



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE BOTÁNICA

Efecto de la aplicación de vermicomposta en la mitigación del estrés hídrico en plantas tipo C3 y C4

GISELA AGUILAR BENÍTEZ

T E S I S
PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

DOCTORA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2011

La presente tesis titulada: "Efecto de la aplicación de vermicomposta en la mitigación del estrés hídrico en plantas tipo C3 y C4", realizada por la alumna: **Gisela Aguilar Benítez**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTORA EN CIENCIAS
BOTÁNICA**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERA: 

DRA. CECILIA BEATRIZ PEÑA VALDIVIA

ASESOR: 

DR. JOSÉ RODOLFO GARCÍA NAVA

ASESOR: 

DR. PORFIRIO RAMÍREZ VALLEJO

ASESOR: 

DR. GERARDO SERGIO BENEDICTO VALDÉS

ASESOR: 

DR. JOSÉ DOMINGO MOLINA GALÁN

Montecillo, Texcoco, México, junio de 2011

EFFECTO DE LA APLICACIÓN DE VERMICOMPOSTA EN LA MITIGACIÓN DEL ESTRÉS HÍDRICO EN PLANTAS TIPO C3 Y C4

Gisela Aguilar Benítez, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2011

Se ha evidenciado que la vermicomposta puede mejorar la germinación y el crecimiento y productividad de las plantas; sin embargo, su efecto combinado con déficit de humedad ha sido escasamente documentado. El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la vermicomposta en la germinación, crecimiento inicial y rendimiento en plantas C3 y C4, con déficit de humedad en el suelo. En laboratorio se evaluó la germinación de dos cultivares de frijol y dos de maíz, con respuesta contrastante a sequía, en suelo sin y con 1.5, 3, 6 y 9 % de vermicomposta, y con potenciales de agua (Ψ_A) de -0.03 y -2 MPa; en invernadero se cuantificó el intercambio de gases y crecimiento de maíz, así como algunos componentes del rendimiento de frijol, en suelo sin y con 1.5 y 3 % de vermicomposta, y con riego o su suspensión. Ambas especies tuvieron germinación total acumulada mayor a 90 %, y duplicaron el tiempo para la germinación máxima (TGM) con el Ψ_A de -2.0 MPa en suelo con 6 y 9 % de vermicomposta. La imbibición máxima promedio fue 40 % en maíz y 90 % en frijol, y disminuyó ($p \leq 0.05$) con la cantidad de vermicomposta en el suelo. Los cultivares tolerantes a sequía de ambas especies embebieron menos agua ($p \leq 0.05$) que los susceptibles en ambos Ψ_A . La conductancia estomática e intercambio de gases de ambas especies se afectaron igual por el déficit de humedad, a pesar de haberse evaluado en etapas fenológicas diferentes. El número de vainas producidas y cosechadas incrementó ($p \leq 0.05$) entre 17 y 50 %, así como el número y peso de semillas con 3 % de vermicomposta. Las interacciones entre factores evidenciaron la complejidad de las respuestas a la combinación de los factores evaluados. Se demostró que la vermicomposta incrementó la capacidad de retención del agua en el suelo, mitigó ($p \leq 0.05$) el efecto del déficit hídrico sobre el rendimiento de plantas que se enfrentan a esa condición en la fase reproductiva, y redujo parcialmente el efecto del déficit hídrico en la germinación y el crecimiento inicial de maíz y frijol.

Palabras clave: Estrés, floración, semilla, germinación, uso eficiente del agua.

EFFECT OF VERMICOMPOST APPLICATION ON WATER STRESS MITIGATION IN C3 AND C4 PLANTS

Gisela Aguilar Benítez, Dra.

Colegio de Postgraduados, 2011

There has been demonstrated that vermicompost can improve germination, growth and productivity of plants; nevertheless, its effect combined with water stress has been poorly documented. The aim of this investigation was to evaluate the effect of vermicompost on seed germination, early growth, and yield in C3 and C4 plants, with soil water deficit. The germination of two bean and two maize cultivars, with contrasting responses to drought were evaluated in unamended soil or amended soil with 1.5, 3, 6, and 9 % of vermicompost, and water potentials (Ψ_w) of -0.03 and -2 MPa. Bean and maize plants were grown in pots with 0, 1.5 and 3 % vermicompost-soil combinations in well-watered or deficit irrigated conditions. Gas exchange, early growth, and some bean yield components were determined. Bean and maize species had maximum cumulative germination up to 90 %. Maximum germination time (MGT) was longer ($p \leq 0.05$) with Ψ_w of -2.0 MPa in 6 and 9 % of vermicompost. The maximum imbibition was 40 % in maize, and 90 % in bean, and it diminished ($p \leq 0.05$) with the proportion of vermicompost in the soil. The drought tolerant cultivars absorbed less water ($p \leq 0.05$) than the drought susceptible ones in both Ψ_w . Gas exchange and stomatal conductance of both species were affected equally by water deficit, even when they were evaluated on different phenological stages; 1.5 and 3 % of vermicompost diminished ($p \leq 0.05$) both variables. Pods produced and harvested, and seeds number and seeds weight were increased ($p \leq 0.05$) between 17 and 50 % with 3 % of vermicompost. The interactions between the evaluated factors showed the complexity of response to their combination. Our results suggest that application of vermicompost increased the soil water retention and mitigated the effect of water deficit on yield of plants growing under irrigation interruption in reproductive stage. On the other hand a partially alleviates of the effect of water deficit in germination and early growth of maize and bean was detected.

Key words: Stress, flowering, seeds, germination, water use efficiency

A Joshimar y José Ángel

... sin ustedes mi vida simplemente no tendría eje.

A mis padres Jaime Aguilar y Efigenia Benítez

... por darme la existencia y quererme y estar conmigo y ...

A Ismael, David y Eduardo

... un gran ejemplo que aún no pienso seguir.

A Rigo

... por ser el tiburón de mi pecera.

A Cris

... mi hermana de corazón.

Agradecimientos

Muy especial al International Fellowships Program - Ford Foundation, por creer que no debe haber límites para el acceso a la educación y beneficiarme con una beca especial de estudios de postgrado.

A todos los contribuyentes que a través del **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** (CONACYT) me apoyaron con una beca parcial para la realización de mis estudios de Doctorado.

Al Postgrado de **Botánica** del **Colegio de Postgraduados**, por brindarme sus instalaciones y gente que permitieron la conclusión de este proyecto.

A mi consejera, **Dra. Cecilia B. Peña Valdivia**, por su profesionalismo, tolerancia y calidad humana. Casi imposible encontrar todo eso en una sola persona.

A los integrantes de mi Consejo Particular, Doctores: José Rodolfo García Nava, Gerardo Sergio Benedicto Valdés, Porfirio Ramírez Vallejo, José Domingo Molina Galán. Por sus aportaciones en la orientación y revisión de la investigación. También por facilitarme las semillas para las pruebas preliminares y ensayos, así como los laboratorios que se requirieron para análisis de suelos y germinación de semillas.

Al Dr. David Navarrete, Blanca Ceballos, Xochitl Hernández, Marina Cadaval, Ma. Del Pilar Muñoz y Linda Isabel Uribe. Mi soporte IFP-Ford Foundation. ¡Son grandiosos!.

Al Dr. Carlos Trejo López porque es un gran investigador y sin ninguna obligación siempre estuvo para aclarar mis dudas y apoyarme con su biblioteca.

Al M.C José Luis Torres quien amablemente me apoyó con las gestiones para obtener germoplasma del CIMMYT.

Al Dr. Julio Sánchez Escudero por aportar la vermicomposta para las pruebas preliminares.

Al M.C. Juan Vidal Bello, coordinador del Módulo de Abonos Orgánicos y Lombricultura de la Universidad Autónoma Chapingo, quien donó la vermicomposta para los ensayos en laboratorio e invernadero.

Al Dr. Humberto Vaquera Huerta por brindarme su conocimiento para realizar los análisis estadísticos, y por su amabilidad.

A los Doctores: Adrián Quero Carrillo, Cándido López Castañeda, Jesús García Zavala, Carlos Ramírez Ayala, y Edmundo García Moya, que en momentos de confusión pudieron aclarar mi panorama.

A la M.C. Ana Galicia por su orientación en el laboratorio y su amistad.

A los que además de ser grandes amigos han catalizado de una u otra forma esta etapa de mi vida: María de Jesús Ávila, Gladys Bala, Violena Millahual, Roberto Orellana, Innah Cervantes, Valentina Smelova, Sirinath Matra, Farida Badr, Charles Donou, Tezira Jamwa, Dorine JeanPaul, Saúl Rioja, Alannah Massey, Sarah Franklin, Zeina, Hugo y Oscar. ¡Soy afortunada!.

A los compañeros del laboratorio 111 de Botánica, en especial al grupo de aquellos tiempos: Raquel, Rosario, Balois, Mayra, Cristian, Erasmo, y a los de ahora también Huitzi y Fran, por todas las vivencias buenas, malas y peores.

A la señora Irma Alvarado y al señor Ricardo García, por todas las actividades aligeradas en el trabajo experimental.

Contenido

	Pág.
Introducción general.....	1
Capítulo I. Efecto de la vermicomposta y el potencial de agua del suelo en la germinación de maíz y frijol.....	8
Resumen.....	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Materiales y métodos.....	11
Material vegetal.....	11
Sustrato.....	13
Diseño experimental.....	14
Condiciones del estudio.....	16
Variables evaluadas.....	17
Resultados.....	18
Imbibición de semillas de maíz.....	18
Imbibición de semillas de frijol.....	20
Germinación de maíz.....	23
Germinación de frijol.....	25
Crecimiento de la raíz de maíz.....	27
Biomasa acumulada en raíz de frijol.....	29
Discusión.....	30
Conclusiones.....	37
Literatura citada.....	37
Capítulo II. Intercambio de gases y conductancia estomática de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) cultivado en vermicomposta y suspensión de riego..	42
Resumen.....	42
Abstract.....	43
Introducción.....	44
Materiales y métodos.....	46
Material vegetal.....	46
Sustratos	47
Diseño experimental.....	47
Desarrollo del experimento.....	48
Variables evaluadas.....	50
Resultados y discusión.....	50
Efecto de la vermicomposta en la retención de humedad del suelo	50
Conductancia estomática.....	54
Asimilación neta de CO ₂	55
Transpiración.....	60

Uso eficiente del agua.....	60
Temperatura foliar.....	62
Conclusiones.....	66
Literatura citada.....	66
Capítulo III. Intercambio de gases, índice de área foliar y prolina en maíz cultivado en vermicomposta y déficit de humedad.....	71
Resumen.....	71
Abstract.....	72
Introducción.....	73
Materiales y métodos.....	74
Material vegetal.....	74
Sustrato.....	75
Diseño experimental.....	75
Condiciones del experimento.....	76
Variables evaluadas.....	78
Resultados y discusión.....	79
Humedad en los sustratos durante la suspensión del riego.....	79
Conductancia estomática e intercambio de gases.....	82
Indicadores del crecimiento.....	93
Contenido de prolina.....	102
Conclusiones.....	104
Literatura citada.....	104
Capítulo IV. Rendimiento de frijol (<i>Phaseolus vulgaris</i> L.) en relación con la concentración de vermicomposta y déficit de humedad en el sustrato.....	109
Resumen.....	109
Abstract.....	110
Introducción.....	111
Materiales y métodos.....	114
Material vegetal.....	114
Sustrato.....	115
Diseño experimental.....	117
Condiciones y desarrollo del experimento.....	117
Variables evaluadas.....	118
Resultados y discusión.....	119
Conclusiones.....	132
Literatura citada.....	133
Discusión general.....	137
Conclusiones generales.....	143
Literatura citada.....	144

Lista de cuadros

Pág.

Capítulo I

Cuadro 1. Características de calidad de semillas de maíz y frijol tolerantes y susceptibles a sequía.	13
Cuadro 2. Características fisicoquímicas del suelo y las mezclas evaluadas.	15
Cuadro 3. Imbibición máxima (IM) y tiempo para germinación máxima (TGM) de semillas de maíz en suelo sin vermicomposta y diferentes proporciones de ella, dos potenciales de agua (Ψ_A) del sustrato y en condiciones de laboratorio.	22
Cuadro 4. Imbibición máxima (IM), tiempo para la germinación máxima (TGM) e índice de biomasa acumulada en la raíz (IBA) de frijol sin vermicomposta y diferentes proporciones de ella, dos potenciales de agua (Ψ_A) del sustrato y en condiciones de laboratorio.	26

Capítulo II

Cuadro 1. Características fisicoquímicas y valores de referencia del contenido de humedad de los sustratos.	49
Cuadro 2. Significancia de los niveles de factores principales y sus interacciones para el contenido de humedad gravimétrico (%), en las unidades experimentales en tratamiento con suspensión de riego.	52
Cuadro 3. Conductancia estomática (gs), asimilación de CO ₂ (A), transpiración (E), uso eficiente del agua (UEA) y temperatura foliar (T) en frijol susceptible y tolerante a sequía, cultivados en suelo sin o con vermicomposta como sustrato y riego en el ciclo completo o suspensión a partir de la antesis, en invernadero.	56

Capítulo III

Cuadro 1. Características fisicoquímicas y constantes de humedad de suelo y las mezclas evaluadas.	77
Cuadro 2. Potencial de agua (Ψ_A) en muestras de suelo, sin y con vermicomposta, tomadas a 10 cm de profundidad en macetas con plantas de maíz, susceptible y tolerante a sequía, y suspensión de riego por 8 d, a partir de los 40 d de la siembra.	81
Cuadro 3. Conductancia estomática (gs), asimilación de CO ₂ (A), transpiración (E), uso eficiente del agua (UEA) y temperatura foliar (T) en plántulas de maíz.	92
Cuadro 4. Altura de plantas, área foliar e índice raíz/vástago de maíz cultivado con diferentes sustratos en invernadero.	95
Cuadro 5. Biomasa seca de raíz (BSR) y tallo (BST), número de hojas	99

liguladas (HL) y no liguladas (HNL) en plantas jóvenes de maíz susceptible y tolerante a la sequía.

Capítulo IV

Cuadro 1. Calidad de semillas de cultivares de frijol tolerante y susceptible a sequía, cultivados en Montecillo, México en el ciclo primavera-verano, 2008.	114
Cuadro 2. Características fisicoquímicas y valores de referencia de los sustratos evaluados en el rendimiento de frijol con riego y déficit de humedad.	116
Cuadro 3. Número de inflorescencias (NI) y número de vainas en cultivares de frijol susceptible y tolerante a sequía, cultivados en condiciones de invernadero. Datos tomados una vez por semana entre los 50 y 92 días después de la siembra.	120
Cuadro 4. Significancia de los niveles de factores principales y sus interacciones para el rendimiento y sus componentes en cultivares de frijol susceptible y tolerante a sequía, cultivados en condiciones de invernadero.	125
Cuadro 5. Tamaño de semilla (g) de dos cultivares de frijol, susceptible y tolerante (cv. 122 y 92, respectivamente) a sequía, cultivados en suelo, sin o con vermicomposta como sustrato, y riego en el ciclo completo o su suspensión a partir de la floración, en condiciones de invernadero.	130

Lista de figuras

	Pág.
Capítulo I	
Figura 1. Contenido de humedad (%) y potencial de agua (MPa) determinado por psicrometría, de suelo (●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■), suelo con 3 % de vermicomposta (▲), suelo con 6 % de vermicomposta (◆), y suelo con 9 % de vermicomposta (▼).PMP: punto de marchitez permanente, n=3. Líneas punteadas señalan los Ψ_A evaluados.	17
Figura 2. Dinámica de imbibición (porcentaje de agua embebida en relación al peso seminal individual) de semilla de maíz, susceptible y tolerante a sequía, en dos niveles de Ψ_A en suelo (●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■), suelo con 3 % de vermicomposta (▲), suelo con 6 % de vermicomposta (◆), y suelo con 9 % de vermicomposta (▼), n=30.	19
Figura 3. Dinámica de imbibición de semillas de frijol susceptible y tolerante a sequía en suelo (●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■), suelo con 3 % de vermicomposta (▲), suelo con 6 % de vermicomposta (◆), y suelo con 9 % de vermicomposta (▼) con dos Ψ_A ; n=30.	21
Figura 4. Germinación acumulada de maíz susceptible y tolerante a sequía en suelo (●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■), suelo con 3 % de vermicomposta (▲), suelo con 6 % de vermicomposta (◆), y suelo con 9 % de vermicomposta (▼) con dos Ψ_A ; n=30.	24
Figura 5. Germinación acumulada de frijol susceptible y tolerante a sequía, con dos niveles de Ψ_A en suelo (●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■), suelo con 3 % de vermicomposta (▲), suelo con 6 % de vermicomposta (◆), y suelo con 9 % de vermicomposta (▼); n=30.	27
Figura 6. Crecimiento inicial de raíz primaria en plántulas de maíz susceptible y tolerante a sequía, germinado con dos niveles de Ψ_A en suelo (●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■), suelo con 3 % de	28

- vermicomposta (▲), suelo con 6 % de vermicomposta (◆), y suelo con 9 % de vermicomposta (▼); n=30.
- Figura 7. Biomasa de raíz primaria de plántulas de frijol susceptible y tolerante a sequía en suelo con proporciones diferentes de vermicomposta y dos Ψ_A (MPa), n=30. 30

Capítulo II

- Figura 1. Humedad del suelo, determinada por gravimetría, de macetas con plantas de frijol susceptible (símbolos rojos) y tolerante (símbolos amarillos) a sequía, con suspensión de riego a partir de la antesis (59 d después de la siembra). Sustratos: suelo (testigo) (●, ○), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■, □) y suelo con 3 % de vermicomposta (▲, △). CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente; n=5. 53
- Figura 2. Conductancia estomática (A-B), asimilación de CO₂ (C-D) y transpiración (E-F) en frijol cultivado en invernadero con suelo y diferentes porcentajes de vermicomposta y riego o suspensión a partir de la floración. Tratamientos: testigo con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y su suspensión (1.5S), suelo con 3 % de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S). n=36. 57
- Figura 3. Conductancia estomática (A-B), asimilación neta de CO₂ (C-D) y transpiración (E-F) de frijol cultivado en invernadero, con riego (símbolos llenos), con suspensión de riego a partir de la antesis (símbolos vacíos), en suelo (●, ○), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■, □) y suelo con 3 % de vermicomposta (▲, △). Los datos corresponden a 4, 8, 12 y 16 d después de la antesis. n=9. 58
- Figura 4. Uso eficiente del agua (A-B) y temperatura foliar (C-D) de frijol cultivado con riego (símbolos llenos) o su suspensión a partir de la antesis (símbolos vacíos) en invernadero en suelo (●, ○), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■, □) y suelo con 3 % de vermicomposta 61

(▲, △). (n=9).

Figura 5. Uso eficiente del agua (A-B) y temperatura foliar (C-D) de plantas de frijol susceptible y tolerante a sequía cultivado en invernadero en diferentes sustratos y riego durante el cultivo o su suspensión a partir de la antesis. Tratamientos: testigo con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3 % de vermicomposta con riego (3R) y su suspensión (3S). n=36. 63

Capítulo III

Figura 1. Potencial de agua del suelo (MPa), determinado por psicrometría a 10 cm de profundidad de macetas con plantas de maíz susceptible (símbolos rosa) y tolerante (símbolos verdes) a sequía, con suspensión de riego por 8 d a partir de los 40 d de la siembra. Sustratos: suelo (●, ○), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■, □) y suelo con 3.0 % de vermicomposta (▲, △). PMP: punto de marchitez permanente, n=5. 80

Figura 2. Conductancia estomática (A-B), asimilación de CO₂ (C-D) y transpiración (E-F) en maíz cultivado en invernadero con diferentes sustratos con riego y suspensión. Suelo (●, ○), suelo con 1.5% de vermicomposta (■, □) y suelo con 3.0 % de vermicomposta (▲, △). Símbolos llenos corresponden a los tratamientos con riego continuo y los vacíos a aquellos con suspensión de éste. Los datos corresponden a 2, 3, 6 y 7 d con suspensión de riego; n=9. 83

Figura 3. Conductancia estomática (A-B), asimilación de CO₂ (C-D) y transpiración (E-F) de plantas de maíz cultivadas durante 52 días en macetas, con diferentes sustratos y riego o su suspensión a partir del día 40 de la siembra y en condiciones de invernadero. Tratamientos: testigo con riego (RT), testigo con suspensión de riego (ST), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3 % de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S). 86

Los datos corresponden a valores promedio de un periodo de 7 d sin riego para los tratamientos con esta condición; n=36.

Figura 4. Eficiencia en el uso del agua (A-B) y temperatura foliar (C-D) de maíz cultivado en invernadero con diferentes sustratos. Suelo (●, ○), suelo con 1.5% de vermicomposta (■, □) y suelo con 3.0 % de vermicomposta (▲, △). Símbolos llenos corresponden a los tratamientos con riego continuo y los vacíos a aquellos con suspensión de éste. Los datos corresponden a 2, 3, 6 y 7 d con suspensión de riego; n=9. 88

Figura 5. Eficiencia en el uso del agua (A-B) y temperatura foliar (C-D) de plántulas de maíz cultivadas durante 52 d en macetas, en condiciones de invernadero, con diferentes sustratos y riego o su suspensión a partir de los 40 d de la siembra. Tratamientos: testigo con riego (RT), testigo con suspensión de riego (ST), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3.0% de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S). Los datos corresponden a valores promedio registrados durante 7 d sin riego para los tratamientos con esta condición; n=36. 90

Figura 6. Altura (A-B), área foliar (C-D) e índice raíz/vástago (E-F) de plántulas de maíz cultivadas durante 52 d en macetas, en condiciones de invernadero, con diferentes sustratos y riego o su suspensión durante 12 d a partir de los 40 d de la siembra. Tratamientos: testigo con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (R1.5) y suspensión (S1.5), suelo con 3.0% de vermicomposta con riego (R3) y suspensión (S3); n=10. 96

Figura 7. Número de hojas liguladas (segmento inferior de las barras) y no liguladas (segmento superior de las barras) por planta de maíz 52 d después de la siembra. Tratamientos: testigo con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta 98

- con riego (R1.5) y suspensión (S1.5), suelo con 3.0% de vermicomposta con riego (R3) y suspensión (S3); n=10.
- Figura 8. Peso (A-B) y proporción (C-D) de la biomasa deshidratada, respecto a la biomasa total individual para raíz (sección inferior de las barras), y tallo (sección superior de las barras) de plantas de maíz cultivadas durante 52 d en condiciones de invernadero, con riego o suspensión durante 12 d a partir del día 40 después de la siembra. Tratamientos: testigo con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3% de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S); n=10. 101
- Figura 9. Contenido de prolina en el tejido seco del ápice de la raíz de plantas de maíz cultivadas en macetas, en invernadero, con diferentes sustratos y riego o su suspensión durante 12 d a partir de la exposición de la quinta hoja ligulada. Tratamientos: testigo con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3.0% de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S); n=3. 103

Capítulo IV

- Figura 1. Producción de inflorescencias (A, B) y vainas (C, D) por planta de frijol cultivado en invernadero con diferentes sustratos. Las flechas señalan la suspensión de riego en los tratamientos respectivos. La cosecha se realizó a los 98 y 125 días después de la siembra, para los tratamientos con suspensión de riego y riego continuo respectivamente. Suelo (●, ○), suelo con 1.5% de vermicomposta (■, □) y suelo con 3 % de vermicomposta (▲, △). Símbolos llenos corresponden a los tratamientos con riego continuo y los vacíos a aquellos con suspensión de él. 121
- Figura 2. Contenido de humedad determinada por gravimetría en macetas con plantas de frijol susceptible (símbolos rojos) y tolerante (símbolos 123

amarillos) a sequía, con suspensión de riego a partir del día 59 después de la siembra y hasta la cosecha (98 DDS). Sustratos: suelo (testigo) (●, ●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■, ■) y suelo con 3 % de vermicomposta (▲, ▲). CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente; n=5. Los tratamientos con riego mantuvieron 80 a 100 % de humedad aprovechable en el sustrato.

Figura 3. Cantidad (A, B) y proporción (C, D) de vainas normales (sección inferior de las barras), con una o más semillas abortadas (sección intermedia de las barras) y vanas (sección superior de las barras) de frijol cultivado en invernadero en diferentes sustratos y riego durante el cultivo o su suspensión a partir de la floración. Tratamientos: testigo (suelo) con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3.0 % de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S); n=10. 127

Figura 4. Número (A, B) y biomasa (C, D) de semillas producidas por planta de frijol cultivado en invernadero en diferentes sustratos y con riego durante el cultivo o su suspensión a partir de la floración. Tratamientos: testigo (suelo) con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3.0 % de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S); n=10 129

Figura 5. Frecuencia de tamaño (masa) de semillas de frijol cultivado en invernadero en diferentes sustratos y riego durante el cultivo o su suspensión a partir de la floración. Testigo en suelo con riego (TR), testigo en suelo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3.0 % de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S) n=100. 131

Introducción general

La vermicomposta es el producto de la bio-degradación mesofílica aeróbica de materiales orgánicos a través de la interacción entre lombrices y microorganismos (Sallaku *et al.*, 2009), y su producción se ha aceptado como un proceso eficiente y ambientalmente sano que puede transformar sustancias orgánicas complejas en productos estables como el humus (Benítez *et al.*, 2000). A diferencia de los métodos tradicionales de composteo, el vermicomposteo minimiza la pérdida de materia orgánica y nitrógeno, mejora la calidad de las sustancias húmicas (Theunissen *et al.*, 2010) y genera un sustrato con valor nutricional mayor, debido a la actividad biocatalítica de las lombrices (Suthar, 2007).

La materia orgánica para producir vermicomposta puede ser diversa, como estiércol, residuos de cultivos, desechos industriales (papel, bagazo de caña, algodón) y basura orgánica, y su valor nutricional dependerá de su origen (Theunissen *et al.*, 2010). En general, el producto obtenido es parecido a la turba, es sólido, con porosidad alta, aireación buena, drenaje bueno y capacidad de retención de humedad y actividad microbiana altas. Por esto, la vermicomposta es excelente como rehabilitadora de suelos y sustrato para el crecimiento de las plantas (Arancón *et al.*, 2008; Singh *et al.*, 2010), no es susceptible a procesos de putrefacción y mantiene sus propiedades de producto biológico activo por periodos de 3 a 5 años (Atiyeh *et al.*, 2000).

Frente a un panorama mundial de disminución de los suministros de agua y tierra para la agricultura, y una demanda creciente de granos en los próximos 50 años, la incorporación de enmiendas orgánicas al suelo es una acción que permite mantener e incrementar la producción de alimentos (Wilkinson y Hartung, 2009). Particularmente, el uso de vermicomposta en la agricultura se ha identificado como una práctica importante para la disposición adecuada de residuos orgánicos y el mejoramiento y conservación de suelos (Glab y Gondek, 2009). Su beneficio se asocia principalmente con la mejora significativa de la germinación, los parámetros vegetativos y los componentes de rendimiento de numerosos cultivos agrícolas; simultáneamente, se ha demostrado la importancia de los materiales que la originan en la reacción del cultivo, la proporción más adecuada, la interacción con la especie

vegetal y la etapa fenológica del cultivo evaluado (Atiyeh *et al.*, 2000; Jeyabal y Kuppaswamy, 2001; Arancon *et al.*, 2002).

Así, la emergencia de dos cultivares de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.) en proporciones entre 20 y 100 % de vermicomposta, elaborada con desechos de alimentos, fue similar ($p \geq 0.05$) al testigo, y un tercer cultivar la incrementó 35 % sólo con 20 % de vermicomposta en el sustrato; aunque, el incremento no se mantuvo con proporciones mayores de vermicomposta (Zaller, 2007). Evaluaciones de la emergencia de *Raphanus sativus*, *Tagetes patula* y *Barbarea verna* evidenciaron que tres tipos de vermicomposta, elaborada con mezclas diversas de residuos (basura de cocina y papel, basura de cocina y jardín, y estiércol con basura de jardín) disminuyeron significativamente la emergencia cuando se aplicaron en proporciones de 12.5 y 25 % (Warman y AngLopez, 2010). Similarmente, la emergencia de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) se incrementó 17 % con 8.1 % de vermicomposta, respecto al testigo en suelo y suelo tratado con urea y lodos (Fernández-Luqueño *et al.*, 2010).

Además, Arancon *et al.* (2002) evidenciaron que una proporción de 10 % de vermicomposta mezclada con un medio de cultivo comercial, duplicó la biomasa seca de los tallos de tomate (*Solanum lycopersicum* L.) en tres semanas, y que las plántulas de caléndula (*Tagetes patula* L.) mostraron una tendencia similar. El efecto positivo también se ha documentado en cereales y leguminosas; en trigo se observó el incremento significativo de los parámetros del crecimiento, como la altura y número de hojas, el peso de las semillas y el rendimiento de semilla con 3.8 ton ha⁻¹ de vermicomposta combinada con 2.45 ton ha⁻¹ de gallinaza (Channabasanagowda *et al.*, 2008). El rendimiento comercial de chile (*Capsicum annum*) y tomate fertilizados con 5 % de vermicomposta de estiércol bovino incrementó 2 y 5 ton ha⁻¹; mientras que, en fresa (*Fragaria spp.*) el incremento debido a la fertilización con 5 % de vermicomposta, producida con residuos de alimentos, representó 500 g por planta (Arancon *et al.*, 2002).

La materia seca de plántulas de maíz de dos meses de edad incrementó significativamente con 1 y 3 %; pero, proporciones mayores, de 6 y 9 % no tuvieron

ese efecto (Kalantari *et al.*, 2010). Además, parámetros como longitud de la raíz, altura de planta, biomasa fresca y seca de raíz y tallo de frijol no se afectaron significativamente con la vermicomposta; pero, algunos componentes del rendimiento, como número de vainas, biomasa fresca y seca de vainas y rendimiento de semilla por planta, incrementaron entre un tercio y más del doble con 8.1 % de vermicomposta (Fernández-Luqueño *et al.*, 2010). Gutiérrez-Miceli *et al.* (2008) demostraron que la proporción de 5 y 10 % vermicomposta explicó más de 70 % la variación del incremento del número de hojas, biomasa fresca de la planta y altura y diámetro del tallo de plántulas de maíz inoculadas con micorrizas.

El efecto de la vermicomposta en las propiedades físicas del suelo también se ha señalado como una ventaja adicional respecto a los fertilizantes inorgánicos, pues se ha comprobado que la incorporación de la materia orgánica propicia el incremento de la porosidad y disminución de la densidad aparente, lo que repercute en el contenido de humedad, aireación y temperatura del suelo (Ferrerías *et al.*, 2006). De esta forma, con aplicaciones crecientes de vermicomposta, entre 1 y 9 %, al cultivo de maíz, Kalantari *et al.* (2010) observaron que las características del suelo, como porosidad total, densidad aparente y retención de la humedad, se modificaron significativa y proporcionalmente con la cantidad de vermicomposta. Marinari *et al.* (2000) señaló que la vermicomposta en un suelo cultivado con maíz incrementó los macroporos entre 50 y 500 μm , los que son considerados muy importantes en la relación suelo – agua – planta, y en la buena estructura del suelo. López *et al.* (2001) también documentaron que 40 Mg ha^{-1} de composta en un suelo migajón arenoso retuvo y conservó la humedad durante más tiempo en comparación con tratamientos con estiércol de bovino, caprino y gallinaza. Por su parte, Edwards *et al.* (2000) notaron que al aplicar 15 ton ha^{-1} de vermicomposta en parcelas de 4 x 22.1 m, la humedad del suelo fue hasta 7 % mayor que en las parcelas testigo, y enfatizaron que esta práctica puede ser recomendada para beneficiar al agricultor durante temporadas secas.

La mayor capacidad de retención de humedad del suelo durante la sequía intraestival mejora el comportamiento agronómico y los rendimientos en zonas de temporal (Antonio *et al.*, 2000). En México, lo anterior tiene gran importancia por que

más del 80 % de la superficie para producción de maíz y frijol, cultivos de mayor importancia económica, social, nutricional y cultural, es de temporal y alrededor de 69 % de esa superficie es afectada adversamente por sequías (SIAP-SAGARPA, 2009).

La respuesta de las plantas al déficit de humedad depende de la especie, el cultivar y su tolerancia a este factor, la etapa fenológica y la severidad con la que se presente (Peña-Valdivia, 1994). El estrés por falta de agua en maíz inhibe la germinación (Peña-Valdivia *et al.*, 2007), disminuye el área foliar, la altura de la planta, la producción de biomasa (Gheysari *et al.*, 2009). En frijol el estrés por déficit de humedad incrementa la temperatura foliar y declina gradualmente la conductancia estomática (Aguirre-Medina *et al.*, 2008), acelera la abscisión de los órganos reproductivos (Lizana *et al.*, 2006), acorta la etapa de madurez fisiológica (Rosales-Serna *et al.*, 2004) y disminuye el número de vainas y semillas (Castañeda-Saucedo *et al.*, 2009). Algunos parámetros de productividad, señalados anteriormente, y características fisiológicas, como la eficiencia del uso de agua y ajuste osmótico, se han considerado para la selección de cultivares tolerantes a sequía (Bolaños *et al.*, 1993; Ramírez-Vallejo y Kelly, 1998); y se ha propuesto que esas características sobresalientes, u otras, pueden ser expresadas desde la germinación (Tsougkrianis *et al.*, 2009), en las etapas iniciales del desarrollo de las plántulas (Sánchez-Urdaneta *et al.*, 2005; Peña-Valdivia *et al.*, 2010), y en la etapa reproductiva (Singh, 2008).

El objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de la vermicomposta en la germinación, el crecimiento inicial y el rendimiento de cultivares susceptibles y tolerantes a sequía de especies C3 y C4, en condiciones de déficit de humedad. Así, la hipótesis plantea que la vermicomposta puede amortiguar el estrés causado por déficit de humedad en la germinación, crecimiento inicial, y el rendimiento de las plantas, debido a que modifica las propiedades físicas del suelo; además que la mitigación del estrés es independiente del carácter de tolerancia del cultivar al déficit de humedad y del tipo de metabolismo.

Literatura citada

- Antonio L P, A Carballo C, A Martínez G, H López S. 2000. Producción de semilla de híbridos de maíz en suelos con diferente capacidad de retención de humedad en el valle de Puebla. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 23(002):227-238.
- Arancon N Q, C A Edwards, P Bierman, J D Metzger, S Lee, C Welch. 2002. Effects of vermicomposts on growth and marketable fruits of field-grown tomatoes, peppers and strawberries. *Pedo Biología*. 47:731-735.
- Arancon N Q, C A Edwards, A Babenko, J Cannon, P Galvis, J D Metzger. 2008. Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse. *Applied Soil Ecology*. 39:91-99.
- Atiyeh R M, S Subler, C A Edwards, G Bachman, J D Metzger, W Shuster. 2000. Edeects of vermicomposts and composts on plant growth in horticultural container media and soil. *Pedo biología*. 44: 579-590.
- Bolaños J, G O Edmeades. 1993. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. I. Response in grain yield, biomass, and radiation utilization. *Field Crops Research*. 31: 233-252.
- Benítez E, R Nogales, G Masciandaro, B Ceccanti. 2000. Isolation by isoelectric focusing of humic-urease complexes from earthworm (*Eisenia fetida*)-processed sewage sludges. *Biology & Fertility of soils*. 31:489-493
- Castañeda S M C, T L Córdoba, H V A González, A A Delgado, V A Santacruz, G García de los santos. 2009. Physiological performance, yield, and quality of dry bean seeds under drought stress. *INTERCIENCIA* 34(10): 748-754.
- Channabasanagowda N K, B Patil, B N Patil, J S Awaknavar. 2008. Effect of organic manures on growth, seed yield and quality of wheat. *Karnataka Journal of Agricultural Sciences*. 21 (3): 366-368.
- Edwards L, J R Burney, G Richter, A H MacRae. 2000. Evaluation of compost and straw mulching on soil-loss characteristics in erosion plots of potatoes in Prince Edward Island, Canada. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 81:217-222.
- Fernández-Luqueño F, V V Reyes, S C Martínez, H G Salomón, M J Yañéz, R J M Ceballos, L Dendooven. 2010. Effect of different nitrogen source on plant characteristics and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) *Bioresource Technology* 101: 396-403.

- Ferreras L, E Gomez, S Toresani, I Firpo, Rossana R. 2006. Effect of organic amendments on some physical, chemical and biological properties in a horticultural soil. *Bioresource Technology* 97:635-640.
- Gheysari M, S Majid M, M Bannayan, M Homaei, G Hoogenboom. 2009. Interaction of water and nitrogen on maize grown for silage. *Agricultural Water Management*. 96:809-821.
- Glab T, K Gondek. 2009. Effect of organic amendments on water retention characteristics of stagnic gleysol soil. *Polish Journal of Soil Science*. XLII(I): 111-120.
- Gutiérrez-Miceli F A, B Moguel-Zamudio, M Abud-Archila, V F Gutiérrez-Oliva, L Dendooven. 2008. Sheep manure vermicompost supplemented with a native diazotrophic bacteria and mycorrhizas for maize cultivation. *Bioresource Technology*. 99: 7020-7026.
- Jeyabal A, G Kuppaswamy. 2001. Recycling of organic wastes for the production of vermicompost and its response in rice-legume cropping system and soil fertility. *European Journal of Agronomy* 15:153-170.
- Kalantari S, S Hatami, M M Ardalan, H A Alikhani, M Shorafa. 2010. The effect of compost and vermicompost of yard leaf manure on growth of corn. *African Journal of Agricultural Research*. 5(11): 1317-1323.
- Lizana C, M Wentworth, J P Martínez, D Villegas, R Meneses, E H Murchie, C Pastenes, B Lercari, P Vernieri, P Horton, M Pinto. 2006. Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress. I. Effects of drought on yield and photosynthesis. *Journal of Experimental Botany* 57(3): 685-697.
- López J D, A Díaz E, E Martínez R, R D Valdez C. 2001. Abonos orgánicos y su efecto en propiedades físicas y químicas del suelo y rendimiento en maíz. *Terra*. 19:293-299.
- Peña-Valdivia C, C Trejo, J Galicia, A Sánchez-Urdaneta. 2007. Reacción del maíz de alta calidad proteica al potencial de agua del sustrato: germinación y crecimiento radical inicial. *Revista de la Facultad de Agronomía. Universidad del Zulia*. 24 (1): 326-331.
- Peña-Valdivia, C. B.; A.B. Sánchez-Urdaneta; J. Meza R.; J. Juárez M.; R. García-Nava; R. Celis V. 2010. Anatomical root variations in response to water deficit: wild and domesticated common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Biological Research* 43: 417-427.
- Ramírez-Vallejo P, J D Kelly. 1998. Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica* 99:127-136.

- Rosales-Serna R, J Kohashi-Shibata, J A Acosta-Gallegos, C Trejo-López, J Ortíz-Cereceres, J D Kelly. Biomass distribution, maturity acceleration and yield in drought-stressed common bean cultivars. *Field Crops Research*. 85:203-211.
- Sallaku G, I Babaj, S Kaciu, A Balliu. 2009. The influence of vermicompost on plant growth characteristics of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings under saline conditions. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 7(3&4):869-872.
- Sánchez-Urdaneta, A. B.; C. B. Peña-Valdivia; C. Trejo; J. R. Aguirre R.; E. Cárdenas S. 2005. Root growth and proline content in drought sensitive and tolerant maize (*Zea mays* L.) seedlings under different water potentials. *Cereal Research Communications* 33(4): 697-704.
- Singh R, Sharma R R, Kumar S, Gupta R K, Patil R T. 2008. Vermicompost substitution influences growth, physiological disorders, fruit yield and quality of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Bioresource Technology* 99:8507-8511.
- Singh R, R K Gupta, R T Patil, R R Sharma, R Asrey, A Kumar, K K Jangra. 2010. Sequential foliar application of vermicompost leachates improves marketable fruit yield and quality of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) *Scientia Horticulturae* 124:34-39.
- Suthar, S. 2007. Vermicomposting potential of *Perionyx sansibaricus* (Perrier) in different wastes materials. *Bioresource. Technology*. 98:1231-1237.
- SIAP-SAGARPA, 2009. Información del sector agroalimentario y pesquero. [http://www.siap.gob.mx/opt/ebook/informacion del sector agroalimentario y pesquero/files/search/searchtext.xml](http://www.siap.gob.mx/opt/ebook/informacion%20del%20sector%20agroalimentario%20y%20pesquero/files/search/searchtext.xml)
- Theunissen J, P A Ndakidemi, C P Laubscher. 2010. Potential of vermicompost produced from plant waste on the growth and nutrient status in vegetable production. *International Journal of the Physical Sciences*. 5(13): 1964-1973.
- Tsougkrianis N, C B Peña-Valdivia, C Trejo L, J D Molina G. 2009. El potencial de agua del sustrato en la germinación de maíces con tolerancia y sensibilidad a la sequía. *Agricultura Técnica en México*. 35(4): 363-369.
- Wilkinson S, W Hartung. 2009. Food production: reducing water consumption by manipulating long-distance chemical signaling in plants. *Journal of Experimental Botany*. 60(7):1885-1891.
- Warman P R, AngLopez M J. 2010. Vermicompost derived from different feedstocks as a plant growth medium. *Bioresource Technology* 101: 4479 – 4483.
- Zaller J G. 2007. Vermicompost in seedling potting media can affect germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties. *European Journal of Soil Biology*. 43: S332-S336.

Capítulo I. Efecto de la vermicomposta y el potencial de agua del suelo en la germinación de maíz y frijol

Resumen

Existen evidencias que muestran que la incorporación de vermicomposta al suelo promueve la germinación en algunos cultivos; sin embargo, la información de su efecto en condiciones de estrés es escasa. El objetivo de esta investigación fue caracterizar la germinación de semillas de maíz y frijol con respuesta contrastante a sequía, en suelo sin y con 1.5, 3, 6 y 9 % de vermicomposta y potenciales de agua (Ψ_A) de -0.03 y -2.0 MPa, en condiciones de laboratorio. Para cada especie se trabajó con un diseño experimental completamente al azar en un arreglo factorial asimétrico 2 x 2 x 5. Se registró la velocidad de imbibición, la imbibición máxima necesaria para la germinación (IM), la germinación acumulada (GA), el tiempo para la germinación máxima (TGM) y el crecimiento inicial de la raíz primaria. La IM y el TGM promedio, para maíz y frijol, fueron 40 y 90 % y 73 y 148 h, respectivamente. La vermicomposta inhibió la imbibición en ambas especies con Ψ_A de -2.0 MPa y las concentraciones de 6 y 9 % prolongaron ($p \leq 0.05$) el proceso hasta el doble de tiempo, respecto al testigo; también afectó ($p \leq 0.05$) la IM, reduciéndola cerca de 15 %. El porcentaje de germinación se mantuvo sin efecto por la vermicomposta y bajo las condiciones de evaluación, ambas especies presentaron más de 90 % de emergencia. El crecimiento inicial de la raíz del maíz se inhibió con las concentraciones mayores de vermicomposta (6 y 9 %) y el Ψ_A de -2.0 MPa; mientras que, en el frijol la biomasa acumulada mostró una tendencia no significativa de incremento proporcional a la concentración de vermicomposta. El Ψ_A de -2.0 MPa prolongó la imbibición y redujo la IM en ambas especies. Los cultivares tolerantes embebieron hasta 7 % menos ($p \leq 0.05$) agua antes de germinar; y la característica de tolerancia a la sequía fue más evidente en frijol, pues el cv. tolerante requirió casi el doble de tiempo para la IM en Ψ_A de -0.03 MPa y casi el triple en la condición de déficit de humedad. Se evidenció que las interacciones humedad x vermicomposta y humedad x cultivar fueron significativas. La imbibición, velocidad de germinación y crecimiento inicial de la raíz se regularon por la interacción vermicomposta x

humedad. El efecto mitigante de la vermicomposta en el estrés por déficit de humedad sobre la germinación de maíz y frijol se evidenció parcialmente con proporciones de 1.5 y 3 %.

Palabras clave: semillas, raíz, déficit hídrico.

Abstract

There are many evidences that have shown the favorable effect of vermicompost on the germination, growth and development of some crops. However, there are only few studies about the effect of vermicompost under stress conditions. The goal of this research was to assess the germination of corn and bean seeds with contrasting responses to drought, under laboratory conditions. Seed germination was evaluated with a range of 0, 1.5, 3, 6 and 9 % of vermicompost on dry weight in soil, and water potential of -0.03 and - 2.0 MPa. A factorial completely randomized design 2 x 2 x 5 with 3 repetitions was used to investigate the effects of each species. The imbibition rate, maximum seed imbibition (MI), maximum cumulative germination, length and fresh weight of roots were obtained. Corn and bean have maximum seed imbibitions of 40 and 90 % respectively, and their imbibitions rate were of 73 and 148 h to each one. The maximum imbibition in both species was inhibited to 6 and 9 % of vermicompost and Ψ_w of -2.0 MPa. The imbibition rate was longer twice with 6 and 9 % of vermicompost compared to control. Maximum germination remained ineffective by the vermicompost and under testing conditions both species had more than 90% of emergency. The early growth of corn root was inhibited with higher concentrations of vermicompost (6 and 9%) and Ψ_A of -2.0 Mpa; whereas in common bean accumulated biomass showed a non significant trend of increase proportional to the vermicompost concentration. Tolerant cultivars soaked up 7% ($p \leq 0.05$) water before germination. Drought tolerance was more evident in beans, as the cultivar tolerant took almost twice as long time for the MI in Ψ_w of -0.03 MPa, and nearly three times in moisture deficit. Interactions vermicompost x moisture and humidity x cultivar showed significance. Imbibition, germination rate and initial root growth were regulated by the interaction vermicompost x moisture. The results suggested that ratios of 1.5 and 3%

of vermicompost partially improve germination of corn and beans under limiting soil moisture.

Key words: seeds, roots, water deficit

Introducción

El maíz y frijol son los cultivos más importantes en el sector agrícola de México, debido a que son ingredientes principales en la alimentación de los mexicanos y aglutinan a más de dos terceras partes de los productores agrícolas del país (García *et al.*, 2006). Ambas especies comparten la característica de ser prioritariamente cultivados en condiciones de secano (más del 80 % de la superficie), con periodos intermitentes de sequía que someten a estos cultivos a condiciones de déficit de humedad en cualquier momento de su ciclo (Barrios-Gómez *et al.*, 2010; Rivera-Hernández *et al.*, 2010).

Aún cuando una gran cantidad de estudios se han enfocado a caracterizar el efecto del déficit de humedad en el crecimiento y con mayor énfasis en la etapa reproductiva de estos cultivos, se ha demostrado que el estrés por déficit de humedad en el suelo tiene un efecto limitante en la germinación y el crecimiento inicial, reduciendo la densidad de plantas e, invariablemente, el rendimiento final por unidad de área (Teruel *et al.*, 2008). También se ha documentado que el efecto depende del periodo de estrés, las propiedades del suelo, las condiciones ambientales y las características de la especie (Azarnivand *et al.*, 2007).

