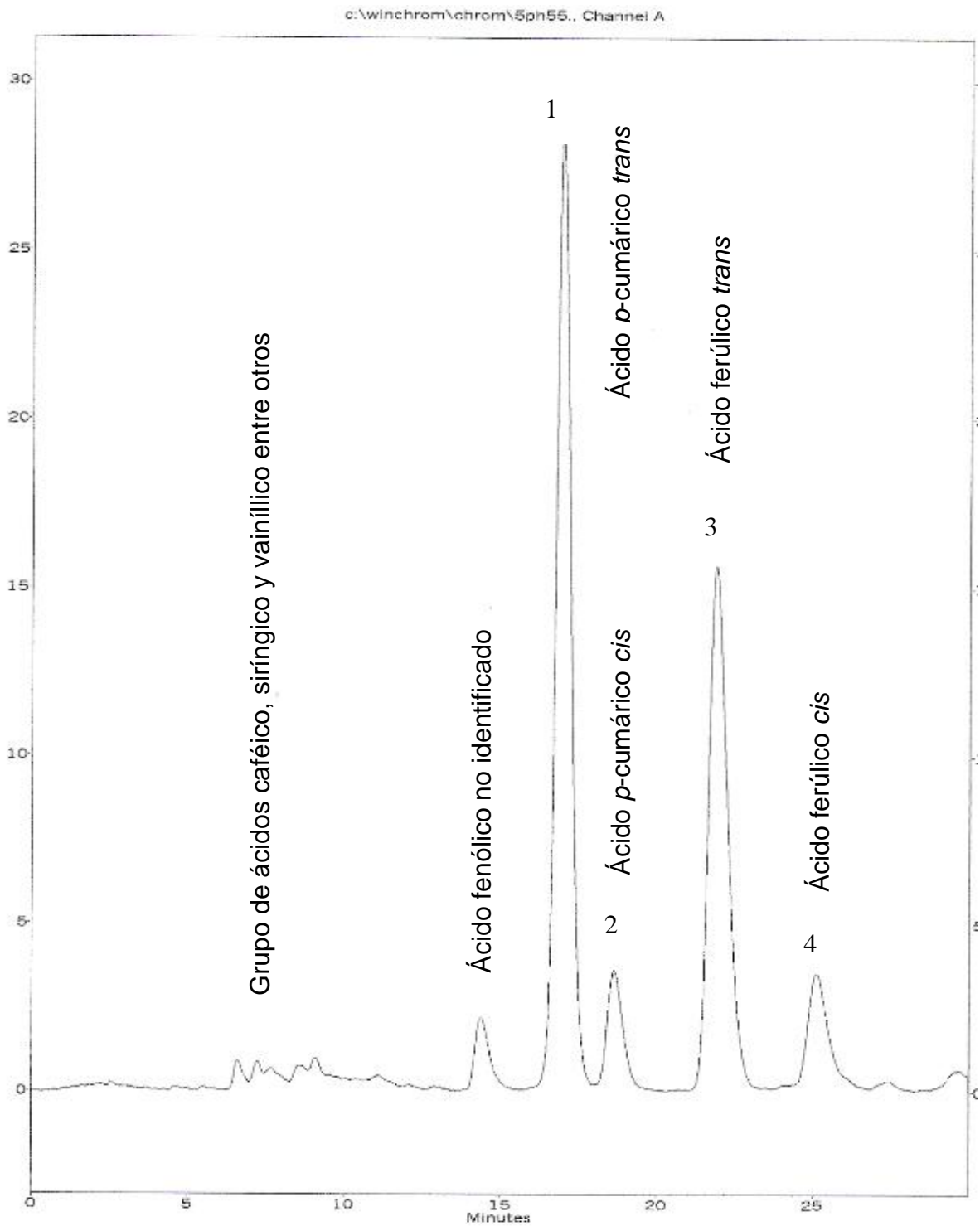


Figura 3. Cromatograma del extracto metanólico obtenido del extracto de agua a pH 5.5.

