



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCION DE ENSEÑANZA E INVESTIGACION EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE EDAFOLOGIA

Manejo y Uso de Biosólidos en Suelos Agrícolas

Edmundo Robledo Santoyo

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

DOCTOR EN CIENCIAS

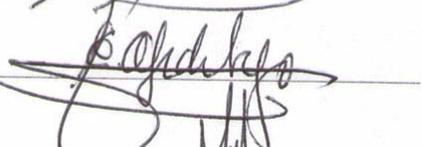
MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2012

La presente tesis titulada: Manejo y Uso de Biosólidos en Suelos Agrícolas realizada por el alumno: Edmundo Robledo Santoyo bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**DOCTOR EN CIENCIAS
EDAFOLOGIA**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO	Vicente Espinosa Hernández	
ASESOR	Enrique Rubiños Panta	
ASESOR	Ranferi Maldonado Torres	
ASESOR	Enrique Ojeda Trejo	
ASESOR	Elizabeth Hernández Acosta	

Montecillo, Texcoco, Estado de México, octubre 2012

AGRADECIMIENTOS

AL CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA (CONACYT), POR EL FINANCIAMIENTO DE BECA OTORGADO, QUE HIZO REALIDAD MIS ESTUDIOS DE DOCTORADO.

A LA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA CHAPINGO, EN ESPECIAL AL DEPARTAMENTO DE SUELOS, POR DARMER LA OPORTUNIDAD DE CULMINAR ESTA IMPORTANTE ETAPA DE MI FORMACIÓN.

A LA FUNDACIÓN PRODUCE AGUASCALIENTES A. C., POR EL APOYO ECONÓMICO OTORGADO PARA LA REALIZACIÓN DEL PRESENTE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN.

AL COLEGIO DE POSTGRADUADOS Y EN PARTICULAR AL PROGRAMA DE EDAFOLOGÍA, POR LAS FACILIDADES PROPORCIONADAS PARA LLEVAR A CABO CON ÉXITO EL PROGRAMA ACADÉMICO Y DE INVESTIGACIÓN.

A LA MC LANGEN CORLAY CHEE, POR EL APOYO INCONDICIONAL QUE SIEMPRE ME HA BRINDADO, LA MOTIVACIÓN DE SUPERACIÓN QUE ME HA INFUNDIDO Y POR SU INVALUABLE AMISTAD.

AL DR. RANFERI MALDONADO TORRES, POR SUS ACERTADOS CONSEJOS Y APOYO EN MI FORMACIÓN PROFESIONAL.

AL MC AMALIO PONCE MONTOYA, POR SU VALIOSO APOYO EN EL MUESTREO DE SUELOS, PLANTAS, BIOSÓLIDOS Y EN LOS EXPERIMENTOS DE CAMPO Y EN ESPECIAL PORQUE EN ÉL ENCONTRÉ UN AMIGO.

A MÍ COMITÉ PARTICULAR, POR SU VALIOSA CONDUCCIÓN Y ORIENTACIÓN EN EL PRESENTE TRABAJO.

AL LIC. JUAN MANUEL CASTAÑEDA MUÑOZ, POR LAS FACILIDADES OTORGADAS PARA REALIZAR LOS EXPERIMENTOS DE CAMPO EN PARCELAS DE SU PROPIEDAD Y CON SU INFRAESTRUCTURA

A LOS C. GABRIEL VEGA RUÍZ Y C. ARACELI DE SANTIAGO GONZÁLEZ, POR SU APOYO EN LOS ANÁLISIS DE LABORATORIO Y LOS GRATOS MOMENTOS DE CONVIVENCIA.

DEDICATORIA

A mi madre

Emma Santoyo Acero

Por todos los sacrificios que hizo para formarme como ser humano responsable y comprometido con la vida y conmigo mismo y de quien aprendí a tener fortaleza en los momentos más difíciles de la vida

A mi Padre

Edmundo Robledo Gámez

Con cariño y Respeto a su Memoria

A mi esposa

Tita

Por su amor, paciencia y dedicación y Por seguir siendo mi fuente inagotable de ánimo y deseos de continua superación

A mis Hijas

Norma Graciela y Brenda Gisela

Zuienes con su amor me impulsan a seguir superándome

A mi hermana

Norma

Mi consentida, mi amiga, mi hija

A mis hermanos

Jesús, Roberto, Emma, Chayo, Sergio, Rosa, Hugo y Javier

De quienes siempre he recibido apoyo sincero e incondicional

A mis Suegros

Gaudencio y Graciela

Con admiración y Respeto, por el apoyo que siempre nos han brindado

A mis cuñados

Antonio y José Luis

Porque son parte de la familia

RESUMEN

Manejo y Uso de Biosólidos en Suelos Agrícolas

Como subproducto del tratamiento de las aguas residuales de la ciudad de Aguascalientes, Ags., en la Planta de Tratamiento “El Niágara”, se generan diariamente de 150 a 170 m³ de biosólidos. Estos materiales son aplicados a suelos agrícolas de áreas cercanas a la planta, sin regulación alguna, por lo que se han obtenido buenos resultados o causado quemaduras en plántulas o endurecimiento de suelos. El objetivo de este proyecto fue generar estrategias para la disposición y aprovechamiento de los biosólidos para mejorar suelos agrícolas y la calidad y rendimiento de los cultivos, sin perjuicio para el ambiente.

Para determinar el efecto de los biosólidos sobre suelos y plantas, se colectaron muestras de los biosólidos y se tomaron muestras de tres tipos de suelo agrícola con características diferentes de fertilidad (alta, mediana y baja, según los productores de la región), en la zona aledaña a la planta de tratamiento. Biosólidos y suelos se caracterizaron químicamente para determinar su estado nutrimental y su contenido de metales pesados. Se establecieron experimentos en invernadero y campo, aplicando dosis crecientes de biosólidos (0, 20, 40, 80, 120, 160 y 200 t ha⁻¹ en base seca) a los suelos y utilizando ballico perenne, maíz y cebada como cultivos indicadores.

Los biosólidos generados en la planta de tratamiento de aguas negras “El Niágara”, presentaron alto contenido de materia orgánica, de macro y micro nutrimentos y sus concentraciones de metales pesados (Fe, Cu, Mn, Pb, Cd, Ni y Zn) no rebasaron los límites máximos permisibles para biosólidos establecidos en la NOM-004-SEMARNAT-2002 en México.

En cuanto a los suelos, con la aplicación de las diferentes dosis de biosólidos, se mejoró el pH e incrementó el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, y las concentraciones de macro y micronutrimentos. La concentración de metales pesados aumentó sin representar un riesgo para su

aplicación como fertilizantes, ya que no se rebasaron los límites considerados como máximos permisibles.

El mayor rendimiento de los cultivos se logró con las dosis de 80, 120 y 160 t ha⁻¹; sin embargo, con 200 t ha⁻¹ se frenó el desarrollo del cultivo en las primeras etapas de crecimiento, sin presentarse acumulación de metales pesados en concentraciones consideradas como fitotóxicas.

En conclusión, los biosólidos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad de Aguascalientes, no representaron riesgos significativos para el uso agrícola, de acuerdo con sus características químicas y contenido de metales pesados, al adecuarse a la legislación que rige en nuestro país.

La incorporación de biosólidos a la actividad agrícola permitió reducir su potencial contaminante y al integrarlos a la cadena productiva como abonos y mejoradores del suelo se reducen sustancialmente los costos de producción e incrementan el rendimiento de los cultivos.