Así, de acuerdo con Edmeades *et al.*, 1994 en el caso de maíz se estima que un periodo prolongado de déficit de humedad durante el establecimiento del cultivo puede provocar disminución del rendimiento, comparable con la disminución que provoca una sequía durante la etapa de floración. Los mismos autores señalan que la selección de genotipos apropiados para mejorar la productividad del maíz en condiciones de déficit de humedad representa una alternativa valiosa para atenuar la caída del rendimiento. Al respecto, en condiciones de laboratorio, Tsoukrianis *et al.* (2009) evidenciaron que las respuestas contrastantes entre cultivares de maíz tolerantes y susceptibles a sequía, pueden demostrar el potencial de los primeros

desde la germinación, ya que ésta es significativamente mayor en Ψ_A del sustrato entre -1.28 y -1.5 MPa.

Para fríjol, en comparación con otros cultivos, existe información limitada de las características fisiológicas que expresan estrés o resistencia al déficit de humedad; probablemente, debido a que la investigación se ha enfocado a conocer y desarrollar características de resistencia a plagas y enfermedades (Lizana *et al.*, 2006). Sin embargo, se ha evidenciado ampliamente su susceptibilidad al déficit hídrico (Castañeda *et al.*, 2009; Reynolds-Henne *et al.*, 2010).

Durante la germinación, la disponibilidad de agua es un factor determinante ya que modula la cinética de imbibición y la activación de los procesos metabólicos, como reparación de membranas, proteínas y ADN, elongación celular, que conducen al crecimiento de la raíz (Dubreucq *et al.*, 2000). El proceso de absorción de agua durante la germinación exhibe tres fases cuya duración depende de las propiedades inherentes a las semillas, así como de la temperatura, humedad y composición del sustrato (Bewley y Black, 1994). Entonces, la tasa de absorción de agua por las semillas es una función compleja entre el microambiente del suelo y las propiedades de la semilla (Vertucci, 1989).

En este sentido, a la vermicomposta se le atribuye la capacidad de modificar el microambiente del suelo para retener mayor humedad (Ferreras *et al.*, 2006), lo que sugiere un efecto mitigante en condiciones de estrés hídrico. Se ha evidenciado que la presencia de 10 % de vermicomposta en sustrato de turba tiene un efecto mitigante del daño provocado por salinidad en el crecimiento de plántulas de tamarindo (*Tamarindus indica* L.) en estrés por concentraciones altas (en un gradiente de 20 a 80 mM) de sodio (Oliva *et al.*, 2008). También, una proporción 50:50 de vermicomposta y turba incrementó el área foliar de las plántulas de pepino (*Cucumis sativus* L.) en estrés salino (Sallaku *et al.*, 2009). En plántulas de papaya (*Carica papaya*), con 70 d de suspensión de riego, la aplicación de 650 g de vermicomposta incrementó el contenido relativo de agua de las hojas, y prolongó su abscisión y el marchitamiento de la plántula, hasta por 5 días, respecto al testigo (Shivaputra *et al.*, 2004). Sin embargo, las evidencias documentadas sobre el efecto

de la vermicomposta en procesos específicos como la imbibición y germinación bajo condiciones de estrés abiótico son muy escasas.

El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la vermicomposta y Ψ_A en la germinación de maíz y frijol, con tolerancia contrastante a la sequía. Se planteó la hipótesis de que la germinación de maíz y frijol se mejora en condiciones de déficit hídrico al incorporar vermicomposta al suelo.

Materiales y métodos

Material vegetal

Se utilizaron semillas de cultivares de maíz y frijol tolerantes y susceptibles a sequía. Las semillas de maíz fueron de los cultivares Tuxpeño ciclo 0 (TC0) y ciclo 8 (TC8) de selección recurrente para tolerancia a sequía donadas por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). Las semillas utilizadas en el estudio fueron multiplicadas en el Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados en el ciclo primavera-verano de 2009.

Las semillas de frijol correspondieron a los cultivares 92 y 122, caracterizados como tolerante y susceptible a sequía respectivamente, y con hábito de crecimiento tipo II. Los cultivares están emparentados y fueron derivados de familias F3 de la cruz AC1028 x Pinto Sierra (Ramírez-Vallejo y Kelly, 1998), e incrementados diez generaciones, seleccionados con base en su comportamiento fisiológico, morfológico y de rendimiento de semilla en condiciones de déficit de humedad en el suelo en las condiciones de los valles altos mexicanos, por el Programa de Mejoramiento Genético de Frijol del Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad del Colegio de Postgraduados (Rodríguez, 2008)¹. Las semillas utilizadas en la investigación fueron multiplicadas por el Programa de Mejoramiento de Frijol en el Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados en el ciclo primavera-verano de 2009.

¹ Rodríguez, G. M. N. 2008. Selección de líneas de frijol tolerantes a la sequía con base en respuestas de la planta al estrés hídrico. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. Pp. 115

Para conocer parcialmente la calidad y homogeneidad de las semillas, se cuantificó el tamaño (masa) individual de una muestra de 100 semillas; el porcentaje de humedad en una muestra de 10 semillas, con cuatro repeticiones, el porcentaje de germinación, con la prueba estándar descrita por ISTA (2004) con 25 semillas y cuatro repeticiones, y la distribución de frecuencias del peso seminal (Cuadro 1). Ya que se observó variabilidad del peso individual de las semillas, principalmente de frijol, con los resultados de las frecuencias de peso se decidió utilizar semillas con peso dentro de la amplitud de dos desviaciones estándar alrededor de la media.

Cuadro 1. Características de calidad de semillas de maíz y frijol tolerantes y susceptibles a sequía.

Cultivares	Contenido de humedad (%)	Germinación (%)	Tamaño (g)
Frijol			
122 (Susceptible)	9.30 a	85 a	0.32 a
92 (Tolerante)	10.80 a	88 a	0.26 b
MEDIA	10.09	84.5	0.29
Maíz			
TC0 (Susceptible)	11.15 a	90.4 a	0.28 a
TC8 (Tolerante)	10.64 a	91.2 a	0.28 a
MEDIA	10.8	90.8	0.28

* Tamaño de semilla se refiere a su masa media individual (n=100). Valores en cada columna seguidos con letra diferente son significativamente distintos (Tukey, $P \leq 0.05$).

Las semillas se mantuvieron etiquetadas, en bolsas de manta y refrigeración (4°C) hasta el momento de ser utilizadas.

Sustrato

Se utilizó suelo con clase textural migajón arcillo arenoso sin mezclar y mezclado con vermicomposta, en proporciones de 1.5, 3, 6 y 9 % con base en peso seco, lo que

correspondió a 0, 40, 80, 160 y 240 ton ha⁻¹ respectivamente; cantidades obtenidas al considerar la densidad aparente del suelo testigo (1.37 g cm⁻³) y una profundidad de 20 cm (Troeh y Thompson, 1993).

La vermicomposta fue aportada por el módulo de abonos orgánicos y lombricultura de la Universidad Autónoma Chapingo. Los materiales originales para su elaboración fueron residuos de cosecha de jitomate (*Lycopersicum esculentum*), hojas secas de fresno (*Fraxinus excelsior* L.) y estiércol de bovino en proporción 40:20:40. Tuvo pH 7.2, conductividad eléctrica 3.99 dS m⁻¹ y 21.7 % de materia orgánica.

El suelo se obtuvo de los primeros 20 cm de una parcela agrícola en Texcoco, Estado de México (19° 23' 40" latitud norte y 98° 39' 28" longitud oeste y altitud promedio de 2250 msnm.). Algunos parámetros fisicoquímicos del suelo y las mezclas fueron determinados en el laboratorio de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo (Cuadro 2). También se determinaron las curvas típicas de retención de humedad, identificando los valores para capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP), calculados por los métodos de la olla y la membrana de presión (Castellanos *et al.*, 2000).

Diseño experimental

Para cada especie se trabajó con un diseño experimental completamente al azar en un arreglo factorial asimétrico 2 x 2 x 5. Los factores de estudio fueron: (a) dos cultivares: uno susceptible y otro tolerante a sequía; (b) dos Ψ_A en el suelo: -0.03 MPa y -2.0 MPa (c) cinco sustratos: suelo sin y con 1.5, 3, 6 y 9 % de vermicomposta. Se generaron 20 tratamientos y se establecieron tres repeticiones de cada uno. La unidad experimental consistió de un grupo de 10 semillas.

Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico SAS versión 9. Los datos fueron sometidos a un análisis de normalidad con el Test de Shapiro-Wilk, y las variables fueron transformadas cuando no se cumplió el supuesto. La comparación múltiple de medias se realizó con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$). Los gráficos y modelos de ajuste para las curvas de imbibición y germinación se procesaron con el programa SigmaPlot de Jandel Scientific (Versión 11).

Cuadro 2. Características fisicoquímicas del suelo y las mezclas evaluadas

	Proporción de vermicomposta en el suelo (%)					Media
	0	1.5	3.0	6.0	9.0	General
pH (relación 1:2)	7.77 a	7.68 bc	7.71 b	7.62 c	7.62 c	7.68
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0.91 d	1.25 c	1.22 c	1.36 ab	1.42 a	1.23
Materia orgánica (%)	1.57 c	1.57 c	1.66 c	2.38 b	3.28 a	2.09
Densidad aparente (g cm ³)	1.37a	1.35a	1.30a	1.26 b	1.24 b	1.15
Porosidad total (%)	45.2 a	46.0 a	48.0 a	49.6 b	50.4 b	44.34
Cationes intercambiables						
Ca ⁺⁺ (cmol kg ⁻¹)	16.67 b	16.66 ab	15.26 ab	16.80 ab	17.86 a	16.25
Mg ⁺⁺ (cmol kg ⁻¹)	6.40 b	5.70 b	7.43 ab	6.71 ab	9.16 a	7.08
Relación absorción de Sodio (cmol kg ⁻¹)	0.033 d	0.077 c	0.11 b	0.14 a	0.16 a	0.11

*Medias dentro de líneas seguidas con letra diferente son significativamente distintas (Tukey, P≤0.05), n=3.

Condiciones del estudio

La investigación se desarrolló en el laboratorio de Biofísica del Posgrado en Botánica del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México.

Pruebas preliminares (datos no presentados) con varios cultivares y Ψ_A permitieron seleccionar los factores y niveles más adecuados para este trabajo. Para cada especie se eligió evaluar sólo dos cultivares emparentados pero con respuesta contrastante a la sequía, pues las características de calidad de semilla fueron más homogéneas y la respuesta en las variables respuesta fue diferencial. Se consideraron dos Ψ_A extremos debido a que con valores intermedios los efectos en la imbibición y velocidad de germinación eran poco claras.

Para obtener los Ψ_A seleccionados, se tomaron como referencia las curvas típicas de retención de humedad de los sustratos; éstos secados al aire se mezclaron con agua destilada en proporciones peso: volumen de 84 g: 16 ml y 95 g: 5 ml, y algunos valores intermedios a éstas. De acuerdo con lo planteado por Sánchez-Urdaneta *et al.* (2004) los sustratos hidratados se mantuvieron en bolsas de polietileno selladas, para lograr el equilibrio entre el sustrato y la humedad. Después de 48 h, se obtuvieron muestras de cada sustrato y se incubaron por 4 h en cámaras psicrométricas (WESCOR C-52, Inc., Logan, Utha.) conectadas a un micro voltímetro (WESCOR HR-33T, Inc., Logan, Utha.), operado en el modo de punto de rocío, para conocer su Ψ_A (Figura 1). Se hicieron los ajustes en la cantidad de agua para obtener los Ψ_A seleccionados en cada sustrato y se repitió el procedimiento descrito para lograr el equilibrio entre el sustrato y la humedad.

Las semillas se pesaron individualmente en una balanza analítica Scientech (SA100, EE.UU.), con precisión de 0.0001 g. Las semillas se sembraron individualmente, en recipientes de cloruro de polivinilo (PVC) con diámetro interno y longitud de 40 y 50 mm, respectivamente, y contenido aproximado de 70 g de sustrato. Los recipientes se sellaron en los extremos con polietileno negro fijado con una banda elástica y se mantuvieron en oscuridad a $25^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ (Sánchez-Urdaneta *et al.*, 2004). Se registró el peso de la semilla y la longitud de la raíz primaria cada 12 h hasta que las semillas germinaron o mostraron ser no viables. El sustrato de cada

recipiente fue reemplazado cada 48 h para mantener constante el Ψ_A de cada tratamiento.

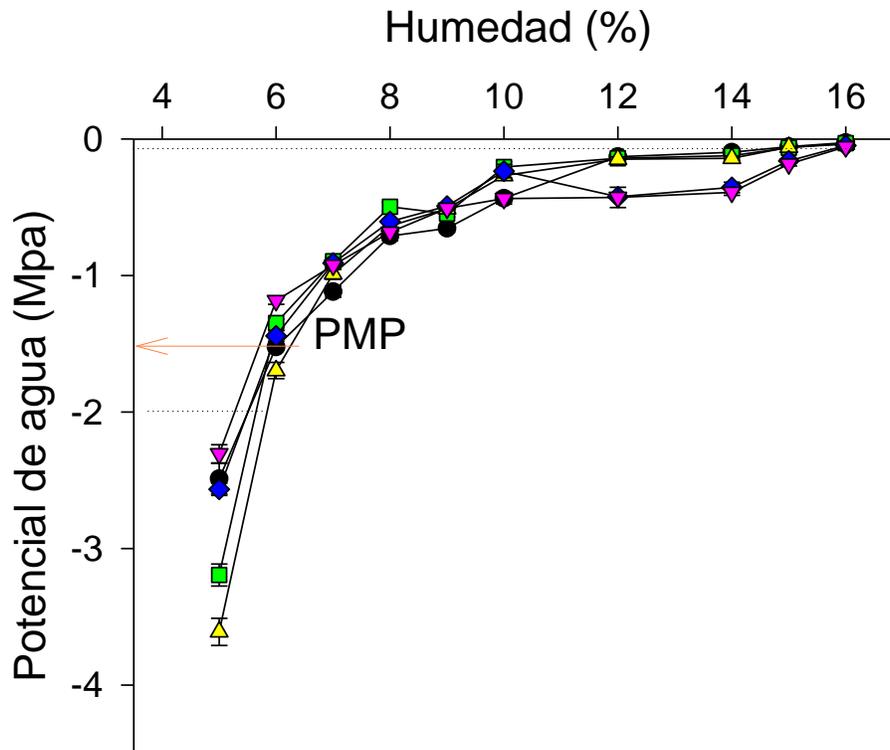


Figura 1. Contenido de humedad (%) y potencial de agua (MPa) determinado por psicrometría, de suelo (●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■), suelo con 3 % de vermicomposta (▲), suelo con 6 % de vermicomposta (◆), y suelo con 9 % de vermicomposta (▼).PMP: punto de marchitez permanente, n=3. Líneas punteadas señalan los Ψ_A evaluados.

Variables evaluadas

Para conocer la cinética de imbibición, cada 12 h a partir de la siembra se registró en una balanza analítica la ganancia de peso de la semilla hasta la germinación, y se expresó como porcentaje en relación al peso seminal individual, respecto a su peso inicial. Esta información se graficó, mostró la dinámica de imbibición, e indicó la proporción máxima de agua embebida para germinar.

Las semillas se consideraron germinadas cuando la radícula emergió de la testa y con este indicador se registró la germinación acumulada, y se calculó el tiempo para la germinación máxima

Una vez emergidas las raíces primarias de maíz se registró su longitud con un calibrador tipo vernier pie de rey (Caliper-Mitutoyo, Japón) de lectura digital y precisión de ± 0.0001 ". Para frijol, se registró la biomasa fresca acumulada en la raíz primaria, cuando su longitud llegaba a 30 mm.

Resultados

Imbibición de semillas de maíz

El efecto de la vermicomposta en la imbibición máxima de las semillas de maíz contrastó entre los cultivares y entre los Ψ_A . En los sustratos bien hidratados el cv. tolerante a sequía alcanzó imbibición máxima 12 h antes que el susceptible, independientemente de la proporción de vermicomposta; en cambio, el cv. susceptible embebió 13 % más agua ($p \leq 0.05$) con 3 % de vermicomposta (Figura 2 A-B). El patrón de imbibición fue similar entre los cultivares de maíz. Con Ψ_A de -0.03 MPa, las semillas obtuvieron el 50 % o más del agua requerida para la germinación en un periodo de 24 h, y en 48 h alcanzaron la imbibición máxima, con una velocidad casi constante.

Con Ψ_A de -2.0 MPa el 50 % de la imbibición máxima se alcanzó en 36 h y ésta fue seguida por una fase lenta, que se extendió hasta las 100 h o más, para embeber el agua necesaria para la germinación. Si bien, ambos cultivares disminuyeron ($p \leq 0.05$) la tasa de imbibición en los sustratos con -2.0 MPa, lo que representó incrementos del tiempo para alcanzar imbibición máxima de 50 h en el cv. susceptible a sequía y 38 en el tolerante; se observaron respuestas diferenciales. En general el retardo de la imbibición por el Ψ_A bajo fue magnificado ($p \leq 0.05$) por la vermicomposta en proporciones de 6 y 9 %. En el cultivar susceptible a la sequía el atraso fue de 12 h, mientras que en el cultivar tolerante alcanzó entre 12 y 36 h

(Figura 2 C-D). Al mismo tiempo, 1.5 y 3 % de vermicomposta redujeron en 12 h el tiempo a imbibición máxima del cv. susceptible.

La combinación de Ψ_A bajo y vermicomposta también disminuyó el porcentaje de imbibición máxima ($p \leq 0.05$). En el cultivar susceptible a sequía sólo las proporciones mayores de vermicomposta (6 y 9 %) propiciaron la disminución en 16 y 28 %, respectivamente; y en el cultivar tolerante la disminución de la imbibición mostró un gradiente, desde 5 hasta 23 %, en función de la proporción de vermicomposta (Figura 2 C-D).

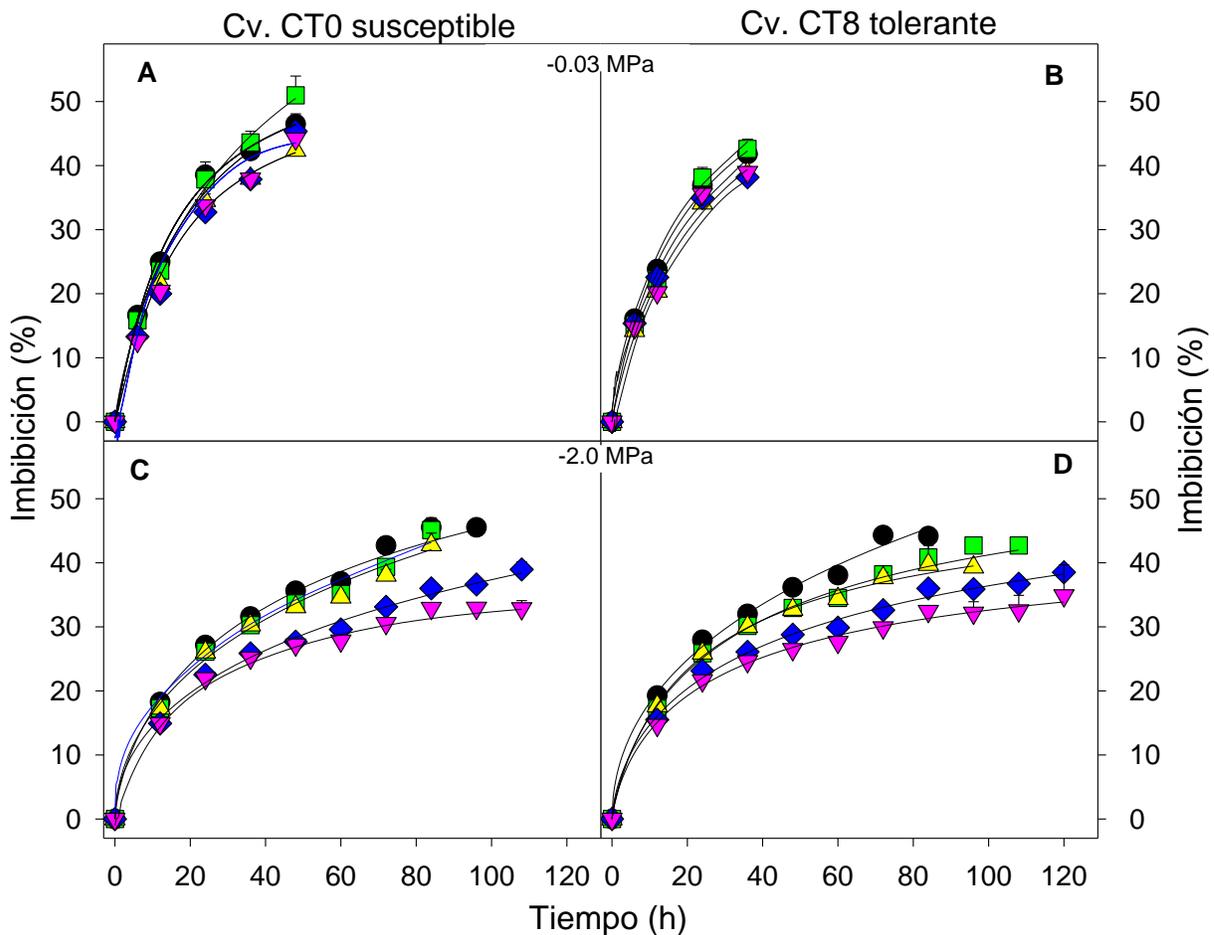


Figura 2. Dinámica de imbibición (porcentaje de agua embebida en relación al peso seminal individual) de semilla de maíz, susceptible y tolerante a sequía, en dos niveles de Ψ_A en suelo (●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■), suelo con 3 % de vermicomposta (▲), suelo con 6 % de vermicomposta (◆), y suelo con 9 % de vermicomposta (▼), $n=30$.

El análisis del efecto de los factores principales confirmó que 9 % de vermicomposta en el suelo disminuyó ($p \leq 0.05$) 14 % el agua embebida, respecto al suelo solo, y el efecto también se lo generaron 3 y 6 % de vermicomposta, pero menos acentuado (Cuadro 3). En promedio el Ψ_A menor disminuyó ($p \leq 0.05$) 15.5 % la imbibición máxima o cantidad de agua requerida por la semilla para germinar, en relación con el Ψ_A mayor. El análisis también mostró que las semillas del cultivar tolerante a sequía embebieron 5 % ($p \leq 0.05$) menos agua que las del cv. susceptible. Las interacciones vermicomposta x humedad y cultivar x humedad fueron significativas ($p \leq 0.001$); lo que confirma que ni el efecto de la vermicomposta, ni el de la tolerancia del cultivar a la sequía puede explicarse sin considerar la condición de humedad del suelo en el que las semillas germinan.

Imbibición de semillas de frijol

La dinámica de imbibición del frijol contrastó ampliamente con la del maíz (Figuras 2 y 3). El cv. susceptible a la sequía tomó 36 h para acumular 50 % de la imbibición máxima y en 72 h las semillas ya habían obtenido 100 % de humedad necesaria para germinar en los sustratos con Ψ_A de -0.03 MPa. La presencia de vermicomposta con este Ψ_A no modificó la imbibición máxima (98 % en promedio). El comportamiento anterior se modificó cuando la humedad se restringió. La imbibición máxima del cultivar susceptible a sequía se retardó 24 h y la más alta fue 91 %, en el sustrato con 1.5 % de vermicomposta; además, fue mayor ($p \leq 0.05$) que en los otros sustratos (Figura 3 A-B).

En contraste, el cv. 92, tolerante a sequía, en el Ψ_A de -0.03 MPa necesitó un poco más de tiempo (72 h; $p \leq 0.05$) para alcanzar la imbibición máxima respecto al susceptible y este parámetro fue menor (87 %; $p \leq 0.05$) que el cv. susceptible, en las mismas condiciones. Otra diferencia sobresaliente entre los cultivares de frijol, es que el tolerante a la sequía incrementó ($p \leq 0.05$) el tiempo para la imbibición máxima en los sustratos con vermicomposta y con Ψ_A de -0.03 MPa, aunque el incremento parece no relacionarse directamente con la proporción de vermicomposta, 9 % de este componente del sustrato retardó hasta 150 h la imbibición máxima (Figura 3 A-B). Lo anterior demuestra que el cultivar tolerante a la sequía para germinar puede

necesitar el doble de tiempo que el susceptible, aún en condiciones de humedad alta en el suelo (Figura 3 C-D).

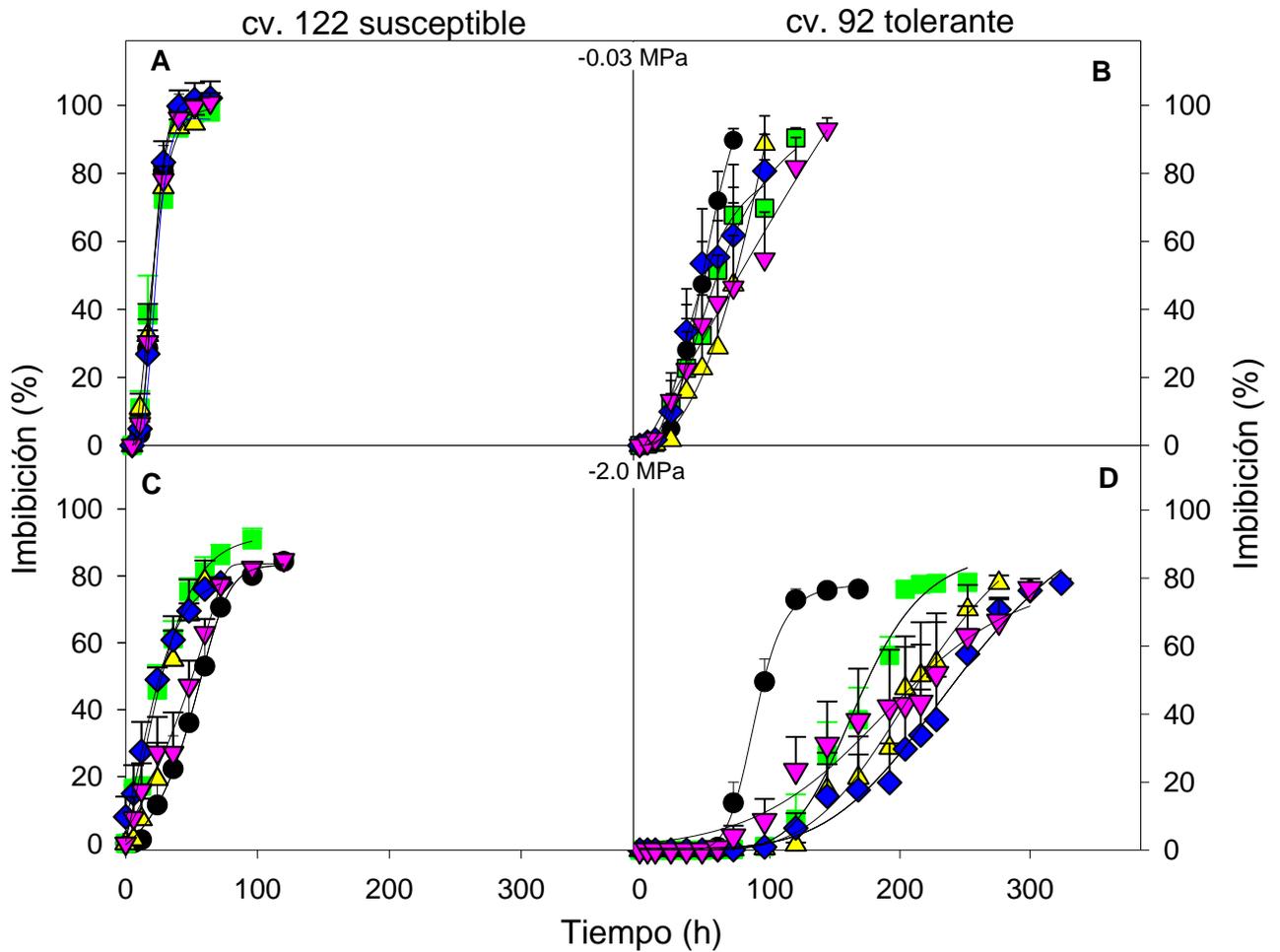


Figura 3. Dinámica de imbibición de semillas de frijol susceptible y tolerante a sequía en suelo (●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■), suelo con 3 % de vermicomposta (▲), suelo con 6 % de vermicomposta (◆), y suelo con 9 % de vermicomposta (▼) con dos Ψ_A ; n=30.

Cuadro 3. Imbibición máxima (IM) y tiempo para germinación máxima (TGM) de semillas de maíz en suelo sin vermicomposta y diferentes proporciones de ella, dos potenciales de agua (Ψ_A) del sustrato y en condiciones de laboratorio.

	Vermicomposta (%)					Ψ_A del suelo (MPa)		Cultivar	
	0.0	1.5	3.0	6.0	9.0	-0.03	-2.0	TC0	TC8
IM (%)	41.3 a	41.8 a	37.7 b	37.8 b	35.4 b	42.5 a	35.9 b	39.9 a	37.9 b
						38.8			
TGM (h)	66 a	69 a	72 a	81 a	81 a	48 a	99.6 b	72 a	75.6 a
MEDIA						73.8			

Medias dentro de líneas seguidas con letra diferente son significativamente distintas (Tukey, $p \leq 0.05$).

El cv. de frijol susceptible a la sequía modificó la velocidad de imbibición con el Ψ_A de -2.0 MPa, y en esta condición, la vermicomposta en proporción de 1.5 % incrementó la cantidad de agua embebida (8%, $p \leq 0.05$), y aceleró el tiempo a imbibición máxima hasta en 24 h en proporción de 3 y 6 %. El cv. tolerante sin vermicomposta incrementó el tiempo para la imbibición máxima a 150 h y las semillas embebieron menos agua (78 %) que con -0.03 MPa. Además, la combinación de Ψ_A bajo y vermicomposta retardó la imbibición en dependencia de su proporción en el sustrato; por lo que, con 6 y 9 % de vermicomposta la imbibición máxima se alcanzó en el cv. tolerante a la sequía cerca de 250 h después de la condición sin vermicomposta (Figura 3 D)

De acuerdo al efecto de los factores principales, la imbibición máxima en el sustrato con 9 % de vermicomposta 16.8 % menor ($p \leq 0.05$), respectivamente que el testigo (Cuadro 4), el cv. tolerante a sequía embebió 7.7 % menos agua que el susceptible ($p \leq 0.05$) y la interacción vermicomposta x humedad fue significativa ($p \leq 0.001$).

Germinación de maíz

Las curvas de germinación acumulada de los tratamientos con maíz presentaron el mejor ajuste al modelo sigmoideal (r^2 promedio 0.98; Figura 4). Ambos cultivares, con el Ψ_A de -0.03 MPa, alcanzaron 50 % de germinación en 48 h, y la germinación máxima acumulada en 72 y 96 h para el cultivar susceptible y el tolerante, respectivamente. Es decir hubo una diferencia promedio de 24 h entre los cultivares. La germinación acumulada máxima de todos los tratamientos de maíz promedió 93 % y fluctuó entre 85 y 100 %.

La vermicomposta mantuvo sin cambio la germinación máxima, pero incrementó la tasa de germinación del cv. susceptible a sequía cuando el Ψ_A se mantuvo en -0.03MPa ($p \leq 0.05$). La disminución del tiempo para acumular la germinación máxima parece no estar relacionada con la proporción de vermicomposta en el suelo, ya que con 3 % de ésta la disminución fue cercana a 40 h (Figura 4 A). Una tendencia similar se observó en el cv. tolerante, aunque la

disminución fue 12h y la germinación acumulada máxima disminuyó un 15 % con algunas proporciones de vermicomposta (Figura 4 B).

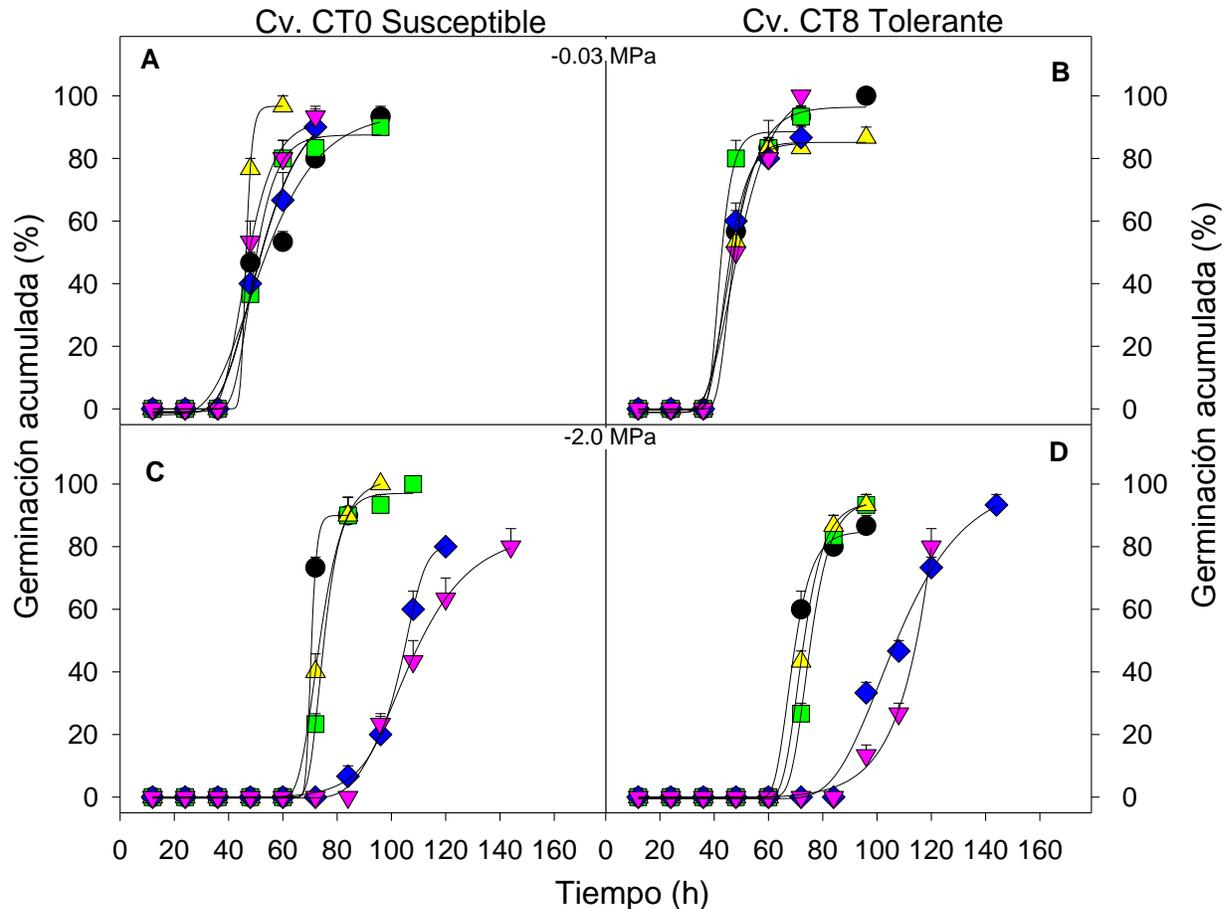


Figura 4. Germinación acumulada de maíz susceptible y tolerante a sequía en suelo (●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■), suelo con 3 % de vermicomposta (▲), suelo con 6 % de vermicomposta (◆), y suelo con 9 % de vermicomposta (▼) con dos Ψ_A ; n=30.

La disminución del Ψ_A (-2.0 MPa) en el suelo aceleró (12 h) la germinación máxima únicamente en el cv. susceptible a la sequía y disminuyó la germinación acumulada máxima 15 % en ambos cultivares. La combinación de la restricción de humedad y proporciones de 1.5 y 3 % de vermicomposta en ambos cultivares y 6 % en el

tolerante revirtieron parcialmente el efecto inhibitorio del potencial bajo en la germinación máxima acumulada.

Otro resultado de la combinación del Ψ_A bajo (-2.0 MPa) y la proporción alta de vermicomposta (6 y 9 %) fue la disminución de la velocidad de germinación de ambos cultivares. Debido a esto, el cv. susceptible a la sequía consumió de 40 a 60 h más en estas condiciones para acumular la máxima germinación y el cv. tolerante entre 25 y 45 h (Figura 4 C-D).

La interacción entre factores no fue significativa.

Germinación de frijol

Las curvas de germinación acumulada de los tratamientos con frijol presentaron el mejor ajuste al modelo sigmoideal (r^2 promedio de 0.93; Figura 5). La germinación acumulada máxima fluctuó entre 80 y 100 %, entre los tratamientos; pero, hubo diferencias notables entre los cultivares.

Con el Ψ_A de -0.03 MPa el cultivar susceptible a la sequía acumuló 100 % de germinación en el suelo y en las mezclas con vermicomposta, entre las 12 y 24 h (Figura 5 A). Similarmente, el cv. tolerante en el mismo Ψ_A alcanzó 100 % de germinación, aunque en más tiempo (100 h) que el cv. susceptible. Con excepción de la proporción de 3 %, la vermicomposta no afectó la germinación total (100 %; Figura 5 B).

En el suelo con Ψ_A de -2.0 MPa el cv. susceptible a la sequía mantuvo 100 % su germinación; aunque, la alcanzó unas pocas horas después de la condición bien hidratada. Salvo una excepción las proporciones diferentes de vermicomposta mantuvieron la germinación máxima; aunque, en más tiempo (120 h). En el cv. tolerante a sequía el Ψ_A de -2.0 MPa no modificó la germinación total (100 %); sin embargo, la vermicomposta en esta condición hídrica del sustrato incrementó el tiempo ($p \leq 0.05$) entre 80 y poco más de 200 horas (Figura 5 D).

El cv. tolerante tardó hasta 79 % (185 h) más tiempo en alcanzar la germinación máxima acumulada, en comparación con el cv. susceptible.

Cuadro 4. Imbibición máxima (IM), tiempo para la germinación máxima (TGM) e índice de biomasa acumulada en la raíz (IBA) de frijol sin vermicomposta y diferentes proporciones de ella, dos potenciales de agua (Ψ_A) del sustrato y en condiciones de laboratorio.

	Vermicomposta (%)					Ψ_A del suelo (MPa)		Cultivar	
	0.0	1.5	3.0	6.0	9.0	-0.03	-2.0	122	92
IM (%)	95 a	92 a	91 a	87 ab	79 b	90.5 a	89.2 a	93.6 a	86.4 b
MEDIA						89.9			
TGM (h)	117 a	121.5 a	138.5 a	166.25 a	170.75 a	69.4 b	220.2 a	103.7 a	185.9 b
MEDIA						148			
IB (mg cm^{-1})	7.6 a	7.9 a	8.1 a	8.6 a	8.8 a	9.9 a	6.6 b	9.1 a	7.5 b
MEDIA						8.3			

Medias dentro de líneas seguidas con letra diferente son significativamente distintas (Tukey, $P \leq 0.05$)

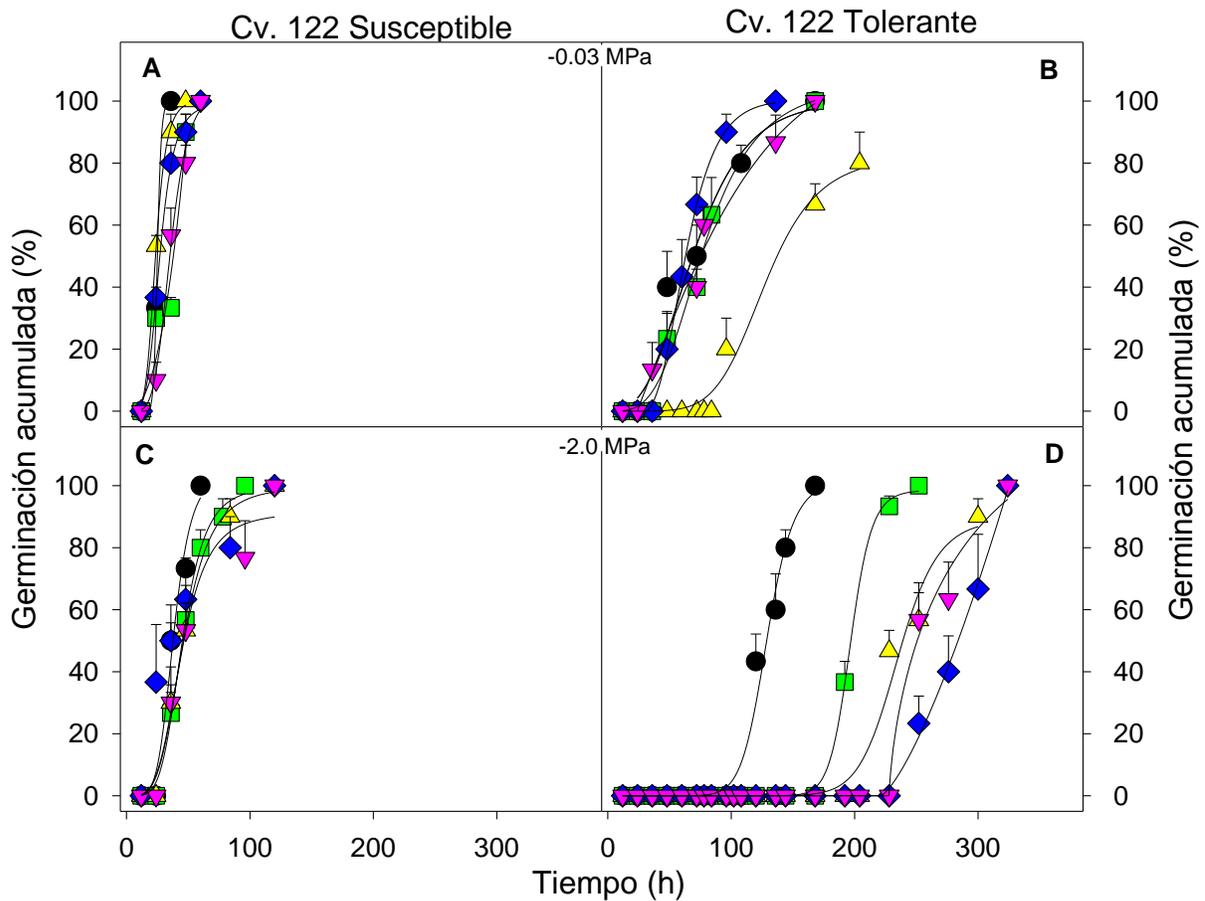


Figura 5. Germinación acumulada de frijol susceptible y tolerante a sequía, con dos niveles de Ψ_A en suelo (●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■), suelo con 3 % de vermicomposta (▲), suelo con 6 % de vermicomposta (◆), y suelo con 9 % de vermicomposta (▼); n=30.

Crecimiento de la raíz de maíz

El efecto de la vermicomposta en el crecimiento longitudinal inicial de la raíz de las plántulas de ambos cultivares fue parcialmente diferente. En Ψ_A de -0.03 MPa, a las 96 h después de la siembra, el cv. susceptible alcanzó una longitud de raíz 120 % mayor (28.5 mm, $p \leq 0.05$) con 3, 6 y 9 % de vermicomposta en comparación con el testigo. En el mismo periodo de tiempo, el cv. tolerante tendió a registrar un mayor crecimiento con suelo solo y 9 % de vermicomposta (Figura 6 A-B).

El Ψ_A de -2.0 MPa disminuyó la tasa de crecimiento de la raíz de ambos cultivares. La disminución se acentuó con la vermicomposta y estuvo relacionada directamente con su proporción en el sustrato; por lo que, para que las raíces alcanzaran en promedio 30 mm en suelo transcurrieron entre 100 y 120 h y con la proporción máxima de 9 % de vermicomposta longitudes similares se alcanzaron en 170 h (Figura 6 C-D).

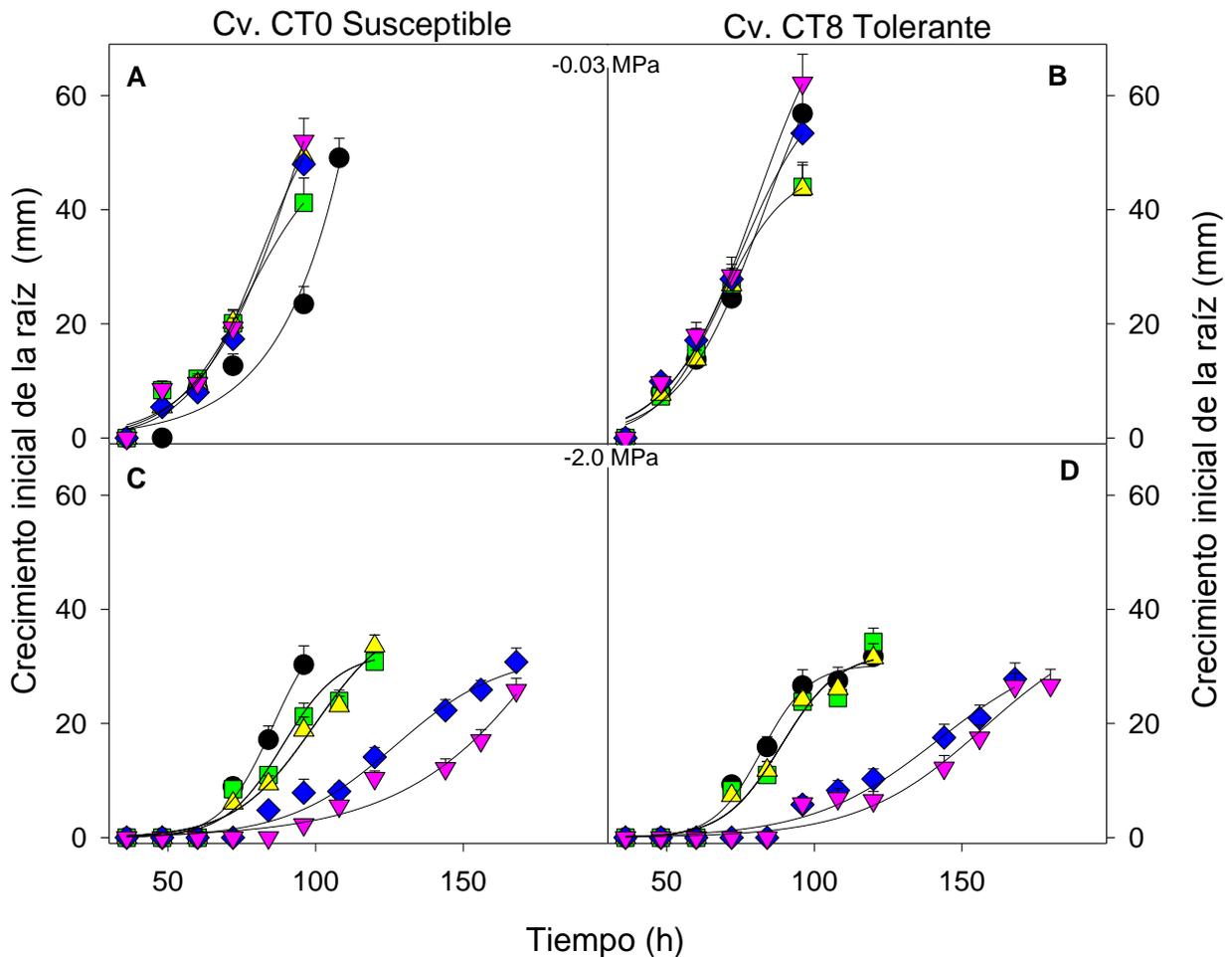


Figura 6. Crecimiento inicial de raíz primaria en plántulas de maíz susceptible y tolerante a sequía, germinado con dos niveles de Ψ_A en suelo (●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■), suelo con 3 % de vermicomposta (▲), suelo con 6 % de vermicomposta (◆), y suelo con 9 % de vermicomposta (▼); n=30.