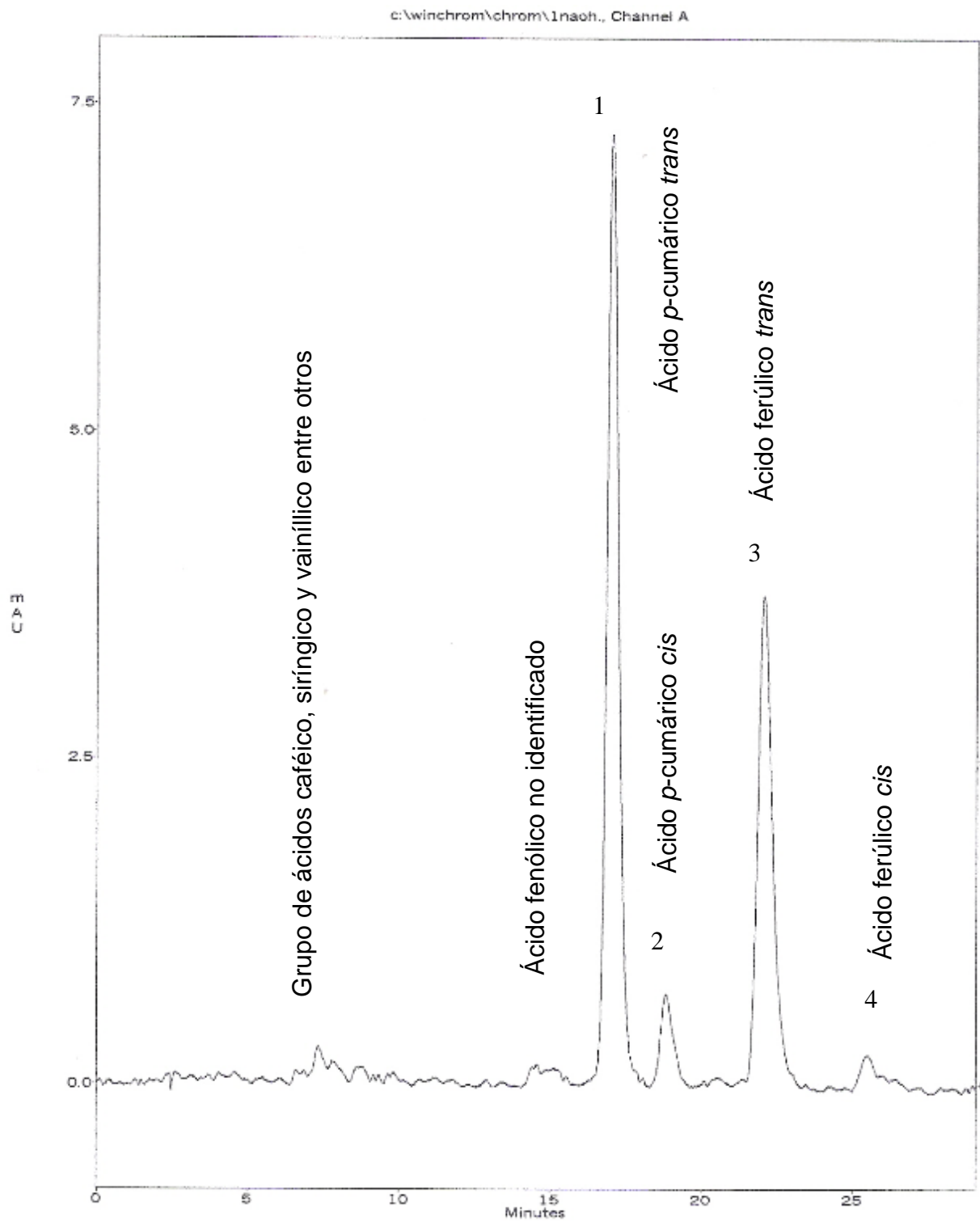


Figura 4. Cromatograma del extracto metanólico obtenido del extracto de NaOH al 0.5 %.