Palabras clave: Aguas residuales, metales pesados, contaminación, mejoradores del suelo

SUMARY

Handle and use of the Biosolids in Agricultural Soils

As a byproduct of wastewater treatment in Aguascalientes city of State in Mexico, in the treatment plant "El Niagara" every day about 150 to 170m³ of biosolids are generated. This materials are applied to agricultural soils near the plant without any regulation, so they caused beneficial effects or plants burning or soil hardening. The objective of this project was to generate strategies for the disposition and use of the biosolids in order to improve the agricultural soils as well as the quality and production crops.

In order to determine the effect of the biosolids on the soils and plants, some samples of the biosolids were collected as well as samples of three kind of

agricultural soil with different fertility features (high, medium and low, according to the region producers), in the nearby area to the treatment plant. Biosolids and soils were characterized chemically to determine their nutritional status and heavy metal content. Experiments were established in the green house as well as in the field, increasing doses of biosolids (0, 20, 40, 80, 120, 160 and 200 t ha⁻¹ in a dry base) applied to soils and using perennial ryegrass, corn and barley as crops indicators.

The biosolids generated in the sewage treatment plant “El Niagara”, presented high content of organic material, macro and micro nutrients and their concentrations of heavy metals (Fe, Cu, Mn, Pb, Ni and Zn) did not exceed the maximum allowable limits established in Mexico for biosolids.

In reference to the soils, with the application of the different biosolid doses, the pH was handled and the material organic content was increased, the cationic exchange capacity, and the concentrations of macro and micronutrients. The concentration of heavy metals increased without representing any risk for its application with fertilizer what so ever, since the maximum allowable limits weren't exceed.

The higher yield of crops was achieved using the 80, 120 and 160 t ha⁻¹ doses, never the less, the 200 t ha⁻¹ refrain the development of the crops in the early stages of growth, without any sign of heavy metal accumulation in concentrations considered as phytotoxic.

In conclusion the biosolids generated in the wastewater treatment plant in Aguascalientes City didn't show any significant risks for the agricultural use, according with their chemical features and content of heavy metals, since they're appropriate to the legislation that rules our country.

The biosolids incorporation to the agriculture has allowed reducing its potential for contamination and at the same time integrating them to the production chain as soil fertilizers and improvers has substantially reduce the production costs and it has increased the crops yield.

Key Words: Wastewater, heavy Metals, Contamination, soil amendments.

Estructura del documento

El documento está estructurado en forma de artículos científicos y consta de ocho capítulos:

Capítulo I. Introducción, objetivos e hipótesis. En esta parte se señalan los motivos que originaron la investigación, se destacan aspectos relevantes (antecedentes) sobre el tema de estudio (Biosólidos), se define y ubica el problema y se señalan los objetivos e importancia de la investigación realizada.

Capítulo II. Revisión de literatura: se destacan aspectos relevantes del uso de biosólidos en el mundo y en México, que han sido estudiados por diversos investigadores, desde diferentes enfoques y perspectivas.

Capítulo III. Área de estudio: Se presenta la ubicación y descripción general del área de estudio, así como el funcionamiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Aguascalientes.

Capítulo IV. Artículo científico: “Biosólidos: Una Alternativa para la Producción Agrícola”. El objetivo de este trabajo, fue evaluar mediante un experimento de campo el efecto de la aplicación de biosólidos sobre un suelo calcáreo, en algunas de sus características y en las variables del crecimiento de maíz cultivado en ese suelo con la finalidad de establecer la dosis óptima de este subproducto, que permita obtener un mayor rendimiento y calidad de este forraje.

Capítulo V. Artículo científico: “Rendimiento de *Ballico perenne* y Características Químicas de un Suelo Mejorado con Biosólidos”. En este trabajo, con la finalidad de establecer la dosis óptima de aplicación de biosólidos al suelo, se evaluó el efecto de la aplicación de dosis crecientes de biosólidos sobre algunas características químicas de un suelo calcáreo y sobre el crecimiento de pasto cultivado en el mismo.

Capítulo VI. Artículo científico; “Sales Solubles y Metales Pesados en Suelos Mejorados con Biosólidos”. En este estudio se evaluó en un suelo representativo de la zona de influencia de la PTAR, el efecto de la aplicación de biosólidos en el contenido de metales pesados y sales solubles en el suelo y en la producción de biomasa de pasto ballico, con la finalidad de establecer su aprovechamiento agrícola sin potenciales riesgos de degradación y contaminación de los suelos (Artículo Publicado en revista Científica).

Capítulo VII. Artículo científico; “Metales Pesados en Suelos Mejorados con Biosólidos y Rendimiento de Cebada”. En esta investigación se determinó el contenido de metales pesados en los biosólidos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales y su efecto al aplicarlos a un suelo representativo de la región cultivado con cebada.

Capítulo VIII. “Discusión y Conclusiones Generales”. Se hace una discusión general de los experimentos efectuados y se establecen conclusiones generales, además se hacen algunas recomendaciones.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	iv
ÍNDICE DE CUADROS	ii
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
RESUMEN.....	iv
SUMMARY	v
Estructura del documento	vi

CAPITULO I

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	1
1.1. INTRODUCCIÓN	1
1.2. OBJETIVOS	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3

CAPITULO II

2. REVISIÓN DE LITERATURA	5
2.1. AGUAS RESIDUALES Y SU TRATAMIENTO	5
2.1.1. Origen, composición y destino final de las aguas residuales	5
2.1.2. Tratamiento de las aguas residuales	5
2.1.3. Producción de lodos en el tratamiento de las aguas residuales.....	6
2.2. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES (PTAR)	6
2.2.1. Objetivo de las plantas de tratamiento.....	6
2.2.2. Funcionamiento de las plantas de tratamiento	7
2.2.3. El circuito de agua	7
2.2.4. El circuito de lodos	9
2.3. BIOSÓLIDOS: CONCEPTO Y APROVECHAMIENTO	9
2.3.1. Concepto de biosólido	9
2.3.2. Aprovechamiento de los biosólidos.....	10
2.3.3. Importancia de los biosólidos en los agroecosistemas.....	11
2.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS BIOSÓLIDOS.....	12
2.4.1. Características físicas	12
2.4.2. Características químicas	12
2.4.3. Características biológicas	13
2.5. BIOSÓLIDOS: BENEFICIOS y RIESGOS.....	14
2.5.1. Beneficios	14

2.5.2. Riesgos.....	16
2.5.3. Nutrientes en exceso (N, P y sales).....	18
2.5.4 Otros.....	18
2.6. BIOSÓLIDOS: REGULACIÓN DE SU USO	18
2.6.1. Manejo responsable de biosólidos.....	18
2.6.2. Normativa en México sobre el uso de biosólidos.....	19
2.6.3. Normativa en el mundo sobre el uso de biosólidos	21
2.7. Uso de biosólidos en la agricultura	21
2.7.1. Utilización en el mundo	24
2.7.2. Utilización en México.....	27
2.8. Literatura citada.....	30

CAPITULO III

3.0 AREA DE ESTUDIO.....	37
3. 1. Características Agroclimáticas y Edáficas de la zona.....	38
3. 2. Características Generales de la PTAR “El Niágara”	39
3.2.1. Métodos de Tratamiento de la PTAR “El Niágara”	40
3.2.2. Métodos de tratamiento en el circuito de agua.....	41
3.2.2.1. Pretratamiento.....	41
3.2.2.2. Tratamiento biológico	41
3.2.2.3. Tratamiento terciario	43
3.2.3. Métodos de tratamiento en el circuito de lodos	44
3.2.3.1. Digestión Aerobia	45
3.2.3.2. Espesamiento	45
3.2.3.3. Deshidratación o Secado.....	45
3. 2.3.4. Disposición Final.....	46
3.3. Literatura Citada	46