Se decidió no cuantificar la biomasa acumulada en raíz debido a que a partir de las 96 h después de la siembra, en el Ψ_A de -2.0 MPa, se observó el engrosamiento del cuello de la raíz y la aparición de raíces adventicias en algunas plántulas.

Biomasa acumulada en raíz de Frijol

En los sustratos con Ψ_A de -0.03 MPa las raíces de las plántulas de frijol eran excesivamente túrgidas y quebradizas; además al emerger la raíz, el cuello de ésta formaba una pequeña curva que dificultaba definir el inicio de la misma. Por lo anterior, su manipulación y el seguimiento de su crecimiento se descartaron y las plántulas fueron cosechadas en un plazo máximo de 14 d después de su siembra para cuantificar la biomasa acumulada en la raíz (Figura 7).

En los sustratos con Ψ_A de -0.03 MPa la raíz del cultivar susceptible a sequía mostró más crecimiento que el tolerante, por lo que acumuló 17.5 % más biomasa fresca. También se observó que el cv. susceptible tendió a incrementar la biomasa en relación directa a la proporción de vermicomposta en el sustrato; en contraste, el cv. tolerante acumuló cantidades notablemente homogéneas de biomasa en la raíz independientemente de la ausencia o proporción de vermicomposta en el sustrato (Figura 7 A-B).

En suelo con Ψ_A de -2.0 MPa la biomasa acumulada en la raíz de ambos cultivares disminuyó ($p \leq 0.05$) respecto al Ψ_A de -0.03 MPa. La presencia de vermicomposta en el suelo incrementó el efecto del Ψ_A bajo en el cv. susceptible a sequía y en promedio generó 33.3 % menos biomasa, la excepción fue la proporción de 9 % que la incrementó 21 % respecto a la condición sin vermicomposta y humedad baja (Figura 7 C). El cv. tolerante a sequía reaccionó diferente al susceptible, pues no incrementó la biomasa de su raíz por la vermicomposta en esta condición de humedad restringida (Figura 7D).

La interacción vermicomposta x cultivar fue significativa ($p \leq 0.001$).

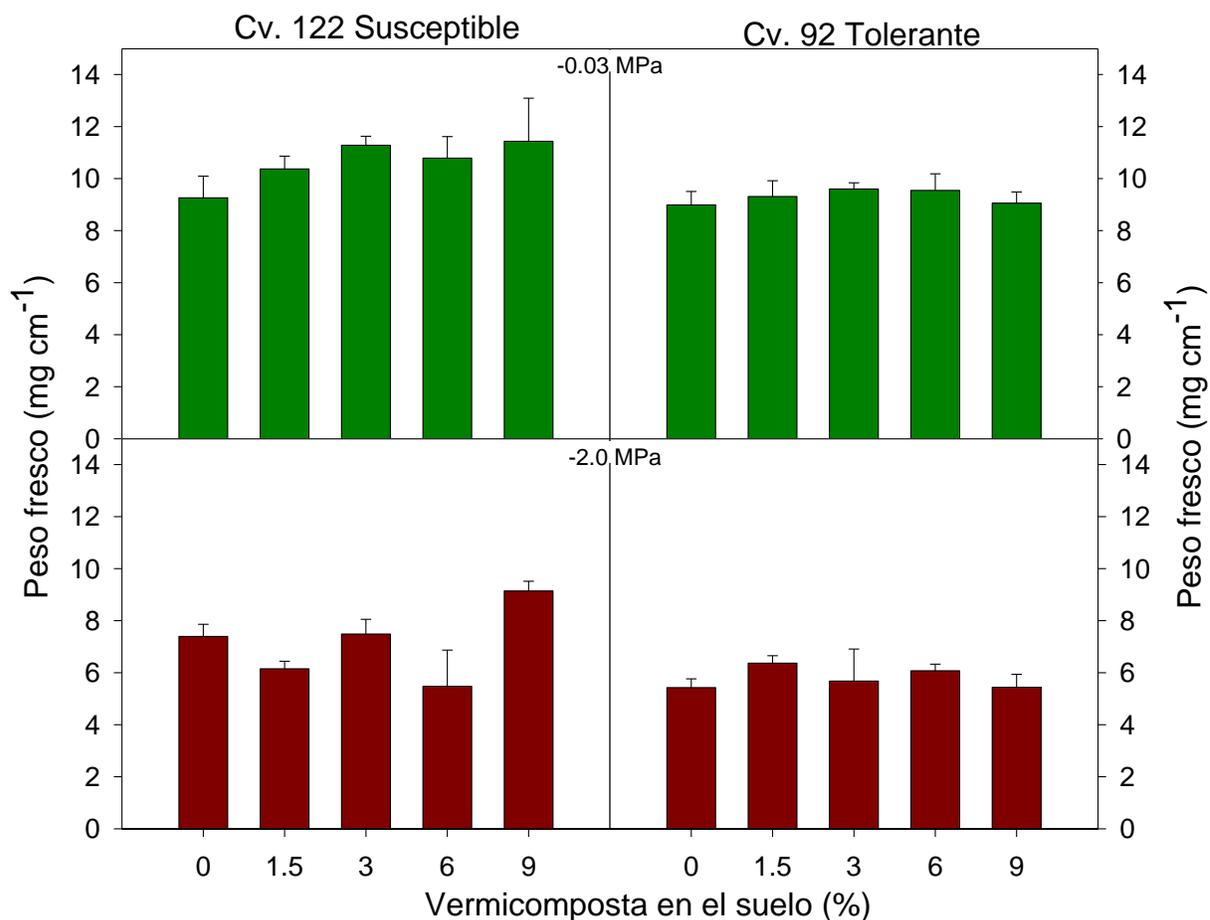


Figura 7. Biomasa de raíz primaria de plántulas de frijol susceptible y tolerante a sequía en suelo con proporciones diferentes de vermicomposta y dos Ψ_A (MPa), n=30.

Discusión

La imbibición máxima (humedad embebida para la germinación) fue diferente en las especies evaluadas. El efecto general de la vermicomposta en el sustrato fue similar en ambas especies y en promedio disminuyó 15 % con la proporción mayor de vermicomposta; este efecto fue potenciado en la condición de restricción de humedad (Figuras 2 y 3).

Debido a que la humedad disponible del sustrato se expresó como Ψ_A (Figura 1) es correcto suponer que la humedad disponible es similar en el suelo y sus

mezclas con vermicomposta al mismo Ψ_A . Los resultados del estudio permiten sugerir que la vermicomposta modifica alguna o varias propiedades fisicoquímicas del suelo, relacionadas con la resistencia al movimiento del agua del sistema suelo-semilla. Así, a mayor proporción de vermicomposta mayor resistencia para la transferencia de humedad del suelo a la semilla.

El análisis fisicoquímico del sustrato y las mezclas con vermicomposta (Cuadro 2) demuestra que algunos parámetros, como pH, conductividad eléctrica, contenido de materia orgánica y densidad aparente se modifican significativamente con el incremento de la proporción de vermicomposta en el suelo. Estos cambios, individualmente o como resultado de sus interacciones también pueden modificar la relación semilla-microambiente de germinación. Esto ha sido señalado directa o indirectamente por Sánchez *et al.* (2005) y Tejada *et al.* (2009). Los autores citados indicaron que cambios como los observados en el presente estudio (Cuadro 2) propician la reconfiguración estructural del suelo, con formación o incremento de los agregados y espacios porosos. Además de los factores intrínsecos de la semilla (Vertucci, 1989), el efecto combinado de la proporción del espacio poroso ocupado por el agua, la densidad aparente y temperatura modifican la imbibición. Studdert *et al.* (1994) generaron un modelo matemático para conocer el efecto de diferentes niveles de estos factores en la imbibición de semillas de trigo; y demostraron que la imbibición es un proceso que es posible predecir satisfactoriamente por modelos matemáticos, pero su complejidad impide la aplicación de los modelos en condiciones de campo.

En condiciones *in situ*, un suelo con densidad aparente alta incrementa el contacto semilla-suelo (Studdert *et al.*, 1994), por lo que, es posible que al disminuir la densidad aparente del suelo, por efecto de la vermicomposta, éste contacto se reduzca junto con la velocidad de imbibición. Esto coincide con lo descrito por Wuest (2002) quien destacó que, con humedad no restrictiva (-0.16 MPa), la cantidad de agua embebida y la velocidad de germinación de semilla de trigo disminuyó cuando la semilla se suspendió en orificios de 11 mm, hechos en bloques de suelo húmedo, en comparación con las semillas que estaban en contacto íntimo con el suelo. Sin embargo, estos autores minimizan el efecto del contacto directo de la semilla con el

suelo; ya que, indican que al menos 85 % del agua embebida por las semillas es atribuible al vapor de agua y no a las películas de agua líquida. Sin embargo, sus evaluaciones se realizaron en condición de humedad no limitante. El efecto de la densidad aparente y el contacto semilla-suelo parecen también estar modulados por propiedades como la textura del suelo, ya que en arena, compactada para generar densidades aparentes entre 0.90 y 1.31 Mg cm⁻³, no se produjeron efectos significativos en la imbibición (Layne-Garsaball *et al.*, 2007).

También se ha demostrado que el tiempo para la germinación incrementa con la restricción de humedad ($\Psi_A \leq -1.1$ MPa) ya que hay un efecto aditivo de esta condición y las temperaturas menores a 8 °C y mayores a 25 °C; lo último, se atribuye a que cuando el Ψ_A es restrictivo, la humedad relativa disminuye, contrarrestando la efectividad del contacto semilla-suelo (Harper y Benton, 1966), y si la temperatura se incrementa, se reduce la condensación del vapor sobre la superficie de la semilla (Wuest *et al.*, 1999). La temperatura del suelo en las mezclas evaluadas en el presente estudio no fueron registradas; sin embargo, se ha descrito ampliamente que la vermicomposta incrementa la temperatura del sustrato, principalmente por el aumento de la actividad microbiana (Tejada *et al.*, 2010). Al-Karaki *et al.* (2007) evaluaron los efectos combinados de temperaturas altas (27 a 33°C) y Ψ_A bajos (-0.9 MPa) en la germinación de cebada, y evidenciaron que las temperaturas elevadas redujeron la tasa y porcentaje de germinación y su efecto más pronunciado se detectó en condiciones de humedad limitantes. Además, los mismos autores indicaron que el estrés por déficit de humedad tuvo un efecto depresivo sobre la tasa de germinación incluso en temperaturas óptimas y que esta respuesta es dependiente del cultivar.

Se ha evidenciado que la incorporación de vermicomposta estimula la actividad microbiana, con lo que se incrementa la concentración de CO₂ en el suelo (Tejada *et al.*, 2009); aunque, el efecto de este gas en la germinación es controvertido, es seguro que afecta la respiración de los tejidos en desarrollo y algunos autores sugieren que esta condición más otro factor de estrés, como el déficit de humedad, pueden promover una fase de latencia secundaria en la semilla

(Yoshioka *et al.*, 1995). Para determinar con precisión el efecto de este factor sobre la germinación, sería conveniente medir la dinámica de producción y dispersión de CO₂ en el microambiente de germinación, enriquecido con vermicomposta.

La complejidad de la interacción de factores es evidente en condiciones de campo, en las que la composición mecánica (tamaño de agregados), compactación, densidad aparente y contenido de materia orgánica del suelo fijan su contenido de agua, temperatura y actividad biológica; que finalmente modula la germinación y establecimiento de los cultivares (Máthé-Gáspar y Rátonyi, 2008).

En el presente estudio se evidenció la respuesta diferente a los sustratos, a los Ψ_A y a su combinación entre las especies; pues, los resultados indican que en maíz la cantidad de agua embebida fue significativamente diferente en dependencia del Ψ_A del sustrato, y esa dependencia fue más evidente en Ψ_A de -2.0 MPa (Figura 2); mientras que, la imbibición máxima de las semillas de frijol no mostró diferencias debidas a este factor (Figura 3). La respuesta del maíz coincide con lo documentado por Peña-Valdivia *et al.* (2007) en maíz de alta calidad proteica en diferentes Ψ_A del sustrato. Mientras, en frijol la imbibición máxima sí dependió del cultivar; esta respuesta podría explicarse con el tamaño de semilla, que fue mayor en el cv. susceptible a sequía, en relación con el tolerante. Una respuesta similar fue observada en maíz por Collins *et al.* (1984). Otra diferencia sobresaliente fue que la humedad máxima embebida por las semillas fue contrastante entre las especies, pues en maíz equivalió aproximadamente al 40 % de su masa y 90 % en frijol.

Se observó que los cultivares seleccionados como tolerantes a sequía, de ambas especies, embeben menor cantidad de agua que los susceptibles; simultáneamente, se evidenció que la cinética de imbibición fue significativamente diferente para el cultivar de frijol tolerante a sequía; principalmente en condición de humedad restrictiva, en la que la ganancia de peso de las semillas en los tratamientos con vermicomposta tomó hasta 96 h. En relación con esto, se ha observado que las semillas de frijol embeben el agua inicialmente por la lenticela como canal principal de agua, y no por el hilio de la región micropilar. Esta dinámica difiere entre cultivares, ya que algunos requieren hidratación lenta para restaurar la función de las membrana de las células de la lenticela, lo que está en relación con la

naturaleza de los tejidos de ésta estructura (Kikuchi *et al.*, 2006). Pruebas preliminares realizadas con estas semillas mostraron impermeabilidad parcial de la testa, lo que se considera un mecanismo de tolerancia y una barrera para prevenir el daño por imbibición acelerada después de periodos largos de almacenamiento (Kikuchi *et al.*, 2006).

La impermeabilidad de la testa se ha relacionado con alteraciones genéticas provocadas por procesos de selección, que modifican características de color, porosidad y serosidad; que a su vez afectan el vigor, potencial de almacenamiento, resistencia a la infección fúngica y la susceptibilidad al daño por imbibición acelerada (Dübbern De Souza y Marcos-Filho, 2001). También, se ha considerado que la impermeabilidad de la testa representa un mecanismo de latencia reversible que previene la germinación en condiciones de humedad insuficiente para evitar el desarrollo de la plántula (Evans y Etherington, 1990). El cultivar de frijol tolerante a sequía, con déficit de humedad, mostró curvas de imbibición diferentes a las de la literatura, pues la fase inicial de absorción de agua hasta llegar al 50 % de la imbibición máxima fue muy lenta y a ésta le siguió una fase más rápida. La primera fase puede relacionarse con la velocidad de hidratación de la testa y la segunda con la hidratación de los cotiledones (Meyer *et al.*, 2006).

La germinación acumulada se afectó con la vermicomposta, sin un patrón proporcional a su concentración en el suelo, principalmente con el Ψ_A de -2.0 MPa. Sólo las proporciones mayores de vermicomposta (6 y 9 %) modificaron la germinación máxima. El cultivar susceptible a sequía con este Ψ_A y 6 % de vermicomposta redujo su germinación a 80 %, y la misma proporción se obtuvo en ambos cultivares con el mismo Ψ_A y 9 % de vermicomposta. También, ambos disminuyeron la tasa de germinación cerca de 50 % con las dos proporciones de vermicomposta (6 y 9 %, Figura 4). En comparación, en frijol, sólo el cultivar tolerante a sequía redujo su germinación a 80 % con 3 % de vermicomposta y humedad no restrictiva y la tasa de germinación disminuyó (más de la mitad) sólo en este cultivar con la combinación de restricción de agua y todas las proporciones de vermicomposta (Figura 5).

La germinación media total para ambas especies fue superior a 90 % (Figuras 4 y 5).

Los resultados indican que el efecto de la vermicomposta en la germinación depende de su proporción en el sustrato, la humedad disponible y la especie. Mientras que, con 20 % de vermicomposta en el sustrato la germinación de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill. "Rutgers"), chile (*Capsicum annuum* L. "California Wonder") y caléndula francés (*Tagetes patula* L. "Queen Sophia") no se afectó (Bachman y Metzger, 2008), en petunia (*Petunia* sp.) la velocidad de germinación se incrementó hasta por 6 días con 10 y 90 % de vermicomposta de papel o residuos de alimentos (Arancon *et al.*, 2008). Edwards y Burrows (1988) también indicaron que una variedad amplia de vegetales y especies ornamentales aceleraron e incrementaron su germinación con mezclas de sustratos comerciales y vermicomposta. En rábano (*Raphanus sativus*) 10 % de vermicomposta aceleró la germinación; pero, con 100 % de vermicomposta, la germinación se inhibió hasta en 45 % (Buckerfield *et al.*, 1999). Además de lo anterior, la respuesta de la germinación parece también depender del tiempo de maduración de la vermicomposta y su presentación (sólida o líquida). Con extractos líquidos de vermicomposta la germinación de semillas de rábano y caléndula fue mayor que con la mezcla de vermicomposta sólida en el suelo. Mientras, con vermicomposta madurada por 68 d la germinación decreció, e igualó o superó al testigo en vermicomposta madurada durante 90 d (Warman y AngLopez, 2010).

En frijol, el efecto del cultivar en la biomasa de la raíz de las plántulas (Figura 7) parece ser dependiente del tamaño de la semilla (Cuadro 1); ya que, se ha observado una asociación positiva entre el tamaño de la semilla y el desarrollo vegetativo y reproductivo (Allende-Arrarás *et al.*, 2006). Lo anterior fue parcialmente confirmado por Celis-Velázquez *et al.* (2008) que reportaron que las semillas pesadas generaron plántulas más vigorosas, con más biomasa en folíolos, hipocótilo y raíz; aunque esta respuesta fue dependiente de la raza. En condiciones de estrés salino e hídrico, las plántulas de frijol provenientes de semillas grandes, presentaron tasa de crecimiento mayor en comparación de las plántulas desarrolladas a partir de

semillas menores. Este efecto ha sido relacionado con el contenido diferente de reservas de las semillas (Gholami *et al.*, 2009).

El crecimiento inicial de la raíz primaria de maíz en Ψ_A de -2 MPa disminuyó a menos de la mitad en ambos cultivares, y el efecto fue mayor en relación con la proporción de vermicomposta en el suelo. Peña-Valdivia *et al.* (2007) probaron que con Ψ_A de -1.58 MPa la longitud, materia fresca y biomasa seca de la raíz de plántulas de maíz disminuyeron a la mitad o menos, respecto a los valores obtenidos en Ψ_A de -0.03 MPa; lo que indicó que los cultivares utilizaron eficientemente la humedad limitada del sustrato para germinar, pero ésta no fue suficiente para el crecimiento del sistema radical, que fue parcialmente afectado. Al parecer, la extensión inicial de la radícula es un proceso dirigido por el turgor de las células del eje embrionario (Bewley, 1997), por lo que se regula, en gran parte, por el contenido de humedad del medio de crecimiento. Respecto a su composición, se especula que la vermicomposta contiene sustancias húmicas y algunos compuestos con estructura similar a las hormonas que promueven o inhiben el crecimiento como el ácido abscísico y el ácido indolacético (Barros *et al.*, 2010). Lo anterior, permite considerar la posibilidad de que algún compuesto presente en la vermicomposta haya inhibido parcialmente el crecimiento de la raíz, como se observó al aplicar ABA en embriones de *Medicago truncatula*, lo que inhibió la extensión radicular (Gimeno-Gilles *et al.*, 2009).

Por el contrario, la vermicomposta no afectó significativamente en la biomasa acumulada de frijol (Figura 7); aunque, si existió cierta tendencia con el incremento de su proporción en el sustrato. En relación con esto, se ha demostrado el efecto benéfico de la vermicomposta en el crecimiento inicial de numerosas especies y se atribuyó a la presencia de sustancias húmicas (Arancon *et al.*, 2008), componentes microbiológicos (Gutiérrez-Miceli *et al.*, 2008), fitohormonas (Jana *et al.*, 2010), iones disponibles (Sallaku *et al.*, 2009) y modificación de las propiedades fisicoquímicas del suelo (Azarmi *et al.*, 2008).

La evidencia indica que el efecto combinado de los factores modificados por la vermicomposta en el suelo es el que influye en la cinética de imbibición de las especies evaluadas y que esto interactúa con la condición de humedad y los

cultivares. Este resultado concuerda con lo señalado por Peña-Valdivia *et al.* (2007) quienes señalaron que la absorción de agua por las semillas y el crecimiento inicial de la plántula está regulada por factores como humedad y permeabilidad de la semilla y los factores externos, como humedad y temperatura ambiente.

Conclusiones

La vermicomposta interactúa con el suelo modificando algunas propiedades físico-químicas, que, a la vez, afectan la velocidad e imbibición máxima, la velocidad para la germinación máxima acumulada y el crecimiento inicial de la raíz de las plántulas de maíz y frijol. La mayoría de estos efectos son amplificadas por la humedad limitante en el sustrato (-2.0MPa). Sin embargo, los patrones de modificación son irregulares dentro y entre las especies C3 y C4.

La significancia de las interacciones entre los factores evaluados muestra la complejidad de las reacciones que se activan al combinar los factores evaluados.

Literatura citada

- Al-Karaki G N, A Al-Ajmi, Y Othman. 2007. Seed germination and early root growth of three barley cultivars as affected by temperature and water stress. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science*. 2(2): 112-117.
- Allende-Arráras G, G M Acero, R J Padilla, P N Mayek. 2006. Comportamiento agronómico y características físico-químicas del grano del frijol en Aguascalientes, México. *Revista Fitotecnia Mexicana* 29(1):89-93.
- Arancon N Q, C A Edwards, A Babenko, J Cannon, P Galvis, J D Metzger. 2008. Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse. *Applied Soil Ecology*. 39:91-99.
- Azarmi R, G M Torabi, T R Didar. 2008. Influence of vermicompost on soil chemical and physical properties in tomato (*Lycopersicum esculentum*) field. *African Journal of Biotechnology* 7(14):2397-2401.
- Azarnivand H, M Souri, V Etemad. 2007. Effect of water stress on seed germination of *Artemisia spicigera* & *Artemisia fragans*. *BIABAN* 12:17-21.
- Bewley J D, M Black. 1994. *Seeds. Physiology of development and germination*. 2a Edición. Plenum. New York. EU. 445 p.

- Bewley J D. 1997- Seed germination and dormancy. *The Plant Cell*. 9:1055-1066.
- Bachman G R, J D Metzger. 2008. Growth of bedding plants in commercial potting substrate amended with vermicompost. *Bioresource Technology*. 99: 3155-3161.
- Barrios-Gómez E J, C López-Castañeda, J Kohashi-Shibata, J A Acosta-Gallegos, S Miranda-Colín, N Mayek-Pérez. 2010. Rendimiento de semilla y sus componentes de frijol flor de mayo en el centro de México. *Agrociencia* 44:481-489.
- Barros D L, C L Pasqualoto, O F Lopes, A N Oliveira, P L Eustáquio, M Azevedo, R Spaccini, A Piccolo, A R Facanha. 2010. Bioactivity of chemically transformed humic matter from vermicompost on plant root growth. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*. 58: 3681-3688.
- Buckerfield J, T C Flavel, K E Lee, K A Webster. 1999. Vermicompost in solid and liquid forms as a plant-growth promoter. *Pedobiologia*. 43:753-759.
- Castañeda S M C, T L Córdoba, H V A González, A A Delgado, V A Santacruz, G García de los santos. 2009. Physiological performance, yield, and quality of dry bean seeds under drought stress. *INTERCIENCIA*. 34(10): 748-754.
- Castellanos J Z, B S X Uvalle, S A Aguilar. 2000. *Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas*. 2ª ed. Colección INCAPA. San Miguel de Allende, Guanajuato. 226 p.
- Celis-Velázquez R, C B Peña-Valdivia, M Luna-Cavazos, J R Aguirre-Rivera, A Carballo-Carballo, C Trejo-López. 2008. Variabilidad morfológica seminal y del vigor inicial de germoplasma mejorado de frijol. *Agronomía Mesoamericana*. 19 (2): 179-193.
- Collins G, E Stibbe, B Kroesbergen. 1984. Influence of soil moisture stress and soil bulk density on the imbibitions of corn seeds in a sandy soil. *Soil & Tillage Research*. 4:361-370.
- Dübbern de Souza F H, J Marcos-Filho. 2001. The seed coat as a modulator of seed-environment relationships in Fabaceae. *Revista Brasileira de Botânica*. 24(4): 365-375.
- Dubreucq B, N Berger, E Vincent, M Boisson, M Caboche, L Lepiniec. 2000. The Arabidopsis AtEPR1 extension-like gene is specifically expressed in endosperm during seed germination. *Plant Journal*. 23: 643-652.

- Edwards C A, I Burrows. 1988. The potential of earthworm composts as plant growth media. In: Edwards C A., Neuhauser E (Eds.) *Earthworms in Waste and Environmental Management* SPB. Academic Press, The Hague. The Netherlands. Pp. 21-32.
- Edmeades G O, H R Lafitte, J Bolaños, S C Chapman, M Bazinger, J A Deutsch. 1994. Developing maize that tolerates drought or low nitrogen conditions. In: G O Edmeades & J A Deutsch (Eds.) *Stress tolerance breeding: Maize that resist insects, drought, low nitrogen and acid soils*. CIMMYT, México, D.F. México. Pp 21-84.
- Ferreras L, E Gomez, S Toresani, I Firpo, Rossana R. 2006. Effect of organic amendments on some physical, chemical and biological properties in a horticultural soil. *Bioresource Technology* 97:635-640.
- Evans C E, J R Etherington. 1990. The effect of soil water potential on seed germination of some British plants. *New Phytologist*. 115:539-548.
- García S J A, L G Rodríguez, T A Saénz, R S Rebollar. 2006. Políticas para mejorar la competitividad de la producción de maíz y frijol en México. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 29(2):115-121.
- Gholami A, S Sharafi, S Ghasemi, A Sharafi. 2009. Pinto bean seed reserve utilization and seedling growth as affected by seed size, salinity and drought stress. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 7(2):411-414.
- Gimeno-Gilles C, E Lelièvre, L Viau, Mustafa Malik-Ghulam, C Ricoult, A Niebel, N Leduc, A M Limami. 2009. ABA- mediated inhibition of germination is related to the inhibition of genes encoding cell-wall biosynthetic and architecture: modifying enzymes and structural proteins in *Medicago truncatula* embryo axis. *Molecular Plant*. 2(1):108-119.
- Gutiérrez-Miceli F A, B Moguel-Zamudio, M Abud-Archila, V F Gutiérrez-Oliva, L Dendooven. 2008. Sheep manure vermicompost supplemented with a native diazotrophic bacteria and mycorrhizas for maize cultivation. *Bioresource Technology* 99:7020-7026.
- Harper J L, R A Benton. 1966. The behavior of seeds in soil: II. The germination of seeds on the surface of a water supplying substrate. *Journal of Ecology*. 54:151-166.
- Jana U, Barot S, Blouin M, Lavelle P, Laffray D, Repellin A. 2010. Earthworms influence the production of above and belowground biomass and the expression of genes involved in cell proliferation and stress responses in *Arabidopsis thaliana*. *Soil Biology & Biochemistry* 42: 244 – 252.

- Kikuchi K, M Koizumi, N Ishida, H Kano. 2006. Water uptake by dry beans observed by micro-magnetic resonance imaging. *Annals of Botany*. 98: 545-553.
- Koizumi M, K Kikuchi, S Isobe, N Ishida, S Naito, H Kano. 2008. Role of seed coat in imbibing soybean seeds observed by micro-magnetic resonance imaging. *Annals of Botany*. 102: 343-352.
- Layne-Garsaball J A, J R Méndez N, J Mayz-Figueroa. 2007. Crecimiento de plántulas a partir de tres tamaños de semilla de dos cultivares de maíz (*Zea mays* L.), sembrados en arena y regados con tres soluciones osmóticas de sacarosa. *IDESIA*. 25(1): 21-36.
- Lizana C, M Wentworth, J P Martínez, D Villegas, R Meneses, E H Murchie, C Pastenes, B Lercari, P Vernieri, P Horton, M Pinto. 2006. Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress. I. Effects of drought on yield and photosynthesis. *Journal of Experimental Botany*. 57(3): 685-697.
- Máthé-Gáspá G, T Rátonyi. 2008. Study of plant emergence by different cultivation. *Acta Biologica Szegediensis*. 52(1): 225-227.
- Meyer C J, E Steudle, C A Peterson. 2006. Patterns and kinetics of water uptake by soybean seeds. *Journal of Experimental Botany*. 58(3):717-732.
- Oliva M A, R Rincón, E Zenteno, A Pinto, L Dendooven, F Gutiérrez. 2008. Rol del vermicompost frente al estrés por cloruro de sodio en el crecimiento y fotosíntesis en plántulas de tamarindo (*Tamarindus indica* L.). *Gayana Botanica*. 65(1): 10-17.
- Peña-Valdivia C, C Trejo, J Galicia, A Sánchez-Urdaneta. 2007. Reacción del maíz de alta calidad proteica al potencial de agua del sustrato: germinación y crecimiento radical inicial. *Revista de la Facultad de Agronomía. Universidad del Zulia*. 24 (1): 326-331.
- Ramírez-Vallejo P, J D Kelly. 1998. Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica*. 99:127-136.
- Reynolds-Henne C E, A Langenegger, J Maní, N Schenk, A Zumsteg, U Feller. 2010. Interactions between temperature, drought and stomatal opening in legumes. *Environmental and Experimental Botany*. 68:37-43.
- Rivera-Hernández B, E Carrillo-Ávila, J J Obrador-Olán, J F Juárez-López, L A Aceves-Navarro. 2010. Morphological quality of sweet corn (*Zea mays* L.) ears as response to soil moisture tension and phosphate fertilization in Campeche, Mexico. *Agricultural Water Management*. 97:1365-1374.

- Sallaku G, I Babaj, S Kaciu, A Balliu. 2009. The influence of vermicompost on plant growth characteristics of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings under saline conditions. *Journal of Food, Agriculture & Environment*. 7(3&4):869-872.
- Sánchez H R, V M Ordaz C, G S Benedicto V, C I Hidalgo M, D J Palma L. 2005. Cambios en las propiedades físicas de un suelo arcillosos por aportes de lombricomposto de cachaza y estiércol. *Interciencia*. 30(012):775-779.
- Sánchez-urdaneta A B, C B Peña-Valdivia, J R Aguirre, C Trejo, E Cárdenas. 2004. Efectos del potencial de agua en el crecimiento radical de plántulas de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dick. *Interciencia*. 29:626-631.
- Shivaputra S S, C P Patil, G S K Swamy, P B Patil. 2004. Effect of vesicular-arbuscular mycorrhiza fungi and vermicompost on drought tolerance in papaya. *Mycorrhiza*. 16(3): 12-13.
- Studdert G A, W Wilhelm, J F Power. 1994. Imbibition response of winter wheat to water-filled pore space. *Agronomy Journal*. 86:995-1000.
- Tejada M, A M García-Martínez, J Parrado. 2009. Effects of a vermicompost composted with beet vinasse on soil properties, soil losses and soil restoration. *Catena* 77:238-247.
- Tejada M, I Gómez, T Hernández, C García. 2010. Utilization of vermicomposts in soil restoration effects on soil biological properties. *Soil Biology & Biochemistry*. 74 (2): 525-532.
- Teruel M E, C A Biasutti, M C Nazar, D A Peiretti. 2008. Efectos de aptitud combinatoria para vigor de plántula bajo estrés hídrico en maíz. *Agriscientia*. XXV(1):27-34.
- Troeh F R, L M Thompson. 1993. *Soils and Soil Fertility*. Oxford University Press, USA. 5 Edition. 480p.
- Tsougkrianis N, C B Peña-Valdivia, C Trejo L, J D Molina G. 2009. El potencial de agua del sustrato en la germinación de maíces con tolerancia y sensibilidad a la sequía. *Agricultura Técnica en México*. 35(4): 363-369.
- Vertucci C W. 1989. The kinetics of seed imbibition: Controlling factors and relevance to seedling vigor. In: P.C. Stanwood M B. McDonald (Eds). *Seed moisture*. CSSA Special Publication Number 14. Crop Science Society of America. Madison, WI. EU. pp: 93-115.
- Warman P R, M J AngLopez. 2010. Vermicompost derived from different feedstocks as a plant growth medium. *Bioresource Technology*. 101:4479-4483.
- Wuest S B, S L Albrecht, K W Skirvin. 1999. Vapor transport vs seed-soil contact in wheat germination. *Agronomy Journal*. 91(5): 783-787.
- Wuest S B. 2002. Water transfer from soil to seed: the role of vapor transport. *Soil Science Society of American Journal*. 66:1760-1763.
- Yoshioka T, H Ota, K Segawa, Y Takeda, Y Esashi. 1995. Contrasted effects of CO₂ on the regulation of dormancy and germination in *Xanthium pennsylvanicum* and *Setaria faberi* seeds. *Annals of Botany*. 76: 625-630.

Capítulo II. Intercambio de gases y conductancia estomática de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivado en vermicomposta y suspensión de riego

Resumen

La aplicación de vermicomposta a suelos ha mostrado efecto benéfico en la germinación y el crecimiento de algunos cultivos; sin embargo, se conoce poco su efecto en la fisiología de las plantas cuando se cultivan en condiciones de déficit de humedad, como factor de estrés. La presente investigación se desarrolló en invernadero con el objetivo de documentar el efecto de la proporción de vermicomposta y la suspensión terminal del riego en el intercambio de gases en plantas de frijol en fase reproductiva. En cultivares susceptible y tolerante a sequía cultivados en suelo sin y con 1.5 y 3% de vermicomposta y con riego o su suspensión a partir de la floración, se registró la dinámica de la humedad del suelo y se cuantificó la conductancia estomática (gs), transpiración (E), asimilación de CO₂ (A) y uso eficiente del agua (UEA). La vermicomposta en 1.5 y 3 % disminuyó ($p \leq 0.05$) 39 y 77 % la gs, respectivamente, la suspensión del riego la abatió totalmente y en promedio en el cv. tolerante fue 14 % menor que en el susceptible. El testigo presentó una A de 25 y 50 % mayor respecto a los tratamientos con 1.5 y 3 % de vermicomposta; pero, la suspensión del riego disminuyó la A totalmente. La suspensión de riego también disminuyó ($p \leq 0.05$) E (62 %) respecto al riego; mientras que, 1.5 y 3 % de vermicomposta la redujo 16 y 49 % en relación al testigo. El UEA disminuyó 91 % con la suspensión del riego y 71 % con 3 % de vermicomposta respecto al riego y al testigo, respectivamente. El cultivar susceptible presentó un UEA 23 % menor que el tolerante. Las interacciones entre los factores principales fueron significativas. Se demostró que el cultivar tolerante a la sequía fue más eficiente en el uso del agua que el susceptible en condición de riego. La vermicomposta modificó algunas propiedades fisicoquímicas del suelo, lo que podría influir en la disminución del intercambio de gases, con lo que bajo las condiciones de estudio no ser considerada como atenuante de esas respuestas al estrés por déficit de humedad.

Palabras clave: déficit de humedad, sequía, uso eficiente del agua.

Abstract

The addition of vermicompost to soils has shown positive effects on seed germination and plant growth. However, little is known about the effects of vermicompost concentration in plant physiology under soil water deficit during the reproductive stage. The research aim was to assess the effect of terminal drought and vermicompost concentration on stomatal conductivity and gas exchange of beans plants during the reproductive stage. Susceptible and tolerant beans cultivars were grown in pots with 0, 1.5 y 3 % of vermicompost in the soil, and under greenhouse conditions. Treatments included plants well watered and terminal drought conditions. The soil water content was measured across the time. Gas exchange (g_s), transpiration rate (E), CO_2 assimilation rate (A), and instantaneous water use efficiency (WUE) were determined. The g_s was significantly reduced ($P \leq 0.05$) 39 and 77% with 1.5 and 3% of vermicompost respectively in well watered plants, stomatal conductance was completely declined by water deficit and the tolerant genotype was reduced 14% in relation with the sensitive one. The A was significantly higher in plants with drought on the control by 25 and 50%, than the 1.5 and 3% vermicompost respectively. Transpiration rate (E) decreased 62% by soil water stress, and also with 1.5 and 3% of vermicompost E was declined up to 16 and 49% respectively. WUE at single leaf level was reduced up to 91% by withholding water and 71% with 3% of vermicompost, compared to both controls. WUE was 23% higher in tolerant genotype. There was significant ($P \leq 0.01$) watering x time and vermicompost x time interaction for g_s , A , E and WUE , and the responses to those interactions were different by both genotypes. The results indicate that vermicompost showed an inhibitory effect on g_s and gas exchange.

Key words: water deficit, drought, water use efficiency.

Introducción

El frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), en comparación con otras leguminosas de grano, es clasificado como altamente susceptible al déficit de humedad del suelo, particularmente durante la floración (Graham *et al.*, 1997; Terzi *et al.*, 2010): En México, las regiones productoras de frijol se ubican en áreas geográficas caracterizadas por suelos someros con capacidad baja de retención de humedad y con régimen de precipitación errática y deficiente (Barrios-Gómez *et al.*, 2010).

Se ha documentado ampliamente que las plantas en condición de déficit de humedad reducen la transpiración al cerrar los estomas, respuesta que proporciona protección a la planta contra la desecación inmediata (Taiz y Zeiger, 2002; Reynolds-Henne *et al.*, 2010). El intercambio de gases regulado por los estomas es uno de los procesos fisiológicos más sensible al déficit de humedad y en diversos estudios ha sido considerado como un indicador importante del estado fisiológico de la planta y criterio de comparación entre cultivares (Liu *et al.*, 2005; Terzi *et al.*, 2010).

Se ha demostrado que las hojas primarias de plántulas de frijol disminuyen significativamente su fotosíntesis a partir del segundo día sin riego, aunque el potencial de agua de la hoja se mantenga sin cambio, esto se ha interpretado como una respuesta no hidráulica de la raíz a la condición hídrica del suelo (Miyashita *et al.*, 2005). También se ha observado que algunos cultivares de frijol susceptibles al déficit de humedad en etapa vegetativa cierran sus estomas y disminuyen la tasa de asimilación de CO₂ como reacción al déficit hídrico, inducido por 10 d de suspensión de riego, esas reacciones ocurren más rápido que en los cultivares tolerantes a sequía (Terzi *et al.*, 2010).

En plantas de frijol en etapa de prefloración se redujo la asimilación de CO₂ con 7 d sin riego, la respuesta fue diferente entre cultivares, pero se detectó un patrón general de disminución de la conductancia estomática (gs) sobre la asimilación de carbono (A) (Guida *et al.*, 2006). En cambio en plantas adultas de frijol en floración y llenado de vaina, la suspensión prolongada del riego disminuyó la fotosíntesis entre 60 y 80 % (Nuñez *et al.*, 1998). Respecto a lo anterior, se conoce que la variación genética define las características morfológicas y adaptaciones de la planta que regulan los procesos de conductancia estomática y transpiración

(Grzesiak *et al.*, 1997). Por lo anterior, una estrategia para incrementar la estabilidad genética del cultivo es la selección de cultivares con características de tolerancia a déficit hídrico, principalmente durante la fase reproductiva, que desde el punto de vista agronómico es la más afectada (Rodríguez, 2008)².

Algunos autores han señalado que la condición hídrica del suelo se mejora al incorporar materia orgánica, pues se incrementa la retención de humedad al modificar la densidad aparente y porosidad (Sánchez *et al.*, 2005). Con la incorporación de 10 ton ha⁻¹ de vermicomposta en los primeros 15 cm de profundidad de un suelo con estructura arcillo arenosa, la porosidad se incrementó 24 % respecto al testigo después de un ciclo de cultivo de maíz; los poros, con diámetro entre 50 y 500 µm, fueron los considerados como más importantes en la relación suelo-agua-planta, (Marinari *et al.*, 2000).

Proporciones de 20, 40 y 60 ton de vermicomposta ha⁻¹ adicionadas a los primeros 10 cm de profundidad en un suelo vertisol, después de mantenerse sin alteración mecánica durante 18 meses, disminuyeron la densidad aparente linealmente en relación con la proporción de vermicomposta aplicada; además, se registró formación de agregados estables al agua, lo que generó una estructura granulada y poco compacta (Sánchez *et al.*, 2005).

En condiciones de clima semiárido, con precipitación menor a 400 mm anuales, en un suelo de textura franca (Xerollic Calciorthid), la incorporación de 32 ton ha⁻¹ de vermicomposta disminuyó 12 % la densidad aparente respecto al testigo e incrementó la estabilidad estructural del suelo, y disminuyó 40 % su pérdida e incrementó la cubierta vegetal espontánea. Todos estos resultados confirmaron que la aplicación de vermicomposta es una opción de manejo para rehabilitar el suelo de áreas semiáridas (Tejada *et al.*, 2009).

Con los antecedentes arriba descritos, el objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de la incorporación de vermicomposta al suelo en el intercambio de gases de dos cultivares de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) caracterizados como

² Rodríguez, G. M. N. 2008. Selección de líneas de frijol tolerantes a la sequía con base en respuestas de la planta al estrés hídrico. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. Pp. 115

susceptible y tolerante a la sequía, cultivados en condiciones de déficit de humedad en el suelo durante la fase reproductiva. Se planteó la hipótesis de que el cierre de estomas, la transpiración, el UEA y la asimilación de CO₂ en plantas de frijol mantenidas con déficit de humedad durante la fase reproductiva, son menos afectados al modificar la condición hídrica del suelo por la adición de vermicomposta, al suelo sin efecto de la tolerancia del cultivar a la sequía.

Materiales y métodos

La investigación se desarrolló durante el ciclo primavera-verano de 2009, en condiciones de invernadero en el Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México (19° 27' latitud N, 98° 54' de longitud O y 2220 msnm) (INEGI, 2005). La temperatura media durante el estudio fue 25 ± 3 °C y la humedad relativa registrada con un medidor data logger-HOBO U12-011 fluctuó entre 47 y 65 %.

Diseño experimental

El experimento se realizó utilizando un diseño completamente al azar con un arreglo factorial asimétrico de tratamientos con cinco repeticiones. Los factores y niveles fueron (a) cultivar, con dos niveles: susceptible (cv. 122) y tolerante (cv. 92) a sequía, (b) régimen de riego, con dos niveles: riego durante todo el ciclo de crecimiento y suspensión de riego a partir de la floración; y (c) sustrato, con tres niveles: suelo solo, suelo con 1.5 % de vermicomposta y suelo con 3 % de vermicomposta. Con la combinación de los factores y niveles se generaron 12 tratamientos y 60 unidades experimentales. La unidad experimental fue una maceta con dos plantas.

El análisis estadístico de la información experimental se realizó bajo un diseño de mediciones repetidas, con los supuestos del modelo de parcelas divididas, donde las combinaciones factoriales equivalen al efecto de las parcelas completas y las mediciones repetidas en el tiempo equivalen al efecto de las subparcelas (Kuehl, 2001). Se obtuvo la significancia de los efectos de los factores principales y sus interacciones. La comparación múltiple de medias se realizó con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Material vegetal

Los cultivares evaluados están emparentados entre sí, su hábito de crecimiento es tipo II, y se derivaron de familias F3 de la cruce de los progenitores AC1028 x Pinto Sierra (Ramírez y Kelly, 1998). El proceso de selección para tolerancia a sequía se llevó a cabo por diez ciclos de selección basándose en el comportamiento fisiológico, morfológico y de rendimiento de semilla de los materiales segregantes, en condiciones de déficit de humedad en el suelo. El programa de selección se realizó en los valles altos de México, por el Programa de Mejoramiento Genético de Frijol del Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad del Colegio de Postgraduados (Rodríguez, 2008)³. Las semillas utilizadas fueron multiplicadas por el Programa de Mejoramiento de frijol, en el campo experimental del Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados en el ciclo primavera-verano de 2008.

Sustratos

La vermicomposta fue adquirida en el Módulo de Abonos Orgánicos y Lombricultura de la Universidad Autónoma Chapingo, México. Fue elaborada con residuos de una cosecha de jitomate, hojas secas de fresno y estiércol de bovino, en proporción 40:20:40 respectivamente. El lapso de descomposición y estabilización fue de 6 meses; presentó pH 7.2, materia orgánica 21.7 % y conductividad eléctrica 3.99 dS m⁻¹.

El suelo utilizado fue extraído de los primeros 20 cm de profundidad de una parcela agrícola de Texcoco, México. Por su clase textural, el suelo fue clasificado como migajón arcillo-arenoso. Las mezclas evaluadas se prepararon con 1.5 y 3 % de vermicomposta con base a peso seco; las proporciones de vermicomposta calculadas fueron equivalentes a 40 y 80 ton ha⁻¹, respectivamente (Troeh y Thompson, 1993). Los valores para capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) de los sustratos fueron calculados por el método de la olla y la membrana de presión (Castellanos *et al.*, 2000) y analizados mediante el

³ Rodríguez, G. M. N. 2008. Selección de líneas de frijol tolerantes a la sequía con base en respuestas de la planta al estrés hídrico. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. Pp. 115

procedimiento ANOVA. Las características fisicoquímicas del suelo y las mezclas evaluadas se presentan en el Cuadro 1.

El agua de riego presentó valores de pH (7.4) y conductividad eléctrica (0.53 dS m^{-1}) y se ubica dentro de los intervalos de clasificación de calidad del agua para riego (Ayers y Wescot, 1985).

Desarrollo del experimento

En macetas con 10 kg de sustrato se sembraron tres semillas de cada cultivar. Cuando la primera hoja trifoliolada estuvo totalmente expuesta se eliminó una plántula de cada maceta y se mantuvieron aquellas con altura y tamaño de hojas homogéneos. Las plantas se regaron con agua suficiente para conservar el sustrato con humedad aprovechable entre 80 y 100 %. La humedad fue asegurada mediante control gravimétrico diario de las macetas, con una báscula electrónica (TOR-REY L-PCR $20 \pm 2 \text{ g}$). Después de que poco más del 50 % de las plantas se encontraba en floración (59 d después de la siembra; DDS) se consideró momento de la antesis y se asignaron al azar los tratamientos a las macetas. Para disminuir la pérdida de agua por evaporación la superficie de las macetas se cubrió con una capa de aproximadamente 2 cm de unicel granulada. Las plantas crecieron sanas y vigorosas, sin incidencia de plagas o enfermedades.

Se seleccionaron aleatoriamente tres unidades experimentales. La hoja trifoliolada más joven del tallo principal se etiquetó en cada planta. En la hoja marcada se realizaron las evaluaciones

Cuadro 1. Características fisicoquímicas y valores de referencia del contenido de humedad de los sustratos.