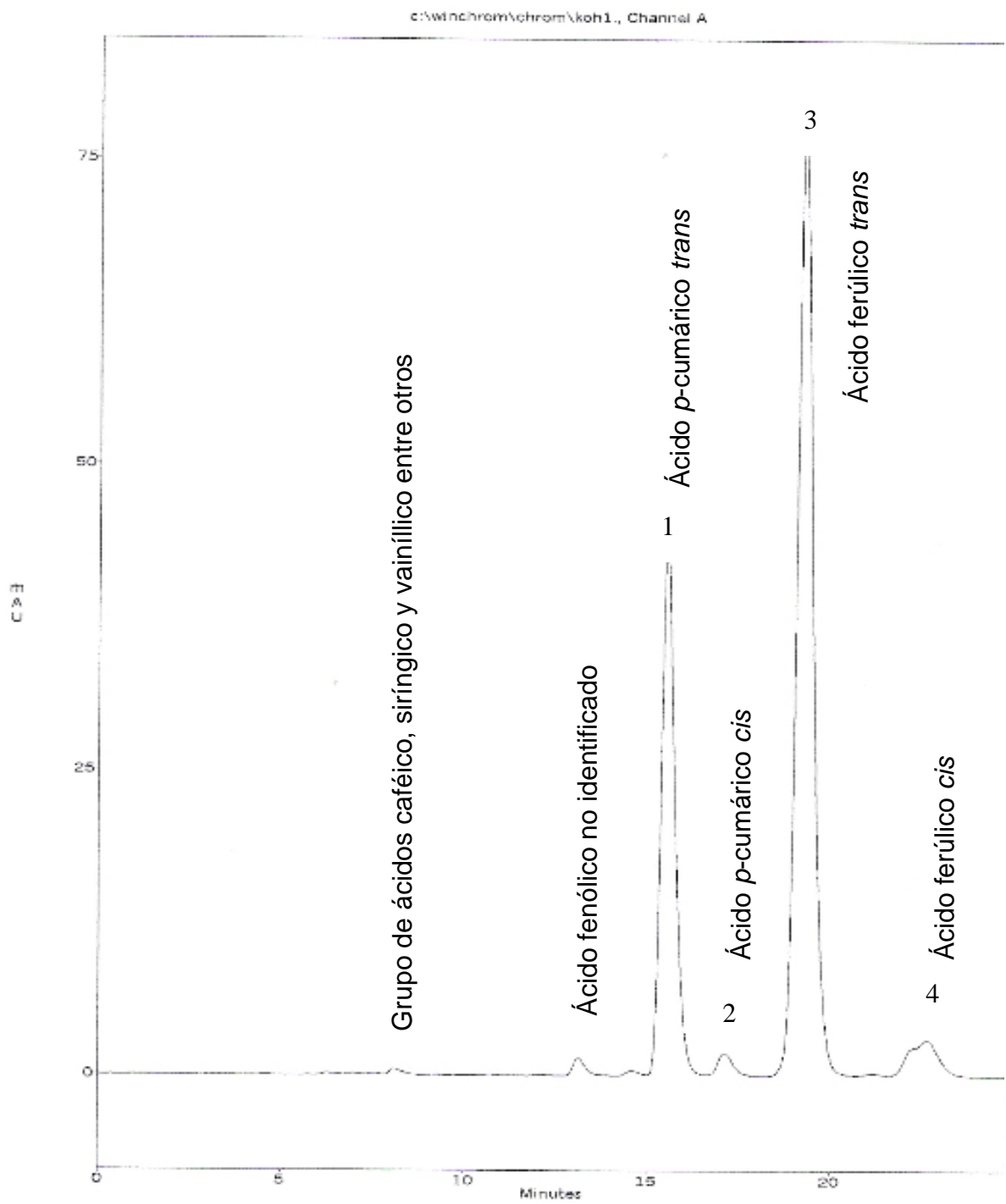


Figura 5. Cromatograma del extracto metanólico obtenido del extracto de KOH al 0.5 %.