CAPITULO IV

4.0. BIOSÓLIDOS: UNA ALTERNATIVA PARA LA PRODUCCIÓN GRÍCOLA	48
4.1. INTRODUCCIÓN	50
4.2. MATERIALES Y MÉTODOS	53
4.2.1. Establecimiento del experimento en campo	53
4.2.2. Variables evaluadas en plantas	54
4.2.5. Variables a evaluadas en suelos y biosólidos.....	54
4.2.6. Método estadístico	54
4.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	54
4.3.1. Características de los biosólidos	55
4.3.2. Características del suelo	57

4.3.3. Características del cultivo	61
4.4. ANÁLISIS DE COSTOS	62
4.5. CONCLUSIONES	64
4.6. LITERATURA CITADA.....	65

CAPITULO V

5.0 RENDIMIENTO DE Ballico perenne Y CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE UN SUELO MEJORADO CON BIOSOLIDOS	70
5.1. INTRODUCCIÓN	71
5.2. MATERIALES Y MÉTODOS	72
5.2.1. Diseño experimental.....	73
5.2.2. Establecimiento del experimento en campo	73
5.2.3. Colecta y preparación de muestras.....	74
5.2.4. Variables a evaluar y metodología analítica	74
5.2.5. Siembra y seguimiento del cultivo.....	75
5.2.5. Método estadístico	75
5.3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	75
5.3.1. Características de los biosólidos	75
5.3.2. Características del suelo	76
5.3.3. Características del cultivo	78
5.4. CONCLUSIONES	81
5.5. LITERATURA CITADA.....	81

CAPITULO VI

6.0. SALES SOLUBLES Y METALES PESADOS EN SUELOS MEJORADOS CON BIOSÓLIDOS	83
6.1. INTRODUCCIÓN	84
6.2. MATERIALES Y MÉTODOS	87
6.2.1. Diseño experimental.....	87
6.2.2. Establecimiento del experimento en campo	87
6.2.3. Colecta y preparación de muestras.....	88
6.3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	88
6.3.1. Características químicas de los biosólidos	88
6.3.2. Características químicas del suelo.....	89
6.3.3. Sales solubles en biosólidos y suelos.....	90
6.3.4. Metales pesados en los biosólidos y el suelo.....	93

6.4. CONCLUSIONES	95
6. 5. LITERATURA CITADA.....	95

CAPITULO VII

7.0 METALES PESADOS EN SUELOS MEJORADOS CON BIOSÓLIDOS Y RENDIMIENTO DE CEBADA.....	99
7.1. INTRODUCCIÓN	99
7.1.1. OBJETIVO GENERAL	100
7.2. MATERIALES Y MÉTODOS	100
7.2.1. Caracterización química de los biosólidosl	101
7.2.2. Muestreo del suelo	101
7.2.3 Caracterización química del suelo	101
7.2.4. Establecimiento del experimento en invernadero	102
7. 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN	104
7.3.1. Metales pesados en los biosólidos	104
7.3.2. Características de los Suelos.....	106
7.3.3. Efecto de la aplicación de biosólidos en pH y contenido de MO en los tres suelos	107
7.3.4. Efecto de la aplicación de biosólidos en el contenido de metales pesados en los tres suelos.....	109
7.3.4.1. Suelo 1.....	109
7.3.4.2. Suelo 2.....	113
7.3.4.3. Suelo 3	116
7.4 Contenido de metales pesados en el tejido de Cebada (<i>Hordeum vulgare</i> L.)	119
7. 5. CONCLUSIONES	123
7 .6. LITERATURA CITADA	124

CAPITULO VIII

8.0 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES	128
8.1 Características de los biosólidos	128
8.1.1. Materia Orgánica.....	129
8.1.2. Nitrógeno	130
8.1.3. Fósforo.....	131
8.1.4. Metales Pesados	131
8.1.5. Dosis de Aplicación.....	132
8.2. Características de los suelos.....	133

8.3. Efectos de la aplicación de biosólidos en las características del suelo y rendimiento de los cultivos.....	134
8.3.1. pH.....	134
8.3.2. Materia Orgánica.....	135
8.3.3. Nitrógeno	136
8.3.4. Fósforo.....	137
8.3.5. Capacidad de Intercambio Catiónico, Calcio y Magnesio,.....	138
8.3.6. Metales Pesados	138
8.3.7. Rendimientos de los cultivos en relación a la aplicación de biosólidos	139
8.5. CONCLUSIONES GENERALES.....	140
8.6. RECOMENDACIONES.....	141
8.7. LITERATURA CITADA.....	142
8.8. ANEXOS	145
8.8.1. ANEXO I. Programa de aplicación de biosólidos en los suelos estudiados	145
8.8.2. ANEXO II. ARTÍCULO PUBLICADO, “SALES SOLUBLES Y METALES PESADOS EN SUELOS TRATADOS CON BIOSÓLIDOS” EN: Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 16(2): 241-251, 2010.....	151
8.8.3 ANEXO III. Ponencia presentada en el XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo del 16 - 20 de noviembre, 2009 en Costa Rica “METALES PESADOS EN SUELOS MEJORADOS CON BIOSÓLIDOS”	152
8.8.4 ANEXO IV Ponencia presentada II International Symposium on Agricultural and Agroindustrial Waste Management March 13-15, 2011 – Foz do Iguaçu – Brazil, “EVOLUCIÓN DE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE UN SUELO CALCÁREO ACONDICIONADO CON BIOSÓLIDOS”	153

INDICE DE CUADROS

Cuadro 2.1. Evolución del saneamiento del agua en México.....	6
Cuadro 2.2. Lodos generados por cada nivel de tratamiento de aguas residuales	9
Cuadro 2.3. Aprovechamiento de biosólidos	11
Cuadro 2.4 Restricciones para la aplicación de biosólidos, relacionadas con la salud pública y los patógenos	17
Cuadro 2.5 Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos ..	19

Cuadro 2.6 Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos.....	20
Cuadro 2.7 Escenarios Típicos de Aplicación de Biosólidos	23
Cuadro 4.1. Determinaciones analíticas y metodologías empleadas en la caracterización de suelos plantas y biosólidos	55
Cuadro 4.2. Composición química de los biosólidos procedentes de la planta de tratamiento de aguas residuales El Niágara	55
Cuadro 4.3 Concentración media de metales pesados en los biosólidos	55
Cuadro 4.4 Características químicas del suelo antes de la incorporación de los biosólidos sobre el terreno	56
Cuadro 4.5 Metales en el suelo antes de la incorporación de los biosólidos.....	56
Cuadro 4.6 Aportación de nutrimentos inmediatamente disponibles para las plantas de los biosólidos (kg t ⁻¹) a los suelos de acuerdo con el tratamiento	56
Cuadro 4.7 Comparación de medias para diferentes variables vegetativas	62
Cuadro 4.8 Análisis del costo/beneficio de la producción del maíz forrajero verde aplicando biosólidos al suelo	63
Cuadro 4.9 Absorción de nutrientes por el maíz forrajero	64
Cuadro 5.1 Dosis de biosólidos correspondiente a cada tratamiento	73
Cuadro 5.2 Cantidad de biosólidos a aplicar por unidad experimental	74
Cuadro 5.3 Determinaciones analíticas y metodologías empleadas en la caracterización de los suelos y los biosólidos	74
Cuadro 5.4 Características químicas de los biosólidos estudiados	76
Cuadro 5.5 Micronutrimentos y metales pesados en los biosólidos estudiados ..	76
Cuadro 5.6 Características químicas del suelo después del primer corte del pasto.....	77
Cuadro 5.7 Metales pesados en el suelo después de tres meses de incorporados los biosólidos.....	78
Cuadro 6.1 Determinaciones analíticas y metodologías empleadas en la caracterización de suelos y biosólidos	88
Cuadro 6.2 Características químicas de los biosólidos estudiados	89
Cuadro 6.3 Características químicas del suelo, después de tres meses de incorporados los biosólidos.....	90
Cuadro 6.4 Conductividad eléctrica y sales solubles en los biosólidos	91
Cuadro 6.5 Efecto de los biosólidos, en sales solubles y conductividad eléctrica del suelo	92
Cuadro 6.6 Micronutrimentos y metales pesados en los biosólidos estudiados ..	94
Cuadro 6.7 Metales pesados en el suelo después de tres meses de incorporados los biosólidos y biomasa de pasto Ballico	94
Cuadro 7.1 Dosis de biosólidos correspondiente a cada tratamiento	102