	Proporción de vermicomposta en el suelo (%)			Media general
	0	1.5	3.0	
Cationes intercambiables				
Ca ⁺⁺ (cmol kg ⁻¹)	15.30b	16.60a	15.26b	15.75
Mg ⁺⁺ (cmol kg ⁻¹)	6.40ab	5.70b	7.43a	6.51
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0.91b	1.22a	1.25a	1.13
Densidad aparente (g cm ³)	1.37a	1.35a	1.30a	1.34
Materia orgánica (%)	1.57a	1.57a	1.66a	1.60
pH (relación 1:2)	7.77a	7.67c	7.71b	7.72
Porosidad total	45.06b	45.73a	48.33a	46.36
Capacidad de campo (%)	12.4a	12.90a	12.80a	12.69
PMP (%)*	6.70b	7.40a	7.70a	7.30
Humedad aprovechable (%)	5.60a	5.40a	5.10a	5.38

*Medias dentro de líneas seguidas con letra diferente son significativamente distintas (Tukey, $p \leq 0.05$). PMP: punto de marchitez permanente $n = 3$.

Variables evaluadas

En los tratamientos con suspensión de riego se registró la pérdida de humedad mediante control gravimétrico constante de las macetas con una báscula electrónica (TOR-REY L-PCR 20 ± 2 g). El intercambio de gases se midió en todos los tratamientos entre las 14:00 y 15:00 h, cada 4 d, entre el cuarto y décimo sexto día después del último riego. Después de éste día las plantas con riego suspendido tenían únicamente hojas marchitas y senescentes. Las variables fueron evaluadas con un sistema portátil y abierto de análisis de gases (CIRAS-1, PPSYSTEMS). La radiación media fotosintéticamente activa varió entre 115 y 615 $\mu\text{moles m}^2 \text{s}^{-1}$. Se realizaron mediciones instantáneas de asimilación de CO_2 (A), tasa transpiratoria (E), conductancia estomática (gs) y temperatura de la hoja. El uso eficiente del agua instantáneo se estimó con la relación de la asimilación de CO_2 entre la tasa de transpiración (A/E) (Campos *et al.*, 2009).

Resultados y discusión

Efecto de la vermicomposta en la retención de humedad del suelo

El efecto de la vermicomposta ($p \leq 0.01$) explicó las diferencias ($p \leq 0.05$) del contenido de humedad del suelo, registradas después de la suspensión de riego (Figura 1-Cuadro 2). La interacción significativa ($p \leq 0.01$) cultivares x proporción de vermicomposta se detectó 59 y 64 d después de la siembra (1 y 5 d después de la suspensión de riego y de la antesis; DDA).

El análisis de los efectos principales de cada factor muestra que con 3 % de vermicomposta la humedad retenida durante el periodo de toma de datos (37 d) fue en promedio 30 % superior respecto al testigo (Cuadro 2). Este resultado muestra que la vermicomposta podría tener efectos benéficos en los tratamientos con déficit de humedad al mantener humedades mayores al PMP, en promedio 2 d más que el testigo, a partir del riego de saturación (Figura 1-Cuadro 2).

Destacó el hecho de que 6 d después de la suspensión de riego (65 DDS) todos los tratamientos presentaron contenidos de humedad equivalente al PMP

(Figura 1-Cuadro 2). Este resultado se consideró como el momento en que las plantas se encontraron en condiciones de déficit de humedad.

El incremento de la humedad retenida (Cuadro 2) con proporción de 3 % de vermicomposta en comparación con el testigo, puede atribuirse a la mayor porosidad del sustrato (Cuadro 1). Al respecto, algunos autores han observado que la porosidad total (Ghassemi *et al.*, 2010) y características específicas como orientación (Sasal *et al.*, 2006), tamaño (Dikinya *et al.*, 2007), volumen y continuidad (Gebhardt *et al.*, 2008) de los poros influyen en la conductividad hidráulica del suelo y su capacidad para almacenar agua.

La humedad retenida se incrementó significativamente en el punto de marchitez permanente ($p \leq 0.05$) con el aumento de la proporción de vermicomposta (Cuadro 1). De acuerdo con Foley y Cooperland (2002) la retención de humedad para un amplio rango de tensiones se debe a que con la adición de materia orgánica se disminuye la densidad aparente y se incrementa la porosidad total; y de forma específica, el agua retenida a capacidad de campo incrementa con la porosidad del sustrato, al mismo tiempo que los poros de tamaño pequeño retienen más agua en el punto de marchitez permanente lo que reduce la humedad disponible para las plantas. Los mismos autores señalaron que otro factor que puede disminuir el agua disponible en suelos con reciente incorporación de materia orgánica, es el incremento de la temperatura del sustrato, debido a la actividad microbiana que incrementa con la materia orgánica en el suelo.

Cuadro 2. Significancia de los niveles de factores principales y sus interacciones para el contenido de humedad gravimétrico (%), en las unidades experimentales en tratamiento con suspensión de riego.

	DÍAS DESPUÉS DE LA SIEMBRA																	
	59	64	65	66	68	69	71	72	74	75	76	77	79	80	81	84	85	100
Vermicomposta (%)																		
0.0	13.61c	6.98c	5.70c	5.19c	4.82c	4.38c	3.46c	3.39c	3.06c	2.88b	2.75b	2.61b	2.30b	2.18b	2.06b	1.83b	1.65b	0.72b
1.5	14.31b	7.80b	6.62b	5.98b	5.52b	5.08b	4.02b	3.97b	3.58b	3.40b	3.27b	3.11b	2.69b	2.57b	2.42b	2.21b	2.04b	0.98b
3.0	15.01a	8.60a	7.53a	6.96a	6.51a	6.08a	5.01a	4.95a	4.56 ^a	4.40a	4.28a	4.12a	3.76a	3.61a	3.46a	3.20a	2.97a	1.90a
Cultivar																		
Susceptible	14.36a	7.85a	6.76a	6.20a	5.78a	5.32a	4.27a	4.19a	3.85 ^a	3.68a	3.58a	3.43a	3.05a	2.93a	2.77a	2.53a	2.30a	1.43a
Tolerante	14.26a	7.74a	6.47a	5.88a	5.45b	5.04a	4.05a	4.01a	3.62 ^a	3.44a	3.29a	3.13a	2.78a	2.64a	2.52a	2.29a	2.14a	1.00b
MEDIA GENERAL	14.31	7.79	6.61	6.04	5.61	5.18	4.16	4.10	3.73	3.56	3.43	3.28	2.91	2.78	2.64	2.41	2.21	1.20
Cultivar	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*
Vermicomposta	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
Cultivar x vermicomposta	*	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS						

Valores seguidos con la misma letra en cada columna son significativamente similares (Tukey, $p \geq 0.05$); **=altamente significativa ($p \leq 0.01$); *=significativa ($p \leq 0.05$); NS=no significativa. n = 9 para vermicomposta y 12 para cultivar.

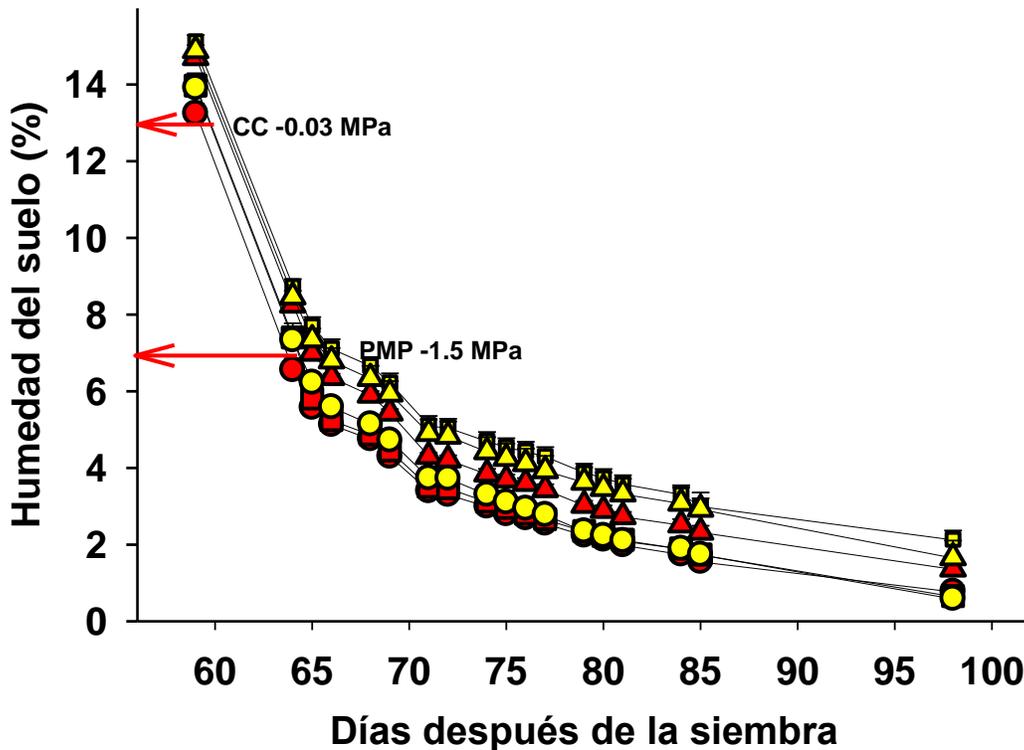


Figura 1. Humedad del suelo, determinada por gravimetría, de macetas con plantas de frijol susceptible (símbolos rojos) y tolerante (símbolos amarillos) a sequía, con suspensión de riego a partir de la antesis (59 d después de la siembra). Sustratos: suelo (testigo) (●, ●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■, ■) y suelo con 3 % de vermicomposta (▲, ▲). CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente; n=5.

Hudson (1994) demostró la relación lineal entre la cantidad de materia orgánica aplicada al suelo y el agua disponible para la planta, pues el agua incrementó más de 60 % cuando la materia orgánica fue de 4 %. En el presente estudio el incremento del contenido de materia orgánica y de la humedad aprovechable no fue significativo (Cuadro 1), y si hubo incremento en la porosidad, lo que parece depender de ciertas características de la materia orgánica aplicada, como la naturaleza bioquímica de los compuestos húmicos presentes en la

vermicomposta. Al respecto, Piccolo *et al.* (1996) sugieren que los compuestos húmicos adicionados al suelo modifican sus propiedades e incrementan la retención de humedad si su contenido de grupos hidrofílicos es alto, lo que, a la vez dependerá de la naturaleza química de esas sustancias.

Conductancia estomática

Analizando los efectos principales de cada factor se observó que 1.5 y 3 % de vermicomposta en el sustrato disminuyó la g_s ($p \leq 0.05$) en 36.15 y 61.54 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respectivamente. Además, como podría esperarse, la suspensión de riego disminuyó la g_s en 71.43 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ respecto a la condición con riego; mientras que en el cv. tolerante a la sequía la g_s promedio fue 13.15 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ menor que en el susceptible (Cuadro 3).

Ambos cultivares con riego, entre los 4 y 13 d después de la antesis (63 y 71 DDS), presentaron valores similares ($P \geq 0.05$) de g_s y en ambos disminuyó significativamente con la vermicomposta. En la condición de riego la g_s presentó fluctuaciones parcialmente diferentes entre los cultivares desde los 4 y hasta 16 d después de antesis (63 a 75 DDS). Sin embargo, los valores de la g_s mayores en ambos cultivares y condición de humedad se presentaron en ausencia de vermicomposta; con excepción de los tratamientos con riego que tendieron a igualar sus valores a los 71 DDS, que se registró como un día nublado, con radiación fotosintéticamente activa media de 116 $\text{mmol m}^{-2} \text{s}^{-2}$ (Figura 3 A-B).

Respecto a los anterior, se ha señalado que la disminución de la conductancia estomática en los periodos de restricción de humedad está relacionada con los cambios del potencial de agua del suelo y de las señales no hidráulicas que la raíz envía al vástago, en menor medida que con el potencial de agua de la hoja, lo que ayuda a entender porqué la conductancia estomática puede disminuir aún cuando la planta está túrgida (Bates y Hall, 1981; Comstock, 2001; Aguirre-Medina *et al.*, 2008); con los resultados obtenidos en este trabajo, se puede especular que la vermicomposta aún en tratamientos con riego, disminuye los potenciales de agua a un nivel suficiente para que la planta responda reduciendo la g_s .

Cuatro días después de la suspensión de riego (63 DDS) la gs en ambos cultivares disminuyó cerca del 50% ($p \leq 0.05$) en los tratamientos con vermicomposta, respecto a su testigo; aunque la caída de gs por efecto de la vermicomposta presentó patrones similares en ambos cultivares, el cv. tolerante a sequía mostró valores menores con ambas concentraciones de vermicomposta (Figura 3 A-B).

Las interacciones humedad x cultivar, humedad x vermicomposta, cultivar x vermicomposta para la gs fueron significativas (Cuadro 3), y el efecto de algunas de las interacciones señaladas se observa en los valores promedio por tratamientos presentados en la figura 2 (A-B); que evidencian resultados diferenciales entre cultivares. Bajo condición de riego, el cultivar susceptible disminuyó ($p \leq 0.05$) el valor promedio de su gs con 3% de vermicomposta, sin mostrar diferencia entre el tratamiento testigo y la proporción de vermicomposta 1.5%. En cambio, el cultivar susceptible sin vermicomposta y con riego presentó el valor promedio más alto ($p \leq 0.05$) de gs, mientras que entre 1.5 y 3% de vermicomposta no hubo diferencia. Para ambos cultivares en condición de suspensión de riego no hubo diferencias ($p \geq 0.05$) asumidas por efecto de la vermicomposta (Figura 2 A-B).

Asimilación neta de CO₂

El análisis de efectos de los factores principales muestra que la vermicomposta afectó ($p \leq 0.05$) negativamente la asimilación neta de CO₂ (*A*), y el efecto dependió de su concentración en el suelo. En promedio la *A* disminuyó en 20 % ($1.28 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) con la adición de 1.5 % de vermicomposta en el suelo, mientras que con la adición de 3% esta se redujo en 35 % ($2.25 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Conductancia estomática (gs), asimilación de CO₂ (A), transpiración (E), uso eficiente del agua (UEA) y temperatura foliar (T) en frijol susceptible y tolerante a sequía, cultivados en suelo sin o con vermicomposta como sustrato y riego en el ciclo completo o suspensión a partir de la antesis, en invernadero.

Vermicomposta (%)	gs (mmol m ⁻² s ⁻¹)	A (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	E (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	UEA (A/E)	T (°C)
0.0	137.45a	6.41a	3.41a	0.0020a	26.34b
1.5	101.30b	5.13b	2.73b	0.0020a	26.20b
3.0	75.91c	4.16c	2.26c	0.0021a	26.74a
Cultivar					
Susceptible	111.15a	5.11a	2.94a	0.0018b	26.21b
Tolerante	98.00b	5.33a	2.64a	0.0021a	26.66a
Humedad					
Riego	139.26a	6.79a	3.5a	0.0021a	25.69b
Suspensión	67.83b	3.45b	2.03b	0.0018b	27.21a
MEDIA *	102.21	5.22	2.79	0.0016	26.43
Humedad x Cultivar	*	NS	*	**	*
Humedad x Vermicomposta	*	NS	NS	NS	*
Cultivar x Vermicomposta	*	NS	*	NS	NS

Medias con letra diferente en columna son significativamente distintas (Tukey, $p \leq 0.05$). **= significancia ($p \leq 0.01$);

*=significancia ($p \leq 0.05$); NS=no significancia. n = 216 para cultivares y humedad, y 144 para vermicomposta

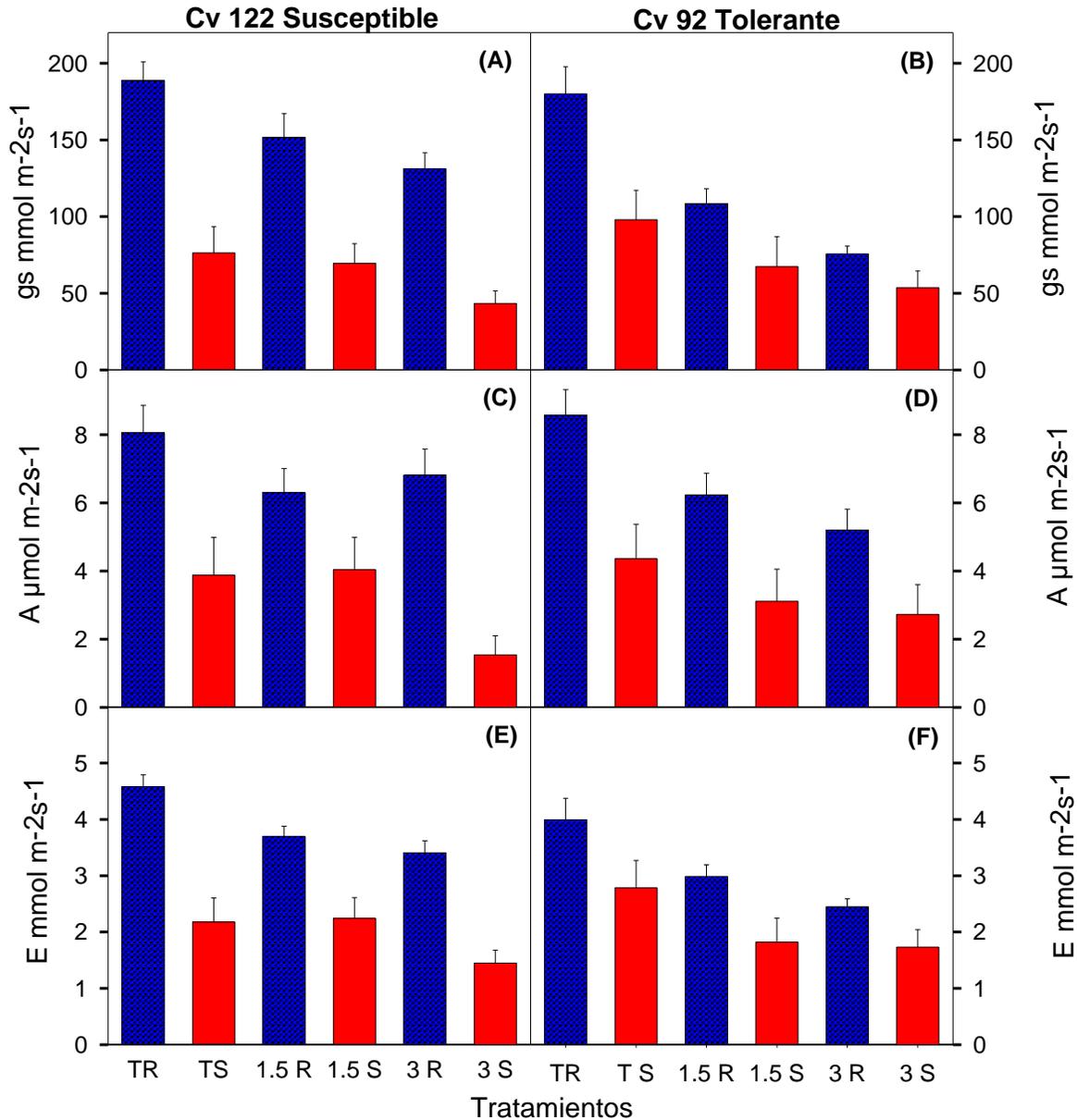


Figura 2. Conductancia estomática (A-B), asimilación de CO₂ (C-D) y transpiración (E-F) en frijol susceptible y tolerante a sequía, cultivado en invernadero con suelo y diferentes porcentajes de vermicomposta y riego o suspensión a partir de la floración. Tratamientos: testigo con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y su suspensión (1.5S), suelo con 3 % de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S). n=36.

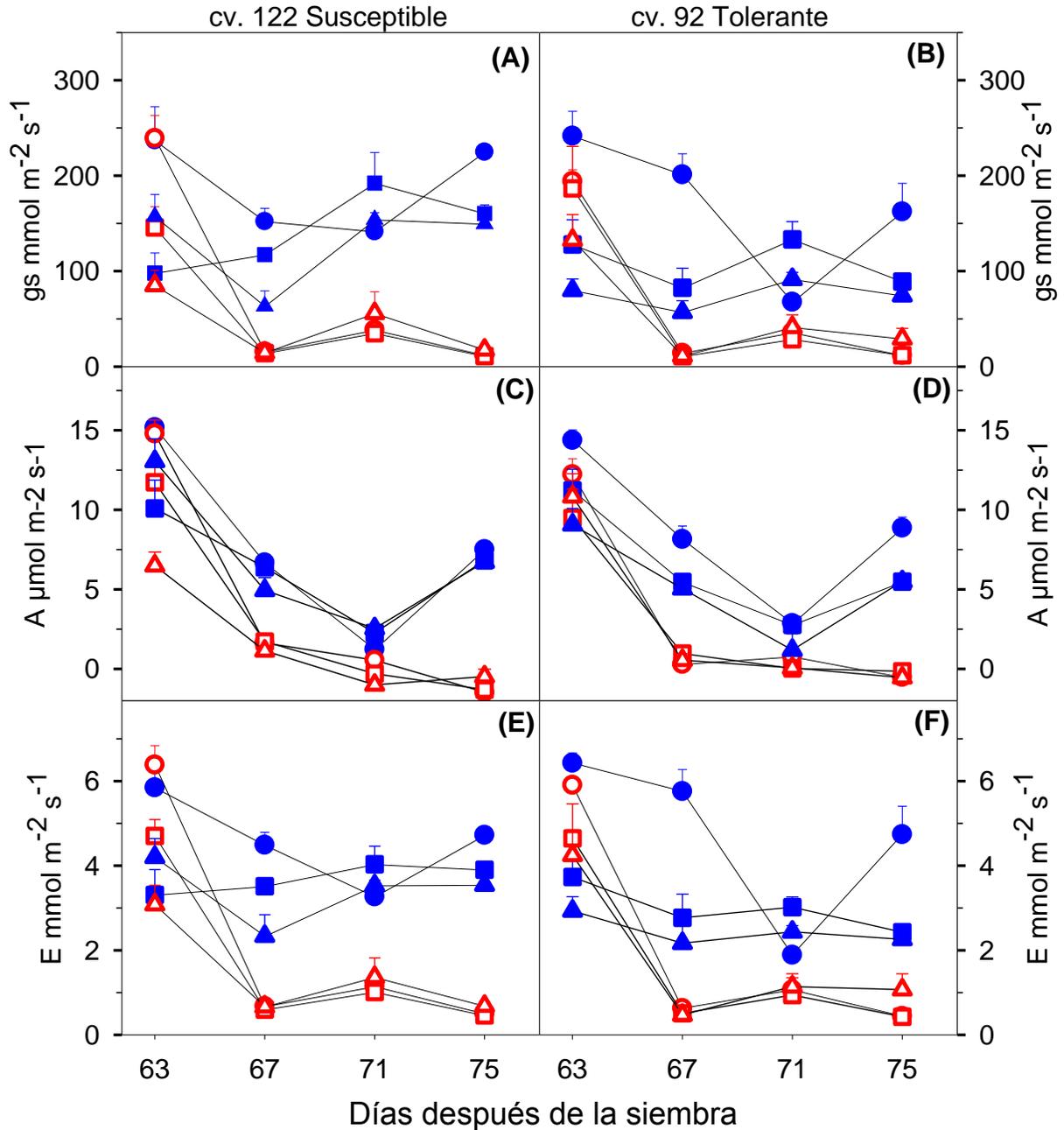


Figura 3. Conductancia estomática (A-B), asimilación neta de CO₂ (C-D) y transpiración (E-F) de frijol susceptible y tolerante a sequía, cultivado en invernadero, con riego (símbolos llenos), con suspensión de riego a partir de la antesis (símbolos vacíos), en suelo (●, ○), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■, □) y suelo con 3 % de vermicomposta (▲, △). Los datos corresponden a 4, 8, 12 y 16 d después de la antesis. n=9.

El cv. susceptible a la sequía presentó mayor apertura estomática respecto al tolerante pero las tasas de asimilación fueron similares entre los cultivares (Cuadro 3). En relación con lo anterior, Flexas y Medrano (2002) señalaron que, a pesar de la co-regulación entre la g_s y la A , la ribulosa bifosfato carboxilasa (enzima que cataliza la asimilación de CO_2) mantiene su actividad aun cuando los valores de g_s sean bajos. La regulación, aparentemente independiente de los procesos metabólicos se ha visto reflejada en la velocidad de su recuperación en experimentos con suspensión de riego y rehidratación, en los que la fotosíntesis se reactiva más rápido que la apertura estomática (Miyashita *et al.*, 2005).

La suspensión de riego disminuyó cerca de 51% ($p \leq 0.05$) los valores de la A ($3.34 \mu\text{mol } CO_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), respecto al riego. Ambos cultivares presentaron una A similar ($p \geq 0.05$) entre sí, en todas las proporciones de vermicomposta y condición de riego evaluadas (Cuadro 3). Sin embargo, los cultivares reaccionaron diferente a la combinación de riego y vermicomposta (Figura 2 C-D). La vermicomposta no tuvo efecto negativo ($p \geq 0.05$) para la A del cultivar susceptible bajo ambas condiciones de humedad; pero, el cultivar tolerante con riego disminuyó su A ($p \leq 0.05$) con 1.5% de vermicomposta respecto al testigo, manteniendo esa reducción con 3% de vermicomposta.

Ambos cultivares disminuyeron su A significativamente (80 % en promedio) entre los primeros 4 y 12 d de antesis (63 a 71 DDS) en condiciones de riego (Figura 3 C-D). Diversos factores pueden disminuir la A en las plantas; entre ellos está la senescencia natural del aparato fotosintético en las hojas y la planta y condiciones ambientales extremas inductoras de estrés como frío, calor, alteraciones de los patrones de irradiancia, entre otros (Lawlor, 2009). El caso de la disminución de la irradiancia, junto con la de la temperatura, por periodos nublados prolongados es común en los cultivos del ciclo primavera-verano en la región en la que se desarrolló el estudio (García, 2004). Así, la disminución de la A coincidió con la caída significativa de la temperatura de la hoja (Figura 4) y del ambiente (datos no presentados). El efecto del ambiente temporal (entre los 58 y 71 DDS) en la A de

ambos cultivares con riego fue evidenciado con su recuperación parcial (entre 62 y 80 %) en oposición con la senescencia total de las hojas y la planta (Figura 3 C-D).

Los cambios de la *A* en el tiempo, en ambos cultivares tuvieron tendencias similares al testigo en las diferentes proporciones de vermicomposta; sin embargo, la caída de la *A* de los tratamientos con suspensión de riego fue significativamente más acelerada que con riego constante. Así, después de 8 d sin riego la disminución de la *A* fue significativa en todos los tratamientos con vermicomposta, respecto a su testigo, y la reacción después de 8 d sin riego fue la inhibición total de la *A* (Figura 3 C-D).

Transpiración

La adición de vermicomposta disminuyó ($p \leq 0.05$) la transpiración (*E*) en 20 ($0.68 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y 23 % ($1.15 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) con 1.5 y 3 % de vermicomposta, respectivamente. Aunque los cultivares presentaron una *E* similar entre sí ($p \geq 0.05$), la suspensión del riego disminuyó en promedio 58 % ($1.47 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) los valores de la *E* (Cuadro 3).

Se observó que la *E* de ambos cultivares con riego en suelo sin vermicomposta, fluctuó ampliamente entre los 63 y 71 DDS (Figura 3 E-F). En contraste, similar a la *gs* y la *A*, la *E* de ambos cultivares disminuyó a valores cercanos a cero con la suspensión del riego desde los 8 d después de antesis.

Las interacciones condición de humedad x cultivar y cultivar x vermicomposta, fueron significativas ($p \leq 0.01$) para la *E* (Cuadro 3). La *E* del cultivar susceptible con riego descendió ($p \leq 0.05$) en los tratamientos con 1.5 y 3% de vermicomposta en comparación con el suelo solo, este efecto no fue observado en los tratamientos con suspensión de riego. La reducción ($p \leq 0.05$) de la *E* del cultivar tolerante se percibió sólo con riego y 3% de vermicomposta en relación al suelo solo (Figura 2 E-F).

Uso eficiente de agua

La vermicomposta como factor principal no tuvo efecto ($p \leq 0.05$) en la reducción del UEA. La suspensión del riego disminuyó en promedio 14 % el UEA en la etapa

reproductiva del frijol. Como podría esperarse, el cv tolerante a la sequía presentó UEA 14% mayor ($p \leq 0.05$) que el cv susceptible (Cuadro 3).

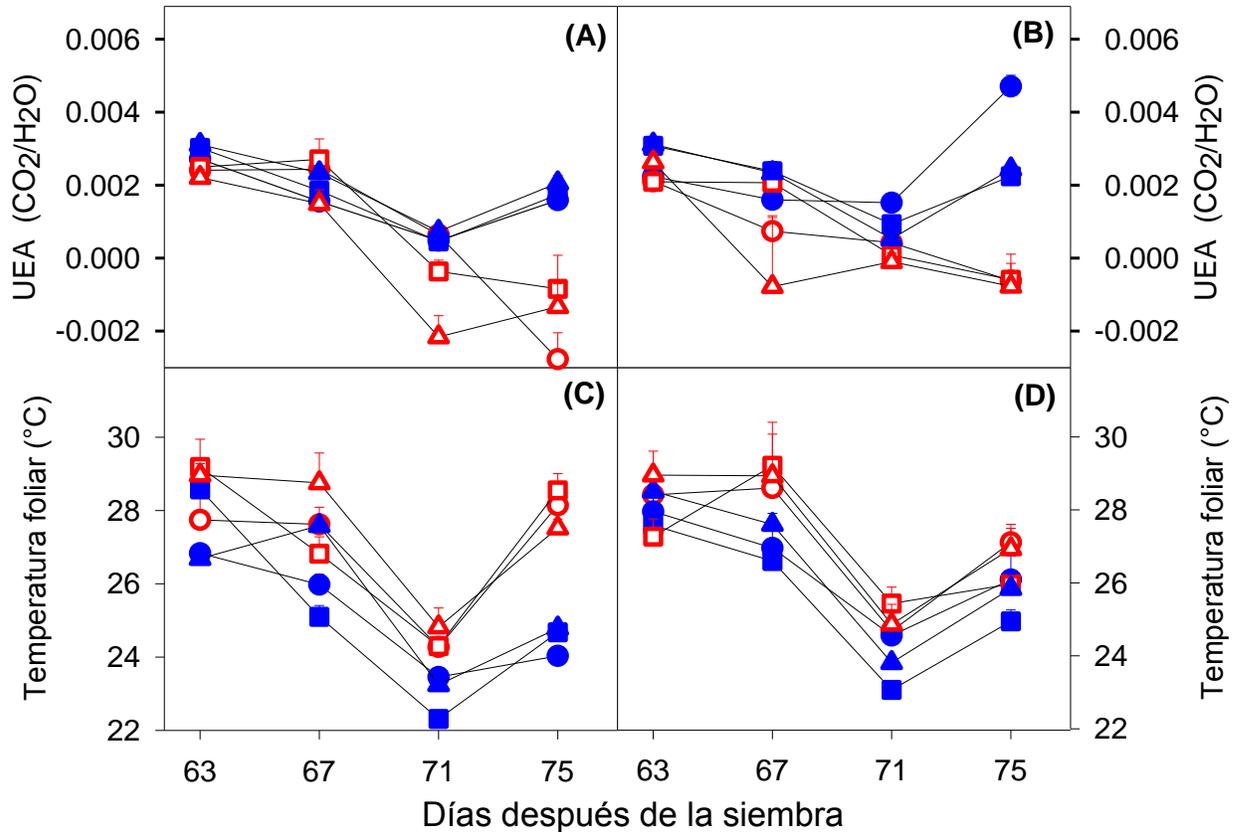


Figura 4. Uso eficiente del agua (A-B) y temperatura foliar (C-D) de frijol cultivado con riego (símbolos llenos) o su suspensión a partir de la antesis (símbolos vacíos) en invernadero en suelo (●, ○), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■, □) y suelo con 3 % de vermicomposta (▲, △). (n=9).

El cv. tolerante a la sequía con riego y suelo solo presentó un UEA mayor que el susceptible, pero con 1.5 y 3 % de vermicomposta se igualaron los valores entre los cultivares. En contraste, la suspensión del riego, en ausencia y con vermicomposta igualó el UEA de los cultivares, y lo llevó a valores de $0 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. (Figura 5 A-B). El UEA de todos los tratamientos disminuyó entre los 4 y 12 d después de la antesis (63 a 71 DDA). En los siguientes 4 d (entre los 71 y 75 DDS)

los tratamientos con riego recuperaron parcialmente el UEA; en contraste, los tratamientos sin riego mantuvieron los valores menores ($p \leq 0.05$, Figura 4 A-B).

Las interacciones humedad x cultivar fue significativa ($p \leq 0.01$) para UEA (Cuadro 3).

Temperatura foliar

La temperatura foliar se incrementó ($p \leq 0.05$) con 3 % de vermicomposta y suspensión de riego, respecto a sus testigos correspondientes. El cultivar tolerante también registró temperatura foliar mayor que el cv susceptible (Cuadro 3).

Aunque, en general los tratamientos con riego mantuvieron la temperatura foliar menor que los sometidos a la suspensión de éste, durante los 16 d de la evaluación no se presentaron tendencias únicas en los cambios (Figura 4 C-D). La temperatura foliar de todos los tratamientos disminuyó dramáticamente 12 d después de la antesis (71 DDS). Sin embargo, esta caída fue debida a la disminución de la irradiancia, no a los tratamientos.

En la temperatura foliar las interacciones humedad x cultivar y humedad x vermicomposta fueron significativas ($p \leq 0.01$); sin embargo en los valores promedio por tratamiento no hubo diferencias ($p \geq 0.05$ – Figura 5 C-D).

Se ha documentado que la incorporación de vermicomposta incrementa la actividad microbiana en el suelo (Joshi *et al.*, 2009). Lo anterior puede ser benéfico para las plantas, pero también puede afectarlas debido al incremento de la temperatura del sustrato y competencia por el agua entre las poblaciones microbianas y las plantas (Foley y Cooperland, 2002). El incremento de la temperatura foliar, en el presente estudio puede tomarse como evidencia de que la vermicomposta incrementó conjuntamente la temperatura del microambiente y de los tejidos de la planta (Cuadro 3).

Se ha sugerido que la temperatura foliar puede usarse para diferenciar líneas tolerantes al déficit de humedad; en el presente estudio se vinculó con la característica de tolerancia de los cultivares. En estudios previos, lo anterior se atribuyó al hecho de que la temperatura foliar es una característica fisiológica

compleja determinada por factores como el movimiento de la hoja, el ángulo de exposición al sol y el número y tamaño de tricomas (Rodríguez, 2008)⁴.

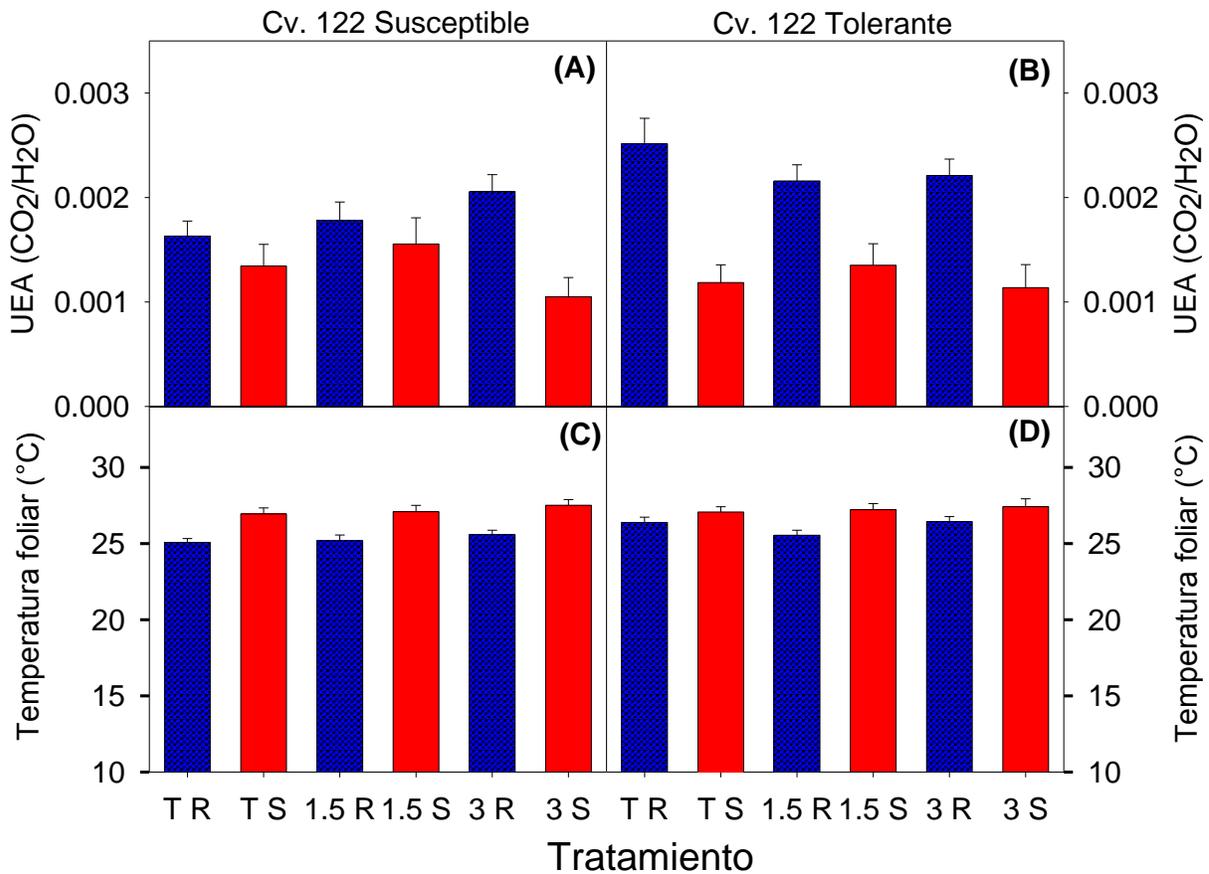


Figura 5. Uso eficiente del agua (A-B) y temperatura foliar (C-D) de plantas de frijol susceptible y tolerante a sequía cultivado en invernadero en diferentes sustratos y riego durante el cultivo o su suspensión a partir de la antesis. Tratamientos: testigo con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3 % de vermicomposta con riego (3R) y su suspensión (3S). n=36.

⁴ Rodríguez, G. M. N. 2008. Selección de líneas de frijol tolerantes a la sequía con base en respuestas de la planta al estrés hídrico. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. Pp. 115

Las respuestas estomáticas observadas en los diferentes tiempos de toma de datos concuerdan parcialmente con lo reportado por Reynolds *et al.* (2010), quienes mostraron que la respuesta estomática al déficit de humedad es compleja debido a la sensibilidad estomática alta a las condiciones externas (temperatura, viento, luminosidad), lo que genera un comportamiento oscilatorio con un amplio rango de respuestas. Estos autores puntualizaron que las leguminosas son sensibles pues responden cerrando los estomas ante un estrés moderado indicando una tendencia a priorizar sus relaciones hídricas.

El efecto del déficit de humedad sobre la fotosíntesis es consistente con un patrón gradual de respuesta que inicia con un ajuste del metabolismo, y que bajo condiciones severas provoca la inhibición total; en un análisis de la literatura reportada para plantas C3, se concluyó que una conductancia estomática $<100 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ refleja un estrés severo durante el cual comúnmente se reporta un decremento de la actividad Rubisco; mientras que la fotoinhibición permanente puede ocurrir a una $gs <50 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Flexas y Medrano, 2002). Bajo condición de suspensión de riego, valores de gs menores a $<100 \text{ mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ se registraron a partir del día 8 después de la suspensión del riego en ambos cultivos evaluados.

Resultados similares en los que la gs y la E disminuyen drásticamente a partir de los primeros días de suspensión del riego, señalando que la disminución de la E por el déficit de humedad se debe principalmente a la disminución de la gs , fueron reportados por Liu *et al.* (2005). Estos mismos autores mostraron que en plantas de soya con déficit de humedad moderado en el suelo, la gs disminuyó linealmente con el incremento de ácido abscísico en el xilema, lo que indicó que ésta hormona puede ser responsable de la reducción de la gs en fases iniciales del secado del suelo.

En girasol se observó que una mayor concentración de Ca^{+2} y nitratos en la savia del xilema estuvieron positivamente correlacionados con una mayor sensibilidad del estoma al ácido abscísico (ABA) producido en condición de déficit hídrico; por lo que se especula que la respuesta estomática puede estar modulada por el estatus nutricional de la planta (Schurr *et al.*, 1992). Las proporciones de nutrientes contenidos en la vermicomposta no se evaluó en la presente investigación;

sin embargo, autores como Arancon *et al.*, (2004) analizaron el contenido de nutrientes en vermicomposta, mostrando que ésta aportó cantidades importantes de C, N, Ca, Fe, K, S, B, Na, Zn, Mn, Mg, P y Cu, y su concentración dependió del material orgánico de origen de la vermicomposta. Por su parte, Jana *et al.* (2010), evidenciaron que la presencia de lombrices en el suelo incrementó el contenido de nitratos, y al respecto sugirieron que este fue un factor que aumentó significativamente la producción de biomasa y la reducción de raíces finas en *Arabidopsis*. En las plantas evaluadas en la presente investigación la biomasa se incrementó a mayor proporción de vermicomposta (datos no presentados).

De otra forma, la caracterización de los sustratos evaluados mostró que la conductividad eléctrica incrementó 37% a mayor proporción de vermicomposta (Cuadro 1). Al respecto, Arancon *et al.* (2008) señalaron que la conductividad eléctrica o niveles excesivos de nutrientes en la vermicomposta elaborada principalmente con estiércol bovino, produjo efectos detrimentales en las tasas del crecimiento en *Petunia (Petunia sp.)*. Por su parte Moreno *et al.* (2008) observaron que en dos cultivares de jitomate la respuesta a la aplicación de vermicomposta elaborada con estiércol de caballo, estiércol de cabra y paja de alfalfa fue diferencial, reportando que el genotipo que registró menor rendimiento a mayor proporción de vermicomposta fue el que presentó el valor más alto para la variable sólidos solubles (6.2° Brix), lo que se atribuyó a la conductividad eléctrica registrada (6.06 dS m⁻¹).

Durante el periodo experimental se observó que en la superficie de las macetas con mayor proporción de vermicomposta se formó una costra delgada en la superficie; Warman *et al.* (2010), propusieron que la formación de estas costras genera condiciones anaeróbicas que pueden resultar en la producción de sustancias fitotóxicas que potencializan el efecto detrimental de las sales solubles del sustrato.

Con los resultados obtenidos en esta investigación, se sugiere que el contenido de sales y algunas características bioquímicas que no se evaluaron en la vermicomposta utilizada tuvieron un efecto detrimental en la respuesta estomática e intercambio de gases en las plantas de frijol aún en condición de riego, efecto que se acentuó en condición de suspensión del riego para ambos cultivares, sin distinguir las características de susceptibilidad o tolerancia de los mismos. Lo anterior

concuenda con lo reportado por Sio-Se *et al.* (2006), quienes concluyeron que la efectividad de los índices de selección en la diferenciación de cultivares resistentes a la sequía varía con la severidad del estrés; llegando a ser no útiles bajo estrés severo.

Aún cuando no fue el objetivo de la presente investigación, es importante destacar que las respuestas observadas en el cultivar tolerante como una menor conductancia estomática e igual asimilación que el cv susceptible son características deseables en un material seleccionado para condiciones de déficit de humedad pues indican una mayor flexibilidad de las líneas tolerantes para responder al estrés..

Conclusiones

La vermicomposta incrementó la porosidad total del suelo, modificando el contenido de humedad a PMP con respecto al testigo; lo anterior aunado al incremento en la conductividad eléctrica afectó la gs, A, E y UEA de las plantas con riego y suspensión de riego.

La suspensión del riego por un periodo de 8 d, después de la antesis suprimió totalmente la gs y el intercambio de gases en ambos cultivares y proporciones de vermicomposta evaluadas.

El cultivar tolerante a la sequía fue más eficiente en el uso del agua en condiciones no restrictivas de humedad, lo que establece su respuesta diferencial aunque, no hubo diferencia con restricción de humedad.

Se sugiere incluir otras variables bioquímicas que son determinantes del efecto de la vermicomposta sobre la respuesta del cultivo de frijol bajo condiciones de déficit hídrico.

Literatura citada

Acosta D E, Trejo L C, Ruíz P L M, Padilla R J S, Acosta G J A. 2004. Adaptación del frijol a sequía en etapa reproductiva. *TERRA Latinoamericana* 22 (1): 49-58.

Aguirre J F, Kohashi-Shibata J, Trejo L C, Acosta-Gallegos J. 1999. Respuesta fisiológica del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) a la sequía en un sistema de raíz dividida. *Agronomía Mesoamericana* 10(1):31-36.

- Aguirre M J F, Acosta G J A, Ruiz P L M, Kohashi S J, Trejo L C. 2002. Diferencias morfológicas de la epidermis de la hoja del frijol común y su relación con tolerancia a sequía. *Agricultura Técnica en México* 28(001):53-64.
- Arancon N Q, Edwards C A, Bierman P, Metzger J D, Lucht C. 2005. Effects of vermicomposts produced from cattle manure, food waste and paper waste on the growth and yield of peppers in the field. *Pedo biologia* 49: 297 – 306.
- Arancon N Q, Edwards C A, Babenko A, Cannon J, Galvis P, Metzger J D. 2008. Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste and paper waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse. *Applied Soil Ecology* 39: 91 – 99.
- Ayers R S, D W Wescot. 1985. *Water Quality for Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev 1, Rome, Italy. 174 p.
- Bates L M, Hall E. 1981. Stomatal closure with soil water depletion not associated with changes in bulk leaf water status. *Oecologia* 50:62-65.
- Barrios-Gómez E J, López-Castañeda C, Kohashi-Shibata J, Acosta-Gallegos J A, Miranda-Colín S, Mayek-Pérez N. 2010. Rendimiento de semilla y sus componentes de frijol flor de mayo en el centro de México. *Agrociencia* 44:481-489.
- Brugnoli E, Lauteri M. 1991. Effects of salinity on stomatal conductance, photosynthetic capacity, and carbón isotope discrimination of salt tolerant (*Gossypium hirsutum* L.) and salt-sensitive (*Phaseolus vulgaris* L.) C3 non-halophytes. *Plant Physiology* 95:628-635.
- Campos H, Trejo C, Peña-Valdivia C B, Ramírez-Ayala C, Sánchez-García P. 2009. Effect of partial rootzone drying on growth, gas exchange, and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae* 120:493-499.
- Castellanos J Z, B S X Uvalle, S A Aguilar (2000) *Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas*. 2ª ed. Colección INCAPA. San Miguel de Allende, Guanajuato. 226 p.
- Comstock J P. 2002. Hydraulic and chemical signaling in the control of stomatal conductance and transpiration. *Journal of Experimental Botany* 53(367):195-200.
- Dikinya O, Lehmann P, Hinz C, Aylmore G. 2007. Using a pore-scale model to quantify of particle re-arrangement on pore structure and hydraulic properties. *Hydrological Processes* 21:989-997.