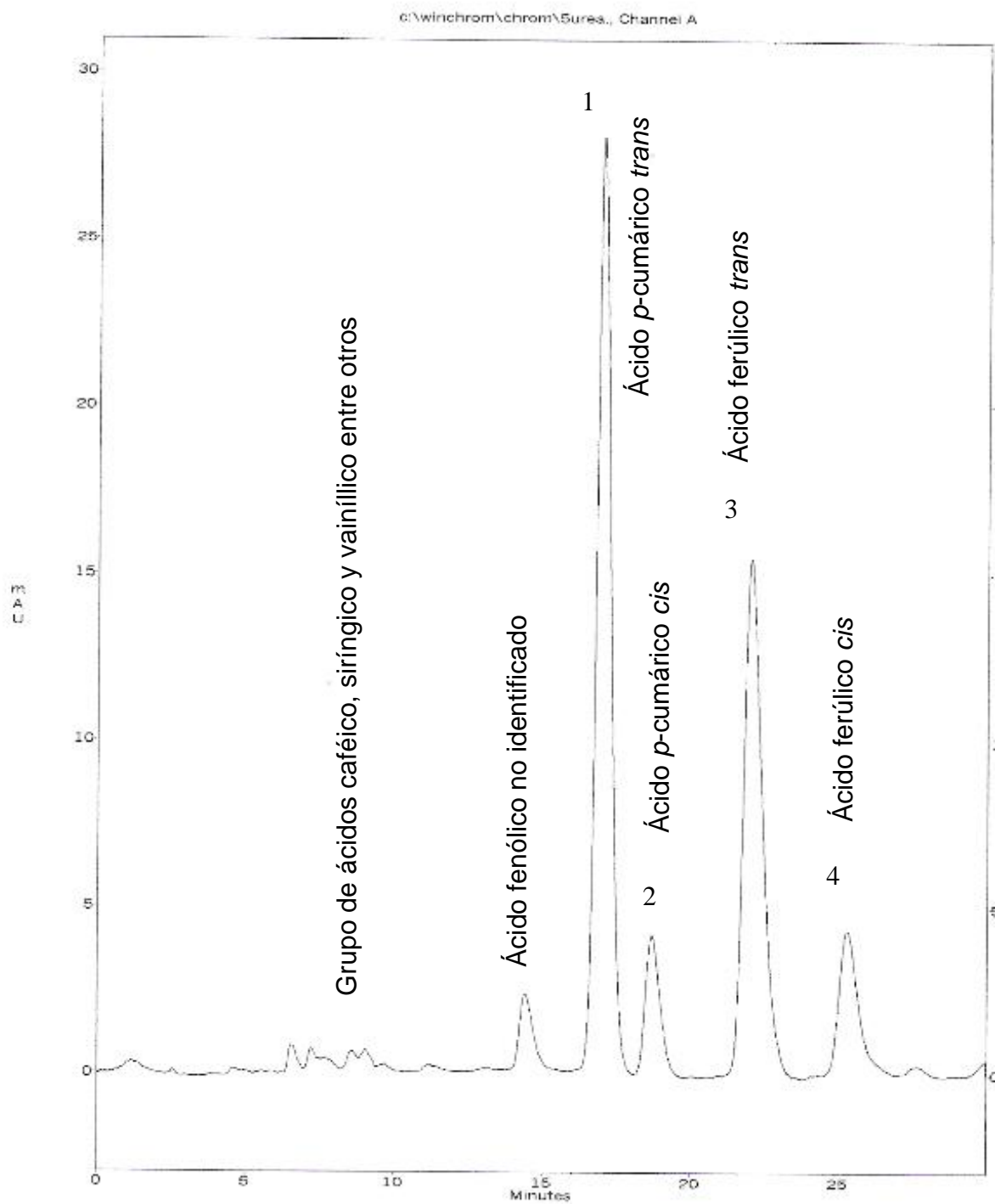


Figura 6. Cromatograma del extracto metanólico obtenido del extracto de urea al 0.5 %.

APÉNDICE B

Cuadro 1. pH de los sustratos evaluados durante las diferentes fechas de toma de muestras

Tratamiento	pH0	pH10	pH13	pH15	pH23	pH27	pH30
100-00	6.95 ab	6.31 a	6.63 a	6.23 a	6.83 a	6.77 a	6.22 a
90-10	6.66 c	6.53 a	6.30 a	6.14 a	6.28 a	6.89 a	6.56 a
80-20	7.02 a	6.81 a	7.06 a	6.51 a	6.49 a	6.85 a	6.54 a
70-30	6.72 bc	6.75 a	6.90 a	6.15 a	6.46 a	6.51 b	6.17 a
60-40	6.74 bc	6.49 a	6.51 a	6.40 a	6.49 a	6.35 b	6.16 a
50-50	7.18 a	6.45 a	6.91 a	6.16 a	6.61 a	6.90 a	6.53 a
Sogemix VT-M	6.40 d	6.46 a	6.22 a	6.18 a	6.32 a	6.42 b	6.50 a
Sunshine	4.35 e	4.46 b	4.29 b	4.68 b	4.92 a	5.55 c	6.50 a
P>F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0007	0.0001	0.0001	0.2842
DHS (Tukey $\alpha = 0.05$)	0.259	0.5453	0.9069	1.11	0.8553	0.24	0.718

pH = pH de las soluciones de los sustratos a los 0, 10, 13, 15, 23, 27 y 30 días después del inicio del experimento. Valores con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Cuadro 2. Conductividad eléctrica (dS m⁻¹) de los sustratos evaluados durante las diferentes fechas de toma de muestras.

Tratamiento	CE0	CE10	CE13	CE15	CE23	CE27	CE30
100-00	0.35 c	1.78 a	2.32 bc	2.68 a	2.71 a	1.77bcd	1.06 b
90-10	0.34 c	1.74 a	2.37 bc	2.89 a	3.08 a	1.87 bcd	1.01 b
80-20	0.35 c	1.68 a	2.02 bc	2.72 a	3.40 a	2.05 bc	1.41 ab
70-30	0.35 c	1.56 ab	2.55 b	2.83 a	2.74 a	1.63 bcd	1.29 b
60-40	0.38 c	1.69 a	1.90 c	2.27 a	3.00 a	1.42 cd	1.45 ab
50-50	0.47 b	1.88 a	2.29 bc	2.41 a	2.21 a	1.35 d	1.29 b
Sogemix VT-M	2.20 a	1.16 b	2.23 bc	2.86 a	3.70 a	3.67 a	2.25 a
Sunshine	0.18 d	1.82 a	3.48 a	3.26 a	3.66 a	2.19 b	2.23 a
P>F	0.00001	0.0016	0.0001	0.0874	0.2555	0.0001	0.0002
DHS (Tukey $\alpha = 0.05$)	0.049	0.4759	0.5986	0.9952	2.0553	0.6979	0.8518

CE= conductividad eléctrica de las soluciones de los sustratos a los 0, 10, 13, 15, 23, 27, y 30 días después del inicio del experimento.