Cuadro 7.2 Densidad aparente y masa calculados para cada tipo de suelo	102
Cuadro 7.3 Cantidad de biosólido seco (g) aplicado a cada maceta con 3 kg de suelo	103
Cuadro 7.4 Concentración de metales pesados (totales), en biosólidos colectados en diferentes fechas en la planta de tratamiento de aguas residuales	104
Cuadro 7.5 Concentración de metales pesados (extractables), en muestras de biosólidos colectadas en diferentes fechas en la planta de tratamiento de aguas residuales El Niágara	105
Cuadro 7.6 Concentración media de metales pesados en biosólidos.....	106
Cuadro 7.7 Características de fertilidad de los tres tipos de suelo de la zona de influencia de la planta de tratamiento El Niágara	107
Cuadro 7.8 Concentración de metales pesados en la raíz de cebada cultivada en suelos adicionados de diferentes dosis de biosólidos	120
Cuadro 7.9 Peso de la paja y su concentración total de metales pesados	121
Cuadro 7.10. Peso de los granos y su concentración total de metales pesados	122
Cuadro 7.11. Peso de paja de espigas y su concentración total de metales pesados	123

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Líneas de actuación de las plantas de tratamiento	7
Figura 2.2. Sistemas de tratamiento de aguas residuales.....	8
Figura 2.3. Evolución de las rutas de eliminación de lodos en la Comunidad Europea hasta el 2005	21
Figura 3.1. Mapa de localización del estado de Aguascalientes, México	37
Figura 3.2. Ubicación de la PTAR y la presa “El Niágara”, dentro del municipio de Aguascalientes.	38
Figura 3.3. Vista aérea de la PTAR “El Niágara”, Aguascalientes	40
Figura 3.4. Esquema del proceso de la PTAR de Aguascalientes.....	41
Figura 3.5. Filtración del agua a través de Rejillas de diferente anchura.....	41
Figura 3.6. sistema de tratamiento de aguas por medio de biofiltros.....	43
Figura 3.7. Sistema de tratamiento del agua por medio de lodos activados.....	44
Figura 3.8. Desinfección con cloro del agua tratada	44
Figura 3.9. Tratamiento de los lodos residuales (digestión aeróbica).....	45
Figura 3.10. Deshidratación de los lodos por medio de filtros banda.....	46
Figura 4.1. Efecto de diferentes dosis de biosólidos, en algunas características del suelo, a uno, tres y ocho meses después de incorporados.....	58
Figura 4.2. Efecto de diferentes dosis de biosólidos , en el contenido de micronutrientes del suelo, a 1, 3 y 8 meses después de incorporados.....	61

Figura 5.1. Croquis de la distribución de tratamientos en campo	73
Figura 5.2. Biomasa de pasto ballico perenne en el primero, segundo y tercer corte.....	79
Figura 5.3. Concentración de nutrimentos en el primero y segundo corte del Pasto ballico perenne.....	80
Figura 6.1. Cationes y aniones en el suelo de la parcela experimental según sus tratamientos	93
Figura 6.2 Valores promedio de RAS y PSI en el suelo de la parcela experimental	93
Figura 7.1. Variación del pH en los Suelos 1, 2 y 3 en diferentes fechas (M1= un mes después de la siembra, M2= dos meses después de la siembra y M3= cuatro meses después de la siembra) y dosis de biosólidos (T= Tratamientos con 0, 10, 20, 40, 80, 120, 160 y 200 t ha ⁻¹ de biosólidos)	108
Figura 7.2. . Variación en la concentración de materia orgánica en los Suelos 1, 2 y 3 en diferentes fechas (M1= un mes, M2= dos meses y M3= cuatro meses después de la siembra) y dosis de biosólidos (T= Tratamientos con 0, 10, 20, 40, 80, 120, 160 y 200 t ha ⁻¹).	109
Figura 7.3. Variación en el tiempo de la concentración de Fe y Cu Mn y Zn para el Suelo 1 adicionado de diferentes dosis de biosólidos. M1= un mes, M2= dos meses y M3= cuatro meses después de la siembra.....	112
Figura 7.4. . Variación en el tiempo de la concentración de Pb y Cd y Ni para el Suelo 1 adicionado de diferentes dosis de biosólidos. M1= un mes, M2= dos meses y M3= cuatro meses después de la siembra.....	113
Figura 7.5. Variación en el tiempo de la concentración de Fe, Cu, Mn y Zn para el Suelo 2 adicionado de diferentes dosis de biosólidos. M1= un mes, M2= dos meses y M3= cuatro meses después de la siembra.....	115
Figura 7.6. Variación en el tiempo de la concentración de Pb, Cd y Ni para el Suelo 2 adicionado de diferentes dosis de biosólidos. M1= un mes, M2= dos meses y M3= cuatro meses después de la siembra	116
Figura 7.7. Variación en el tiempo de la concentración de Fe, Cu, Mn y Zn para el Suelo 3 adicionado de diferentes dosis de biosólidos. M1= un mes después de la siembra, M2= dos meses después de la siembra y M3= cuatro meses después de la siembra.	118
Figura 7.8. Variación en el tiempo de la concentración de Pb, Cd y Ni para el Suelo 3 adicionado de diferentes dosis de biosólidos. M1= un mes, M2= dos meses y M3= cuatro meses después de la siembra	119

CAPITULO I

1.0 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista de la sustentabilidad, la calidad del agua y el tratamiento del agua residual son importantes para el cuidado de la salud humana y el equilibrio de los ecosistemas. En el contexto de los problemas ambientales, la contaminación del agua ocupa un lugar prioritario a escala mundial. Las aguas residuales resultantes de usos domésticos e industriales, antes de su vertido a los cauces receptores, deben sanearse para minimizar su impacto contaminante (INEGI, 2009).

La implantación de depuradoras de aguas residuales ha ido en aumento en los últimos años como resultado de la aplicación de la normativa encaminada a la protección de las aguas superficiales. Con ello se producen volúmenes importantes de lodos que se pueden definir como residuos urbanos procedentes de la depuración de aguas residuales cuya materia orgánica puede ser aprovechada en la agricultura (Porta, 2003).

La mayoría de los procesos para el tratamiento de aguas de desechos producen partículas sólidas sedimentables y decantables, constituidas por minerales inertes y materiales orgánicos fermentables, sobre los que se absorben y adsorben sales minerales y algunos patógenos (bacterias, parásitos, etc.), que se encuentran en las aguas de desecho. Estos materiales se separan del agua y forman un lodo biológicamente inestable, con alto contenido de humedad, (Gamrasni 1985).

En México, el tratamiento de agua residual con lodos activados, además de ser el más eficiente en cuanto a tiempo y volumen de agua que trata, también es el que más cantidad de lodos residuales genera. El volumen aproximado de lodos producidos con este proceso en todo el país es de 0.58 millones de toneladas por año (CONAGUA, 2010).