- Flexas J, Medrano H. 2002. Drought-inhibition of photosynthesis in C3 plants: stomatal and non-stomatal limitations revisited. *Annals of Botany* 89:183-189.
- García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 5ª edición. Instituto de Geografía –UNAM. México, D. F. 90 p.
- Gebhardt S, Fleige H, Horn R. 2009. Effect of compaction on pore functions of soils in a Saalean moraine landscape in North Germany. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172:688-695.
- Ghassemi G K, Ghanehpour S, Mohammadi N A D. 2009 Effects of water limitation on growth and grain filling of faba bean cultivars. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 7(3&4): 442-447.
- Graham P H, Ranalli P. 1997. Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Field Crops Research* 53:131-146.
- Guida dos Santos M, Vasconcelos R R, Ferraz O R, Caruso M E, Pimentel C. 2006. The role of inorganic phosphate on photosynthesis recovery of common bean after a mild water deficit. *Plant Science* 170:659-664.
- Grzesiak S, Lijima M, Kono Y, Yamauchi A. 1997. Differences in drought tolerance between cultivars of field bean and field pea. A comparison of drought-resistant and drought-sensitive cultivars. *Acta Physiologiae Plantarum*. 19(3):349-357.
- Hudson B D. 1994. Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil & Water Conservation* 49(2):189-194.
- Lawlor D W. 2009. Musings about the effects of environment on photosynthesis. *Annals of Botany* 103: 543-549.
- Jana U, Barot S, Blouin M, Lavelle P, Laffray D, Repellin A. 2010. Earthworms influence the production of above – and belowground biomass and the expression of genes involved in cell proliferation and stress responses in *Arabidopsis thaliana*. *Soil Biology & Biochemistry* 42: 244 – 252.
- Joshi D, Hooda K S, Bhatt J C, Mina B L, Gupta H S. 2009. Suppressive effects of composts on soil-borne and foliar diseases of French bean in the field in the western Indian Himalayas. *Crop Protection* 28: 608 – 615.
- Kuehl R (2001) *Diseño de experimentos: Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación*. 2^{da} ed. Thomson. México. 666p.
- Liu F, Andersen M N, Jacobsen S E, Jensen C R. 2005. Stomatal control and water use efficiency of soybean (*Glycine max* L. Merr) during progressive soil drying. *Environmental and Experimental Botany* 54: 33-40.

- Marinari S, Masciandaro G, Ceccanti B, Grego S. 2000. Influence of organic and mineral fertilisers on soil biological and physical properties. *Bioresource Technology* 72:9-17.
- Miyashita K, Tanakamaru S, Maitani T, Kimura K. 2005. Recovery responses of photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance in kidney bean following drought stress. *Environmental and Experimental Botany*. 53:205-214.
- Moreno R A, Gómez F L, Cano R P, Martínez C V, Reyes C J L, Puente M J L, Rodríguez D N. 2008. Genotipos de tomate en mezclas de vermicompost:arena en invernadero. *Terra Latinoamericana* 26: 103 – 109.
- Núñez B A, Ritchie J, Smucker A J M. 1998. El efecto de sequía en el crecimiento, la fotosíntesis y la intercepción de luz en frijol común. *Agronomía Mesoamericana* 9(2):01-08.
- Piccolo A, Pietramellara G, Mbagwu J S C. 1996. Effects of coal derived humic substances on water retention and structural stability of Mediterranean soils. *Soil Use and Management* 12:209-213.
- Sallaku G, Babaj I, Kaciu S, Balliu A. 2009. The influence of vermicompost on plant growth characteristics of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings under saline conditions. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 7 (3&4): 869-872.
- Sasal M C, Andriulo A E, Taboada M A. 2006. Soil porosity characteristics and water movement under zero tillage in silty soils in Argentinian Pampas. *Soil and Tillage Research* 87:9-18.
- Schurr U, Gollan T, Schulze E D. 1992. Stomatal response to drying soil in relation to changes in the xylem sap composition of *Helianthus annuus*. II Stomatal sensitivity to abscísico acid imported from the xylem sap. *Plant, Cell and Environment* 15: 561 – 567.
- Singh R, Sharma R R, Kumar S, Gupta R K, Patil R T. 2008. Vermicompost substitution influences growth, physiological disorders, fruit yield and quality of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.). *Bioresource Technology* 99:8507-8511.
- Sio-Se M A, Ahmadi A, Poustini K, Mohammadi V. 2006. Evaluation of drought resistance índices under various environmental conditions. *Field Crops Research* 98: 222 – 229.
- Ramírez-Vallejo P, Kelly J D. 1998. Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica* 99:127-136.

- Reynolds-Henne C E, Langenegger A, Maní J, Schenk N, Zumsteg A, Feller U. 2010. Interactions between temperature, drought and stomatal opening in legumes. *Environmental and Experimental Botany*. 68:37-43.
- Sánchez H R, Ordaz C V M, Benedicto V G S, Hidalgo M C I, Palma L D J. 2005. Cambios en las propiedades físicas de un suelo arcilloso por aportes de lombricomposto de cachaza y estiércol. *Interciencia* 30(012):775-779.
- Taiz L y Zeiger E. 2002. *Plant Physiology* (3rd. Ed). Sinauer, New York, NY. 690p.
- Tejada M, García-Martínez A M, Parrado J. 2009. Effects of a vermicompost composted with beet vinasse on soil properties, soil losses and soil restoration. *Catena* 77:238-247.
- Terzi, R.; A. Sağlam; N. Kutlu; H. Nar; A. Kadioğlu. 2010. Impact of soil drought stress on photochemical efficiency of photosystem II and antioxidant enzyme activities of *Phaseolus vulgaris* cultivars. *Turkish Journal of Botany* 34: 1-10.
- Troeh F R, L M Thompson. 1993. *Soils and Soil Fertility*. Oxford University Press, USA. 5 Edition. 480p.
- Warman P R, AngLopez M J. 2010. Vermicompost derived from different feedstocks as a plant growth medium. *Bioresource Technology* 101: 4479 – 4483.

Capítulo III. Intercambio de gases, índice de área foliar y prolina en maíz cultivado en vermicomposta y déficit de humedad

Resumen

Existe información limitada respecto al efecto de la aplicación de vermicomposta cuando se asocia a factores de estrés; sin embargo se sabe que su incorporación modifica las características del suelo, con lo que incrementa su capacidad de retención de humedad. Con esos antecedentes, el objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la vermicomposta y la suspensión del riego en el intercambio de gases, crecimiento y contenido de prolina en plantas jóvenes de maíz. Se registró el potencial de agua (Ψ_A) del suelo, la conductancia estomática (gs), transpiración (E), asimilación de CO_2 (A) y eficiencia en el uso del agua (UEA) en un cultivar susceptible y otro tolerante a sequía cultivados en suelo sin y con 1.5 y 3% de vermicomposta y con riego o su suspensión a partir de que la quinta hoja ligulada estuvo totalmente expuesta. El análisis del efecto de los factores principales evidenció que en relación al control, la vermicomposta en 1.5 y 3 % disminuyó ($p \leq 0.05$) la gs 16 y 27 % , respectivamente. Con 3 % de vermicomposta, la A, E y el UEA se redujeron 28, 22 y 21 % respecto al testigo . El cultivar tolerante presentó UEA 21 % mayor que el susceptible; mientras que con siete días de suspensión de riego se mitigó completamente el intercambio de gases. De acuerdo con el análisis de factores principales la vermicomposta afectó sólo la producción de biomasa de raíz, aunque se evidenció la interacción cultivar x vermicomposta para gs, y producción de biomasa en raíz y tallo. La altura de planta y número de hojas liguladas fue similar entre los cultivares; en contraste, el cv susceptible a la sequía acumuló alrededor de 20 % más área foliar y biomasa aérea. No se observó diferencia significativa en el contenido de prolina en plantas de maíz sometidas a riego o suspensión de este. La disminución del intercambio de gases fue proporcional al contenido de vermicomposta. Las variables respuesta crecimiento y acumulación de prolina están determinados por la interacción vermicomposta x cultivar.

Palabras clave: *Zea mays*, biomasa, intercambio de gases, potencial de agua.

Gas exchange, leaf area index and proline in maize cultivated in vermicompost and humidity deficit

Summary

There is limited information of the effect of vermicompost associated to stress factors; nevertheless its soil incorporation modifies the characteristics of the soil by increasing water retention ability. The aim of this study was to evaluate the effect of vermicompost and irrigation interruption in the gas exchange, growth, and proline content in young plants of maize. Soil water potential (Ψ_w), stomatal conductance (gs), transpiration (E), assimilation of CO₂ (A), and water use efficiency (WUE), were registered in bean plants susceptible and tolerant to drought cultivated in soil without and with 1.5 and 3.0 % of vermicompost, well-watered or with irrigation interruption when the fifth ligulate leaf was totally exposed. The analysis of the effect of the principal factors demonstrated that in relation to the control, the vermicompost in 1.5 and 3.0 % diminished ($p \leq 0.05$) the gs 16 and 27 %, respectively. With 3.0 % of vermicompost, A, E, and WUE diminished 28, 22 and 21 % in relation to control. The tolerant cultivar presented an increase of WUE by 21 % than the susceptible one; whereas with seven days of irrigation interruption the gas exchange was mitigated completely. In agreement with the analysis of principal factors, vermicompost affected only the production of root biomass, though the interaction cultivate x vermicompost was demonstrated for gs, and production of biomass in root and stem. The height of plant and number of ligulate leaves were similar between cultivars; in contrast, the drought susceptible cultivar accumulated approximately 20 % more foliate area and foliage biomass. There was not significant difference of proline content in plants growing in well watered and drought conditions. The decrease of gas exchange was proportional to the content of vermicompost. The variable response plant growth and accumulation of proline was affected by the interaction vermicompost x cultivar.

Key words: *Zea mays*, biomass, gas exchange, water stress.

Introducción

El maíz (*Zea mays* L.) ocupa el octavo lugar en la lista de productos agrícolas más importantes del mundo, y es el tercer cereal más producido después del arroz y el trigo (FAOSTAT, 2007). En México es el cultivo más importante desde las perspectivas alimentaria, industrial, política y social, ya que aporta cerca del 65% del volumen de producción de cereales. En 2009 se sembraron 7 726 109.6 ha de este cultivo, de las cuales 18.25 % fueron cultivadas en condiciones de riego y 81.75 % en temporal (SIAP-SAGARPA, 2010).

Bajo el régimen de temporal la lluvia escasa y su distribución aleatoria provoca reducción del rendimiento (Avendaño *et al.*, 2005), ya que las posibilidades de aliviar el estrés hídrico son limitadas (Hayano-Kanashiro *et al.*, 2009). Estudios fisiológicos han mostrado que la reducción en el crecimiento vegetativo, el cierre de estomas, la disminución en la tasa de fotosíntesis y la acumulación de osmolitos que protegen las funciones celulares de los efectos de la deshidratación, son algunas de las respuestas tempranas de la planta, que la protegen del estrés hídrico (Grzesiak, 2001; Avendaño *et al.*, 2005; Grzesiak *et al.*, 2006; Hayano-Kanashiro., *et al.* 2009).

Los cultivares de maíz mejorados producen más biomasa y acumulan más prolina que los cultivares originales, cuando el riego es suspendido por 4, 10, 20 o 38 d. Lo anterior se ha interpretado como reacciones de adaptación y tolerancia a condición de estrés (Avendaño *et al.*, 2005). Zarco *et al.* (2005) compararon cuatro líneas experimentales de maíz cultivadas en condiciones de suspensión permanente del riego a partir de 49 y 97 d de la siembra, sus resultados mostraron que los genotipos tolerantes acumularon más biomasa y tuvieron rendimiento mayor que el testigo, también, observaron que las líneas susceptibles redujeron su fotosíntesis antes que las tolerantes.

Por su parte, Tsoukrianis *et al.* (2009) evidenciaron que las respuestas contrastantes entre cultivares de maíz tolerantes y susceptibles a sequía, muestran el potencial de los primeros desde la germinación, ya que ésta es significativamente mayor en Ψ_A del sustrato entre -1.28 y -1.5 MPa.

La selección de genotipos apropiados para mantener y mejorar la productividad del maíz en condiciones de déficit de humedad representa una

alternativa valiosa para atenuar la caída del rendimiento. Sin embargo, se ha observado que a mayor capacidad de retención de humedad del suelo durante el periodo de sequía intraestival, el comportamiento agronómico y los rendimientos de maíz en zonas de temporal se incrementan (Antonio *et al.*, 2000). Al respecto, se sugiere que la aplicación de vermicomposta al suelo incrementa la porosidad y disminuye la densidad aparente, lo que provee de mayor aireación y mejor drenaje, incrementando su capacidad de retención de humedad (Parthasarathi *et al.*, 2008).

En plántulas de papaya de 50 d de edad sometidas a suspensión de riego por 70 d, la aplicación de 650 g de vermicomposta por planta permitió conservar en 10 % más el contenido relativo de agua de las hojas, en 3.0 % el contenido de humedad del suelo, y prolongó la abscisión de las hojas y el marchitamiento de la planta hasta por 5 d respecto al control (Shivaputra *et al.*, 2004). También la vermicomposta mitiga el efecto inhibitorio de la salinidad del sustrato, en la fotosíntesis y el crecimiento de plántulas de tamarindo (Oliva *et al.*, 2008).

Dado que la respuesta al efecto del estrés por déficit de humedad depende de la especie, la variedad y su tolerancia al déficit de humedad, la etapa fenológica y la severidad del estrés (Peña-Valdivia, 1994), el objetivo de esta investigación fue evaluar el efecto de dos proporciones de vermicomposta en el suelo sobre el intercambio de gases, la producción de biomasa y el contenido de prolina en plantas jóvenes de dos cultivares de maíz susceptible y tolerante a sequía, con riego y suspensión de riego.

Materiales y métodos

Material vegetal

Se utilizaron los cultivares de maíz Tuxpeño ciclo 0 (TC0) y ciclo 8 (TC8) de selección recurrente para tolerancia a sequía donados por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT). La metodología para la selección de estos cultivares con los ciclos de mejoramiento fue descrita por Bolaños y Edmeades (1993).

Las semillas utilizadas en el estudio fueron multiplicadas en el ciclo de siembra primavera-verano de 2008 en el campus Tlaltizapan, Morelos, del CIMMYT. Las

semillas presentaron germinación mayor a 90 % en una prueba estándar de laboratorio, peso individual medio de 28 mg y contenido de humedad de 9 % sin diferencias ($p \geq 0.05$) entre los cultivares (ISTA, 2004).

Sustrato

Se usó suelo agrícola sin mezclar y mezclado con vermicomposta, en proporciones de 1.5 y 3.0 % con base en peso seco, proporciones que correspondieron a 0, 40 y 80 ton ha⁻¹ respectivamente, considerando la densidad aparente del suelo testigo (1.37 g cm⁻³) y una profundidad de 20 cm (Troeh y Thompson, 1993).

La vermicomposta fue aportada por el módulo de abonos orgánicos y lombricultura de la Universidad Autónoma Chapingo. Los materiales usados para la elaboración de la vermicomposta fueron residuos de cosecha de jitomate, hojas secas de fresno y estiércol de bovino en una proporción 40:20:40. El producto obtenido presentó pH 7.2, conductividad eléctrica 3.99 dS m⁻¹ y 21.7 % de materia orgánica.

El suelo se obtuvo de los primeros 20 cm de una parcela agrícola en Texcoco, Estado de México (19° 23' 40" latitud norte y 98° 39' 28" longitud oeste y altitud promedio de 2250 msnm.), su clase textural fue migajón arcillo arenoso. Las mezclas utilizadas se analizaron en el laboratorio de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Los valores para capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) fueron calculados por el método de la olla y la membrana de presión (Castellanos *et al.*, 2000 Cuadro 1).

El agua utilizada para los riegos del cultivo durante el estudio presentó pH de 7.4 y CE de 0.53 ds m⁻¹, valores que descartan riesgo de salinidad, según la clasificación de la calidad de agua apta para riego (Ayers y Wescot, 1985).

Diseño experimental

En el presente estudio se usó el diseño experimental completamente al azar en un arreglo factorial asimétrico 2 x 2 x 3. Los factores de estudio fueron: (a) dos cultivares de maíz (uno susceptible y otro tolerante a sequía); (b) dos condiciones de humedad (riego y su suspensión después de que la quinta hoja ligulada estuvo totalmente

expandida); y (c) tres sustratos (suelo sin y con 1.5 y 3.0% de vermicomposta). Se generaron 12 tratamientos y se establecieron cinco repeticiones de cada uno. La unidad experimental consistió de una maceta con 2 kg de sustrato y dos plantas.

Los análisis estadísticos se realizaron con el paquete estadístico SAS versión 9. El análisis de varianza para los datos tomados de un periodo de tiempo se realizó con el procedimiento GLM, bajo un diseño de mediciones repetidas, considerando los supuestos del modelo de parcelas divididas, en el que las combinaciones factoriales equivalen al efecto de las parcelas completas y las mediciones repetidas en el tiempo equivalen al efecto de las subparcelas (Kuehl, 2001). Los datos tomados por única vez al finalizar el experimento se analizaron con los supuestos del modelo del diseño factorial. Se obtuvo la significancia de los efectos de los factores principales y sus interacciones. La comparación múltiple de medias se realizó con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Condiciones del experimento

El experimento se desarrolló en un invernadero tipo túnel del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México, ubicado en 19° 27' latitud N y 98° 54' de longitud W, altitud de 2220 msnm (INEGI, 2005). El tiempo de evaluación desde la siembra hasta la cosecha de las plántulas fue de 52 días, durante los cuales se registró una temperatura media general de 26 °C con humedad relativa entre 48 y 60 %. No se presentaron plagas ni enfermedades.

Se realizó la siembra de tres semillas por maceta y en el estado V1, primera hoja ligulada totalmente expandida, se seleccionaron y mantuvieron las dos plántulas más vigorosas por maceta y se regaron cada tercer día. Cuando más del 50% de las plántulas tenían la quinta hoja ligulada expuesta (40 d después de la siembra) se aplicó un riego hasta capacidad de campo y se asignaron al azar los tratamientos que serían mantenidos con riego y los que se mantendrían con suspensión.

Cuadro 1. Características fisicoquímicas y constantes de humedad de suelo y las mezclas evaluadas

	Proporción de vermicomposta en el suelo (%)			Media general
	0	1.5	3.0	
Cationes intercambiables				
Ca ⁺⁺ (cmol kg ⁻¹)	15.30b	16.60a	15.26b	15.75
Mg ⁺⁺ (cmol kg ⁻¹)	6.40ab	5.70b	7.43a	6.51
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0.91b	1.22a	1.25a	1.13
Densidad aparente (g cm ³)	1.37a	1.35a	1.30a	1.34
Materia orgánica (%)	1.57a	1.57a	1.66a	1.60
pH (relación 1:2)	7.77a	7.67c	7.71b	7.72
Porosidad total (%)	45.06b	45.73a	48.33a	46.36
Capacidad de campo (%)	12.4a	12.90a	12.80a	12.69
PMP (%)*	6.70b	7.40a	7.70a	7.30
Humedad aprovechable (%)	5.60a	5.40a	5.10a	5.38

*Medias dentro de líneas seguidas con letra diferente son significativamente distintas (Tukey, P≤0.05). PMP: punto de marchitez permanente. n=3.

Los tratamientos con riego se mantuvieron con humedad aprovechable cercana a 80 % durante los 52 d del estudio, mientras que en los de suspensión se dejó de regar durante 12 d, hasta que el peso de las macetas fue constante. Para disminuir la pérdida de agua por evaporación, la superficie de las macetas se cubrió con una capa de unicel granulado de aproximadamente 2 cm de espesor.

Variables evaluadas

El potencial de agua del suelo (Ψ_A) fue evaluado en muestras extraídas de los primeros 10 cm de profundidad de cada maceta. Las muestras fueron incubadas hasta alcanzar el equilibrio termodinámico en cámaras psicrométricas (WESCOR C-52, Inc., Logan, Utha.) conectadas a un microvoltímetro (WESCOR HR-33T, Inc., Logan, Utha.) operado en el modo de punto de rocío. Las muestras procesadas fueron de 8 d sin riego, pues posteriormente la capa superior era muy firme para tomar adecuadamente la muestra.

A partir de la suspensión del riego, en la zona central de la quinta hoja ligulada de cada planta en tres unidades experimentales elegidas al azar, de todos los tratamientos, se realizaron mediciones instantáneas de asimilación de CO_2 (A), transpiración (E) y conductancia estomática (gs). El uso eficiente del agua instantáneo se estimó como la relación de la asimilación de CO_2 entre la tasa de transpiración (A/E) (Campos *et al.*, 2009). Las mediciones se realizaron entre las 14:00 y 15:00 h con un sistema de análisis de gases portátil (CIRAS-1, PPSYSTEMS) por un periodo de 7 d, ya que el enrollamiento de las hojas dificultó su manipulación.

Al cosechar las plantas se determinó la altura con una regla milimétrica. Las estructuras de las plantas fueron pesadas en una balanza electrónica y se determinó el área foliar con un integrador electrónico LICOR LI300 (LI-COR, Inc. Lincon, NE). Las hojas y la raíz se mantuvieron a 80 °C en bolsas de papel por 72 h.

Para determinar el contenido de prolina se siguió el método colorimétrico descrito por Bates *et al.* (1973), en muestras liofilizadas de 1 cm de la zona apical de la raíz principal. Una vez registrados los valores de absorbancia se obtuvo la

concentración de prolina mediante una curva de calibración elaborada con una concentración máxima de 1000 nmoles mL⁻¹.

Resultados y discusión

Humedad en los sustratos durante la suspensión del riego

Se observaron diferencias ($p \leq 0.05$) en el contenido de humedad entre los sustratos a partir del cuarto día y hasta el octavo después de la suspensión del riego, coincidentes con 44 y 48 d después de la siembra (DDS; Figura 1). Ocho días después del último riego los tratamientos con el cultivar tolerante en suelo sin y con 1.5 % de vermicomposta presentaron Ψ_A de -1.5 MPa, que convencionalmente corresponde al punto de marchitamiento permanente, en los demás tratamientos el Ψ_A fue menor a este valor. El Ψ_A menor (-4.2 MPa) fue registrado en el tratamiento con 3.0% de vermicomposta del cultivar susceptible a sequía.

El análisis del efecto de los factores principales mostró que el valor medio de Ψ_A del suelo en los tratamientos del cultivar tolerante fue 24 % (-0.31 MPa) mayor que el del cultivar susceptible. En contraste, los Ψ_A medios de los tratamientos sin y con 1.5 % de vermicomposta fueron similares ($p \geq 0.05$), y con 3.0 % de vermicomposta el Ψ_A medio fue 93 % (-0.82 MPa) menor respecto al suelo sin vermicomposta (Cuadro 2).

El efecto del cultivar es atribuible a cambios anatómicos en diferentes estructuras de la raíz, relacionados con la tolerancia del cultivar e identificados como respuesta a Ψ_A bajos (Peña-Valdivia *et al.*, 2010). Lo anterior fue confirmado por Peña-Valdivia *et al.* (2005) en maíz, quienes observaron un adelgazamiento significativo del espesor de la protodermis y la endodermis, así como la reducción del diámetro de los vasos del xilema en raíces de plántulas del cv Tuxpeño C8 en reacción al Ψ_A bajo. Los autores citados interpretaron estos cambios como el resultado de la selección recurrente para tolerancia a la sequía del maíz. Al respecto, Gil-Pelegrín *et al.* (2005) señalaron que la eficacia en el transporte de agua a través del xilema está condicionada estrechamente por aspectos anatómicos fijados

filogenéticamente y que la diferencia en el tamaño del vaso entre especies influye en los márgenes de eficacia. Por su parte, Steudle (2000) cita que la endodermis y exodermis contribuyen a la regulación del flujo de agua hacia las raíces de maíz crecido en campo, ya que en condiciones de estrés hídrico la formación de laminillas de suberina en las paredes radiales y transversales de las células podría reducir la conductividad hidráulica.

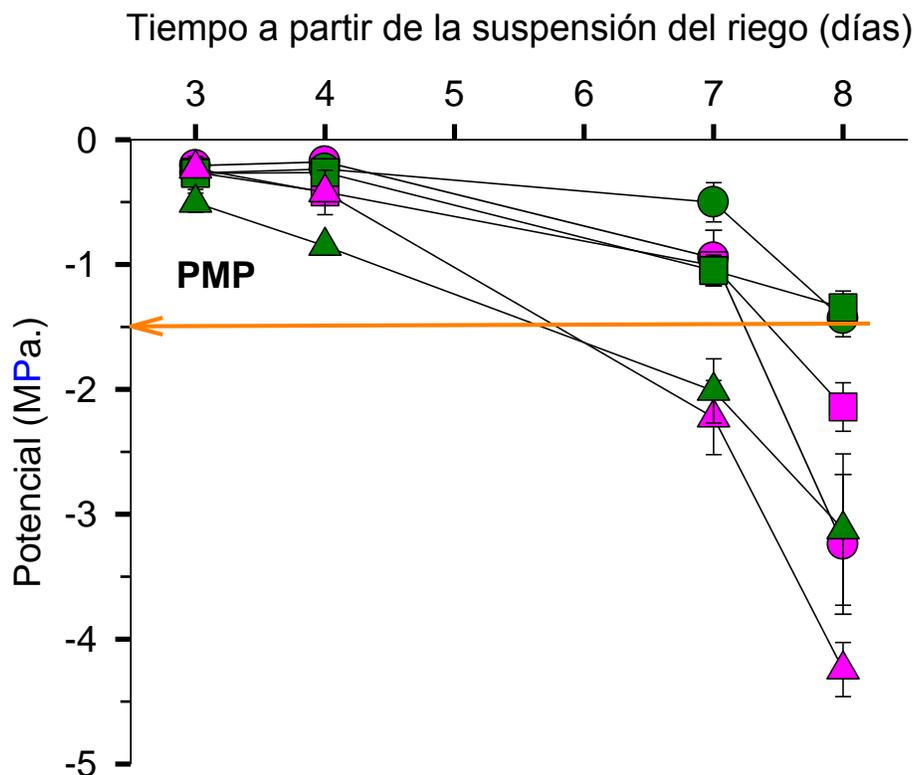


Figura 1. Potencial de agua del suelo (MPa), determinado por psicrometría a 10 cm de profundidad de macetas con plantas de maíz susceptible (símbolos rosa) y tolerante (símbolos verdes) a sequía, con suspensión de riego por 8 d a partir de los 40 d de la siembra. Sustratos: suelo (●, ●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■, ■) y suelo con 3.0 % de vermicomposta (▲, ▲). PMP: punto de marchitez permanente, n=5.

Respecto al efecto de la vermicomposta, el parámetro que presentó diferencias ($p \leq 0.05$) con el incremento de la proporción de vermicomposta fue el punto de marchitamiento permanente (Cuadro 1); esto convencionalmente es interpretado como la retención de humedad por el sustrato, sin que la planta pueda absorberla.

Cuadro 2. Potencial de agua (Ψ_A) en muestras de suelo, sin y con vermicomposta, tomadas a 10 cm de profundidad en macetas con plantas de maíz, susceptible y tolerante a sequía, y suspensión de riego por 8 d, a partir de los 40 d de la siembra .

Factor	Cultivar		Vermicomposta (%)		
	Susceptible	Tolerante	0.0	1.5	3.0
Ψ_A (MPa)	-1.29b	-0.98a	-0.88a	-0.84a	-1.7b
Media			-1.14		

Valores con la misma letra en cada columna son significativamente similares (Tukey, $p \leq 0.05$); $n = 5$.

Rawls *et al.* (2003) señalan en relación a lo antes descrito, que contenidos altos de carbono orgánico en el suelo, hay un incremento en la retención de la humedad, pero la expresión de los cambios difiere con la textura. Estos autores utilizaron un modelo de regresión con una base de datos con 12,000 ejemplos de suelos, y observaron que la retención de humedad de un suelo a -33 KPa se afecta en mayor proporción por el carbono orgánico que a -1500 KPa; sin embargo, también señalaron que esta relación es notablemente compleja y es común encontrar resultados contradictorios en la literatura; como ocurrió en el presente estudio.

Por su parte, Arrieché-Luna y Ruiz-Dager (2010) observaron que en un suelo alcalino, con pH 7.6, similar al usado en el presente estudio, el incremento en la proporción de fertilizante orgánico evidenció mayor actividad microbiana que en un suelo ácido (pH 4.9); esto se atribuyó a que la disponibilidad de nutrientes fue mayor, por que las condiciones para la actividad microbiana fueron mejores. Ésta es una condición que puede incrementar la temperatura del suelo y reducir la humedad

disponible para las plantas (Foley y Cooperland, 2002). Además, Fernández-Luqueño *et al.* (2009) sugieren que la vermicomposta cambia la estructura del suelo y mejora la aireación, con lo que se facilita la evaporación de la humedad del suelo; de ser así, con la condición de déficit de humedad en el presente estudio, resulta desfavorable la presencia de vermicomposta por su efecto negativo en la retención de humedad.

Conductancia estomática e intercambio de gases

El análisis del efecto de factores principales mostró que con 3.0 % de vermicomposta la gs disminuyó ($p \leq 0.05$) 21 % respecto al testigo; sin embargo, no se observaron diferencias ($p \geq 0.05$) para esta variable por efecto del cultivar ni condición de humedad (Cuadro 3).

En condición de riego el cultivar susceptible disminuyó significativamente su gs con ambas proporciones de vermicomposta respecto al suelo solo; mientras que la gs del cultivar tolerante fue similar ($p \geq 0.05$) en suelo con y sin vermicomposta en ambas condiciones de humedad (Figuras 2 y 3 A-B).

En 43 DDS el cultivar susceptible tendió a igualar su gs en todos los tratamientos, como reacción a un día parcialmente nublado, con radiación fotosintéticamente activa promedio de $292 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Además, bajo esta condición, algunos tratamientos del cultivar tolerante a sequía presentaron gs menores que el cv susceptible, sin que se superpusieran. En ambos cultivares la gs alcanzó valores cercanos a cero por efecto de la suspensión del riego, sin distinción de la proporción de vermicomposta, 7 d después de la suspensión del riego (47 DDS Figura 2 A-B).

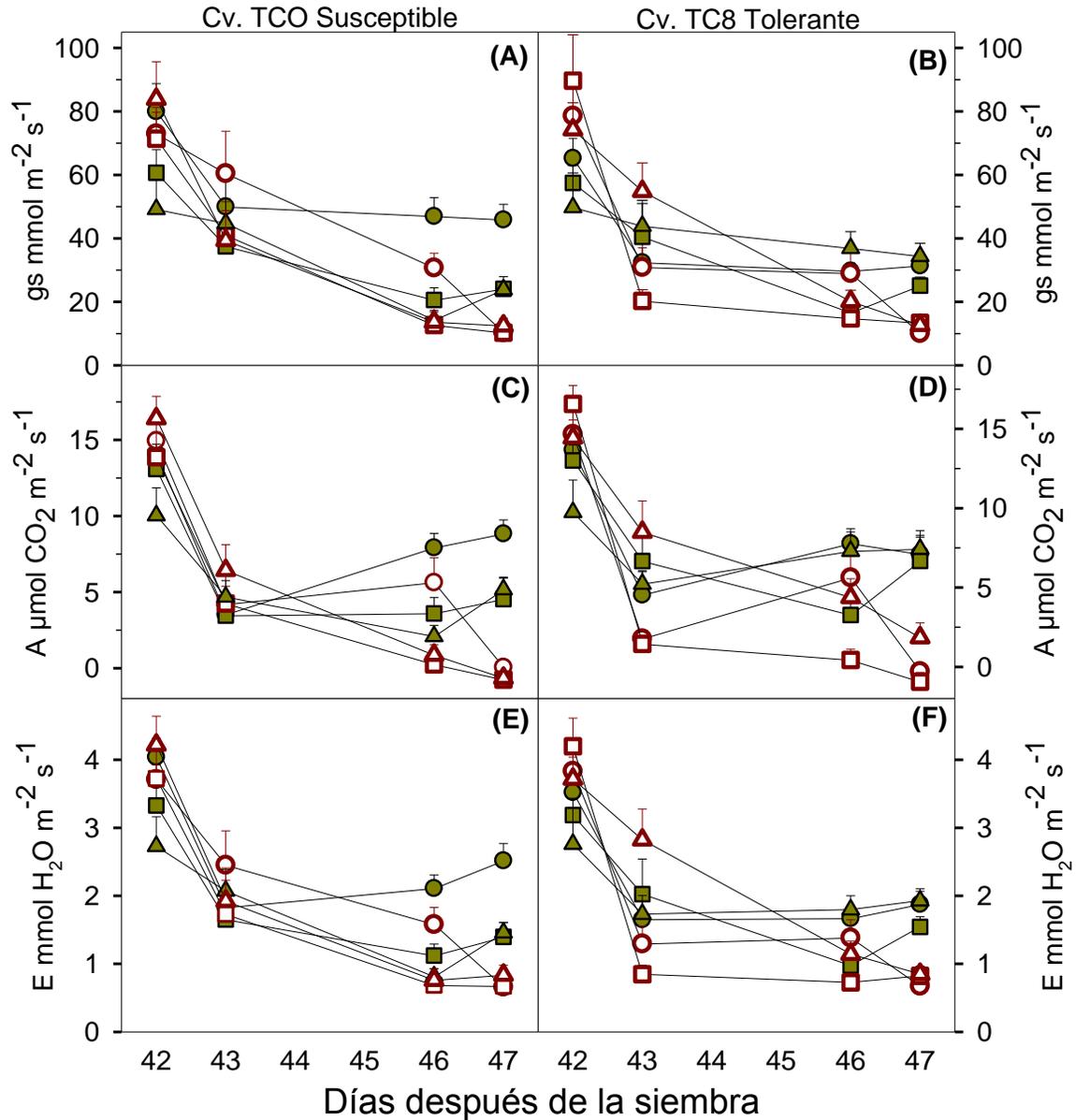


Figura 2. Conductancia estomática (A-B), asimilación de CO₂ (C-D) y transpiración (E-F) en maíz susceptible y tolerante a la sequía, cultivado en invernadero con diferentes sustratos con riego y suspensión. Suelo (●, ○), suelo con 1.5% de vermicomposta (■, □) y suelo con 3.0 % de vermicomposta (▲, △). Símbolos llenos corresponden a los tratamientos con riego continuo y los vacíos a aquellos con suspensión de éste. Los datos corresponden a 2, 3, 6 y 7 d con suspensión de riego; n=9.

El análisis de los valores promedio de los 7 d sin riego y de los tratamientos (Figura 3 A-B) permitió identificar los valores de g_s mayores ($p \leq 0.05$) del cultivar susceptible, con riego y en suelo sin vermicomposta, respecto a las dos proporciones de vermicomposta; mientras que la suspensión de riego no generó diferencias. En contraste, la g_s del cultivar tolerante fue menos afectada y no presentó diferencia ($p \geq 0.05$) entre tratamientos. La interacción cultivar x vermicomposta fue significativa, por lo que los efectos de la vermicomposta sobre la g_s dependen simultáneamente del cultivar y la vermicomposta.

El efecto de los factores principales mostró que la asimilación neta de CO_2 (A) disminuyó ($p \leq 0.05$) 22 % ($1.59 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$) con 3.0 % de vermicomposta en relación al testigo. La suspensión de riego redujo 23 % esta variable ($1.68 \mu mol CO_2 m^{-2} s^{-1}$), respecto a la condición de riego; mientras que ambos cultivares presentaron valores de A similares (Cuadro 3). El cultivar susceptible expresó una A máxima 42 DDS, cuando la RFA fue de $722 \mu mol m^{-2} s^{-1}$ valor que se redujo 70 % un día después (43 DDS); sin embargo, la caída se atribuyó a la disminución de RFA ($292 \mu mol m^{-2} s^{-1}$) por la presencia de nubes. Después de 46 d de la siembra se observaron diferencias parciales entre los tratamientos, y el valor mayor de la A fue expresado por las plantas en suelo sin vermicomposta. Las diferencias incrementaron a los 47 DDS, cuando la A de los tratamientos con suspensión de riego se inhibió completamente en el cultivar susceptible a sequía, y en el cultivar tolerante sólo un tratamiento mantuvo valores ligeramente arriba de cero (Figura 2 C-D).

Aunque los valores medios de la A entre los cultivares fueron similares (Cuadro 3), el patrón de respuesta del cultivar tolerante difirió del susceptible; el primero, en condiciones de riego y en suelo sin vermicomposta, igualó su A 47 DDS a las condiciones generadas por la vermicomposta y la suspensión de riego, inclusive el valor de la A tendió a ser mayor con 1.5 % de vermicomposta; mientras que el cultivar susceptible a la sequía mantuvo los valores mayores de A con riego y suelo sin vermicomposta; pero, la suspensión del riego inhibió totalmente su A sin efecto de la proporción de vermicomposta (Figura 2 C-D).

Los valores promedio de la *A* (Figura 3 C-D) mostraron que el cultivar susceptible a la sequía en condición de riego y 1.5 % de vermicomposta reaccionó diferente que su testigo; esta diferencia se mantuvo con 3.0 % de vermicomposta. En contraste, el cultivar susceptible a sequía evidenció diferencias entre la condición de suspensión de riego y 3.0 % de vermicomposta respecto al suelo sin vermicomposta. La interacción humedad x vermicomposta fue significativa, lo que confirma que el efecto de la falta de humedad del sustrato en la *A* del maíz es modificado por la presencia de vermicomposta en el suelo.

Con 3.0 % de vermicomposta la transpiración (*E*) disminuyó 18 %; en tanto que, el cultivar tolerante a la sequía presentó 10 % menos transpiración que el cv susceptible (Cuadro 3). El cultivar susceptible a sequía en condiciones de riego y sin vermicomposta presentó los valores mayores de *E*, con excepción de los correspondientes a los de 43 DDS (día nublado); en tanto que, 47 DDS los valores de *E* de los tratamientos con vermicomposta se traslaparon. La respuesta a la suspensión de riego fue gradual y el valor mínimo de *E* fue registrado, sin diferencias, 47 DDS, aún en los tratamientos con vermicomposta (Figura 2 E-F).

El cultivar tolerante disminuyó su *E* entre 25 y 75 % 43 DDS; en contraste, este parámetro se mantuvo prácticamente sin cambio en los tratamientos con riego. Además, los tratamientos con suspensión de riego alcanzaron los valores menores de *E* (Figura 2 E-F).

A pesar de las respuestas parcialmente similares de los cultivares, sólo se observaron diferencias en el cultivar susceptible a la sequía en las condiciones generadas por el riego en el suelo sin vermicomposta; en contraste, los valores promedio por tratamiento del cv tolerante a la sequía fueron similares entre sí (Figura 3 E-F).

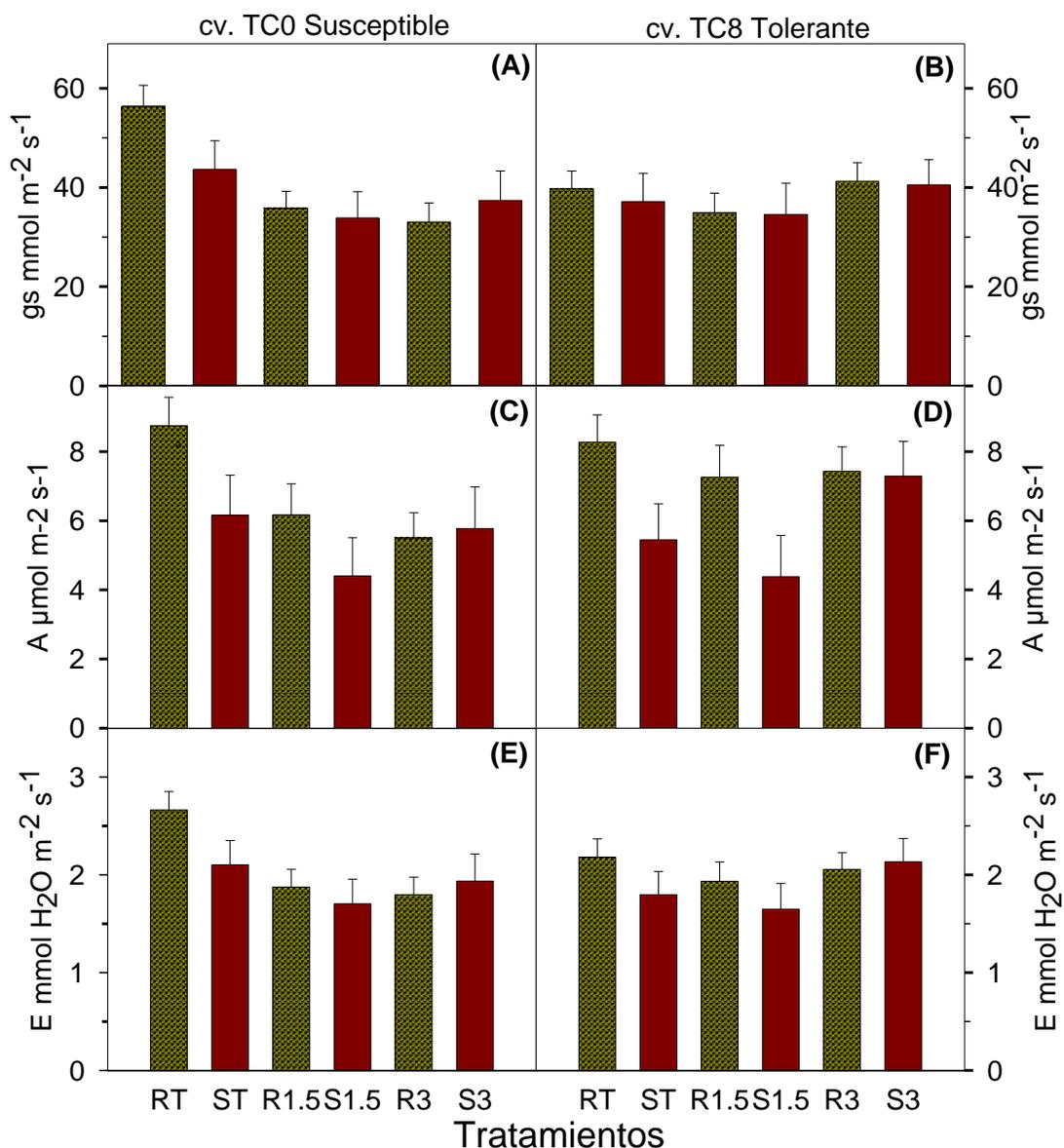


Figura 3. Conductancia estomática (A-B), asimilación de CO₂ (C-D) y transpiración (E-F) de plantas de maíz susceptible y tolerante a sequía, cultivadas durante 52 días en macetas, con diferentes sustratos y riego o su suspensión a partir del día 40 de la siembra y en condiciones de invernadero. Tratamientos: testigo con riego (RT), testigo con suspensión de riego (ST), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3 % de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S). Los datos corresponden a valores promedio de un periodo de 7 d sin riego para los tratamientos con esta condición; n=36.

La eficiencia en el uso del agua disminuyó en 17 % con 3.0 % de vermicomposta, respecto al testigo. Además, como podría esperarse, el cultivar tolerante a la sequía tuvo UEA 21 % mayor ($p \leq 0.05$) que el cultivar susceptible. La suspensión de riego afectó el UEA, pues se redujo 34 % (Cuadro 3).

En la condición de riego el UEA del cultivar susceptible a la sequía se mantuvo constante ($p \geq 0.05$) durante los primeros 2 a 3 d de la toma de datos (42 y 43 DDS); sin embargo, 6 d después (46 DDS) el UEA de las plantas en el suelo sin vermicomposta incrementó significativamente, este incremento fue seguido por el del tratamiento con 1.5 % de vermicomposta; aunque, 47 DDS los valores tendieron a igualarse con los otros tratamientos. En contraste, con la suspensión del riego, las diferencias entre los tratamientos se observaron desde los 43 DDS; en ese momento, el cv susceptible a la sequía, en presencia de 3.0 % de vermicomposta, evidenció los valores mayores de UEA. El UEA cayó a valores ligeramente superior a cero 47 DDS, debido a que el déficit de humedad en el suelo propició la caída del intercambio de gases en las plantas (Figura 4 A-B).

La eficiencia del uso de agua del cultivar tolerante a la sequía, con riego fue afectada significativamente por la presencia de vermicomposta sólo 46 DDS; ya que, 47 DDS el UEA tendió a igualarse entre los tratamientos. El mismo cultivar modificó ($p \leq 0.05$) su UEA con la suspensión del riego a partir de los 43 DDS, y aunque 47 DDS los tratamientos sin y con 1.5 % de vermicomposta tendieron a igualar el UEA, la proporción mayor de vermicomposta incrementó el UEA de este cultivar (Figura 4 A-B).

Los valores medios del UEA de ambos cultivares, mostraron que sólo la combinación de 1.5 % de vermicomposta con la suspensión de riego modificó negativamente su respuesta, respecto a la condición en suelo sin vermicomposta (Figura 5 A). Las interacciones entre factores principales no fueron significativas ($p \geq 0.01$).

El efecto de la vermicomposta como factor principal fue significativo ($p \leq 0.05$) en el incremento de la temperatura foliar (Cuadro 3). Como factores principales el cultivar y régimen de humedad no tuvieron efecto en esta variable; sin embargo, la interacción humedad x vermicomposta sí fue significativa ($p \leq 0.01$). Así, en este

estudio se demostró que el efecto del déficit de humedad en la temperatura foliar es dependiente del tipo de sustrato.