Valores con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente

Cuadro 3. Concentración de fenólicos solubles totales (mg L⁻¹) los sustratos evaluados durante las diferentes fechas de toma de muestras.

Tratamiento	CFST0	CFST10	CFST13	CFST15	CFST23	CFST27	CFST30
100-00	39.10 C	15.12 c	22.57 ab	13.30 a	6.03 abc	4.41 cd	6.00 ab
90-10	38.76 C	18.03 abc	20.68 ab	14.62	8.02 abc	5.63 b	5.46 b
80-20	38.76 C	22.05 ab	26.79 a	19.05 a	8.65 ab	8.67 a	5.42 b
70-30	41.80 ab	18.27 abc	23.01 ab	16.14 a	5.73 bc	5.25 bc	5.56 b
60-40	40.11 bc	18.00 abc	16.17 bc	17.66 a	7.26 abc	6.13 b	6.24 ab
50-50	43.15 a	16.48 bc	23.93 ab	14.58 a	4.86 c	3.75 d	5.96 ab
Sogemix VT-M	25.24 d	22.53 a	12.09 c	7.69 a	7.49 abc	5.90 b	7.28 ab
Sunshine	16.45 e	19.01 abc	10.61 c	9.72 a	9.17 a	6.03 b	8.13 a
P>F	0.0001	0.0064	0.0001	0.0724	0.0022	0.0001	0.0101
DHS (Tukey $\alpha = 0.05$)	2.41	6.0228	8.4189	12.14	3.2378	1.10	2.41

CFST= concentración de fenólicos solubles totales a los 0, 10, 13, 15, 23, 27 y 30 días después del inicio del experimento.

Valores con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente

APENDICE C

Cuadro 1. Concentración de fenólicos solubles totales (mg L^{-1}) registradas durante el proceso de transformación biológica de paja de trigo variedad Saturno.

Tratamiento	CFST0	CFST15	CFST30	CFST45	CFST60	CFST90
T1	184.72 a	129.37 ab	93.33 b	107.49 ab	135.32 ab	169.27 a
T2	121.65 b	83.04 c	54.72 c	70.16 b	95.91 c	133.01 a
T3	130.18 b	84.32 c	61.15 c	72.74 b	97.20 bc	135.59 a
T4	184.72 a	162.84 a	125.51 a	137.09 a	170.56 a	228.47 a
T5	121.65 b	95.27 bc	68.41 c	81.75 ab	97.20 bc	142.25 a
T6	130.18 b	66.31 c	49.85 c	50.86 b	59.87 c	98.48 a
P>F	0.0006	0.0001	0.0001	0.0085	0.0001	0.1648
CV	11.60	13.47	11.37	26.78	13.10	36.49
DHS	46.30	38.22	23.53	63.65	39.26	151.23

CFST = Concentración de fenólicos solubles totales en las diversas fechas de muestreo. Valores con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Cuadro 2. pH registrados durante el proceso de transformación biológica de paja de trigo variedad Saturno.

Tratamiento	pH0	pH15	pH30	pH45	pH60	pH90
T1	6.73 a	8.52 a	8.17 a	8.08 ab	7.50 ab	7.82 a
T2	6.80 a	7.68 b	7.55 a	7.40 abc	7.21 c	7.04 bc
T3	6.68 a	7.43 bc	7.27 a	6.88 c	6.90 d	6.98 bc
T4	6.73 a	7.65 b	7.90 a	8.23 a	7.72 a	7.85 a
T5	6.80 a	7.06 c	7.12 a	7.55 abc	7.29 bc	7.44 ab
T6	6.68 a	7.01 c	7.39 a	7.33 bc	7.48 b	7.58 ab
P>F	0.9441	0.0001	0.1674	0.0017	0.0001	0.0001
CV	2.91	2.61	6.63	4.07	1.18	2.51
DHS	0.53	0.54	1.37	0.84	0.23	0.50

pH= pH en las diversas fechas de muestreo. Valores con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Cuadro 3. Conductividades eléctricas (dS m⁻¹) registradas durante el proceso de transformación biológica de paja de trigo variedad Saturno.