El contenido de materia orgánica y de nutrimentos esenciales para las plantas, en los biosólidos, hace favorable su utilización como fertilizante agrícola en su estado natural, tratado o en forma de compost. Por lo cual, su aplicación al

suelo puede ser una alternativa económica y ambientalmente aceptable (Oberle y Keeney, 1994; Pierzynski, 1994). Sin embargo, estos pueden contener contaminantes dependiendo de su origen (Pescod, 1992). Algunas de estas sustancias pueden ser tóxicas para plantas, humanos o animales, por lo que es necesario controlar la concentración de los elementos potencialmente tóxicos (EPT), al aplicar este material al suelo. También se encuentran presentes otros nutrimentos como Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn y B (Lovell, 1996).

Por lo tanto, se requieren análisis químicos para determinar el contenido de nutrientes y metales pesados, además de calcular una tasa de aplicación debido a que los biosólidos pueden variar en sus concentraciones considerablemente (Lovell, 1996).

La biodisponibilidad de metales en el sistema suelo-planta por aporte de biosólidos, se ha estimado a partir de los coeficientes de transferencia, observándose que el Cd y el Zn poseen los valores más elevados. En general parece que la biodisponibilidad es superior para Cd, Cu, Ni y Zn, que para Pb, Hg y Cr; pero incluso para los elementos más móviles, la cantidad de metal transferida al cultivo es inferior al 0.05% de la cantidad aplicada anualmente por los aportes de lodos (Ortiz *et al.*, 1995).

La aplicación de biosólidos en la agricultura reduce la demanda de fertilizantes inorgánicos, mejora la fertilidad del suelo, así como la retención de humedad, además representa un beneficio económico para esta actividad (Walter *et al.*, 2005). Al respecto Bontoux *et al.*, (1998) señalan que esparcir los lodos en los terrenos agrícolas representa la opción más atractiva ya que se reciclan los nutrimentos y son útiles desde el punto de vista agronómico.

En el Reino Unido, experimentos realizados durante cinco años con la aplicación de biosólidos al suelo en cultivos de trigo, papa, lechuga, remolacha y ballico perenne demuestran que los contenidos de metales en el tejido están por debajo de los niveles máximos permisibles dictaminados por la Comunidad Europea. Además, la concentración de elementos en el tejido de la planta depende del tipo de suelo. Por otro lado, los rendimientos obtenidos con la

dosis de 40 t ha⁻¹ de biosólidos fueron superiores a la fertilización inorgánica (120-80-80) (Pescod, 1992).

La ciudad de Aguascalientes, Ags. cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, con capacidad para tratar hasta 2000 litros por segundo. Esta actividad genera 130-150 m³ de lodos residuales diariamente, que son acumulados en áreas aledañas a la planta porque no tienen un uso inmediato y representan un riesgo de contaminación para suelo, aire y agua. La infiltración de elementos tóxicos hasta alcanzar subsuelo y mantos freáticos, proliferación de moscas y roedores, síntesis de compuestos indeseables debido a la reactividad del lodo, diseminación de olores desagradables, etc., son algunos de los problemas derivados de la inutilización de estos lodos. Estos biosólidos están siendo aplicados en diferentes dosis, sin control ni regulación en parcelas de agricultores cooperantes cercanas a la planta, obteniendo buenos resultados en algunos casos, en otros se detectó que hubo endurecimiento de los suelos ó quemaduras de las plantas.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo General

Evaluar las características de los biosólidos y el efecto de su uso en el suelo y en la producción de cultivos mediante experimentos de campo e invernadero, para establecer la dosis más adecuada de aplicación, sin perjuicio del ambiente.

1.2.2. Objetivos Específicos

1. Caracterizar los biosólidos física y químicamente.
2. Determinar las características físicas y químicas de suelos de la región de estudio.
3. Evaluar el efecto de la aplicación de biosólidos en el rendimiento y contenido nutrimental en maíz, pasto ballico y cebada mediante experimentos de campo e invernadero en suelos

4. Establecer la dosis óptima de biosólidos a aplicar a suelos representativos de la región y su efecto en las características químicas
5. Evaluar el efecto de la aplicación de biosólidos en el contenido de metales pesados y sales solubles en suelos y plantas
6. Realizar un análisis de costos de producción con el uso de biosólidos.

CAPITULO II

2.0 REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. AGUAS RESIDUALES Y SU TRATAMIENTO

2.1.1. Origen, Composición y Destino Final de las Aguas Residuales

Las aguas residuales son aquellas aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios, agrícolas, pecuaria, doméstica, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, así como la mezcla de ellas ([NOM-004-SEMARNAT-2002](#)).

Concretamente, las aguas residuales municipales o domésticas, también llamadas aguas negras, contienen residuos que incluyen tan to materiales orgánicos que consumen o demandan oxígeno (como material fecal, restos de alimentos, aceites y grasas), como otra parte constituida por detergentes, sales, sedimentos, material orgánico no biodegradable, así como microorganismos.

Las aguas negras se vierten al sistema de alcantarillado, que normalmente las conduce a cuerpos de agua como mar, lagos y ríos, provocando la contaminación de aguas naturales. Por eso es importante que, antes de su vertido a los cauces receptores, puedan ser tratadas para minimizar su impacto contaminante sobre el medio ambiente.

En México, las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales están supeditadas por la [NOM-001-ECOL-1996](#), que establece los límites máximos permisibles de contaminantes.

2.1.2 Tratamiento de las aguas residuales

La práctica sistemática de recolección, tratamiento y disposición de aguas residuales no existía hasta después del siglo XIX. En 1992 había en México 394 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales en operación, que trataban un caudal de 30,6 m³/s de aguas residuales ([CNA, 1999](#)), sobre un total estimado ([Escalas, 2006](#)) de 187 m³/s de aguas residuales recolectadas

únicamente por las redes de alcantarillado, suponiendo sólo el 19%. Operaba, por tanto, un número reducido de plantas de tratamiento para las necesidades del país. Además, a finales de los años noventa, un porcentaje muy elevado (39%) de las plantas de tratamiento estaba fuera de operación (CNA, 1999). Según diversos expertos del sector, se construyeron un número elevado de plantas de tratamiento que luego los ayuntamientos no podían operar, normalmente por falta de recursos económicos y humanos para gestionar su operación.

En México, el tratamiento de las aguas residuales ha ido en aumento en los últimos años como resultado de la aplicación de la normatividad encaminada a la protección de las aguas superficiales, tal como se indica en el Cuadro 2.1.

Cuadro 2.1. Evolución del saneamiento del agua en México

Año	Plantas en operación		
	No.	Caudal instalado (L s ⁻¹)	Caudal tratado (L s ⁻¹)
2000	793	68 970.00	45 927.30
2001	938	73 852.60	50 810.00
2002	1 077	79 735.03	56 148.49
2003	1 182	84 331.48	60 242.55
2004	1 300	88 718.30	64 541.94
2005	1 433	95 774.27	71 784.84
2008	1833	113020.00	83 640.00

Fuente, (CONAGUA, 2010).

2.1.3. Producción de lodos en el tratamiento de las aguas residuales

Los lodos generados pueden, después de estabilizados, ser susceptibles de aprovechamiento, por ejemplo, en el ámbito agrícola como fertilizantes para mejorar y mantener productivos los suelos y estimular el crecimiento de las plantas (USEPA, 1994)

2.2. PLANTAS DE TRATAMIENTO DE AGUAS RESIDUALES

2.2.1. Objetivo de las plantas de tratamiento

El objetivo de las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTARs) es la limpieza de las aguas negras (extraer la mayoría de contaminantes o por lo

menos reducirlos) y el posterior tratamiento de los lodos generados en el transcurso del proceso.

El efluente depurado (agua residual ya limpia) se usa principalmente en irrigación o puede ser arrojada de nuevo a un cuerpo de agua, actuando como un elemento regenerador de éste.