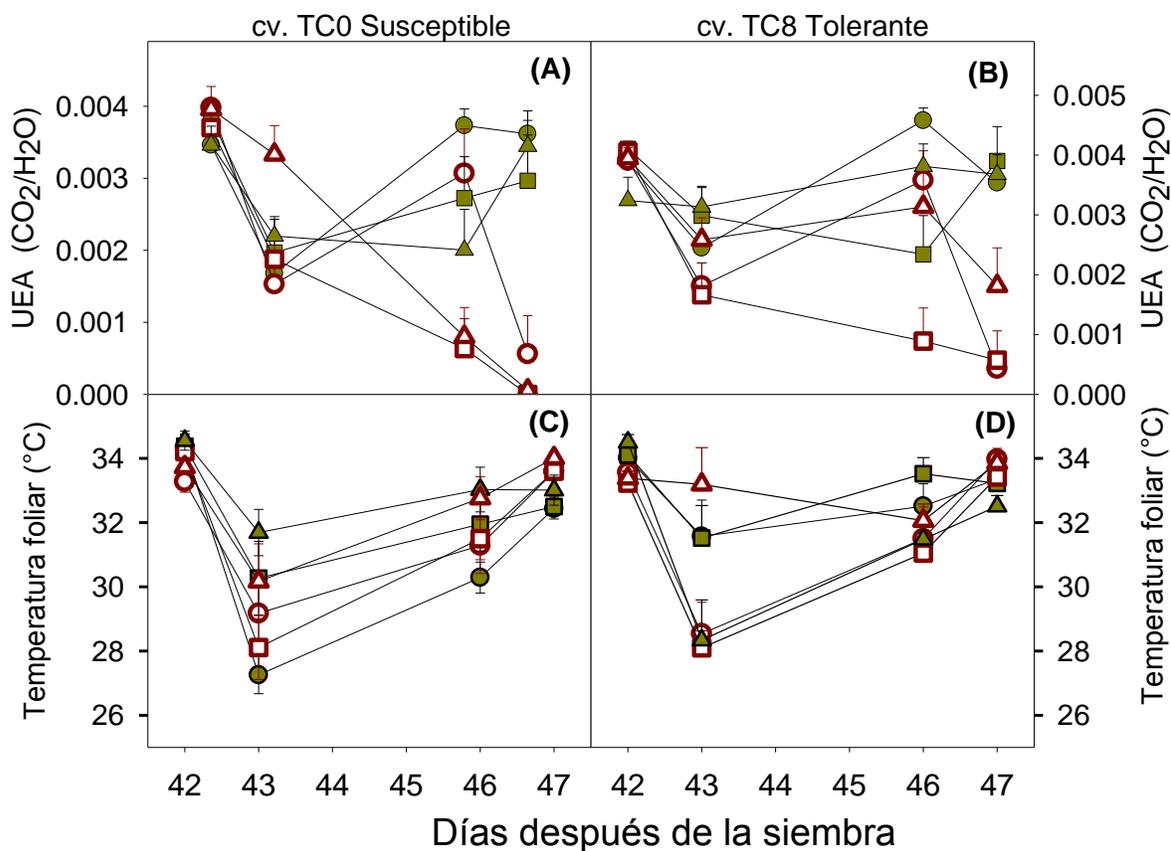


Figura 4. Eficiencia en el uso del agua (A-B) y temperatura foliar (C-D) de maíz, susceptible y tolerante a sequía, cultivado en invernadero con diferentes sustratos. Suelo (●, ○), suelo con 1.5% de vermicomposta (■, □) y suelo con 3.0 % de vermicomposta (▲, △). Símbolos llenos corresponden a los tratamientos con riego continuo y los vacíos a aquellos con suspensión de éste. Los datos corresponden a 2, 3, 6 y 7 d con suspensión de riego; n=9.

Cuarenta y tres días después de la siembra la temperatura foliar del cultivar susceptible a la sequía en condición de riego y suelo sin vermicomposta fue la menor (27 °C) y la mayor (31.6 °C) fue generada en la misma condición de humedad pero con 3.0 % de vermicomposta. Una tendencia similar, con diferencias menores, se observó 46 DDS (Figura 4 C).

El efecto de la vermicomposta en la temperatura foliar fue diferente entre los cultivares. En el cultivar tolerante, 46 DDS la temperatura foliar mayor (33.5 °C) se observó en condición de riego y 1.5 % de vermicomposta. Mientras que en este mismo cultivar la temperatura foliar baja se observó en varios tratamientos, con y sin vermicomposta y con y sin riego. La temperatura foliar tendió a nivelarse, indistintamente de la condición de humedad o proporción de vermicomposta 47 DDS (Figura 4 D).

Los datos promedio del periodo evaluado muestran que para ambos cultivares el efecto de la vermicomposta sobre la temperatura foliar fue mayor con 3.0 % de vermicomposta, pues con esa proporción y riego, el cultivar tolerante disminuyó en 1°C su temperatura foliar respecto al testigo, mientras que el cultivar susceptible con riego la incrementó en 2 °C (Figura 5 C-D). Con suspensión de riego y 3 % de vermicomposta, ambos cultivares incrementaron la temperatura foliar en casi 1 °C. Se observó que g_s , A, E y UEA fueron parámetros fisiológicos regulados por los tres factores principales evaluados, que, como debería esperarse, se modificaron por la radiación fotosintéticamente activa, que con valor promedio de $\approx 538 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, durante el periodo de evaluación, parece haber conducido a la superposición de datos de todos los tratamientos en algún momento de la evaluación.

La presencia de vermicomposta como parte del sustrato, aún en condición de riego, disminuyó g_s , A, E, y el UEA, principalmente en el cultivar susceptible a la sequía; además, las interacciones entre los factores evaluados evidencian la complejidad de las reacciones de la planta al déficit de humedad y presencia de vermicomposta (Cuadro 3). La g_s es una variable regulada por señales hidráulicas producidas por la raíz en respuesta al contenido de humedad del suelo, según Kang *et al.* (1998). Estos autores evaluaron la respuesta estomática de plántulas de maíz con un sistema de raíces divididas y observaron que si alguna sección del sistema radical permanece en suelo deshidratado parcialmente, los estomas de la planta permanecen parcialmente abiertos, lo que restringe la g_s y E, en contraste con plántulas cuyo sistema radical está permanentemente en suelo húmedo.

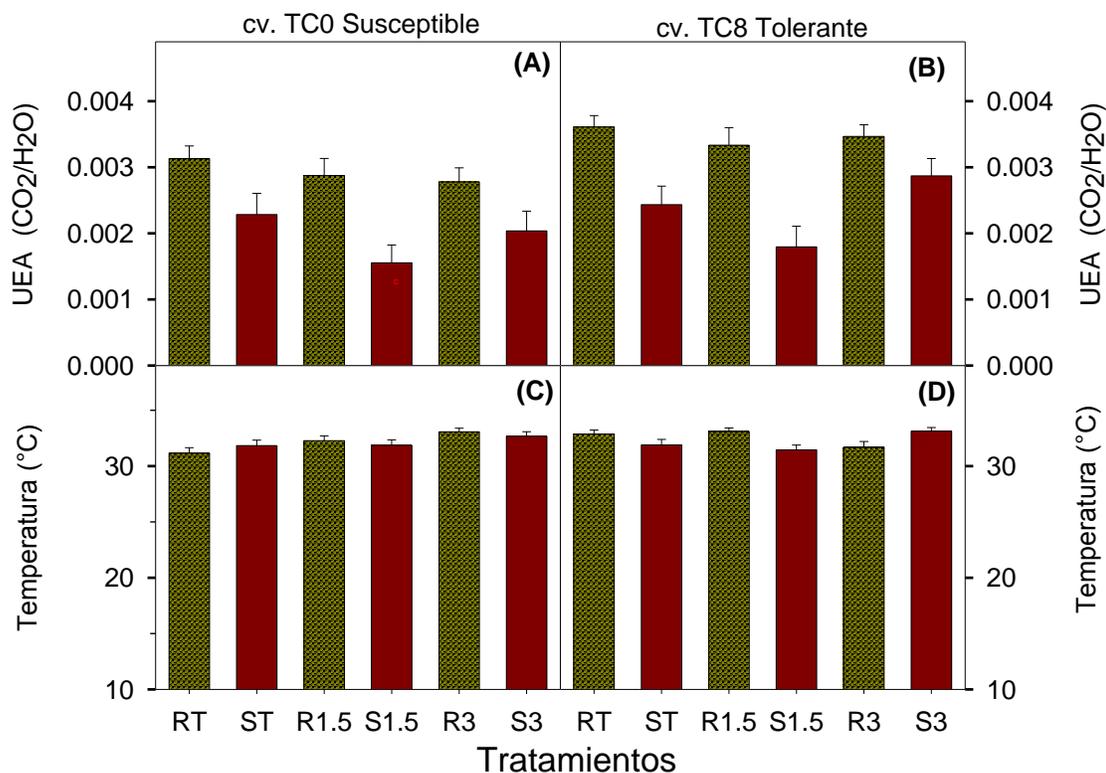


Figura 5. Eficiencia en el uso del agua (A-B) y temperatura foliar (C-D) de plántulas de maíz susceptible y tolerante a sequía, cultivadas durante 52 d en macetas, en condiciones de invernadero, con diferentes sustratos y riego o su suspensión a partir de los 40 d de la siembra. Tratamientos: testigo con riego (RT), testigo con suspensión de riego (ST), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3.0% de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S). Los datos corresponden a valores promedio registrados durante 7 d sin riego para los tratamientos con esta condición; n=36.

Relacionado con lo anterior, puede especularse que las plantas en suelo con vermicomposta estuvieron en un ambiente más seco en relación al testigo, lo que podría parecer contradictorio pues se demostró que el contenido de humedad en PMP se incrementó con la proporción de vermicomposta en el suelo (Cuadro 1); sin embargo, en ambos cultivares el Ψ_A menor correspondió con la proporción mayor de vermicomposta (Figura 1). Al respecto, se ha documentado que el incremento de

materia orgánica en el suelo provoca el aumento del agua absorbida, pero con éste no se incrementa necesariamente la capacidad de retención de humedad del mismo, ya que esto se encuentra directamente relacionado con el tamaño de las partículas orgánicas, el grado de humificación y la naturaleza de los materiales orgánicos originales (Zebarth *et al.*, 1999). De otra forma, también se ha probado que la cantidad de materia orgánica aplicada y las características del suelo determinan el efecto sobre la capacidad de retención de humedad (Glab y Gondek, 2009).

Respuestas relativamente similares a las antes señaladas fueron documentadas por Berova y Karanatsidis (2009), al evaluar la fotosíntesis neta (P_N), E y g_s en dos cultivares de chile (*Capsicum annum* L.), en respuesta a dosis de 50 y 100 ml de un fertilizante biológico derivado de lombriz roja californiana. Sus resultados mostraron que la g_s de ambos cultivares se incrementó significativamente con 50 ml del biofertilizante, respecto al testigo; pero, el efecto de esa dosis y 100 ml de biofertilizante fue el mismo. En contraparte la E se modificó significativamente sólo en un cultivar; con 50 ml del biofertilizante la E fue mayor respecto al testigo, mientras que con 100 ml del biofertilizante se mantuvo la diferencia respecto al testigo, pero tendió a disminuir respecto a la dosis más baja. El cultivar que no reaccionó en la E a la presencia del biofertilizante mostró un incremento significativo en P_N , aunque con la misma tendencia que la E del otro cultivar. Además, aunque estos autores observaron respuestas diferentes entre los cultivares, encontraron que el biofertilizante incrementó en los valores de las variables señaladas, respecto al testigo, lo que contrasta con lo observado en el presente estudio. Lo anterior permite suponer que la respuesta al biofertilizante y el déficit de humedad está modulada simultáneamente por factores como la especie, las condiciones climáticas, la etapa fenológica, la proporción y tipo de biofertilizante, el nivel de deshidratación que alcance el suelo, entre otros factores. Esto último se evidenció en el presente estudio, ya que el efecto detrimental de la vermicomposta en el intercambio de gases fue mayor en ambos cultivares al suspender el riego. En ese sentido, se ha demostrado ampliamente que el estrés hídrico causa el cierre de los estomas, lo que afecta el intercambio de gases y todos sus parámetros (Hsiao y Acevedo, 1974; Knittel y Pell, 1991; Grzesiak *et al.*, 2006; Schmidt *et al.*, 2011).

Cuadro 3. Conductancia estomática (gs), asimilación de CO₂ (A), transpiración (E), eficiencia en el uso del agua (UEA) y temperatura foliar (T) en plántulas de maíz.

	gs (mmol m ⁻² s ⁻¹)	A (μmol CO ₂ m ⁻² s ⁻¹)	E (mmol H ₂ O m ⁻² s ⁻¹)	UEA (A/E)	T (°C)
Vermicomposta (%)					
0	44 a	7.18a	2.18a	.0029a	31.95b
1.5	38 ab	6.49ab	1.97ab	.0028ab	32.16ab
3	34.7b	5.59b	1.79b	.0024b	32.64a
Cultivar					
Susceptible	39.6a	6.09 a	2.07a	.0024b	32.16a
Tolerante	38a	6.7 a	1.87b	.0029a	32.35a
Humedad					
Riego	39.9a	7.23a	1.99a	.0032a	32.37a
Suspensión	37.6a	5.55b	1.95a	.0021b	32.15a
MEDIA GENERAL	38.82	6.4	1.97	.0026	
Humedad x cultivar	NS	NS	NS	NS	NS
Humedad x vermicomposta	NS	*	NS	NS	*
Cultivar x Vermicomposta	*	NS	NS	NS	NS

Medias en las líneas seguidas con letra diferente son significativamente distintas (Tukey, $p \leq 0.05$). **= significancia ($p \leq 0.01$); *=significancia ($p \leq 0.05$); NS=no significancia.

Aunque, la g_s y A fueron diferentes entre tratamientos y cultivares, y algunas interacciones entre factores fueron evidentes, el cultivar como factor principal no mostró diferencias significativas para estas respuestas (Cuadro 3). Este resultado no corresponde a lo esperado al comparar cultivares con respuestas contrastantes al déficit de humedad. Al respecto, puede especularse que la reacción observada estuvo relacionada con la etapa fenológica de la planta; pues, se ha señalado que algunos genotipos evaluados en condición de déficit de humedad pueden no presentar diferencias en la g_s durante la etapa vegetativa, pero las manifiestan en la etapa de espigamiento (Atteya *et al.*, 2003). Además, el cultivar tolerante a la sequía tuvo E menor y UEA mayor que el susceptible; lo que de acuerdo con los autores antes citados representa una adaptación importante para prevenir la deshidratación foliar, retardar la condición de estrés y mantener las tasas de fotosíntesis; siendo en este trabajo, parte de las respuestas diferenciales esperadas entre cultivares.

El cultivar susceptible a la sequía presentó valores similares de A al cultivar tolerante; sin embargo, su transpiración fue menor. Al respecto se sabe que el maíz, por ser una planta con metabolismo fotosintético C_4 , puede presentar tasas de asimilación de carbono (A) altas, aún con g_s bajas, y entre cultivares tolerantes y resistentes a la sequía puede haber diferencias en su g_s , concentración interna de CO_2 y eficiencia en la transpiración, sin que se presenten diferencias significativas en la fotosíntesis (Bunce, 2010). Esas diferencias, entre cultivares tolerantes y susceptibles a sequía, también han sido señaladas por Grzesiak *et al.* (2006), quienes evidenciaron que con estrés hídrico prolongado y severo (5 a 14 d) la disminución de la fotosíntesis neta fue más drástica para el cultivar susceptible que para el tolerante; en contraste, el efecto del estrés hídrico fue mayor en la g_s y E del cultivar tolerante, lo que se puede interpretarse como un mecanismo más eficiente de protección del estado hídrico del tejido.

Indicadores del crecimiento

El análisis factorial (Cuadro 4) reveló que la altura, el índice de área foliar y la relación raíz/vástago permanecieron sin cambios significativos ($p \geq 0.05$) por efecto de la vermicomposta. En cambio, el cultivar sí afectó el área foliar, pues el cv

tolerante a sequía presentó 56 cm² menos área que el susceptible, lo que a su vez incrementó el índice raíz/vástago. La suspensión del riego redujo en cerca de 100 cm² el área foliar. Las interacciones entre factores no fueron significativas ($p \geq 0.01$) para estas variables.

Los valores promedio de los tratamientos durante los 52 d del estudio, evidenciaron reacciones desiguales entre los cultivares (Figura 6). La altura de la planta del cultivar susceptible a la sequía no se modificó ($p \geq 0.05$) por la incorporación de vermicomposta; sin embargo, ésta se redujo ($p \leq 0.05$) 5 cm al suspenderse el riego, mientras que con 1.5 % de vermicomposta, no hubo efecto del riego. En contraste, con 3.0 % de vermicomposta el efecto de la suspensión de riego fue más evidente que con él (testigo), y registró una reducción de 7.5 cm.

El cultivar tolerante a la sequía aumentó ($p \leq 0.05$) 4 cm la altura de planta con 1.5 % de vermicomposta y riego, respecto a la misma condición de humedad y suelo solo; pero, la suspensión del riego, en presencia o ausencia de vermicomposta, no modificó la altura ($p \geq 0.05$).

El cultivar susceptible a la sequía produjo más área foliar con riego y la proporción mayor de vermicomposta (3.0 %), el incremento alcanzó 121 cm², respecto al testigo. La suspensión del riego en suelo sin vermicomposta redujo 50 cm² el área foliar, y este efecto se intensificó en las plantas crecidas en suelo con 3.0 % de vermicomposta, en las que el área foliar disminuyó casi 200 cm² al suspender el riego. Para la misma variable, el cultivar tolerante a la sequía tuvo 120 cm² más área foliar con riego y 1.5 % de vermicomposta, respecto al suelo solo; mientras que, la suspensión del riego no tuvo efecto en las plántulas crecidas en suelo solo.

En contraparte, con la suspensión de riego las plántulas produjeron 140 cm² menos área foliar con 1.5 y 3.0 % de vermicomposta. Estos resultados muestran que el crecimiento foliar del cultivar tolerante a la sequía es menos afectado por el déficit de humedad que el cultivar susceptible.

Cuadro 4. Altura de plantas, área foliar e índice raíz/vástago de maíz susceptible y tolerante a sequía, cultivado con diferentes substratos en invernadero.

	Altura (cm)	Área foliar (cm ²)	Índice raíz/vástago
Vermicomposta (%)			
0	22.92 a	253.84 a	1.50 a
1.5	20.51 a	317.44 a	1.50 a
3	20.27 a	322.24 a	1.56 a
Cultivar			
Susceptible	20.45 a	327.91 a	1.20 b
Tolerante	21.94 a	271.21 b	1.86 a
Humedad			
Riego	21.24 a	349.65 a	1.46 a
Suspensión	21.15 a	249.94 b	1.56 a
MEDIA GENERAL	21.19	299.36	1.52
Humedad x cultivar	NS	NS	NS
Cultivar x vermicomposta	NS	NS	NS
Humedad x vermicomposta	NS	NS	NS

Medias en las líneas seguidas con letra diferente son significativamente distintas (Tukey, $p \leq 0.05$).

De acuerdo con el análisis de los factores principales (Cuadro 5), la biomasa acumulada en la raíz fue modificada significativamente ($p \leq 0.05$) por la presencia de vermicomposta en suelo, el efecto fue diferente en la biomasa acumulada en el tallo y en el número de hojas liguladas y no liguladas. El cultivar susceptible a la sequía superó al cultivar tolerante en casi todas las variables mencionadas, excepto número de hojas no liguladas; esta variable tampoco se afectó ($p \geq 0.05$) por la suspensión del riego. La interacción cultivar x vermicomposta fue significativa ($p \leq 0.05$) para la biomasa acumulada en la raíz y el tallo.

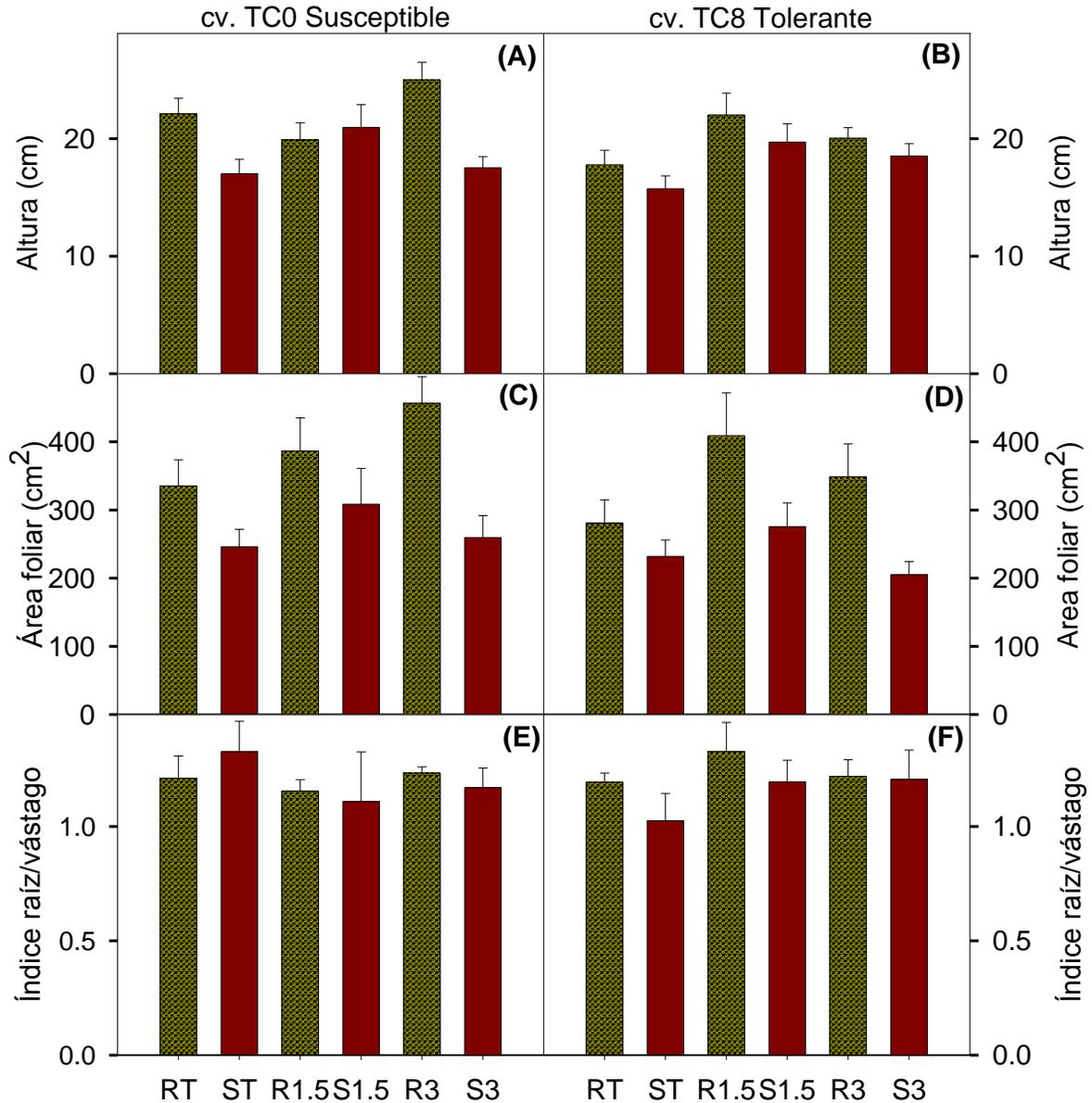


Figura 6. Altura (A-B), área foliar (C-D) e índice raíz/vástago (E-F) de plántulas de maíz susceptible y tolerante a sequía, cultivadas durante 52 d en macetas, en condiciones de invernadero, con diferentes sustratos y riego o su suspensión durante 12 d a partir de los 40 d de la siembra. Tratamientos: testigo con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (R1.5) y suspensión (S1.5), suelo con 3.0% de vermicomposta con riego (R3) y suspensión (S3); n=10.

Los valores promedio de los tratamientos revelaron que el número de hojas liguladas por planta (6) y no liguladas (3) expuestas durante el desarrollo del estudio, se mantuvo sin cambio en los tratamientos de ambos cultivares (Figura 7). El cultivar susceptible a la sequía redujo 0.76 y 0.89 g por planta la producción de biomasa en la raíz ($p \leq 0.05$) con la suspensión de riego en el suelo solo y en suelo con 3.0 % de vermicomposta, respectivamente. El efecto de la vermicomposta en la producción de biomasa del tallo del mismo cultivar fue mayor en condición de riego, ya que el incremento fue cercano a 2 g con 3.0 % de vermicomposta, en relación al suelo solo; aunque, fue en esta misma proporción de vermicomposta en la que la biomasa acumulada en tallo se redujo más de 1 g con la suspensión del riego (Figura 8-A). El cultivar tolerante a la sequía en presencia de 1.5 % de vermicomposta y riego incrementó ($p \leq 0.05$) la biomasa de su raíz y tallo alrededor de 1 g, respecto al suelo sin vermicomposta. La producción menor de biomasa en la raíz fue de 1.2 g por planta en el tratamiento con 3.0 % de vermicomposta y suspensión de riego (Figura 8-B).

Los resultados obtenidos relacionados con el efecto benéfico de la vermicomposta en la altura de planta, el área foliar y la producción de materia seca principalmente con riego, coinciden parcialmente con lo observado en otros estudios con maíz (Materechera, 2002; Jayaprakash *et al.*, 2004; Canellas *et al.*, 2010; Gutiérrez-Miceli *et al.*, 2008; Kalantari *et al.*, 2010 y otras especies, como *Lycopersicum esculentum* Mill (Zaller, 2007; Bachman y Metzger, 2008), *Capsicum annum* L (Berova y Karanatsidis, 2009), *Helianthus annuus* L. (Ahmad y Jabeen, 2009), *Sorghum bicolor* y *Cynodon nlemfuensis* (Durán-Umaña y Henríquez-Henríquez, 2010). Al respecto, se ha demostrado que los nutrientes presentes en la vermicomposta están más disponibles que en el suelo lo que incrementa la tasa fotosintética y en consecuencia la acumulación de materia seca. Sin embargo, en el presente estudio, el efecto positivo de la vermicomposta en el área foliar y la acumulación de biomasa en raíz y tallo fue heterogéneo entre los dos cultivares evaluados, y se modificó con la humedad del suelo.

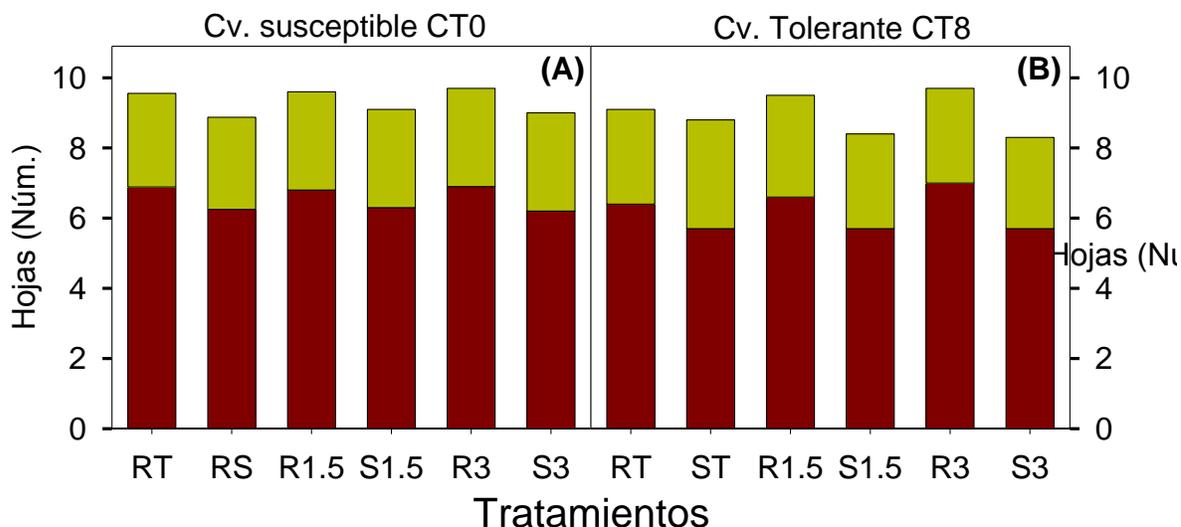


Figura 7. Número de hojas liguladas (segmento inferior de las barras) y no liguladas (segmento superior de las barras) por planta de maíz 52 d después de la siembra. Tratamientos: testigo con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (R1.5) y suspensión (S1.5), suelo con 3.0% de vermicomposta con riego (R3) y suspensión (S3); n=10.

Al realizar el cálculo de la proporción de biomasa seca de raíz y tallo por planta, las diferencias por tratamiento son menos evidentes (Figura 8 C-D), lo que concuerda con lo señalado anteriormente en la relación raíz/vástago.

Se han encontrado respuestas contrastantes a la presencia de vermicomposta en el sustrato entre especies (Barros *et al.*, 2010) y entre cultivares (Zaller, 2007); lo que sugiere que además del efecto del contenido de nutrientes hay otros factores con efectos biológicos indirectos que pueden anular el efecto de los nutrientes. En concordancia con lo anterior, se ha observado que la incorporación de concentraciones bajas de sustancias húmicas derivadas de la mineralización de la fracción orgánica al sustrato de cultivo produce un incremento proporcional en el crecimiento de la planta, y con concentraciones altas éste disminuye; lo que se atribuye a que, con bajas concentraciones se obtiene un efecto estimulante sobre el metabolismo de los microorganismos del suelo y la disponibilidad de nutrientes, efecto que resulta inhibitorio en concentraciones altas (Atiyeh *et al.*, 2002).

Cuadro 5. Biomasa seca de raíz (BSR) y tallo (BST), número de hojas liguladas (HL) y no liguladas (HNL) en plantas jóvenes de maíz susceptible y tolerante a la sequía.

		BSR (g pl ⁻¹)	BST (g pl ⁻¹)	HL (Núm)	HNL (Núm)
Vermicomposta (%)					
	0	1.60 b	1.68 a	6.29 a	2.78 a
	1.5	2.09 a	2.00 a	6.35 a	2.8 a
	3	1.93 a	2.10 a	6.45 a	2.73 a
Cultivar					
	Susceptible	1.98 a	2.12 a	6.56 a	2.75 a
	Tolerante	1.77 b	1.75 b	6.18 b	2.78 a
Humedad					
	Riego	2.19 a	2.28 a	6.76 a	2.76 a
	Suspensión	1.56 b	1.57 b	5.96 b	2.77 a
MEDIA GENERAL		1.88	1.93	6.37	2.77
Humedad x cultivar		NS	NS	NS	NS
Cultivar x vermicomposta		*	*	NS	NS
Humedad x vermicomposta		NS	NS	NS	NS

Medias en las líneas seguidas con letra diferente son significativamente distintas (Tukey, $p \leq 0.05$).

El desarrollo de la raíz es un requisito clave para que las plantas se adapten y sobrevivan en condiciones adversas (Barros *et al.*, 2010), y en esta investigación el incremento en la relación raíz/vástago del cultivar tolerante puede considerarse como evidencia de la adaptación al déficit de humedad; sin embargo, aparentemente la vermicomposta tuvo mayor efecto en la interacción cultivar x vermicomposta, pues se ha documentado que la selección del Tuxpeño para tolerancia a sequía ha permitido una asignación mayor de recursos a los órganos

reproductores, con una reducción consecuente de la biomasa en raíz y otros órganos (Bolaños *et al.*, 1993).

La presencia de vermicomposta favoreció la producción de biomasa radical en el cultivar tolerante a la sequía (Figura 8-B), especialmente con la proporción de 1.5 % de vermicomposta y riego; este efecto puede estar relacionado cercanamente con la teoría del crecimiento ácido, ya que se especula que algunas de las sustancias húmicas presentes en la vermicomposta podrían ser compuestos con estructura similar al ácido indolacético que promueven el crecimiento radical. Al mismo tiempo, se sugiere que los ácidos orgánicos exudados por la raíz pueden modificar las complejas estructuras húmicas, que promoverían la liberación de moléculas pequeñas como auxinas (Barros *et al.*, 2010), a las que se les han reconocido cierta función en el incremento de la longitud y área superficial de la raíz del maíz (Canellas *et al.*, 2002), pues funcionan como reguladoras del crecimiento vegetal. Los mismos autores evidenciaron la capacidad de las estructuras húmicas para interactuar con las células vegetales en dependencia de su estructura química, el índice de hidrofobicidad y el tamaño de cada molécula que conforma la asociación supramolecular. Todo esto evidencia la complejidad de las interacciones vermicomposta-planta, que se ha documentado en trabajos recientes (Domínguez *et al.*, 2010).

También, las respuestas diferentes en los parámetros de crecimiento, 12 d después de la germinación, se han evidenciado entre especies, en sustrato con 10 y 20 % de vermicomposta. En *Tagetes patula* L., la biomasa seca del tallo se incrementó con 10 % de vermicomposta y la de la raíz también se incrementó respecto al testigo pero fue similar con ambas proporciones de vermicomposta; el área foliar fue superior con la menor cantidad de vermicomposta; además, la relación vástago/raíz fue mayor en el testigo y con 10 % de vermicomposta, en relación a 20 %. En *Lycopersicon esculentum* Mill. se observó el incremento de la biomasa seca del tallo con 20 % de vermicomposta; pero, la biomasa de la raíz y la relación vástago/raíz permanecieron sin cambio, esto contrastó con el incremento proporcional del área foliar a la cantidad de vermicomposta. La reacción de *Capsicum annuum* L. a la vermicomposta fue diferente a los otras especies, pues se

observó un decremento del área foliar y la biomasa seca del tallo y la raíz, proporcional a la cantidad de vermicomposta. Además de los efectos en esas especies, se observó que la vermicomposta no tuvo efecto sobre ninguna de las cuatro variables de crecimiento de *Centaurea cyanus* L (Bachman y Metzger, 2008).

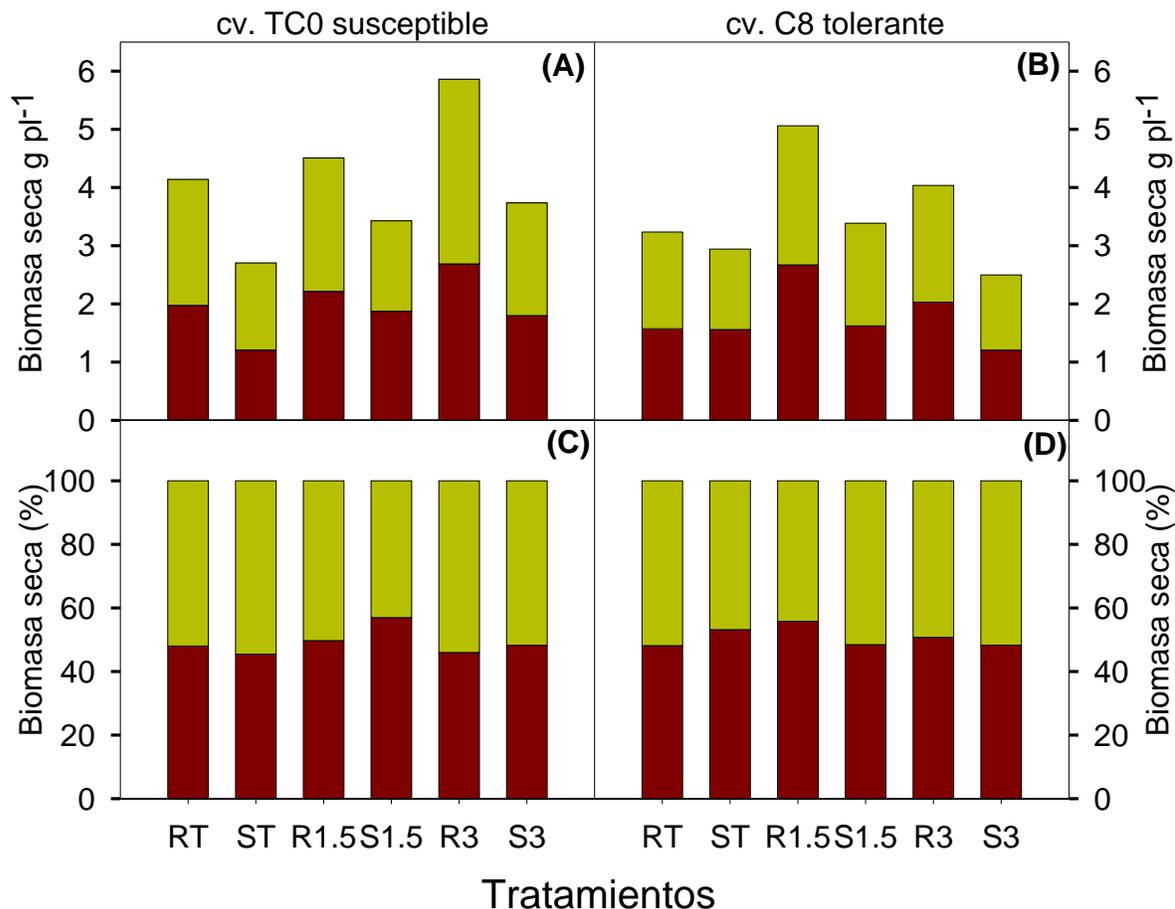


Figura 8. Peso (A-B) y proporción (C-D) de la biomasa deshidratada, respecto a la biomasa total individual para raíz (sección inferior de las barras), y tallo (sección superior de las barras) de plantas de maíz susceptible y tolerante a sequía, cultivadas durante 52 d en condiciones de invernadero, con riego o suspensión durante 12 d a partir del día 40 después de la siembra. Tratamientos: testigo con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3% de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S); n=10.

Entre cultivares de *Lycopersicum esculentum* Mill., se observaron respuestas heterogéneas en la velocidad de la germinación, acumulación de biomasa y calidad de frutos con proporciones crecientes de vermicomposta; además, la complejidad de la interacción cultivar – vermicomposta fue evidenciada estadísticamente, y se observó que el cultivar más tardío para la madurez fisiológica tuvo respuestas más pronunciadas a los tratamientos con vermicomposta (Zaller, 2007).

En el presente estudio no se observó una respuesta proporcional a la concentración de vermicomposta; sin embargo, el cultivar susceptible a la sequía (Tuxpeño original C0) en promedio tuvo respuesta superior en la exposición de área foliar, hojas liguladas y producción de biomasa respecto al cv tolerante (Tuxpeño sequía C8). En relación con esto, se ha demostrado que la reducción en algunas variables morfológicas la altura de la planta, número total de hojas y biomasa de la espiga, son respuestas correlacionadas con el incremento de la tolerancia a la sequía del Tuxpeño durante la selección, y que se expresan con los ciclos de selección. Esto se asocia con la tendencia del denominado “escape al estrés por sequía” con floración temprana (Bolaños *et al.*, 1993). La reducción de la biomasa también puede explicarse al considerar que la cantidad de agua transpirada está directamente relacionada con la biomasa producida (Edmeades *et al.*, 1997), y que en nuestros resultados el cultivar tolerante a la sequía tuvo transpiración significativamente menor que el susceptible.

Contenido de prolina

Se observó una tendencia de incremento del contenido de prolina, en ambos cultivares, con la proporción de vermicomposta y la suspensión de riego (Figura 9). No obstante, las diferencias no fueron estadísticamente significativas. Esta respuesta podría atribuirse a la intensidad del estrés hídrico impuesto, que en este estudio parece haber sido insuficiente para que los tratamientos manifestaran diferencias.

Aún cuando la acumulación de prolina es considerada una respuesta de ajuste osmótico de las plantas en estrés hídrico (Avendaño *et al.*, 2005). El maíz Tuxpeño, como otros maíces de origen tropical, no manifiestan su capacidad de ajuste osmótico en respuesta a la selección (Bolaños *et al.*, 1993); aunque, los mismos

autores sugieren que algún mecanismo para la acumulación de solutos sigue funcionando. En otros estudios, en plántulas crecidas sin restricción de humedad, se demostró que ocho ciclos de selección recurrente para tolerancia a sequía de maíz Tuxpeño generaron disminución significativa del contenido de prolina en la región de diferenciación celular de la raíz y simultáneamente incrementaron ese aminoácido en el ápice de la misma (Sánchez-Urdaneta *et al.*, 2005). Además, los mismos autores señalaron que aunque la raíz de ambos cultivares Tuxpeño, susceptible y tolerante a la sequía, incrementan la acumulación de prolina en reacción a los ψ_A bajos, la selección para tolerancia a la sequía acumula cantidades significativamente mayores del aminoácido cuando los ψ_A son menores.

Se sugiere que a mayor acumulación de prolina en los tejidos, la reducción de la biomasa es menor (Avendaño, 2005), y al respecto se sabe que la acumulación de biomasa sobre todo en la fase vegetativa es menor para el Tuxpeño sequía que para el Tuxpeño original. Probablemente por ello hay una aparente mayor cantidad de prolina en el cultivar susceptible (Figura 9).

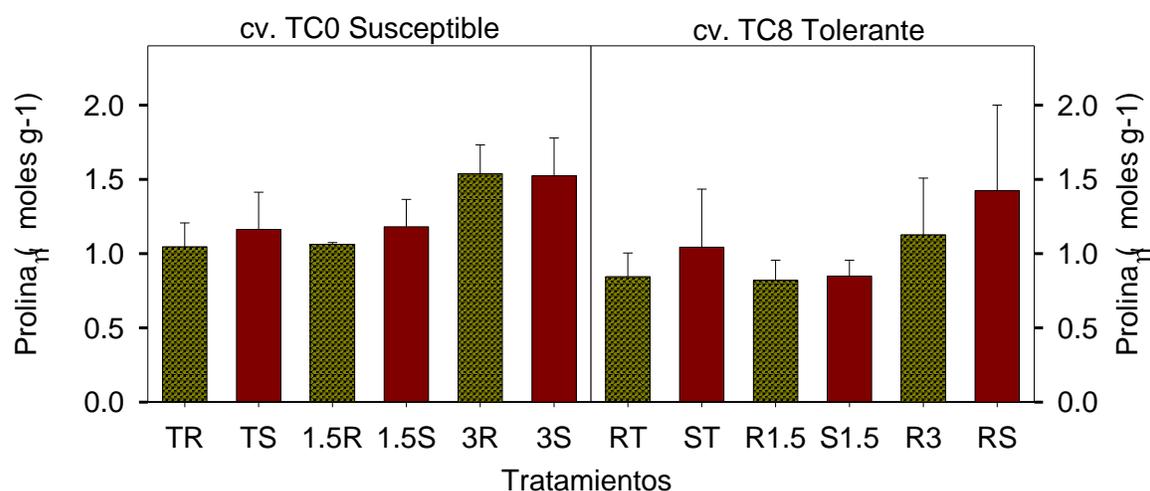


Figura 9. Contenido de prolina en el tejido seco del ápice de la raíz de plantas de maíz susceptible y tolerante a sequía, cultivadas en macetas, en invernadero, con diferentes sustratos y riego o su suspensión durante 12 d a partir de la exposición de la quinta hoja ligulada. Tratamientos: testigo con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con

riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3.0% de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S); n=3.

Conclusiones

Siete días sin riego inhibieron totalmente el intercambio de gases y la gs en ambos cultivares, sin que se detectara el efecto mitigante especulado de la vermicomposta al estrés por déficit de humedad.

El cultivar Tuxpeño tolerante a sequía C8 mostró mayor eficiencia en el uso del agua, y desarrolló menos área foliar, número de hojas y acumuló menos biomasa; lo que demuestra parte de su respuesta debida al proceso de selección.

Se evidenció la complejidad de la reacción fisiológica al déficit de humedad del maíz por la interacción vermicomposta x cultivar en las variables de crecimiento y su modificación por la condición de humedad.

Bajo las condiciones de evaluación, el contenido de prolina no se expresó como un mecanismo de tolerancia al estrés hídrico.

Literatura citada

- Ahmad R, N Jabeen. 2009. Demonstration of growth improvement in sunflower (*Helianthus annuus* L.) by the use of organic fertilizers under saline conditions. *Pakistan Journal of Botany*. 41(3): 1373-1384.
- Antonio L P, C A Carballo, G A Martínez, S H López. 2000. Producción de semilla de híbridos de maíz en suelos con diferente capacidad de retención de humedad en el valle de Puebla. *Revista Fitotecnia Mexicana*. 23(2): 227-238.
- Arrieche-Luna E, M Ruiz-Dager. 2010. Influencia de la fertilización química y orgánica sobre el carbono de la biomasa microbiana y rendimiento del maíz en suelos de pH contrastante. *Agrociencia*. 44: 249-260.
- Atiyeh R M, S Lee S, C A Edwards, N Q Arancon, J D Metzger. 2002. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresource Technology*. 84: 7-14.
- Atteya A M. 2003. Alteration of water relations and yield of corn genotypes in response to drought stress. *Bulgarian Journal of Plant Physiology*. 29(1-2): 63-76.

- Avendaño A C H, L C Trejo, C C López, G J D Molina, V A Santacruz, G F Castillo. 2005. Comparación de la tolerancia a la sequía de cuatro variedades de maíz (*Zea mays* L.) y su relación con la acumulación de prolina. *Interciencia*. 30(9): 560–564.
- Ayers R S, D W Wescot. 1985. *Water Quality for Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev 1, Rome, Italy. 174 p.
- Barros D L, C L Pasqualoto, O F Lopes, A N Oliveira, P L Eustáquio, M Azevedo, R Spaccini, A Piccolo, A R Facanha. 2010. Bioactivity of chemically transformed humic matter from vermicompost on plant root growth. *Journal of Agriculture & Food Chemistry*. 58: 3681-3688.
- Bachman G R, J D Metzger. 2008. Growth of bedding plants in commercial potting substrate amended with vermicompost. *Bioresource Technology*. 99: 3155-3161.
- Bates L W, R P Waldren, I D Teare. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant and Soil*. 39: 205-207.
- Berova M, G Karanatsidis. 2009. Influence of bio-fertilizer, produced by *Lumbricus rubellus* on growth, leaf gas-exchange and photosynthetic pigment content of pepper plants (*Capsicum annuum* L.). *Acta Horticulturae*. 830: 447-452.
- Bolaños J, G O Edmeades. 1993. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. I. Response in grain yield, biomass, and radiation utilization. *Field Crops Research*. 31: 233-252.
- Bolaños J, G O Edmeades, Martínez L. 1993. Eight cycles of selection for drought tolerance in lowland tropical maize. III. Responses in drought-adaptive physiological and morphological traits. *Field Crops Research*. 31: 269-286.
- Bunce J A. 2010. Leaf transpiration efficiency of some drought-resistant maize lines. *Crop Science*. 50: 1409-1413.
- Campos H, C Trejo, C B Peña-Valdivia, C Ramírez-Ayala, P Sánchez-García. 2009. Effect of partial rootzone drying on growth, gas exchange, and yield of tomato (*Solanum lycopersicum* L.). *Scientia Horticulturae* 120:493-499.
- Canellas L, F Olivares, A Okorokova-Facanha, A Facanha. 2002. Humic acids isolated from earthworm compost enhance root elongation, lateral root emergence and plasma membrane H⁺- ATPase activity in maize root. *Plant Physiology*. 130: 1951-1957.
- Canellas P L, A Piccolo, L B Dobbss, R Spaccini, F L Olivares, D B Zandonadi, A R Façanha. 2010. Chemical composition and bioactivity properties of size-fractions separated from a vermicompost humic acid. *Chemosphere*. 78: 457-466.