Tratamiento	CE0	CE15	CE30	CE45	CE60	CE90
T1	1.17 a	0.85 a	1.00 a	1.15 a	1.19 ab	1.19 ab
T2	0.45 b	0.36 b	0.36 b	0.55b	0.59 c	0.47 c
T3	0.41 b	0.39 b	0.43 b	0.62 b	0.79 bc	0.71 bc
T4	1.17 a	0.84 a	1.12 a	1.43 a	1.62 a	1.61 a
T5	0.45 b	0.50 b	0.51 b	0.64 b	0.68 bc	0.69 bc
T6	0.41 b	0.50 b	0.36 b	0.44 b	0.72 bc	0.60 c
P>F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002
CV	13.50	13.27	13.22	13.22	20.62	24.21
DHS	0.25	0.20	0.36	0.29	0.52	0.58

CE = Conductividad eléctrica en las diversas fechas de muestreo. Valores con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Cuadro 4. Contenidos de materia orgánica (%) registrados durante el proceso de transformación biológica de paja de trigo variedad Saturno.

Tratamiento	MO0	MO15	MO30	MO45	MO60	MO90
T1	92.11 a	88.73 ab	87.73 a	86.45 ab	85.05 bc	84.31 b
T2	91.65 a	90.33 ab	89.18 a	87.88 a	87.28 a	85.00 ab
T3	91.91 a	90.25 ab	88.08 a	87.41 a	85.40 b	81.83 c
T4	92.11 a	88.46 b	86.58 a	84.66 c	84.10 c	83.58 bc
T5	91.65 a	90.81 a	88.54 a	87.26 a	87.55 a	86.95 a
T6	91.91 a	88.73 ab	86.36 a	85.05 bc	84.26 bc	83.28 bc
P>F	0.8943	0.0081	0.06	0.0001	0.0001	0.0001
CV	0.702	0.854	1.28	0.71	0.517	0.96
DHS	1.77	2.09	3.09	1.70	1.21	1.28

MO = Materia orgánica en las diversas fechas de muestreo. Valores con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

APÉNDICE D

Cuadro 1. pH de los sustratos evaluados en las diferentes fechas de muestreo.

Sustrato	pH 0	pH 10	pH 20	pH 25	pH 30
1	6.20 de	6.30 e	6.39 b	6.47 abcd	5.80 ab
2	6.30 de	6.50 cd	6.59 ab	6.48 abcd	5.70 ab
3	6.70 b	6.80 b	6.59 ab	6.50 abcd	6.00 ab
4	6.20 de	6.26 e	6.31 b	6.37 cde	5.83 ab
5	6.13 ef	6.22 e	6.25 b	6.32 de	6.10 ab
6	7.41 a	7.05 a	6.76 a	6.43 bcd	6.00 ab
7	6.39 cd	6.35 de	6.33 b	6.26 def	6.22 ab
8	6.19 de	6.25 e	6.53 ab	6.66 abc	6.43 a
9	6.61 bc	6.55 c	6.53 ab	6.46 bcd	5.91 ab
10	6.21 de	6.40 cde	6.50 ab	6.78 a	5.81 ab
11	6.53 bc	6.53 cd	6.58 ab	6.69 ab	5.97 ab
Sogemix VT-M	5.91 f	6.40 cde	6.27 b	5.97 f	6.48 a
Sunshine	5.43 g	5.52 f	5.80 c	6.09 ef	6.09 ab
P>F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.040
DHS	0.2233	0.1937	0.3663	0.3166	1.1252

0, 10, 20, 25 y 30. Los números son los días después de la siembra, cuando se tomaron las muestras. Valores con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Cuadro 2. Conductividad eléctrica (dS m⁻¹) de los sustratos evaluados en las diferentes fechas de muestreo.

Sustrato	CE 0	CE 10	CE 20	CE 25	CE 30
1	0.50 f	1.70 f	1.36 fg	1.05 e	1.18 cde
2	0.55 ef	1.80 ef	1.82 e	1.38 de	0.82 def
3	1.97 b	2.15 bcd	1.89 de	1.33 de	1.20 cde
4	1.09 d	2.37 ab	2.02 cde	1.55 cde	1.63 abc
5	1.21 d	2.05 cde	1.70 ef	1.36 de	1.14 cdef
6	2.59 a	2.56 a	2.69 a	2.25 ab	1.85 ab
7	1.17 d	1.65 f	1.30 g	1.30 de	1.52 abc
8	1.00 de	2.00 de	2.26 bcd	2.28 ab	1.52 abc
9	1.26 cd	1.80 ef	1.69 ef	1.62 cde	0.73 ef
10	1.18 d	1.70 f	1.40 fg	1.80 bcd	0.59 f
11	1.72 bc	2.12 bcd	2.24 bcd	2.03 abc	1.33 bcd
Sogemix VT-M	1.90 b	2.32 ab	2.28 bc	2.38 ab	0.80 def
Sunshine 3	0.95 def	2.27 bc	2.51 ab	2.48 a	2.08 a
P>F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
DHS	0.4762	0.2627	0.3772	0.595	0.5744

CE = conductividad eléctrica. Los números son los días después de la siembra, cuando se tomaron las muestras.