2.2.2. Funcionamiento de las plantas de tratamiento

Las plantas de tratamiento de aguas residuales tienen dos líneas de actuación: el circuito del agua y el del lodo, (Figura 2.1).

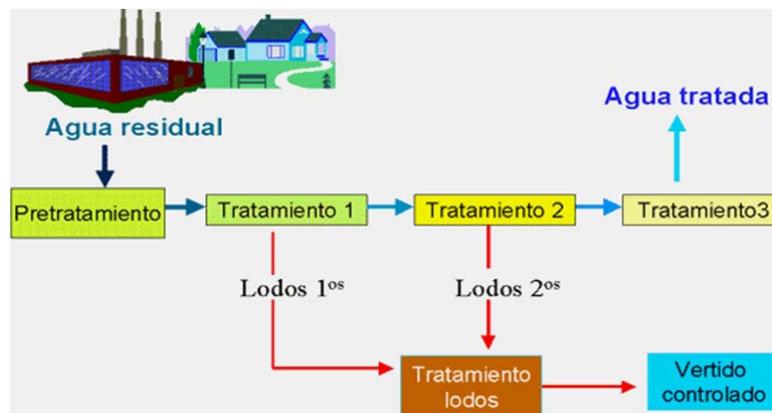


Figura 2.1. Líneas de actuación de las plantas de tratamiento

(<http://www.minambiente.gov.co>).

2.2.3. El circuito de agua

En términos generales, los tratamientos aplicados a los vertidos para la obtención de agua tratada pueden clasificarse de la siguiente manera:

- Tratamiento preliminar: Es el tratamiento básico que se da a los vertidos con el fin de remover sólidos gruesos y objetos que puedan impedir el funcionamiento de bombas y equipos o causar taponamiento en las redes de drenaje internas.
- Tratamiento primario (físico): Es el conjunto de operaciones encaminadas hacia la separación de sólidos sedimentables o de material

flotante, por medios gravitacionales o mecánicos. En algunos casos requiere de ayudas físicas o químicas para remover los sólidos sedimentables o el material flotante y aumentar su eficiencia.

- Tratamiento secundario (biológico): Se utiliza para la reducción de la carga orgánica y/o de sólidos en suspensión del vertido, por métodos bioquímicos.
- Tratamiento terciario: Es aquel requerido por un vertido después del tratamiento secundario, cuando así lo exige la calidad de la corriente receptora del vertido (por ejemplo, cuando el agua va a ser reutilizada). Elimina un 99% de los sólidos y además se emplean varios procesos químicos para garantizar que el agua esté tan libre de impurezas como sea posible.

En la Figura 2.2 pueden observarse los diferentes sistemas de tratamiento aplicados a las aguas residuales.

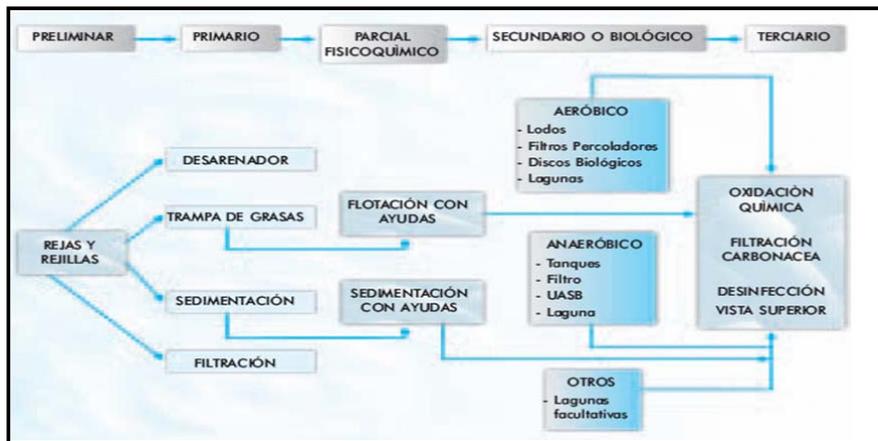


Figura 2.2. Sistemas de tratamiento de aguas residuales.

(<http://www.minambiente.gov.co>).

2.2.4. El circuito de lodos

Paralelamente al circuito de agua se realiza el de lodos, debido a que el tratamiento del agua residual no puede considerarse sustentable si los lodos que se generan no son tratados y dispuestos adecuadamente (Moeller y Ferat, 2000).

Por su origen (fase o proceso de tratamiento del agua en que se generaron), los lodos se clasifican en primarios, secundarios o terciarios (Girovich, 1996) (Cuadro 2.2).

Para mejorar su imagen pública y utilizarlos como fertilizante orgánico, estos desechos también se clasifican en lodos crudos y lodos tratados o biosólidos (Nebel y Wright, 1999). El tratamiento de los lodos o su estabilización constituye los procesos físicos, químicos o biológicos a los que se someten los lodos para acondicionarlos para su aprovechamiento o disposición final para evitar o reducir sus efectos contaminantes al medio ambiente (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Cuadro 2.2. Lodos generados por cada nivel de tratamiento de aguas residuales (Girovich, 1996).

Parámetro	Unidad	Nivel de tratamiento		
		Primario	Secundario	Terciario
Cantidad de lodos generada	Lodo / 10 ⁶ L agua tratada	2 500 – 3 500	15 000 – 20 000	10 000
% de Sólidos totales	%	3.0 – 7.0	0.5 – 2.0	0.2 – 1.5
Materia orgánica	% en base seca	60 - 80	50 - 60	35 - 50

A nivel mundial, los procesos o técnicas de tratamiento de los lodos residuales para estabilizarlos comprenden: sistemas biológicos, espesamiento, acondicionamiento y deshidratado.

2.3. BIOSÓLIDOS: CONCEPTO Y APROVECHAMIENTO

2.3.1. Concepto de biosólido

Gamrasni (1985) define los biosólidos como sustancias sólidas sedimentables y decantables con un alto contenido de agua, biológicamente inestables, que contienen partículas minerales inertes y materia orgánica fermentable, sobre los que se absorben y adsorben sales minerales y algunos patógenos (bacterias, virus, parásitos, etc.), que se encuentran inexorablemente en las aguas de desecho.

Los biosólidos son residuos sólidos, semisólidos y líquidos generados durante el tratamiento de desechos sanitarios producidos por el tratamiento de aguas residuales. El término fue introducido por la industria de tratamiento de aguas residuales en 1991 para describir los residuos o sólidos generados durante el tratamiento de éstas (de aquí, bio-sólidos). La U. S. Environmental Protection Agency (USEPA) adoptó el término “biosolids” para distinguir la alta calidad de los lodos tratados con los no tratados o que contienen excesivas concentraciones de potenciales contaminantes y patógenos; por lo tanto los lodos residuales deben ser procesados para cumplir con los estándares de uso benéfico de la USEPA para que puedan ser llamados biosólidos (Sukkaryah et al, 2005).

Ortiz et al., (1995) definen a los biosólidos como los residuos sólidos remanentes del proceso de tratamiento de aguas de desecho, que están compuestas por materia orgánica residual no descompuesta, microorganismos, compuestos no biodegradables o potencialmente tóxicos y sales inocuas que se han removido durante el tratamiento.

Como ya se ha mencionado anteriormente, la norma **NOM-004-SEMARNAT-2002** define los biosólidos como lodos provenientes de las plantas de tratamiento de aguas residuales que, por su contenido de nutrientes y por sus características propias o por las adquiridas después de un proceso de estabilización, pueden ser susceptibles de aprovecharse.

2.3.2. Aprovechamiento de los biosólidos

El aprovechamiento, es el uso de los biosólidos como abonos, mejoradores o acondicionadores de los suelos por su alto contenido de materia orgánica y nutrientes, o en cualquier actividad que represente un beneficio (**NOM-004-SEMARNAT-2002**).