- Castellanos J Z, B S X Uvalle, S A Aguilar. 2000. Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. 2ª ed. Colección INCAPA. San Miguel de Allende, Guanajuato. 226 p.
- Domínguez J, C Lazcano, M Gómez-Brandón. 2010. Influencia del vermicompost en el crecimiento de las plantas. Aportes para la elaboración de un concepto objetivo. Acta Zoológica Mexicana. 26(2): 359-371.
- Durán-Umaña L, C Henríquez-Henríquez. 2010. El vermicompost: su efecto en algunas propiedades del suelo y la respuesta de la planta. Agronomía Mesoamericana. 21(1): 85-93.
- Edmeades G O, J Bolaños, S C Chapman. 1997. Value of secondary traits in selecting for drought tolerance in tropical maize. In G.O. Edmeades, M. Bänziger, H.R. Mickelson, and C.B. Peña-Valdivia (eds.), Developing Drought and Low N Tolerant Maize. Proceedings of a Symposium, March 25-29, 1996, CIMMYT, El Batán, Mexico, 222-234. Mexico, D.F.: CIMMYT.
- Fernández-Luqueño F, V V Reyes, S C Martínez, H G Salomón, M J Yañez, R J M Ceballos, L Dendooven. 2010. Effect of different nitrogen source on plant characteristics and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Bioresource Technology. 101: 396-403.
- Foley B J, L R Cooperband. 2002. Paper mill residuals and compost effects on soil carbon and physical properties. Journal of Environment Quality. 31: 2086-2095.
- Gil_Pelegrín E, I Aranda, J J Peguero-Pina, A Vilagrosa. 2005. El continuo suelo-planta-atmósfera como un modelo integrador de la ecofisiología forestal. Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales. 14(3): 358-370.
- Glab T, K Gondek. 2009. Effect of organic amendments on water retention characteristics of stagnic gleysol soil. Polish Journal of Soil Science. XLII(I): 111-120.
- Grzesiak S. 2001. Genotypic variation between maize (*Zea mays* L.) single cross hybrids in response to drought stress. Acta Physiologiae Plantarum. 23(4): 443-456.
- Grzesiak M T, S Grzesiak, A Skoczowski. 2006. Changes of leaf water potential and gas exchange during and after drought in triticale and maize genotypes differing in drought tolerance. Photosynthetica. 44(4): 561-568.
- Gutiérrez-Miceli F A, B Moguel-Zamudio, M Abud-Archila, V F Gutiérrez-Oliva, L Dendooven. 2008. Sheep manure vermicompost supplemented with a native diazotrophic bacteria and mycorrhizas for maize cultivation. Bioresource Technology. 99: 7020-7026.

- Hayano-Kanashiro C, C Calderón-Vásquez, E Ibarra-Laclette, L Herrera-Estrella, J Simpson. 2009. Analysis of gene expression and physiological responses in three mexican maize landraces under drought stress and recovery irrigation. PLoS ONE. 4(10): 1-19.
- Hsiao T C, E Acevedo. 1974. Plant responses to water deficits, water-use efficiency, and drought resistance. Agricultural Meteorology. 14: 59-84.
- INEGI (2005) Principales resultados por localidad 2005 (ITER). <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/conteo2005/localidad/iter/default.asp?s=est&c=10395>
- ISTA International Seed Testing Association 2004 International Rules for Seed Testing. Rules 2004. ISTA Ed. Zurich. Switzerland. 243 p.
- Jayaprakash T C, V P Nagalikar, B T Pujari, R A Setty. 2004. Effect of organics and inorganics on soil properties and available nutrient status of soil after harvest of maize crop under irrigation. Karnataka J. Agri. Sci. 17(2): 311-314.
- Kang S, Z Liang, W Hu, J Zhang. 1998. Water use efficiency of controlled alternate irrigation on root-divided maize plants. Agricultural Water Management. 38: 69-76.
- Kalantari S, S Hatami, M M Ardalan, H A Alikhani, M Shorafa. 2010. The effect of compost and vermicompost of yard leaf manure on growth of corn. African Journal of Agricultural Research. 5(11): 1317-1323.
- Knittel R, E J Pell. 1991. Effects of drought stress and simulated acidic rain on foliar conductance of *Zea Mays* L. Environmental and Experimental Botany. 31(1): 79-90.
- Kuehl R (2001) Diseño de experimentos: Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación. 2^{da} ed. Thomson. México. 666p.
- Materechera S A. 2002. Nutrient availability and maize growth in a soil amended with earthworm casts from a South African indigenous species. Bioresource Technology. 84: 197-201.
- Oliva M A, R Rincón, E Zenteno, A Pinto, L Dendooven, F Gutiérrez. Rol del vermicompost frente al estrés por cloruro de sodio en el crecimiento y fotosíntesis en plántulas de tamarindo (*Tamarindus indica* L.). Gayana Bot. 65(1): 10-17.
- Parthasarathi K, M Balamurugan, L S Ranganathan. 2008. Influence of vermicompost on the physico-chemical and biological properties in different types of soil along with yield and quality of the pulse crop-blackgram. Iranian Journal of Environmental Health Science & Engineering. 5(1):51-58.

- Peña-Valdivia C B. 1994. Functional effects of mild water stress on young *Phaseolus vulgaris* L. plant. *Plant Physiology (Life Sci. Adv.)* 13: 125-134.
- Peña-Valdivia C B, A B Sánchez-Urdaneta, C Trejo, R J R Aguirre, E Cardenas. 2005. Root anatomy of drought sensitive and tolerant maize (*Zea mays* L) seedlings under different water potentials. *Cereal Research Communications*. 33: 705-712.
- Peña-Valdivia C B, A B Sánchez-Urdaneta, J R Meza R, J M Juárez, R García-Nava, R V Celis. 2010. Anatomical root variations in response to water deficit: wild and domesticated common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Biological Research*. 43: 417-427.
- Rawls W J, Y A Pachepsky, J C Ritchie, T M Sobecki, H Bloodwoth. 2003. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*. 116: 61-76.
- SIAP-SAGARPA. 2010. Cierre de la producción agrícola por cultivo. http://www.siap.gob.mx/index.php?option=com_wrapper&view=wrapper&Itemid=350.
- Sánchez-Urdaneta A B, C B Peña-Valdivia, C Trejo, J R Aguirre R, E. Cárdenas S. 2005. Root growth and proline content in drought sensitive and tolerant maize (*Zea mays* L.) seedlings under different water potentials. *Cereal Research Communications*. 33(4): 697-704.
- Schmidt J J, E E Blankenship, J L Lindquist. 2011. Corn and velvetleaf (*Abutilon theophrasti*) transpiration in response to drying soil. *BioOne*.59(1) 50-54.
- Shivaputra S S, C P Patil, G S K Swamy, P B Patil. 2004. Effect of vesicular-arbuscular mycorrhiza fungi and vermicompost on drought tolerance in papaya. *Mycorrhiza*. 16(3): 12-13.
- Steudle E. 2000. Water uptake by roots: effects of water deficit. *Journal of Experimental Botany*. 51(350): 1531-1542.
- Tsougkrianis N, C B Peña-Valdivia, C Trejo L, J D Molina G. 2009. El potencial de agua del sustrato en la germinación de maíces con tolerancia y sensibilidad a la sequía. *Agricultura Técnica en México*. 35(4): 363-369.
- Zarco P E, V A González H, M C López P, Y Salinas M. 2005. Marcadores fisiológicos de la tolerancia a sequía en maíz (*Zea mays* L.). *Agrociencia*. 39(5): 517-528.
- Zaller J G. 2007. Vermicompost in seedling potting media can affect germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties. *European Journal of Soil Biology*. 43: S332-S336.

Capítulo IV. Rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en relación con la concentración de vermicomposta y déficit de humedad en el sustrato

Resumen

El efecto benéfico de la vermicomposta en el rendimiento de algunos cultivos ha sido documentado ampliamente; sin embargo, existe información limitada de su efecto cuando se combina con factores que inducen estrés hídrico. El objetivo de esta investigación fue conocer el efecto combinado de la vermicomposta y el déficit de humedad en el rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), bajo la hipótesis de que la vermicomposta modifica algunas propiedades físicas del suelo y disminuye la reacción al déficit de humedad. En condiciones de invernadero se evaluó el rendimiento de dos cultivares de frijol (susceptible y tolerante a sequía) en suelo sin y con 1.5 y 3 % de vermicomposta, y con riego regular en el ciclo completo y su suspensión a partir de la floración. El experimento fue conducido con un diseño factorial asimétrico completamente al azar con cinco repeticiones. Se evaluó el número de inflorescencias, vainas y semillas. La proporción de 3.0 % de vermicomposta, en ambas condiciones de riego, incrementó ($p \leq 0.05$) por planta en 31 % el número de inflorescencias, 36 % las vainas producidas, 16 % las vainas cosechadas, y 34 y 33% el número y rendimiento de semillas respectivamente. El efecto negativo ($p \leq 0.01$) de la suspensión de riego se observó en el número de vainas y semillas y en el rendimiento de semilla; sin embargo con 3 % de vermicomposta incrementó 17 y 15 % el número de vainas, 28 y 48 % el número de semillas, y 30 y 50 % el rendimiento de semillas en los cultivares susceptible y tolerante respectivamente, en comparación con el testigo. Las interacciones entre los factores mostraron una reacción diferencial de los cultivares al déficit de humedad, vermicomposta y su combinación. Se demostró que la vermicomposta modifica algunas propiedades físico-químicas del suelo y disminuye la reacción al déficit de humedad del frijol en etapa reproductiva, ya que incrementa significativamente su rendimiento.

Palabras clave: Estrés hídrico, floración, leguminosa, semilla.

Abstract

Many studies have been reported beneficial effects of application of vermicompost on crops yield. However there are only few studies about the effects of vermicompost when some factors inducing stress are present during the reproductive stage of crops. This research was designed to understand the effects of water stress and vermicompost on some yield components of common bean. Beans were grown under greenhouse conditions. Two bean cultivars with contrasting responses under drought were grown in unamended soil and amended soil with vermicompost to 1.5 or 3.0 %. During the growing cycle, two irrigation treatments were evaluated a) irrigation on whole cycle, and b) irrigation interruption at the flowering stage. There was a strong interaction between cultivars x time, and vermicompost x time for pods number; and irrigation treatments x cultivars for seed number. The application of vermicompost 3.0 % in both cultivars and irrigation treatments resulted in an increased 31% in inflorescences number, 36 % in pod number, 16 % in pod harvest, 34 and 33 % in seed number and yield respectively. Irrigation interruption had a negative effect ($p \leq 0.01$) on pods number, and seeds number and yield. Even though the vermicompost 3.0 % have increased 17 and 30 % in pod harvest; 28 y 48 % in seed number; and 30 and 50 % seed yield in drought sensitive and tolerant cultivars respectively. The interaction between the evaluated factors showed contrasting responses of cultivars to water stress and vermicompost combination. The study revealed that vermicompost modifies soil properties, and 3 % of vermicompost amending the soil increased yield bean plants with irrigation interruption at the reproductive stage.

Index words: Water stress, flowering, legume, seed, modified substrate.

Introducción

El cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) es uno de los principales cultivos en el mundo por su importancia en la alimentación humana (Fernández-Luqueño *et al.*, 2010). En México ocupa el segundo lugar por la superficie cultivada y el sexto por el valor de la producción (SIAP-SAGARPA, 2008). Su importancia es ancestral respecto a la diversidad de poblaciones silvestres como de cultivares criollos o tradicionales y mejorados, y ha representado la base de la alimentación y fuente de nutrientes desde la época prehispánica (Celis-Velazquez *et al.*, 2010).

La producción de este cultivo es afectada notablemente por las sequías, ya que alrededor de 60 % de las zonas productoras en el mundo y 85 % en México se ubican en regiones con régimen pluvial de temporal y frecuentemente con precipitación insuficiente e impredecible (Martínez *et al.*, 2007; Castañeda *et al.*, 2009). La sequía se caracteriza por periodos prolongados, intermitentes o continuos, de ausencia de precipitación, por lo que para un cultivo puede presentarse en parte del ciclo de crecimiento o ser terminal (Neumann, 2008), en la fase vegetativa, reproductiva o ambas.

Se ha demostrado que la restricción de humedad en la fase reproductiva disminuye el rendimiento en mayor proporción que cuando se presenta en la fase vegetativa. Castañeda *et al.* (2009) señalaron que el rendimiento de frijol se redujo hasta 10, 57 y 50 % cuando el riego fue suspendido 10 días a plantas en etapas de floración, formación de vaina y llenado de semilla respectivamente. La suspensión definitiva de riego a plantas de frijol en etapa de llenado de semilla provocó la reducción de hasta 72 % del número de vainas por planta y 32 % del número de semillas por vaina, respecto a las plantas bien irrigadas (Lizana *et al.*, 2006). Por su parte, Martínez *et al.* (2007) concluyeron que el componente de la producción más afectado por la restricción de humedad fue el número de vainas por planta y que el grado de afectación depende del cultivar y los componentes menos afectados son el número y biomasa de semillas por vaina, componentes asociados en menor grado con la tolerancia a sequía en frijol.

Investigaciones realizadas en otras leguminosas como garbanzo (*Cicer arietinum* L.), haba (*Vicia faba* L.) y soya (*Glycine max* L.) evidencian que los

rendimientos disminuyen significativamente en condiciones de déficit de humedad durante las etapas de formación de vainas y llenado de grano; aunque, los resultados difieren entre los cultivares (Liu *et al.*, 2004; Leport *et al.*, 2006; Fang *et al.*, 2009; Ghassemi *et al.*, 2009).

El mejoramiento genético representa una opción para incrementar el rendimiento de frijol bajo restricción de humedad, en parte, mediante la identificación de genotipos cuya respuesta diferencial en el rendimiento de grano con riego sea mínima respecto a la condición de seco (Rosales-Serna *et al.*, 2000). Sin embargo, la complejidad de las respuestas fenotípicas al déficit de humedad dificulta el mejoramiento para tolerancia a sequía, y la evaluación de cultivares con origen genético común y respuestas contrastantes al estrés por sequía ha permitido identificar los cambios morfológicos, fisiológicos y bioquímicos propios de la especie y contrastantes entre los cultivares (Peña-Valdivia *et al.*, 1997; Peña-Valdivia *et al.*, 2005).

En México, otro factor que determina el efecto del déficit de humedad en el rendimiento de frijol es el tipo de suelo de las zonas productoras, que se caracteriza como poco profundo, con contenido bajo de materia orgánica (menor a 1 %) y capacidad limitada para retener humedad (Rosales-Serna *et al.*, 2000; Acosta-Díaz *et al.*, 2003; Acosta-Díaz *et al.*, 2007). Al respecto, Hudson (1994) señaló que la adición de cantidades pequeñas de materia orgánica al suelo modifica su capacidad de retención de humedad, ya que existe una correlación positiva entre el contenido de materia orgánica y el agua disponible. El mismo autor mostró que lo anterior se debe a que el volumen de agua retenida por el suelo a capacidad de campo incrementa significativamente más que el volumen de agua retenida en punto de marchitez permanente.

Además, se ha demostrado que la aplicación de vermicomposta incrementa la materia orgánica del suelo, mejora algunas de sus características físicas y biológicas que favorecen el flujo de aire y agua, la mineralización de nutrientes por la actividad microbiana, y el desarrollo radicular de las plantas; aunque, estos efectos dependen de factores como la naturaleza bioquímica y nivel de humificación de la vermicomposta, la cantidad y frecuencia de su aplicación, las características del

suelo, el clima y las prácticas agrícolas (Arancon *et al.*, 2006; Ferreras *et al.*, 2006; Abiven *et al.*, 2009). En condiciones de campo se observó que con la adición de 20 Mg ha⁻¹ de vermicomposta al suelo, la cantidad de agregados estables en agua incrementó significativamente, y se modificó la estructura (Marinari *et al.*, 2000). También, se modificaron las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, que repercutieron en el incremento de hasta 69 % en la cobertura vegetal, y disminución de la pérdida de suelo, hasta en 30 % con respecto al testigo, en un ambiente semiárido, con la aplicación de 5 y 10 Mg ha⁻¹ de vermicomposta (Tejada *et al.*, 2009).

Estudios en invernadero, campo y laboratorio bajo condiciones adecuadas de riego, han demostrado directa o indirectamente que los nutrientes, reguladores del crecimiento, ácidos húmicos y poblaciones microbianas de la vermicomposta favorecen la producción de biomasa y cantidad de flores y frutos o semillas en arroz (*Oryza sativa*; Jeyabal y Kuppaswamy, 2001), caléndula (*Calendula officinalis*; Warman *et al.*, 2010), chile (*Capsicum annuum*; Bachman y Metzger, 2008), fresa (*Fragaria vesca* L.; Sing *et al.*, 2010), frijol (*Phaseolus vulgaris* L.; Joshi *et al.*, 2009; Fernández-Luqueño *et al.*, 2010), lechuga (*Lactuca sativa* L.; Ali *et al.*, 2007), maíz (*Zea mays* L.; Gutiérrez *et al.*, 2008; Roy *et al.*, 2010), petunias (*Petunia* sp.; Arancon *et al.*, 2008), sorgo (*Sorghum bicolor* L.; Cavender *et al.*, 2003), pepino (*Cucumis sativus* L.) y tomate (*Solanum lycopersicum*; Zaller, 2007; Moreno *et al.*, 2008).

La presente investigación tuvo como objetivo conocer el efecto de la adición de vermicomposta al suelo en algunos componentes del rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en condiciones de déficit de humedad durante la etapa reproductiva. Con base en los antecedentes que indican que la vermicomposta modifica ciertas características del suelo se plantea la hipótesis de que el rendimiento y sus componentes en plantas de frijol mantenidas con déficit de humedad durante la etapa reproductiva, se ven menos afectados cuando se adiciona vermicomposta al suelo, sin diferencia de la tolerancia del cultivar a la sequía.

Materiales y Métodos

Material vegetal

Se utilizaron los cultivares de frijol 92 y 122 caracterizados como tolerante y susceptible a sequía respectivamente, y con hábito de crecimiento tipo II. Los cultivares están emparentados y fueron derivados de familias F3 de la cruza AC1028 x Pinto Sierra (Ramírez-Vallejo y Kelly, 1998), e incrementados diez generaciones, seleccionados con base en su comportamiento fisiológico, morfológico y de rendimiento de semilla en condiciones de déficit de humedad en el suelo en las condiciones de los valles altos mexicanos, por el Programa de Mejoramiento Genético de Frijol del Postgrado de Recursos Genéticos y Productividad del Colegio de Postgraduados (Rodríguez, 2008)⁵.

Cuadro 1. Calidad de semillas de cultivares de frijol tolerante y susceptible a sequía, cultivados en Montecillo, México en el ciclo primavera-verano, 2008.

Indicador	Cultivar 92 tolerante	Cultivar 122 susceptible	Media general
Contenido de humedad (%)	10.80 a	9.30 a	10.09
Germinación (%)	88.00 a	85.00 a	84.50
Tamaño de semilla (g)*	0.25 b	0.32 a	0.29

* Tamaño de semilla se refiere a su masa media individual (n=100). Valores en cada línea seguidos con letra diferente son significativamente distintos (Tukey, $P \leq 0.05$).

Las semillas utilizadas en la investigación fueron multiplicadas por el Programa de Mejoramiento de Frijol en el Campus Montecillo del Colegio de Postgraduados en el ciclo primavera-verano de 2008; para conocer parcialmente su calidad y homogeneidad se cuantificó el tamaño (masa) individual de una muestra de 100 semillas; el porcentaje de humedad en una muestra de cinco semillas, con

⁵ Rodríguez, G. M. N. 2008. Selección de líneas de frijol tolerantes a la sequía con base en respuestas de la planta al estrés hídrico. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. Pp. 115

cuatro repeticiones, y el porcentaje de germinación, con la prueba estándar descrita por ISTA (2004) utilizando 25 semillas (con cuatro repeticiones) por cultivar (Cuadro 1).

Sustrato

La vermicomposta empleada fue adquirida en el Módulo de Abonos Orgánicos y Lombricultura de la Universidad Autónoma Chapingo, México; y elaborada a partir de una mezcla de residuos de cosecha de jitomate, hojas secas de fresno y estiércol de bovino, en proporción 40:20:40. El lapso de descomposición y estabilización fue de seis meses. El producto obtenido presentó pH 7.2, materia orgánica 21.7 % y conductividad eléctrica de 3.99 dS m⁻¹.

El suelo usado, extraído de los primeros 20 cm de profundidad de una parcela agrícola de Texcoco, México; tuvo una textura migajón arcillo-arenoso. Las mezclas evaluadas se prepararon con 1.5 y 3.0 % de vermicomposta. Con los datos de densidad aparente del suelo y considerando 20 cm de profundidad se calculó la cantidad de vermicomposta correspondiente a las proporciones de 1.5 y 3.0 % con base a peso seco; que fueron iguales a 40 y 80 Mg ha⁻¹ respectivamente (Troeh y Thompson, 1993). Las características fisicoquímicas del suelo y las mezclas respectivas fueron evaluadas en el área de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados, Montecillo, México (Cuadro 2).

Los contenidos de humedad que caracterizan los parámetros conocidos como capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) de los sustratos utilizados fueron cuantificados por los métodos de la olla y la membrana de presión respectivamente (Castellanos *et al.*, 2000), y usados para calcular la humedad aprovechable (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características fisicoquímicas y valores de referencia de los sustratos evaluados en el rendimiento de frijol con riego y déficit de humedad.

	Proporción de vermicomposta en el suelo (%)			Media general
	0	1.5	3.0	
Cationes intercambiables				
Ca ⁺⁺ (cmol kg ⁻¹)	15.30 b	16.60 a	15.26 b	15.75
Mg ⁺⁺ (cmol kg ⁻¹)	6.40 ab	5.70 b	7.43 a	6.51
Conductividad eléctrica (dS m ⁻¹)	0.91 b	1.22 a	1.25 a	1.13
Densidad aparente (g cm ³)	1.37 a	1.35 a	1.30 a	1.34
Materia orgánica (%)	1.57 a	1.57 a	1.66 a	1.60
pH (relación 1:2)	7.77 a	7.67 c	7.71 b	7.72
Porosidad total (%)	45.06b	45.73a	48.33a	46.36
Capacidad de campo (%)	12.4 a	12.9 a	12.8 a	12.69
PMP (%)*	6.7 b	7.4 a	7.7 a	7.30
Humedad aprovechable (%)	5.6 a	5.4 a	5.1 a	5.38

*Medias en las líneas seguidas con letra diferente son significativamente distintas (Tukey, $p \leq 0.05$). PMP: punto de marchitez permanente.

Diseño experimental

El experimento fue establecido con base en un diseño factorial asimétrico completamente al azar con cinco repeticiones. Los factores y niveles fueron: (a) cultivar o línea de frijol, con dos niveles: susceptible (cv. 122) y tolerante (cv. 92) a sequía; (b) régimen de riego, con dos niveles, riego durante el ciclo completo de crecimiento y suspensión de riego a partir de la floración y hasta la cosecha; y (c) sustrato: suelo, suelo con 1.5 % de vermicomposta y suelo con 3 % de vermicomposta. Así, se evaluaron 12 tratamientos y un total de 60 unidades experimentales. La unidad experimental fue una maceta con dos plantas y los parámetros del rendimiento se expresaron por planta.

El análisis de varianza (ANOVA) para el número de inflorescencias y vainas desde la suspensión del riego y hasta antes de la cosecha, se realizó bajo el diseño de mediciones repetidas, con los supuestos del modelo de parcelas divididas, donde las combinaciones factoriales equivalen al efecto de las parcelas completas y las mediciones repetidas en el tiempo equivalen al efecto de las subparcelas (Kuehl, 2001). Se obtuvo la significancia de los efectos de los factores principales y sus interacciones y la comparación múltiple de medias se realizó con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Para el análisis de los datos de vainas totales, vanas y normales, semillas por vaina y biomasa de semillas al momento de la cosecha, se utilizó el modelo del diseño factorial, con un análisis de varianza y prueba de comparación múltiple de medias con la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

Condiciones y desarrollo del experimento

La investigación se realizó en un invernadero en el Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Estado de México (19° 27' latitud N, 98° 54' de longitud W y 2220 de altitud) (INEGI, 2005). La humedad relativa y la temperatura del invernadero fue evaluada con un equipo electrónico "data logger" (HOBO U12-011, EE.UU.). La humedad relativa durante los experimentos fluctuó entre 47 y 65 % y la temperatura media fue de 24° +/- 2°C.

En macetas con 10 kg de sustrato se sembraron tres semillas de cada cultivar. Cuando la primera hoja trifoliolada estuvo expuesta se eliminó una plántula de cada maceta y se mantuvieron aquellas con crecimiento homogéneo y mayor vigor aparente. Las plantas se mantuvieron con riego suficiente para mantener el sustrato con humedad aprovechable entre 80 y 100 % mediante control gravimétrico de las macetas. Después de 59 días de la siembra, cuando más del 50 % de las plantas se encontraba en floración se integraron en forma aleatoria dos grupos de macetas de cada sustrato y cultivar, un grupo se mantuvo con el mismo régimen de riego y al otro se le suspendió el riego hasta la madurez fisiológica del cultivo.

El agua de riego tuvo pH 7.4 y conductividad eléctrica de 0.53 dS m^{-1} , valores que se ubican dentro de los intervalos usados en la clasificación de la calidad de agua apta para riego (Ayers y Wescot, 1985). Las plantas crecieron sanas y vigorosas, y no se detectaron plagas o enfermedades durante el estudio.

Variables evaluadas

A partir de los 50 días posteriores a la siembra se contabilizaron semanalmente y hasta la cosecha las inflorescencias y las vainas en tres unidades experimentales tomadas aleatoriamente de cada tratamiento.

Las vainas fueron cosechadas manualmente después de 98 y 125 días de la siembra en los tratamientos con suspensión de riego y riego continuo respectivamente; en ese momento presentaban el color amarillo paja típico de la madurez fisiológica. Las vainas se mantuvieron tres días sobre los bancales del invernadero para asegurar su deshidratación homogénea; posteriormente, se cuantificaron las vainas totales, vanas y normales, semillas por vaina y biomasa de las semillas (g) por planta.

Para conocer la uniformidad del tamaño (peso) de semilla se obtuvo la distribución de frecuencias de la biomasa seminal individual de una muestra de 100 de ellas de cada tratamiento.

Resultados y discusión

Analizando los efectos principales de cada factor se observó que la suspensión de riego disminuyó 16 % el número de inflorescencias, respecto a la condición con riego; mientras que la vermicomposta en proporción de 1.5 y 3.0 % incrementó en 19 y 31 % respectivamente estas estructuras en comparación a la condición en la que estaba ausente (Cuadro 3).

El patrón de floración fue desigual entre los cultivares (Figura 1 A-B) y se afectó en forma diferente por la vermicomposta, el déficit de humedad y su combinación; aunque, la cantidad media de inflorescencias a lo largo del ciclo fue similar entre ellos (Cuadro 3).

El cv. 122, susceptible a sequía, mostró cerca del 50 % (2-3 inflorescencias) del número máximo de sus inflorescencias 50 días después de la siembra (DDS), alcanzó la floración máxima a los 57 DDS (6 inflorescencias), para decaer luego sincrónicamente en todos los tratamientos evaluados (Figura 1 A). En contraste, la floración del cv. 92, tolerante a sequía en todas las condiciones evaluadas alcanzó el máximo número de inflorescencias (5-7) a los 57 DDS; proporción que se mantuvo constante por siete días en los tratamientos con 1.5 % de vermicomposta y suspensión de riego, 3 % de vermicomposta con riego, y en el testigo con déficit de humedad (Figura 1 B). Estos resultados muestran que la vermicomposta y la restricción de humedad en el suelo modificaron la fenología de la floración (etapa R6; Fernández *et al.*, 1983) únicamente en el cv. 92, lo que se explica como una respuesta diferencial entre grupos de líneas tolerantes y susceptibles (Rodríguez, 2008)⁶.

La producción de vainas en el tiempo también contrastó entre los cultivares (Cuadro 3). En el cv. 122 ésta fue acelerada y sincrónica entre sus tratamientos, alcanzó los valores máximos 64 DDS y luego decayó ($p \leq 0.05$) de la misma forma con las cuatro condiciones de cultivo y el testigo con y sin riego. En contraste, en el cv. 92 la producción de vainas incrementó paulatinamente después de 50 DDS y en

⁶ Rodríguez, G. M. N. 2008. Selección de líneas de frijol tolerantes a la sequía con base en respuestas de la planta al estrés hídrico. Tesis doctoral, Colegio de Postgraduados. Montecillo, México. Pp. 115

los testigos alcanzó el máximo 70 DDS y en otros tratamientos hasta los 78 DDS en las diferentes condiciones de humedad y proporción de vermicomposta, a excepción del tratamiento con 3 % de vermicomposta y suspensión de riego, que alcanzó el máximo 57 DDS y luego decayó significativamente (Figura 1 C-D).

Cuadro 3. Número de inflorescencias (NI) y número de vainas en cultivares de frijol susceptible y tolerante a sequía, cultivados en condiciones de invernadero. Datos tomados una vez por semana entre los 50 y 92 días después de la siembra.

	NI	NV
Vermicomposta (%)		
0.0	5.9b	7.2b
1.5	7.1a	9.3a
3.0	7.7a	11.4a
Cultivar		
Susceptible	6.8a	10.6a
Tolerante	7.0a	8.0b
Humedad		
Riego	7.5a	9.0a
Suspensión	6.3b	9.5a
MEDIA GENERAL	6.9	9.3
Humedad x Cultivar	NS	NS
Humedad x Vermicomposta	NS	NS
Cultivar x Vermicomposta	NS	NS

Valores con la misma letra en cada columna son significativamente similares (Tukey, $p \geq 0.05$); NS=no significativa. n = 3 (1 maceta con 2 plantas por repetición).

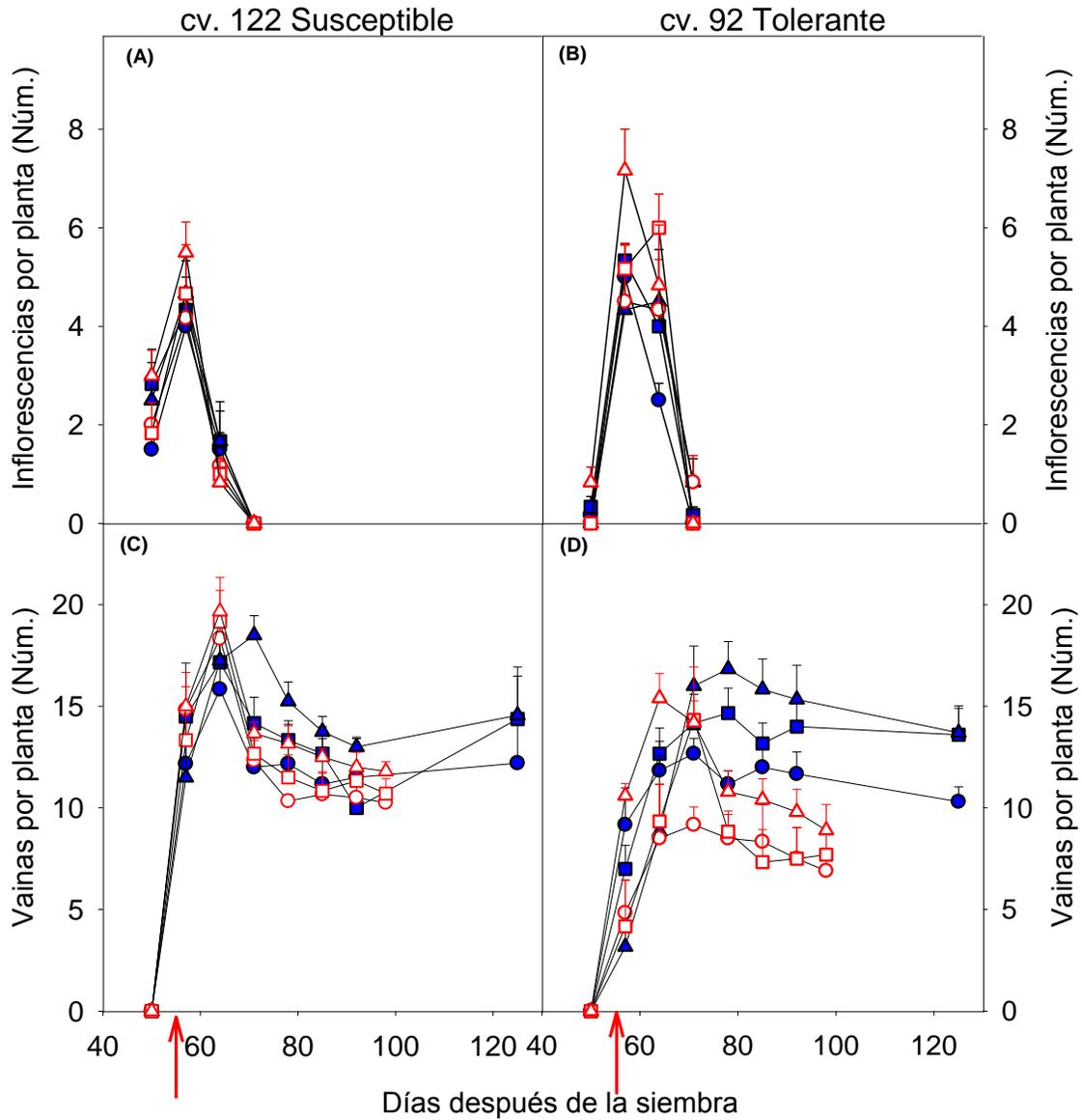


Figura 1. Producción de inflorescencias (A, B) y vainas (C, D) por planta de frijol, susceptible y tolerante a sequía, cultivado en invernadero con diferentes sustratos. Las flechas señalan la suspensión de riego en los tratamientos respectivos. La cosecha se realizó a los 98 y 125 días después de la siembra, para los tratamientos con suspensión de riego y riego continuo respectivamente. Suelo (●, ○), suelo con 1.5% de vermicomposta (■, □) y suelo con 3 % de vermicomposta (▲, △). Símbolos llenos corresponden a los tratamientos con riego continuo y los vacíos a aquellos con suspensión de él.

Estos resultados indican que la combinación de la suspensión del riego y la presencia de vermicomposta en el sustrato modificó la fenología de la etapa reproductiva del cv. 92 y que su respuesta a estas condiciones fue diferente al cv. 122. Sin embargo, es claro que el número de vainas producidas durante el ciclo de cultivo incrementó ($p \leq 0.05$) con la presencia de vermicomposta (Figura 1 A-B).

Es probable que la abscisión de vainas haya disminuido su cantidad en el cv. 122, después de haber alcanzado el valor máximo (Figura 1 C); y aunque la abscisión de estructuras reproductivas por efecto del déficit de humedad ha sido documentada en frijol (Acosta-Díaz *et al.*, 2003; Castañeda *et al.*, 2006), garbanzo (Leport *et al.*, 2006; Fang *et al.*, 2010) y soya (Liu *et al.*, 2004), los resultados mostraron que el cv. 122 tuvo abscisión natural de esas estructuras, pues el comportamiento fue similar en los testigos con y sin déficit de humedad.

En los tratamientos con suspensión del riego el PMP (equivalente a -1.5 MPa o 7.5 % de humedad) se alcanzó ocho días después de su suspensión (67 DDS) y el contenido de humedad en el suelo continuó disminuyendo hasta valores cercanos al 2% hacia los 98 DDS (Figura 2).

Sin embargo, con 3.0 % de vermicomposta se observó el incremento de la humedad retenida a PMP; lo que puede atribuirse al incremento ($p \leq 0.05$) de la porosidad en comparación con el testigo (Cuadro 2 – Figura 2). Al respecto, algunos autores han observado que la porosidad (Ghassemi *et al.*, 2010) y características específicas como orientación (Sasal *et al.*, 2006), tamaño (Dikinya *et al.*, 2007), volumen y continuidad (Gebhardt *et al.*, 2008) de los poros influyen en la conductividad hidráulica del suelo y su capacidad para almacenar agua.

La madurez fisiológica bajo suspensión de riego se alcanzó a los 98 DDS para ambos cultivares y proporciones de vermicomposta; en contraste, con riego la madurez fisiológica se atrasó 27 días (125 DDS - Figura 1 C-D). La sincronía de los dos cultivares para alcanzar la madurez fisiológica, en una u otra condición de humedad, puede deberse en parte a que poseen el mismo hábito de crecimiento (tipo II). Este resultado demostró que el déficit de humedad, bajo las condiciones de estudio, aceleró la maduración de ambos cultivares con presencia o ausencia de la vermicomposta; aunque algunas etapas previas a la maduración hayan sido

asincrónicas entre los cultivares, como la antesis (etapa R5), R6 y R7 que fueron menor y mayores respectivamente, en el cv. 92 comparado con el 122 (Figura 1 C-D).

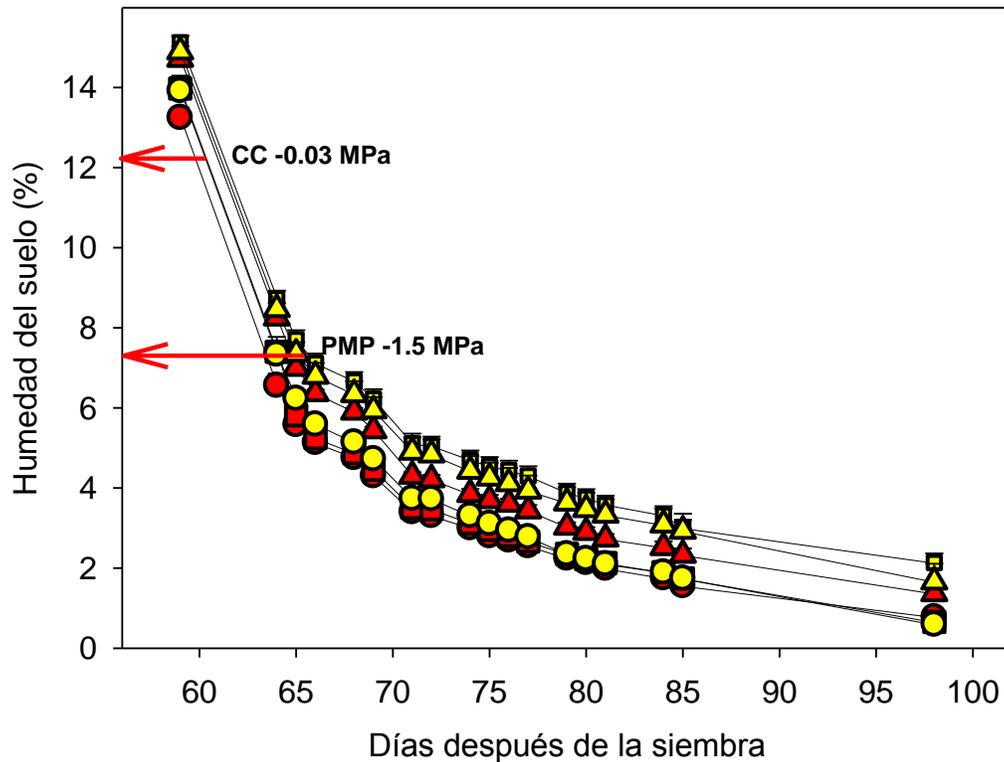


Figura 2. Contenido de humedad determinada por gravimetría en macetas con plantas de frijol susceptible (símbolos rojos) y tolerante (símbolos amarillos) a sequía, con suspensión de riego a partir del día 59 después de la siembra y hasta la cosecha (98 DDS). Sustratos: suelo (testigo) (●, ●), suelo con 1.5 % de vermicomposta (■, ■) y suelo con 3 % de vermicomposta (▲, ▲). CC: capacidad de campo; PMP: punto de marchitez permanente; n=5. Los tratamientos con riego mantuvieron 80 a 100 % de humedad aprovechable en el sustrato.

En la cosecha ambos cultivares produjeron número similar ($p \geq 0.05$) de vainas por planta con todas las condiciones de evaluación; sin embargo, contrastaron las características de las vainas. Es el caso del número de vainas vanas, que puede

tener uno de los efectos mayores en el rendimiento, pues la planta asigna recursos para su desarrollo pero estos no se transforman en simiente; en promedio, el cv. 122 generó casi el doble de vainas vanas respecto al cv. 92. Sin embargo, el primero tuvo rendimiento de semilla 22 % mayor que el segundo, lo que pudo deberse a que de origen el cv. 122 presentó semillas con mayor peso (Cuadro 4; Figura 3).

El efecto negativo del déficit de humedad en la producción de vainas fue significativo, pues con la suspensión del riego se disminuyó en 25 % la cantidad de vainas cosechadas y de estas únicamente 20 % no tuvieron semillas abortadas; además, la restricción de humedad disminuyó drásticamente ($p \leq 0.05$) la producción de semillas y el rendimiento decayó cerca de 50 %, respecto al obtenido con riego continuo (Cuadro 4).

Los resultados del estudio mostraron el efecto positivo de la vermicomposta en ambas condiciones de humedad y cultivares evaluados. La vermicomposta en las dos proporciones evaluadas incrementó ($p \leq 0.05$) en 15 % el número de vainas cosechadas; aunque, con 3 % de vermicomposta se produjo la misma cantidad de vainas vanas que sin ella, tanto la cantidad de semillas cosechadas por planta, como su biomasa (rendimiento) fueron significativamente mayores, entre 22 y 34 %, y entre 20 y 33 %, respectivamente con 1.5 y 3 % de vermicomposta (Cuadro 4).

El incremento de estructuras reproductivas promovido por la vermicomposta, como frutos y semillas, observado en los resultados (Cuadro 4), puede explicarse como el resultado de su aporte de nutrientes y otros compuestos como ácidos húmicos (Arancon *et al.*, 2006), fitohormonas reguladoras del crecimiento y enzimas microbianas (Masciandaro *et al.*, 2000; Arancon *et al.*, 2005) al suelo, que promueven el crecimiento y desarrollo de las plantas (Roy *et al.*, 2010), como el frijol (Fernández-Luqueño *et al.*, 2010). El efecto de algunas fitohormonas ha sido demostrado, en condiciones de déficit moderado de agua en el suelo, el ácido abscísico estimula el crecimiento de vainas en soya (Liu *et al.*, 2004) y la citoquinina puede estimular la producción de flores y prevenir la abscisión de vainas en condiciones de riego (Nagel *et al.*, 2001).

Cuadro 4. Significancia de los niveles de factores principales y sus interacciones para el rendimiento y sus componentes en cultivares de frijol susceptible y tolerante a sequía, cultivados en condiciones de invernadero.

Factor	Vainas (Número)			Semillas (Núm y gr)		
	Totales	Normales	≥ una semilla abortada	Vanas	Totales	Biomasa
Cultivar						
Susceptible	12.2 a	2.8 a	5.6 b	3.3 a	31.0 a	8.3 a
Tolerante	10.2 a	1.9 b	7.0 a	1.2 b	28.0 a	6.8 b
Humedad						
Riego	12.4 a	2.8 a	7.5 a	2.5 a	35.7 a	9.8 a
Suspensión de riego	9.3 b	1.8 b	5.0 b	2.0 a	23.0 b	5.2 b
Vermicomposta						
0.0%	10.2 b	2.8 b	4.8 b	3.1 a	25.6 c	6.6 c
1.5%	11.6 a	2.6 b	7.2 a	2.2 b	31.3 b	7.9 b
3.0%	11.9 a	3.2 a	7.1 a	3.1 a	34.4 a	8.8 a
MEDIA GENERAL	10.89	2.35	6.29	2.24	29.45	7.54
Cultivar x humedad	NS	*	NS	NS	*	NS
Cultivar x verm	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Hume x verm	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Las medias corresponden a datos tomados al momento de la cosecha, de plantas en madurez fisiológica. *Valores con la misma letra en cada columna son significativamente similares (Tukey, $p \geq 0.05$). $n = 10$. **=significativa ($P \leq 0.01$); *=significativa ($P \leq 0.05$); NS=no significativa.

También, se ha señalado que la vermicomposta modifica las propiedades fisicoquímicas del suelo, contribuye en la formación de poros de diámetro entre 50 y 500 μm , considerados los más importantes en la relación suelo-agua-planta (Marinari *et al.*, 2000); además, apoya la formación de agregados estables al agua, lo que genera sustratos con estructura más granulada y menos compacta (Sánchez *et al.*, 2005), disminuye el pH del suelo e incrementa la cantidad de macro y micronutrientes disponibles para la planta (Azarmi *et al.*, 2008).

El análisis de los factores principales mostró que el cv. 122 produjo en promedio 41 % más vainas con la suspensión de riego, con y sin vermicomposta, respecto al cv. 92; sin embargo, el efecto positivo de la vermicomposta se observó en ambos cultivares y condiciones de humedad, pues con riego y suspensión de él incrementó significativamente (entre 11 y 25 %) la producción de vainas respectivamente (Figura 3 A-B). Destacó que el testigo del cv. 122 (susceptible a sequía) con suspensión de riego haya generado mayor cantidad de vainas que el cv. 92 (Figura 3 A-B); sin embargo, 43 % de ellas eran vanas (Figura 3 C-D). Lo anterior indica que el cv. 92, con las proporciones mayores de vainas con semillas normales (29%), en condiciones de déficit de humedad tiene una mejor asignación de recursos para la formación de las estructuras reproductivas y las que se desarrollan contienen semillas normales, como resultado de su tolerancia a sequía.

La interacción entre el cultivar y la condición de riego para el total de vainas cosechadas y vainas normales fue significativa, lo que indica que la producción de estas estructuras y algunos de sus atributos fueron dependientes simultáneamente de la tolerancia del cultivar a la sequía y de la disponibilidad de humedad.

Los mecanismos por los cuales el déficit hídrico puede afectar el desarrollo de estructuras reproductoras son parcialmente conocidos. Al respecto, se ha señalado que los potenciales de agua bajos afectan la división celular, la síntesis de proteínas y el metabolismo de los carbohidratos, que disminuyen o detienen el crecimiento (Liu *et al.*, 2004); en este estudio los efectos fueron expresados y cuantificables en las inflorescencias, vainas y semillas, debido, en parte, a que la suspensión del riego se inició con la floración.