Valores con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

Cuadro 3. Concentración de fenólicos solubles totales (mg L⁻¹) de los sustratos evaluados en las diferentes fechas de muestreo.

Sustrato	CFST 0	CFST 10	CFST 20	CFST 25	CFST 30
1	33.95 cd	29.30 e	23.68 cde	10.04 cde	3.64 de
2	34.11 cd	28.50 e	24.29 bcd	7.78 def	2.48 e
3	118.91 b	50.30 b	15.49 g	4.70 f	2.42 e
4	74.30 bc	40.33 cd	20.96 cdef	10.37 cd	5.09 bc
5	75.51 bc	39.10 d	16.40 fg	5.18 f	2.93 de
6	228.94 a	50.40 b	18.33 efg	6.41 def	3.60 de
7	101.53 b	44.20 bcd	15.78 fg	5.29 ef	3.96 cd
8	73.31 bc	45.30 bcd	19.93 defg	10.40 cd	2.83 de
9	80.67 bc	48.20 bc	18.50 efg	5.96 def	5.26 bc
10	86.47 b	40.50 cd	19.03 defg	6.89 def	5.26 bc
11	117.63 b	60.50 a	25.82 bc	14.68 bc	5.46 b
Sogemix VT-M	25.25 d	27.12 e	29.61 ab	18.48 b	5.40 b
Sunshine 3	16.46 d	20.50 e	31.45 a	39.34 a	7.06 a
P>F	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
DHS	46.94	8.84	5.41	4.77	1.32

CFST = concentración de fenólicos solubles totales. Los números son los días después de la siembra, cuando se tomaron las muestras. Valores con la misma letra en cada columna son iguales estadísticamente.

APÉNDICE E

Cuadro 1. Características generales de los sustratos testigos y los dos mejores sustratos derivados de paja de trigo con degradación parcial, que proporcionaron un adecuado crecimiento en plántulas de brócoli cv. Patriot. (Sakata Seeds).

	Sustrato			
	Sogemix VT-M	Sunshine 3	Sustrato No. 5	Sustrato No. 8
Características generales				
País de fabricación	Canadá	Canadá	México	México
Material orgánico base para su elaboración	Turba de <i>Sphagnum</i>	Turba de <i>Sphagnum</i>	Paja de trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.).	Paja de trigo (<i>Triticum aestivum</i> L.).
Proporción de material orgánico base (% en volumen)	60-70	Información no disponible	100 %	100 %
Tipo de fibra	Larga	Corta	Mediana	Mediana
Facilidad para llenar las cavidades de las charolas	Fácil	Fácil	Fácil	Fácil
Presentación más común (Sacos con sustrato comprimido – Litros)	107.50	107.50	No determinado	No determinado
Volumen aproximado después de desempacado. (Litros)	215.0	215.0	No determinado	No determinado
Contenido de humedad empacado (% con base en peso)	50-60	40 ± 10	7 %	7 %

Cuadro 2. Concentrado de propiedades físicas de los sustratos testigos y los dos mejores sustratos derivados de paja de trigo con degradación parcial, que proporcionaron un adecuado crecimiento en plántulas de brócoli cv. Patriot. (Sakata Seeds).

	Sustratos			
	Sogemix VT-M	Sunshine 3	Sustrato No. 5	Sustrato No. 8
Propiedades físicas				
Granulometría (p/p)	2.63 %	9.28 %	80 %	80 %
	≥ 2.0 mm	≥ 2.0 mm	≥ 2.0 mm	≥ 2.0 mm
	22.62 %	12.98 %	20 %	20 %
	< 2.0 ≥ 1.0 mm	< 2.0 ≥ 1.0 mm	< 2.0 ≥ 1.0 mm	< 2.0 ≥ 1.0 mm
	15.03 %	28.02 %		
	< 1.0 ≥ 0.5 mm	< 1.0 ≥ 0.5 mm		
	59.49 %	50.52 %		
	< 0.5 mm	< 0.5 mm		
Color en Seco (Munsell)	10 YR 4/4	10 YR 4/4	5 Y 3/2	5 Y 3/2
Color en seco (Munsell)	Café amarillento oscuro	Café amarillento oscuro	Café grisáceo muy oscuro	Café grisáceo muy oscuro
Color en húmedo (Munsell)	5 YR 2.5/1	5 YR 2.5/1	2.5 YN 2/0	2.5 YN 1/0
Color en húmedo (Munsell)	Olivo	Olivo	Negro	Negro
Olor	Agradable	Agradable	Agradable	Agradable

Cuadro 2. Concentrado de propiedades físicas de los sustratos testigos y los dos mejores sustratos derivados de paja de trigo con degradación parcial, que proporcionaron un adecuado crecimiento en plántulas de brócoli cv. Patriot. (Sakata Seeds). (Continuación).