El aprovechamiento de los biosólidos se establece en función del tipo (según el contenido en metales pesados) y clase (según el contenido en patógenos y parásitos), como se especifica en el cuadro 2.3 y con un contenido de humedad de hasta el 85% (**NOM-004-SEMARNAT-2002**).

Cuadro 2.3. Aprovechamiento de biosólidos

Tipo	Clase	Aprovechamiento
Excelente	A	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación. • Los establecidos para clase B y C.
Excelente o bueno	B	<ul style="list-style-type: none"> • Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación. • Los establecidos para clase C.
Excelente o bueno	C	<ul style="list-style-type: none"> • Usos forestales. • Mejoramiento de suelos. • Usos agrícolas.

2.3.3. Importancia de los biosólidos en los agroecosistemas

Tradicionalmente, en México, la disposición de lodos ha consistido en depositarlos en rellenos sanitarios, en terrenos aledaños a las plantas de tratamiento de aguas residuales, en tiraderos de basura a cielo abierto, descargarlos al drenaje o incinerarlos (**Campos et al., 1997**). Pero desde sus inicios, la aplicación al suelo ha sido la opción más difundida para la disposición de los biosólidos.

Según **Tester (1990)** los biosólidos tienen valor fertilizante y mejoran las propiedades físicas y químicas de los suelos. También **Page y Chang (1994)** justifican este uso de los biosólidos como mejorador del suelo y como fuente para la nutrición vegetal.

Aún así, el valor de los lodos residuales como fertilizantes no compensa los costos de tratamiento y transportación. Su valor real debe ser considerado en términos de restablecer un ciclo sostenible de nutrientes en los suelos y proteger los cuerpos de aguas de la contaminación y la eutrofización (**Nebel y Wrigth, 1999**).

Para el Comité de Uso de Biosólidos, el uso de este material en la agricultura ofrece un manejo ambientalmente seguro a la alternativa de eliminación de éste, ya que se reduce la cantidad de material que entraría al rellano sanitario o a un incinerador (**Salcedo, 2000**).

2.4. CARACTERÍSTICAS DE LOS BIOSÓLIDOS

Díaz (1991) indica que las características de los lodos son consecuencia del uso que se haya dado a las aguas y de los sucesivos procesos de depuración a los que se han visto sometidos y del tratamiento que les hayan dado a los lodos para su estabilización **(Singh y Agrawal, 2007)**.

2.4.1 Características físicas

Los lodos de origen primario y secundario se presentan en forma de un líquido que contiene partículas heterogéneas en suspensión. Su volumen representa del 0.05 al 0.5% del volumen de agua tratada para los lodos frescos, mientras que es ligeramente inferior para los lodos activados y otros procedimientos biológicos. La floculación del agua aumenta el volumen de los lodos, y sobre todo su peso, en aproximadamente un 10%.

El color de los lodos varía entre el pardo y el gris, y su olor es a menudo desagradable, puesto que se trata de productos fácilmente fermentables y existe un inicio de descomposición. Los principales parámetros físicos son: contenido de materia seca, contenido de materia volátil, contenido de agua intersticial, viscosidad, carga específica, resistencia específica, compresibilidad y poder calórico.

2.4.2 Características químicas

La composición química de los biosólidos varía dependiendo de su origen y el método de tratamiento que se les proporcione **(Girovich, 1996)**. Los principales parámetros químicos son:

- **Materia orgánica:** Corresponde a la materia volátil, y varía de 60 a 85% de la materia seca.
- **Elementos nutrientes:** Se trata del contenido de nitrógeno total, fósforo y potasio. Son sustancias que favorecen el crecimiento de las plantas y que tienen mucha importancia para la utilización agrícola de los lodos.

- Microcontaminantes orgánicos: Son sustancias que pueden tener una acción negativa sobre el tratamiento de los lodos y sobre su utilización en la agricultura. Se trata generalmente de productos de síntesis química que se utilizan comúnmente y que se encuentran en las aguas de desecho domésticas e industriales. Se hallan particularmente contenidos importantes de detergentes y medicinas (especialmente antibióticos que actúan sobre la flora de los lodos).
- Microcontaminantes minerales: Los lodos contienen numerosos elementos minerales, algunos de ellos tienen una acción positiva sobre las plantas o sobre los animales (Fe, Cu, Mn, Zn), sin embargo, otros tienen una acción negativa sobre el uso posterior de las aguas negras (Pb, Cd, Hg y Ni). Resulta pues, indispensable conocer el contenido mineral de los lodos antes de su utilización en la agricultura.

2.4.3 Características Biológicas

Las aguas residuales contienen una flora y una fauna variadas que se encuentran en parte en los lodos. Los principales organismos presentes en los lodos son:

- Bacterias: Se encuentran diferentes tipos de bacterias en los lodos, una parte de estas bacterias es de tipo fecal y algunas provienen de portadores de gérmenes; por consiguiente, pueden ser patógenas. Las bacterias se pueden dividir en cuatro clases: aerobias estrictas, aerobias facultativas (ej. *Aeromonas*), anaerobias facultativas (ej. *Lactobacillus*) y anaerobias estrictas (ej. *Clostridium*). El tratamiento biológico de los lodos favorece el desarrollo de ciertas bacterias en detrimento de las otras y su almacenamiento permite a los organismos anaerobios desarrollarse.
- Virus y parásitos: Se encuentran enterovirus, adenovirus y reovirus absorbidos sobre la materia sólida de los lodos. Respecto a parásitos, hay numerosos, de origen fecal o telúrico; se trata de huevos de áscaris, tricocéfalos, helmintos, tenias o fasciolas hepáticas, o de formas enquistadas de *Giardia* o tricomonas. Su eliminación es muy difícil puesto

que estos parásitos toman una forma vegetativa cuando las condiciones les son hostiles, mientras que se desarrollan cuando se encuentran en los animales de sangre caliente o en el hombre.

- Hongos y algas: Respecto a hongos, se trata esencialmente de las levaduras y los saprófitos que están normalmente presentes en el aire; por lo general no son patógenos para los animales y el hombre, excepto algunos que pueden llegar a serlo cuando las condiciones son favorables, especialmente los hongos oportunistas; por el contrario, ciertos mohos son fitopatógenos y deben ser eliminados antes de la utilización de los lodos en la agricultura, como por ejemplo los del género *Fusarium*. No se encuentran algas en gran cantidad en los lodos primarios y secundarios; por el contrario, en las lagunas naturales, gran parte de los lodos están constituidos por detritus de algas.
- Macrofauna: En lodos activados o en los lechos bacterianos, además de los patógenos mencionados anteriormente, se encuentran gusanos, larvas de insectos, crustáceos y arañas pequeñas.

2.5. BIOSÓLIDOS: BENEFICIOS Y RIESGOS

2.5.1. Beneficios

A corto plazo, la adición de lodos residuales puede mejorar la productividad del suelo cultivable, ya que por el alto contenido de MO (60 – 85% en materia seca), se facilita la disponibilidad, suministro inmediato y transporte de nutrientes necesario para el crecimiento y desarrollo de las plantas (principalmente N, P y nutrientes menores).

- Materia orgánica: La MO contenida en los biosólidos ayuda a retener agua en el suelo. Esta retención extra de agua puede reducir la frecuencia de riego y facilita la conservación de agua. Los biosólidos, gracias a la MO, también son beneficiosos para mejorar la estructura del suelo. La materia orgánica ayuda a mantener la porosidad del suelo, cosa que permite el paso del agua y aire a través del suelo. Esta

porosidad puede perderse a través del uso excesivo del suelo, y es necesario mantener el suelo rico en oxígeno para las raíces de la planta.