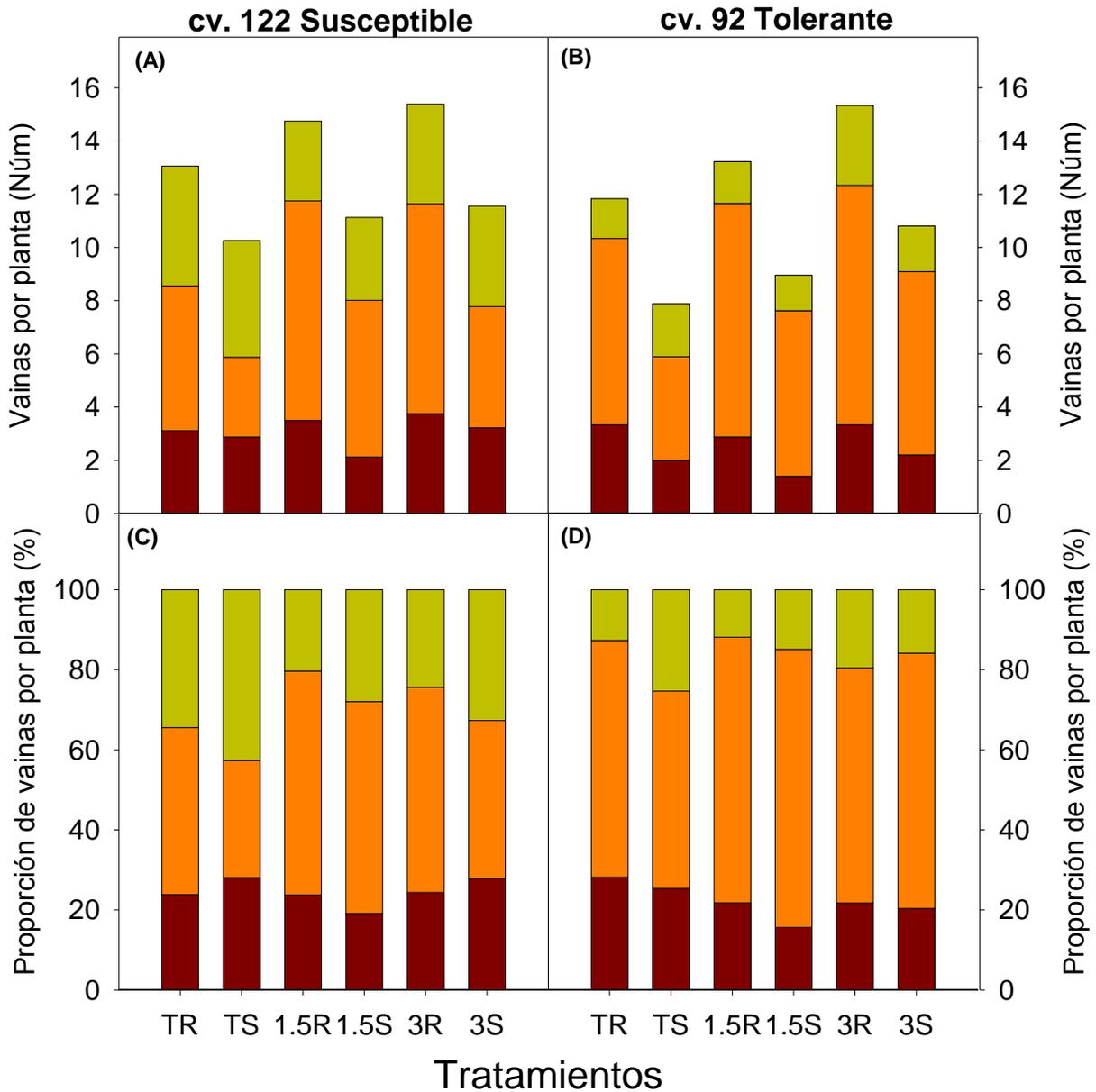


Figura 3. Cantidad (A, B) y proporción (C, D) de vainas normales (sección inferior de las barras), con una o más semillas abortadas (sección intermedia de las barras) y vanas (sección superior de las barras) de frijol susceptible y tolerante a sequía, cultivado en invernadero en diferentes sustratos y riego durante el cultivo o su suspensión a partir de la floración. Tratamientos: testigo (suelo) con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3.0 % de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S); n=10.

Se ha sugerido que dentro de ciertos límites, la caída del potencial de agua de los tejidos de vainas y semillas e incluso la falta de asimilados, debida al déficit de humedad, no afecta su crecimiento, ya que el efecto mayor lo generan las señales liberadas por las raíces que activan procesos fisiológicos diversos (Leport *et al.*, 2006).

La cantidad y rendimiento de semilla del testigo con riego del cv. 122 fue similar al cv. 92; en ambos casos la vermicomposta incrementó el rendimiento significativamente, entre 14 y 32 % con 1.5 y 3 %, respectivamente. El déficit de humedad en ausencia de vermicomposta disminuyó significativamente el rendimiento en ambos cultivares (entre 25 y 82 %); en contraste, su presencia modificó positivamente la reacción al déficit de humedad y se manifestó con el incremento significativo en el número de semillas (28 % en el cv. 122 y 48 % en el cv. 92) y por lo tanto en el rendimiento (hasta 30 % y 50 % con 3 % de vermicomposta en el cv. 122 y 92, respectivamente), en comparación a los testigos con suspensión de riego (Figura 4 A-D).

En relación con lo anterior, se ha señalado que el número y tamaño de semillas en frijol son componentes del rendimiento poco asociados a la tolerancia a sequía, pues son características relativamente estables escasamente afectadas por el estrés causado por el ambiente; en contraste, se sugiere que los citados componentes son mayormente afectados por la duración del periodo reproductivo (Martínez *et al.*, 2007). En el presente estudio se comprobó que la fenología de reproducción del frijol se redujo aproximadamente un mes por efecto de la restricción de humedad; lo que indica que la eficiencia en el uso de agua estuvo dirigida a la supervivencia de las plantas y no al incremento del rendimiento.

La interacción entre el cultivar y la condición de riego en el número de semillas fue significativa, esto indica que la producción de semilla depende simultáneamente de la tolerancia del cultivar a la sequía y de la disponibilidad de humedad.

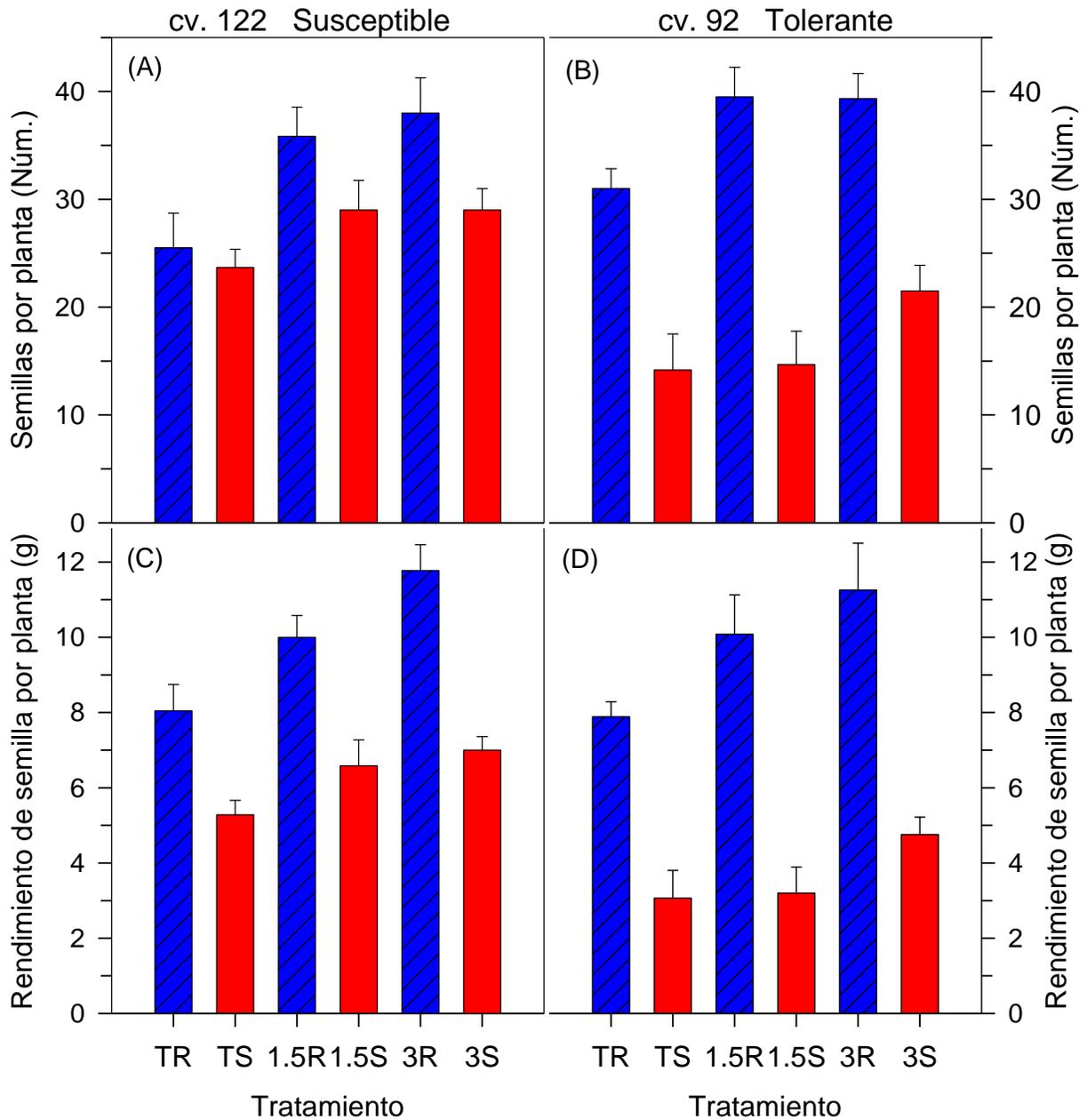


Figura 4. Número (A, B) y biomasa (C, D) de semillas producidas por planta de frijol susceptible y tolerante a sequía cultivado en invernadero en diferentes sustratos y con riego durante el cultivo o su suspensión a partir de la floración. Tratamientos: testigo (suelo) con riego (TR), testigo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3.0 % de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S); n=10.

El tamaño de semilla mayor característico del cv. 122 (22 %) respecto al cv. 92 (Cuadro 1) se mantuvo en los tratamientos con riego; sin embargo, el déficit de humedad modificó este carácter (Cuadro 5). El tamaño medio de semilla de ambos cultivares disminuyó significativamente con la suspensión del riego: En el cultivar tolerante a sequía (29 %) respecto al susceptible (17 %) y la presencia de vermicomposta en el suelo mantuvo sin cambio esa diferencia.

Cuadro 5. Tamaño de semilla (g) de dos cultivares de frijol, susceptible y tolerante (cv. 122 y 92, respectivamente) a sequía, cultivados en suelo, sin o con vermicomposta como sustrato, y riego en el ciclo completo o su suspensión a partir de la floración, en condiciones de invernadero.

Cultivar	Riego			Suspensión de riego		
	Vermicomposta (%)			Vermicomposta (%)		
	0	1.5	3.0	0	1.5	3.0
Susceptible	0.315a	0.273b	0.306a	0.222cd	0.225cd	0.228cd
Tolerante	0.253b	0.231c	0.254b	0.210d	0.212cd	0.212cd

Valores con la misma letra son significativamente similares (Tukey, $p \geq 0.05$). $n=100$.

Además de disminuir el tamaño medio de la semilla, el déficit de humedad modificó las proporciones de tamaño de semilla en ambos cultivares (Figura 5). Esta condición, independientemente de la presencia de vermicomposta en el sustrato, incrementó la frecuencia de semillas con masa alrededor de los 250 mg y disminuyó o eliminó las de masa mayor (comparar TS, 1.5S y 3S con las respectivas TR, 1.5R y 3R en la Figura 5).

Se sugiere que el efecto positivo de la vermicomposta en el rendimiento es debido, en parte, al aumento de biomasa de estructuras que almacenan fotoasimilados antes del periodo de estrés, y que cubrirán la demanda para el desarrollo de las estructuras reproductoras. Al respecto, Roy *et al.* (2010) observaron que 8 % de vermicomposta en el sustrato incrementó el contenido de clorofila en las hojas de frijol, lo que estuvo relacionado con la acumulación de biomasa.

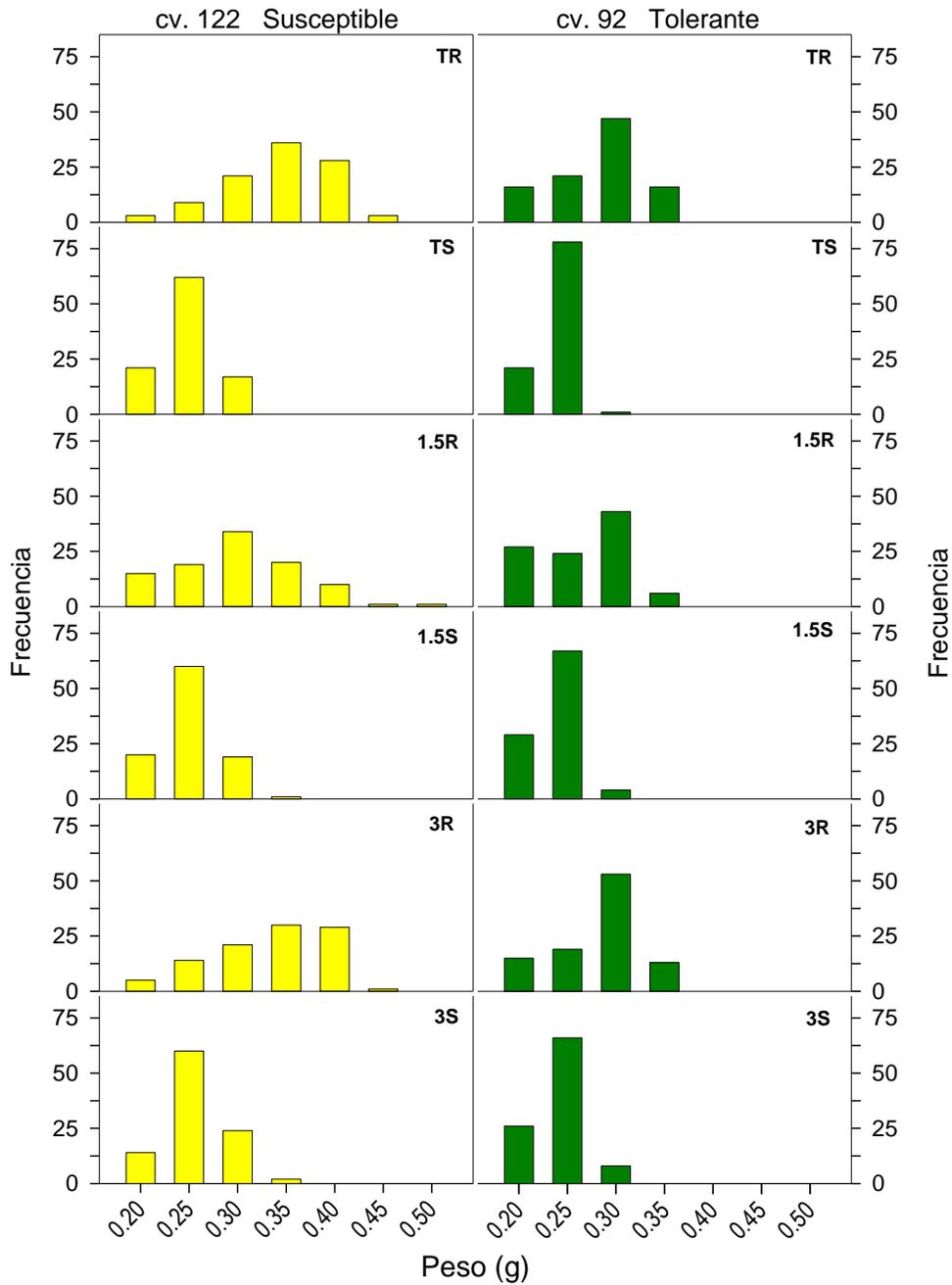


Figura 5. Frecuencia de tamaño (masa) de semillas de frijol susceptible y tolerante a sequía, cultivado en invernadero en diferentes sustratos y riego durante el cultivo o su suspensión a partir de la floración. Testigo en suelo con riego (TR), testigo en suelo con suspensión de riego (TS), suelo con 1.5 % de vermicomposta con riego (1.5R) y suspensión (1.5S), suelo con 3.0 % de vermicomposta con riego (3R) y suspensión (3S) n=100.

Fernández-Luqueño *et al.* (2010) señalaron que la adición de vermicomposta al suelo incrementó el rendimiento de frijol, lo que estuvo relacionado positivamente con la producción de biomasa y el aumento de N disponible. Otros autores indican que los productos orgánicos incorporados al suelo tienen un efecto benéfico en los cultivos porque generalmente mejoran la fertilidad del suelo (Cavender *et al.*, 2003).

En el presente estudio los cambios observados en el sustrato con las mezclas de vermicomposta pueden referirse al contenido de cationes intercambiables (Ca^{++} y Mg^{++}), relacionado parcialmente con la conductividad eléctrica significativamente mayor de los sustratos con vermicomposta.

Aún cuando la materia orgánica se mantuvo sin cambio significativo, se observó la tendencia de su incremento (7 %) con 3 % de vermicomposta (Cuadro 2); y hay evidencias de que el aporte de la población microbiana de la vermicomposta, evaluada mediante la actividad deshidrogenasa, acelera los procesos de degradación de la materia orgánica del suelo, lo que contribuye a incrementar los rendimientos de los cultivos (Arancon *et al.*, 2005).

Conclusiones

Se comprobó que el déficit de humedad en la etapa reproductiva del frijol afecta el rendimiento y sus componentes en los cultivares de frijol, independientemente de su carácter de tolerancia al déficit de humedad reconocido previamente.

La modificación de algunas características fisicoquímicas del suelo, como el incremento de la porosidad, disminución del pH e incremento de la conductividad eléctrica, promovidos por la vermicomposta apoyan la hipótesis de que modifica el sistema suelo-planta y disminuye los efectos del estrés por déficit de humedad. Lo anterior puede evaluarse por los efectos positivos en el rendimiento y sus componentes en el frijol. Sin embargo, el efecto de los tres factores evaluados (tolerancia del cultivar a la sequía, disponibilidad de humedad y vermicomposta) es, en parte, resultado de su interacción significativa; esto demuestra la complejidad de efectos y reacciones generadas. Con base en lo anterior, se sugiere estudiar los efectos de mayor cantidad de niveles de los factores principales para abundar en la explicación de los resultados y conocimiento de los efectos.

Literatura citada

- Abiven S, S Menasseri, C Chenu. 2009. The effects of organic inputs over time on soil aggregate stability – A literature analysis. *Soil Biology & Biochemistry* 41: 1-12.
- Ali M, A J Griffiths, J P Williams, D L Jones. 2007. Evaluating the growth characteristics of lettuce in vermicompost and green waste compost. *European Journal of Soil Biology* 43:S316-S319.
- Acosta-Díaz E, R M D Amador, G J A. 2003. Abscisión de estructuras reproductoras en frijol común bajo condiciones de secano. *Agricultura Técnica en México* 29(002): 155-168.
- Acosta-Díaz E, R M D Amador, R J S Padilla, D J P Gómez, M H Valadez. 2007. Biomasa y rendimiento de frijol tipo flor de junio bajo riego y sequía. *Agricultura Técnica en México* 33 (2):153-162.
- Arancon N Q, C A Edwards, P Bierman, J D Metzger, C Lutch. 2005. Effects of vermicomposts produced from cattle manure, food waste and paper waste on the growth and yield of peppers in the field. *Pedobiologia* 49:297-306.
- Arancon N Q, C A Edwards, S Lee, R Byrne. 2006. Effects of humic acids from vermicompost on plant growth. *European Journal of Soil Biology* 45: 65-69.
- Arancon N Q, C A Edwards, A Babenko, J Cannon, P Galvis, J D Metzger. 2008. Influences of vermicomposts, produced by earthworms and microorganisms from cattle manure, food waste, on the germination, growth and flowering of petunias in the greenhouse. *Applied Soil Ecology* 39:91-99.
- Ayers R S, D W Wescot. 1985. *Water Quality for Agriculture*. FAO Irrigation and Drainage Paper 29 Rev 1, Rome, Italy. 174 p.
- Azarmi R, G M Torabi, T R Didar. 2008 . Influence of vermicompost on soil chemical and physical properties in tomato (*Lycopersicum esculentum*) field. *African Journal of Biotechnology* 7(14):2397-2401.
- Castañeda S M C, T L Córdoba, H V A González, A A Delgado, V A Santacruz, G García de los santos. 2006. Respuestas fisiológicas, rendimiento y calidad en frijol sometido a estrés hídrico. *INTERCIENCIA* 31(6): 461- 465.
- Castañeda S M C, T L Córdoba, H V A González, A A Delgado, V A Santacruz, G García de los Santos . 2009. Physiological performance, yield, and quality of dry bean seeds under drought stress. *INTERCIENCIA* 34(10): 748-754.

- Castellanos J Z, B S X Uvalle, S A Aguilar. 2000. Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. 2ª ed. Colección INCAPA. San Miguel de Allende, Guanajuato. 226 p.
- Cavender N D, R M Atiyeh, M Knee. 2003. Vermicompost stimulates mycorrhizal colonization of roots of *Sorghum bicolor* at the expense of plant growth. *Pedobiologia* 47:85-89.
- Celis-Velazquez, R, C B Peña-Valdivia, M Luna-Cavazos, J R Aguirre R. 2010. Seed morphological characterization and reserves used during seedling emergency of wild and domesticated common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Revista de la Facultad de Agronomía (LUZ)* 27:61-87.
- Fang X, N C Turner, G Yan, F Li, K H M Siddique. 2010. Flower numbers, pod production, pollen viability, and pistil function are reduced and flower and pod abortion increased in chickpea (*Cicer arietinum* L.) under terminal drought. *Journal of Experimental Botany* 61(2): 335-345.
- Fernández F, P Gepts, G M López. 1983. Etapas de desarrollo en la planta de frijol común. CIAT. Cali, Colombia. 26 p.
- Fernández-Luqueño F, V V Reyes, S C Martínez, H G Salomón, M J Yañez, R J M Ceballos, L Dendooven. 2010. Effect of different nitrogen source on plant characteristics and yield of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) *Bioresource Technology* 101: 396-403.
- Ferreras L, E Gomez, S Toresani, I Firpo, Rossana R. 2006. Effect of organic amendments on some physical, chemical and biological properties in a horticultural soil. *Bioresource Technology* 97:635-640.
- Ghassemi G K, S Ghanehpour, N A D Mohammadi. 2009. Effects of water limitation on growth and grain filling of faba bean cultivars. *Journal of Food, Agriculture & Environment* 7(3&4): 442-447.
- Gutiérrez M F A, Z B Moguel, A M Abud, O V F Gutiérrez, L Dendooven. 2008. Sheep manure vermicompost supplemented with a native diazotrophic bacteria and mycorrhizas for maize cultivation. *Bioresource Technology* 99: 7020-7026.
- Hudson B D. 1994. Soil organic matter and available water capacity. *Journal of Soil and Water Conservation* 49(2):189-194.
- INEGI. 2005. Principales resultados por localidad 2005 (ITER). <http://www.inegi.org.mx/est/contenidos/espanol/sistemas/conteo2005/localidad/iter/default.asp?s=est&c=10395>

- ISTA International Seed Testing Association. 2004. International Rules for Seed Testing. Rules 2004. ISTA Ed. Zurich. Switzerland. 243 p.
- Jeyabal A, G Kuppaswamy. 2001. Recycling of organic wastes for the production of vermicompost and its response in rice-legume cropping system and soil fertility. *European Journal of Agronomy* 15:153-170.
- Joshi D, K S Hooda, J C Bhatt, B L Mina, H S Gupta. 2009. Suppressive effects of compost on soil-borne and foliar disease on French bean in the field in the western Indian Himalayas. *Crop Protection* 28: 608-615.
- Kuehl R. 2001. Diseño de experimentos: Principios estadísticos de diseño y análisis de investigación. 2^{da} ed. Thomson. México. 666p.
- Leport L, N C Turner, S L Davies, K H M Siddique. 2006. Variation in pod production and abortion among chickpea cultivars under terminal drought. *European Journal agronomy* 24: 236-246.
- Liu F, M N Andersen, C R Jensen. 2004. Root signal controls pod growth in drought-stressed soybean during the critical abortion-sensitive phase of pod development. *Field Crops Research* 85:159-166.
- Lizana C, M Wentworth, J P Martínez, D Villegas, R Meneses, E H Murchie, C Pastenes, B Lercari, P Vernieri, P Horton, M Pinto. 2006. Differential adaptation of two varieties of common bean to abiotic stress. I. Effects of drought on yield and photosynthesis. *Journal of Experimental Botany* 57(3): 685-697.
- Marinari S, G Masciandaro, B Ceccanti, S Grego. 2000. Influence of organic and mineral fertilizers on soil biological and physical properties. *Bioresource Technology* 72:9-17.
- Martínez J P, H Silva, J F Ledent, M Pinto. 2007. Effect of drought stress on the osmotic adjustment, cell wall elasticity and cell volume of six cultivars of common beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *European Journal of Agronomy* 26: 30-38.
- Masciandaro G, B Ceccanti, V Ronchi, C Bauer. 2000. Kinetic parameters of dehydrogenase in the assessment of the response of soil to vermicompost and inorganic fertilisers. *Biology and Fertility of Soils* 32:479-483.
- Moreno R A, L G Fuentes, P C Ríos, V M Cueto, J L R Carrillo, J L P Manríquez, N R Dimas. 2008. Genotipos de tomate en mezclas de vermicompost: arena en invernadero. *Terra Latinoamericana* 26:103.109.
- Nagel L, R Brewster, W E Riedel, R N Reese. 2001. Cytokinin regulation on flower and pod set in soybean (*Glycine max* L. Merr.) *Annals of Botany* 88:27-31.

- Neumann P M. 2008. Coping mechanisms for crop-plants in drought-prone environments. *Annals of Botany* 101: 901-907.
- Peña-Valdivia, C. B., J. C. Raya, H. R. Perales R., B. Lotina H., R. Merchant. 1997. Biochemical characterization of drought tolerant and susceptible young maize plants under well-watered conditions. En: Edmeades, G. O.; Bänziger M.; H. R. Mickelson; C. B. Peña-Valdivia (eds.). *Developing Drought- and Low N-Tolerant Maize: Proceedings of a Symposium*. El Batán, México, pp. 163-168.
- Peña-Valdivia, C. B., A. B. Sánchez-Urdaneta, C. Trejo, J. R. Aguirre R., E. Cárdenas. 2005. Root anatomy of drought sensitive and tolerant maize (*Zea mays* L.) seedlings under different water potentials. *Cereal Research Communications* 33(4):705-712.
- Ramírez-Vallejo P, J D Kelly. 1998. Traits related to drought resistance in common bean. *Euphytica* 99:127-136.
- Rosales-Serna S R, P V Ramírez, J A G Acosta, F G Castillo, J D Kelly. 2000. Rendimiento de grano y tolerancia a la sequía del frijol común en condiciones de campo. *Agrociencia* 34:153-165.
- Roy S, K Arunachalam, D B Kumar, A Arunachalam. 2010. Effect of organic amendments of soil on growth and productivity of three common crops *viz. Zea mays, Phaseolus vulgaris and Abelmoschus esculentus*. *Applied Soil Ecology* 45: 78-84.
- Singh R, R K Gupta, R T Patil, R R Sharma, R Asrey, A Kumar, K K Jangra. 2010. Sequential foliar application of vermicompost leachates improves marketable fruit yield and quality of strawberry (*Fragaria x ananassa* Duch.) *Scientia Horticulturae* 124:34-39.
- Tejada M, A M García-Martínez, J Parrado. 2009. Effects of a vermicompost composed with beet vinasse on soil properties, soil losses and soil restoration. *Catena* 77:238-247.
- Troeh F R, L M Thompson. 1993. *Soils and Soil Fertility*. Oxford University Press, USA. 5 Edition. 480p.
- Warman P R, M J AngLopez. 2010. Vermicompost derived from different feedstocks as a plant growth medium. *Bioresource Technology* 101:4479-4483.
- Zaller J G. 2007. Vermicompost in seedling potting media can affect germination, biomass allocation, yields and fruit quality of three tomato varieties. *European Journal of Soil Biology* 43:S332-S336.

Discusión general

Con los resultados obtenidos se evidenció que en un suelo clasificado como migajón arcillo-arenoso la vermicomposta modifica significativamente ($p \leq 0.05$) la porosidad, densidad aparente, conductividad eléctrica, pH y contenido de materia orgánica, proporcionalmente a la cantidad incorporada (Cuadro 2 del Capítulo 1). Este efecto ha sido observado en trabajos previos, en los que se comprobó que la densidad aparente del suelo se modifica al alterarse la porosidad, y que ésta depende de la cantidad de bioporos (100-500 μm), poros elongados (200-300 μm), y/o poros irregulares (>500 μm), efecto que obedece a las características de la vermicomposta, del suelo nativo y la relación de ambos (Marinari *et al.*, 2000). La conductividad eléctrica parece incrementarse por las sales que contiene la vermicomposta (Atiyeh *et al.*, 2002) y la producción de NH_4^+ , CO_2 y ácidos orgánicos debida a la actividad metabólica microbiana del suelo, incrementada por la vermicomposta puede contribuir a la disminución del pH (Albanell *et al.*, 1988). El presente estudio confirmó que la adición de vermicomposta al suelo tiene efectos inmediatos en diferentes características físico-químicas del suelo, lo que apoya la idea de considerarla en los programas de rehabilitación de suelos de áreas semiáridas, no obstante que su efecto dependa de la naturaleza de la vermicomposta, la concentración usada y, por supuesto, de las características del suelo (Tejada *et al.*, 2009).

También se observó que los contenidos de humedad a capacidad de campo (CC) y punto de marchitez permanente (PMP) fueron modificados por la vermicomposta con tendencias irregulares (Figura 1 del Capítulo 1). Esto es, con 9 % de vermicomposta la humedad gravimétrica a CC incrementó 6 % respecto al testigo, mientras que con 1.5 y 3 % de vermicomposta el PMP disminuyó 10.4 y 3 %, respectivamente. Al respecto, otros autores ha señalado que las propiedades hidráulicas del suelo, incluyendo la retención de agua, están directamente relacionadas con la geometría de los espacios porosos disponibles (Vogel y Roth, 2001) y se ha comprobado que la distribución y conexión de estos espacios es más importante que el tamaño de los mismos; además, se ha documentado que los cambios físicos debido a la ruptura o conexión de flujos capilares influye tanto en la difusión de solutos como en características para la retención de agua (Dikinya *et al.*,

2007); esto significaría entonces que el arreglo de las partículas depende en este caso de la proporción de vermicomposta incorporada y por tanto el espacio poroso, su geometría y conexión se modifican en respuesta a la interacción suelo x vermicomposta.

En este estudio también se observó que, la presencia de vermicomposta en el suelo modificó con patrones irregulares la germinación de las especies y cultivares. El maíz incrementó su imbibición máxima (IM) con 1.5 % de vermicomposta sin restricción de humedad (-0.03 MPa), en las mismas condiciones la IM del frijol susceptible a sequía no se alteró y el cultivar de frijol tolerante a la sequía disminuyó la velocidad de imbibición (Figuras 2 y 3 A-B del Capítulo 1). También, con la restricción de humedad (potencial de agua (Ψ_A) de -2.0 MPa) los dos cultivares de maíz y el cv. de frijol tolerante a la sequía reaccionaron con patrones similares, ya que todos disminuyeron la tasa de imbibición e incrementaron el tiempo para alcanzar la germinación máxima, principalmente con las proporciones mayores de vermicomposta (6 y 9 %); mientras que el cv. de frijol susceptible a sequía incrementó su tasa de imbibición con la presencia de vermicomposta en el suelo y la velocidad para la germinación máxima (Figuras 2 y 3 C-D del Capítulo 1). El efecto de la vermicomposta en el incremento del tiempo para la germinación máxima de maíz y frijol, así como la respuesta diferente de las especies, han sido observadas por Roy *et al.* (2010). Estos autores propusieron que la temperatura y humedad del suelo se modifican con la incorporación de vermicomposta y afectan (aceleran o disminuyen) la velocidad de germinación, en dependencia de la especie. Entre los aportes del presente trabajo está el hallazgo de que manteniendo los mismos potenciales de agua (Ψ_A) en todas las proporciones de vermicomposta evaluadas, se observó una respuesta diferencial en la germinación de las dos especies, por lo que es probable que propiedades físicas del suelo, como la porosidad, pueden determinar la dinámica de flujo de agua en la relación suelo-semilla, principalmente con contenidos bajos de humedad (-2.0 MPa) y altos de vermicomposta (6 y 9 %).

Zirbes *et al.* (2011) notaron el efecto benéfico de la vermicomposta preparada con 25 % de lirio acuático y 75 % de estiércol de cerdo, en la germinación de arroz (*Oryza sativa*) y berros (*Nasturtium officinale*); los mismos autores sugirieron evaluar

vermicomposta elaborada con proporciones diferentes de esos materiales y concentraciones variadas de ella en el medio de crecimiento, pues consideraron que cada especie responde a proporciones óptimas para incentivar la germinación.

En este estudio, también se observó que el crecimiento inicial y la biomasa de la raíz primaria de frijol y maíz sin restricción de humedad (Ψ_A de -0.03 MPa) tendió a incrementar proporcionalmente con la concentración de vermicomposta en el suelo, aunque este efecto fue más evidente en maíz; en cambio, con restricción de humedad (Ψ_A de -2.0 MPa) la respuesta en maíz fue opuesta a la anterior, mientras que en frijol el patrón de respuesta fue variable y no correspondió con la concentración de vermicomposta. Estos efectos combinados de la vermicomposta y el déficit de humedad parecen no haber sido documentados previamente; sin embargo, recientemente Levinsh (2011) demostró el decremento casi lineal de la germinación y crecimiento de diferentes cultivos con el incremento de la concentración de vermicomposta; además, que el crecimiento del hipocótilo fue estimulado por concentraciones bajas de vermicomposta, mientras que la radícula fue más sensible. El mismo autor sugirió que algunas sustancias de naturaleza fenólica y húmica en una interacción dependiente dosis-genotipo afectan la germinación y el desarrollo temprano de la plántula. En el presente estudio se evidenció una reacción similar a la descrita por Levinsh (2011) ya que la interacción vermicomposta x cultivar fue significativa ($p \leq 0.001$), y se demostró que el efecto de la vermicomposta es diferente entre los Ψ_A o condición de humedad en el suelo. Lo anterior también tuvo sustento estadístico, pues la interacción humedad x vermicomposta fue significativa ($p \leq 0.001$). Las interacciones observadas en la germinación, son congruentes con lo señalado por Peña-Valdivia *et al.* (2007) quienes indican que la absorción de agua por las semillas y el crecimiento inicial de la plántula está regulada por factores como humedad y permeabilidad de la semilla y los factores externos, como humedad y temperatura ambiente.

Se comprobó que las reacciones a la presencia de vermicomposta y a la combinación de esta y el déficit de humedad entre las especies son diferentes, pues la imbibición máxima (IM) y el tiempo para la germinación máxima acumulada (TGM) de maíz fue 40 % del peso seco seminal inicial y tomó entre 48 y 120 h, y en frijol la

cantidad de agua embebida fue en promedio 90 % y el tiempo para la germinación máxima fluctuó entre 36 y 300 h. Se ha demostrado que las semillas con integumento permeable exhiben un proceso de absorción de agua trifásico, y la duración de cada fase depende de propiedades inherentes a la semilla, como el nivel de materiales hidratables, permeabilidad del integumento, el tamaño de la semilla y la absorción de oxígeno, y de las condiciones del medio de germinación, como temperatura, humedad y composición del sustrato (Bewley y Black, 1994). Como parte de las diferencias morfológicas, se ha reconocido que el tiempo que tarda la imbibición del maíz, aún en condiciones de humedad no restrictiva, es menor que en el frijol debido a que aquel carece de cotiledones desarrollados y el agua llega en poco tiempo al embrión; mientras que el frijol posee cotiledones densos y un sistema de membranas con permeabilidad selectiva que pueden prolongar el proceso de absorción de agua (Kikuchi *et al.*, 2006). En adición, la capacidad del frijol para embeber un volumen mayor de agua puede estar relacionada con un contenido mayor de proteínas y carbohidratos, así como paredes celulares con alto grado de hidrofobicidad (Leopold, 1983; Vertucci y Leopold, 1987).

Algunos mecanismos que desencadenan respuestas diferenciales como las observadas en este estudio se han tratado de explicar en el nivel genético, y en pruebas de revigorización de las semillas de maíz y frijol con osmoacondicionamiento (OSMA). Campos-Álvarez *et al.* (2002) ha cuantificado que una semilla monocotiledónea de maíz se estabiliza con un potencial osmótico entre -1.7 y -2.0 MPa, mientras que una semilla dicotiledónea de frijol requiere un potencial mayor a -1.2 MPa, para no reducir su viabilidad. Estos autores dieron seguimiento a los transcritos de las proteínas LEA que se acumulan durante el estado tardío del desarrollo de las semillas cuando se inicia el periodo de desecación, y que se expresan durante situaciones de déficit hídrico, y observaron que en frijol los transcritos estuvieron presentes en la semilla seca y descendieron durante el OSMA, en tanto que el maíz con un contenido de agua menor, acumula los transcritos que aparentemente transitan entre dos estados moleculares durante el OSMA; lo que sugiere que los genes de frijol y maíz se expresan diferente bajo condiciones

similares; por lo que parecería que “pueden detectar” la condición de estrés a través de mecanismos que derivan en la inhibición de la germinación.

En relación con la respuesta del cultivar de frijol tolerante a sequía que requirió menos agua para germinar (imbibición máxima menor), pero hasta el doble de tiempo para germinar en relación al susceptible, incluso con suficiente humedad (Ψ_A de -0.03 MPa), es posible que la diferencia en el tamaño de la semilla y la presencia de semillas con testa dura (o parcialmente impermeable) sean las características que restrinjan la difusión del agua (Borji *et al.*, 2007); esto último se comprobó con ensayos en los que las semillas fueron escarificadas (datos no presentados). En garbanzo (*Cicer arietinum* L.) se han observado resultados similares a los del presente estudio, pues el tamaño de semilla no afectó el porcentaje de germinación pero sí su velocidad; además, se ha reconocido la relación entre el tamaño de semilla y el vigor inicial de la plántula (Hosseini *et al.*, 2009). Esto último también se comprobó únicamente en el frijol con el crecimiento inicial de la raíz (Cuadro 4 del Capítulo 1), ya que fue mayor ($p \leq 0.05$) en el cultivar susceptible a sequía, que presentó semillas más grandes (Cuadro 1 del Capítulo 1; $p \leq 0.05$) que el cv. tolerante. Debe señalarse que en maíz no se registró diferencia significativa en el tamaño de la semilla entre los cultivares.

En cuanto al efecto del estrés hídrico y la vermicomposta en la conductancia estomática y el intercambio de gases, ambas especies reaccionaron similarmente, a pesar de que las evaluaciones se realizaron en etapas fenológicas diferentes. Sin embargo, en frijol se observó una sensibilidad mayor de la conductancia estomática a todos los factores evaluados (Cuadro 3 del Capítulo 2) y en el intercambio de gases se observaron más interacciones significativas en comparación con el maíz (Cuadro 3 del Capítulo 3). La eficiencia en el uso del agua se evidenció como una característica propia de los cultivares tolerantes. Estos efectos del déficit de humedad confirman que las plantas C4 tienen ventajas sobre las C3 principalmente porque en ciertos ambientes las últimas activan la fotorespiración y pérdida de agua por transpiración. En evaluaciones comparativas se ha observado que las plantas C3 reducen inmediatamente al inicio de la sequía su conductancia estomática, fotosíntesis y transpiración, en comparación con las plantas C4 (Ward *et al.*, 1999);

sin embargo, tras una condición severa de estrés hídrico, se manifiesta una sensibilidad metabólica alta de la fotosíntesis y las ventajas de las plantas C4 respecto a las C3 disminuyen (Ripley *et al.*, 2007). De otra forma, una mayor eficiencia en el uso del agua se ha considerado como un componente importante pero temporal que responde a una característica de adaptación a condiciones de sequía y se obtiene cuando se realiza una selección exitosa dirigida a disminuir el uso de agua pero que también puede reducir el rendimiento (Blum, 2005).

En relación con esto último, los resultados obtenidos con frijol indicaron que el cv. susceptible a sequía es más rendidor (Cuadro 4 del Capítulo 4), a pesar que el cv. tolerante mostró mayor eficiencia en el uso del agua (Cuadro 3 del Capítulo 2). De acuerdo con Blum (2005) los procesos de selección de cultivares tolerantes a sequía priorizan evitar la deshidratación aunque eso implique reducir el área foliar y la producción de biomasa. La suspensión de riego en la fase reproductiva de frijol provocó que el ciclo de cultivo se acortara 27 d, pese a ello, los rendimientos obtenidos se incrementaron (30 – 50 %, $p \leq 0.05$) proporcionalmente a la concentración de 1.5 y 3.0 % de vermicomposta en el suelo. Se sugiere que este efecto en parte puede deberse al aumento de la biomasa en estructuras que almacenan fotoasimilados antes del periodo de estrés, y que cubrirán la demanda para el desarrollo de las estructuras reproductoras; ya que en algunos trabajos se ha evidenciado que al incorporar vermicomposta en el sustrato se incrementó el contenido de clorofila en las hojas de frijol, y a la vez, esto estuvo relacionado con la acumulación de biomasa (Roy *et al.* 2010). Además, se sabe que ciertas estructuras, como el tallo, son importantes reservorios de carbohidratos utilizados en el llenado de granos durante periodos de estrés hídrico (Plau *et al.*, 2004).

En todas las variables evaluadas se evidenciaron interacciones entre los factores que mostraron una reacción diferencial de los cultivares al déficit de humedad, vermicomposta y su combinación. Por lo que, se puede sugerir para estudios posteriores, que sea observada la respuesta de un número menor de factores y se incrementen sus niveles. También se sugiere evaluar las reacciones químicas y biológicas provocadas por la incorporación de vermicomposta al suelo.

Conclusiones Generales

La vermicomposta en proporción de 6 y 9 % disminuye la velocidad y tasa de imbibición de maíz y frijol, el efecto es proporcional a la concentración de vermicomposta y las características propias de la especie. Únicamente las proporciones bajas de vermicomposta (1.5 y 3 %) mejoran parcial la imbibición de los cultivares tolerantes a sequía en condiciones de humedad restrictiva (-2.0 MPa).

La velocidad de imbibición y la imbibición (máxima) requerida para la germinación de maíz y frijol contrastan entre las especies; sin embargo, ambas evidenciaron gran capacidad para germinar, independientemente de su condición de tolerancia a sequía, con humedad notablemente baja en el sustrato (-2.0 MPa).

Se observó una tendencia a posponer el efecto de la suspensión del riego en la conductancia estomática e intercambio de gases, principalmente en el cultivar de maíz tolerante a sequía, cuando el sustrato tenía 3 % de vermicomposta; a pesar de esto, la suspensión del riego inhibió totalmente la actividad fisiológica.

Ambos cultivares de frijol suspendieron completamente el intercambio de gases por la suspensión de riego en la etapa reproductiva y el rendimiento disminuyó en 25 y 82 %, en el susceptible y el tolerante a sequía, respectivamente; pero la vermicomposta redujo parcialmente el efecto del déficit de humedad, pues incrementó el número de estructuras reproductivas y el rendimiento se recuperó entre 30 y 50 %.

Se evidenció que el efecto benéfico de la vermicomposta depende de su proporción, de las condiciones de humedad del suelo, de la especie y del cultivar.

Aunque la vermicomposta puede tener efectos negativos en el crecimiento inicial de maíz y frijol si muestra potencial para mitigar el efecto del estrés hídrico en el rendimiento. Además, si se considera como parte de una estrategia integral para mejorar la productividad de los cultivos en condiciones de temporal, ésta puede ser de gran utilidad.

Literatura citada

- Albanell E, J Plaixats, T Cabrero. 1988. Chemical changes during vermicomposting (*Eisenia Andrei*) of sheep manure mixed with cotton industrial wastes. *Biology & Fertility of Soils*. 6:266-269.
- Atiyeh R M, C A Edward, N Q Arancon, J D Metzger. 2002. The influence of humic acids derived from earthworm-processed organic wastes on plant growth. *Bioresource Technology*. 84:7-14.
- Blum A. 2005. Drought resitance, water-use efficiency, and yield potential-are they compatible, dissonant, or mutually exclusive?. *Australian Journal of Agriculture Research*. 56:1159-1168.
- Borji M, M Ghorbanli, M Sarlak. 2007. Some seed traits and their relationships to seed germination, emergence rate electrical conductivity in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Asian Journal of Plant Sciences*. 6(5):781-787.
- Bewley J D, M Black. 1994. *Seeds. Physiology of development and germination*. 2a Edición. Plenum. New York. EU. 445 p.
- Campos-Álvarez F, F Cruz-García, A Torres-Espinoza. M Sánchez-Jímenez, J M Colmenero-Flores, C Smith-Espinoza, A A Covarrubias-Robles, J M Vázquez-Ramos. 2002. Expresión de genes codificantes para las proteínas abundantes en embriogénesis tardía (LEA), durante el osmoacondicionamiento de semillas de maíz y frijol. *Agrociencia*. 36:461-470.
- Dikinya O, P Lehmann, C Hinz, G Aylmore. 2007. Using a pore-scale model to quantify the effect of particle re-arrangement on pore structure and hydraulic properties. *Hydrological Processes*. 21:989-997.
- Hosseini N M, J A Palta, J D Berger, K H M Siddique. 2009. Sowing soil water content effects on chickpea (*Cicer arietinum* L.): seedling emergence and early growth interaction with genotype and seed size. *Agricultural Water Management*. 96:1732-1736.
- Kikuchi K, M Koizumi, N Ishida, H Kano. 2006. Water uptake by dry beans observed by micro-magnetic resonance imaging. *Annals of Botany*. 98: 545-553.
- Leopold A C. 1983. Volumetric components of seed imbibition. *Plant Physiology*. 73:677-680.
- Levinsh G. 2011. Vermicompost treatment differentially affects seed germination, seedling growth and physiological status of vegetable crop species. *Plant Growth Regulation*. March, 2011. Online First. <https://springerlink3.metapress.com/content/8013t0h299755q55/resource->

[secured/?target=fulltext.pdf&sid=xoikej55kjrwsaj4pp2xet55&sh=www.springerlink.com](https://www.springerlink.com/secured/?target=fulltext.pdf&sid=xoikej55kjrwsaj4pp2xet55&sh=www.springerlink.com).

- Marinari S, G Masciandaro, B Ceccanti, S Grego. 2000. Influence of organic and mineral fertilizers on soil biological and physical properties. *Bioresource Technology* 72:9-17.
- Peña-Valdivia C, C Trejo, J Galicia, A Sánchez-Urdaneta. 2007. Reacción del maíz de alta calidad proteica al potencial de agua del sustrato: germinación y crecimiento radical inicial. *Revista de la Facultad de Agronomía. Universidad del Zulia*. 24 (1): 326-331.
- Plau Z, B J Butow, C S Blumenthal, C W Wrigley. 2004. Transport of dry matter into developing wheat kernels and its contribution to grain yield under post-anthesis water deficit and elevated temperature. *Field Crops Research*. 86:185-198.
- Ripley B S, M E Gilbert, D G Ibrahim, C P Osborne. 2007. Drought constraints on C4 photosynthesis: stomatal and metabolic limitations in Ce and C4 subspecies of *Alloteropsis semialata*. *Journal of Experimental Botany*. 58(6):1351-1363.
- Roy S, K Arunachalam, B Kumar D, A Arunachalam. 2010. Effect of organic amendments of soil on growth and productivity of three common crops *viz. zea mays, phaseolus vulgaris* and *Abelmoschus esculentus*. *Applied Soil Ecology*. 45:78-84.
- Tejada M, A M García-Martínez, J Parrado. 2009. Effects of a vermicompost composed with beet vinasse on soil properties, soil losses and soil restoration. *Catena* 77:238-247.
- Vertucci C W, Leopold A C. 1987. Water binding in legume seeds. *Plant Physiology*. 85:224-231.
- Vogel H J, K Roth. 2001. Quantitative morphology and network representation of soil pore structure. *Advances in Water Resources*. 24:233-242.
- Ward J K, D T Tissue, R B Thomas. 1999. Comparative responses of model C3 and C4 plants to drought in low and elevated CO2. *Global Change Biology*. 5:857-867.
- Zirbes L, Q Renard, J Dufey, P Khanh T, H Nghia D, P Lebailly, F Francis, E Haubruge. 2011. Valorisation of a water hyacinth in vermicomposting using an epigeic earthworm *Perionyx excavates* in Central Vietnam. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment*. 15(1)85-93.