	Sustrato			
	Sogemix VT-M	Sunshine 3	Sustrato No. 5	Sustrato No. 8
Propiedades físicas				
Densidad aparente (Mg m^{-3})	0.143	0.1536	0.1297	0.1646
Densidad en húmedo - 50 % de humedad (Mg m^{-3})	0.2145	0.2304	-----	-----
Densidad real (Mg m^{-3})	1.7900	1.6426	1.6078	1.5915
Porosidad total (% con base en volumen)	89.25	89.75	91.10	90.00
Porosidad de aire (% con base en volumen)	2.93	0.96	5.26	5.70
Espacio sólido (% con base en volumen)	10.75	10.25	8.90	10.00
Agua fácilmente disponible (% con base en volumen)	33.50	33.84	36.25	39.84
Agua de reserva (% con base en volumen)	9.75	14.15	6.75	6.70
Agua total disponible (% con base en volumen)	43.25	47.99	43.00	46.54
Agua difícilmente disponible (% con base en volumen)	43.07	40.80	42.84	37.76
Porosidad de agua (% con base en volumen)	86.32	88.79	85.84	84.30
Retención de humedad (p/p). Veces su peso en seco	603.63	878.05	661.83	805.92
Retención de humedad ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)	0.8632	0.8879	0.8584	0.8430
Infiltración	Lenta	Lenta	Moderada	Moderada

Cuadro 3. Concentrado de propiedades químicas de los sustratos testigos y los dos mejores sustratos derivados de paja de trigo con degradación parcial, que proporcionaron un adecuado crecimiento en plántulas de brócoli cv. Patriot. (Sakata Seeds).

	Sustratos			
	Sogemix VT-M	Sunshine 3	Sustrato No. 5	Sustrato No. 8
Propiedades químicas				
pH relación 1: 2 sustrato: agua v/v)	5.91	5.53	6.13	6.19
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹ ;1: 2; sustrato: agua destilada v/v)	1.90	1.97	1.21	1.00
Concentración de fenólicos solubles totales (mg L ⁻¹ ; 1: 2; sustrato: agua v/v)	25.25	16.46	75.51	73.31
CICT (cmoles (+) kg ⁻¹)	62.80	46.93	13.22	10.59
Materia orgánica (% p/p)	58.25	77.58	84.54	86.76
C (%-- p/p)	33.78	44.99	49.03	50.32
N (% -- p/p)	0.67	0.83	2.29	1.89
C/N	50.27	54.26	21.51	26.63
Capacidad de amortiguamiento del pH	Alta	Alta	Alta	Alta
Mojabilidad sin agitación (Minutos)	11.69	2.19	4.22	17.22
Mojabilidad con agitación (Segundos)	10.00	5.33	7.66	15.00

Cuadro 4. Aditivos en los sustratos testigos y los dos mejores sustratos derivados de paja de trigo con degradación parcial, que proporcionaron un adecuado crecimiento en plántulas de brócoli cv. Patriot. (Sakata Seeds).

	Sustratos			
	Sogemix VT-M	Sunshine 3	Sustrato No. 5	Sustrato No. 8
Aditivos				
Vermiculita fina (% con base en volumen)	Si (30 -40 %)	Si (no especificado)	No	No
Carbonato de calcio	Si	No	No	No
Dolomita	Si	Si	No	No
Yeso	No	Si	No	No
Macronutrientes	Si	Si	Si	Si
Micronutrientes	Si	Si	Sí	Sí
Agente humectante	Si (patentado)	Si (Patentado)	No	No
Fijación de nutrimentos (adsorción)	Si (Cu)	Si (Cu)	No	No

Cuadro 5. Concentrado de propiedades biológicas de los sustratos testigos y los dos mejores sustratos de paja de trigo con degradación parcial, que proporcionaron un adecuado crecimiento en plántulas de brócoli cv. Patriot (Sakata Seeds).

	Sustratos			
	Sogemix VT-M	Sunshine 3	Sustrato No. 5	Sustrato No. 8
Bioestabilidad (%)	95.50	99.35	94.67	92.41
Organismos fitopatógenos	Sí	Sí	No	No
Semillas de malas hierbas	No	No	No	No