- **Nitrógeno:** Es un nutrimento esencial en la nutrición de las plantas, que es principalmente absorbido como amonio y nitrato. En los biosólidos está en forma de amonio, nitratos y nitrógeno orgánico. El nitrógeno del amonio y nitratos está listo para ser usado por la planta. El nitrógeno orgánico es liberado lentamente durante muchos meses, proveyendo continuamente a los cultivos y minimizando el movimiento potencial a las aguas del subsuelo.
- **Fósforo:** Es un nutriente básico para el crecimiento de la planta y está presente en todos los biosólidos en diferentes concentraciones.
- **Micronutrientes:** Se incluyen diferentes sales y metales, necesarios para el crecimiento de la planta y presentes en los biosólidos en diferentes cantidades.

A largo plazo, el lodo entrega nutrientes de forma lenta pero continua, y mejora las propiedades físicas del suelo, tales como estructura, permeabilidad y poder de amortiguamiento.

Al respecto, [Hall et al., \(1986\)](#), mencionan que la aplicación de biosólidos como enmienda orgánico-mineral para la recuperación de suelos degradados, implica dos soluciones ambientales: i) una alternativa de bajo costo para su aplicación y ii) la adición al suelo de un material orgánico que libera nutrientes y mejora las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo.

2.5.2. Riesgos

El aprovechamiento de los lodos procedentes de PTARs para la obtención de cultivos causa preocupación en lo que respecta a la contaminación ambiental y sanitaria.

Dentro de este contexto se entiende como contaminante a una sustancia orgánica, inorgánica, una combinación de ambos tipos u organismos patógenos

que después de su descarga a través de diversas vías de exposición ingestión o asimilación por un organismo directamente del medio ambiente o indirectamente por ingestión en la cadena alimenticia puede causar muerte, enfermedades, mutaciones genéticas, entre otros **(Felipó, 1995)**.

Felipó (1995) y **González (2000)** mencionan que en la actualidad, el aprovechamiento de lodos residuales y biosólidos en suelos agrícolas representa una fuente contaminante debido a la presencia de metales pesados, compuestos orgánicos potencialmente tóxicos, organismos patógenos y nutrimentos en exceso.

- Microcontaminantes:

Los lodos contienen, en poca cantidad, varios productos que pueden ser tóxicos para las plantas, presentar inconvenientes o hasta ser peligrosos para el hombre a través de las plantas. Estos microcontaminantes pueden ser divididos en orgánicos y minerales **(Gamrasni, 1985)**.

Dentro de los microcontaminantes orgánicos se encuentra una serie de sustancias como AOX (halógenos adsorbidos y enlazados orgánicamente), PAH (hidrocarburos aromáticos policíclicos), PCB (bifenilos policlorados), LAS (aquilbencenos sulfonatos lineales), DEHP (etil exil ftalato), NPE (nonilfenol etoxilato) y PCDD/PCDF (policlorodibenzodioxina y policlorodibenzofuranos) **(González, 2000)**.

Por otro lado, los microcontaminantes minerales son esencialmente metales pesados **(Gamrasni, 1985)**. Los metales pesados contenidos en los lodos, como elementos potencialmente tóxicos (EPT), representan la mayor limitante en su uso en agricultura. Si se aplican cantidades excesivas de EPT en el suelo, éstos pueden contaminar las aguas subterráneas, producir toxicidad en plantas, y tener efectos adversos en los microorganismos del suelo o acumularse en los tejidos de la planta. Los animales herbívoros pueden acumular metales pesados y pasarlos a otros animales que comen estos últimos contaminados. **Omran y Waly (1988)**, **Alloway (1995)** y **García (2000)** señalan que los lodos pueden contener EPT que representan una amenaza

para la salud humana, como Cd, Pb y Hg; y otros fitotóxicos cuando aumenta excesivamente su concentración en el suelo, como B, Cu, Ni, Zn y Mn.

- Microorganismos patógenos:

Los lodos, al igual que los suelos, contienen un número muy elevado de gérmenes inofensivos; pero junto con éstos, en los lodos, están concentrados microorganismos de origen fecal que son *a priori* dañinos para el hombre y los animales (Gamrasni, 1985). Es necesario que los biosólidos sean especialmente tratados o desinfectados para destruir estos patógenos, que se presentan en concentraciones significativas de bacteria, virus y parásitos.

Por lo anterior, para que cualquier vertido de lodos sea seguro, se precisa la eliminación o una inactivación suficiente de agentes patógenos (Bontoux et al., 2002). Además, esta cuestión de salud pública puede prevenirse con un control apropiado del acceso del público a las zonas de aplicación, y restricciones en el uso y siembra de ciertos cultivos en las áreas tratadas.

Así, la aplicación de estos lodos puede suponer una limitación debido al tiempo de espera para la cosecha o para la alimentación del ganado (Cuadro 2.4). Este periodo es necesario para reducir el número de patógenos que permanecen en los biosólidos después de la estabilización (Bigeriego, 1993; Lovell, 1996).

Cuadro 2.4. Restricciones para la aplicación de biosólidos, relacionadas con la salud pública y los patógenos (Lovell, 1996).

Cultivo	Tiempo de espera para la cosecha, después de la aplicación
Heno	3 semanas
Pasto para porcinos, ovinos y caprinos	2 meses
Pastos comerciales	6 meses
Frutas pequeñas	15 meses
Árboles frutales y vid	3 meses
Legumbres	12 meses
Tabaco	No se recomienda aplicar
Jardines residenciales	No se recomienda aplicar
Campos de golf y recreación	Se recomienda aplicar sólo si hay estabilización adicional a parte de la digestión que se usa para reducir el contenido de patógenos

2.5.3 Nutrientes en exceso (N, P y sales)

El nitrógeno puede ser aplicado en exceso, causando su acumulación en el suelo. El exceso de nitrógeno eventualmente se convertirá en nitratos que pueden pasar al agua del subsuelo. Se sabe que cantidades elevadas de nitratos (mayor de $10 \text{ mg L}^{-1} \text{ N-NO}_3$) en el agua son peligrosas para la salud humana. La sobre aplicación de nitrógeno puede ser prevenida aplicando biosólidos en proporciones agronómicas, esto es, la cantidad de nitrógeno que los diferentes tipos de suelos y plantas pueden absorber y usar, sin dejar exceso de este elemento en el suelo.

Algunos biosólidos son ricos en minerales solubles, como calcio, magnesio, sodio, sulfatos y cloruros. Estas sales se pueden acumular en la zona radicular a una concentración tal que ocasiona pérdidas en la producción, causando quemado de hojas, clorosis, raquitismo a las plantas, y en general bajos rendimientos.

2.5.3 Otros

Los malos olores e insectos pueden ser causados si los biosólidos no han sido tratados adecuadamente antes de ser aplicados ó si se los deja mojados por muchos días en la superficie del suelo. El manejo apropiado en el lugar de aplicación prevendrá los malos olores o insectos molestos.

2.6. BIOSÓLIDOS: REGULACIÓN DE SU USO

2.6.1. Manejo responsable de biosólidos

Para asegurar la seguridad y bienestar de suelos, agua, animales y personas es necesario realizar un planteamiento prudente de uso de aguas residuales tratadas y sus lodos o biosólidos y tener un control local sobre el mismo. Por eso solamente deben aplicarse biosólidos que cumplan con requisitos estrictos: que protejan la salud, seguridad y bienestar de la gente y animales, así como la calidad del agua y el suelo.

Los biosólidos son una fuente valiosa de nutrientes para los cultivos. Sin embargo, principalmente debido a su contenido de organismos patógenos y

elementos potencialmente tóxicos, este producto tiene diferentes restricciones. Por lo tanto el uso de los biosólidos en la agricultura está estrictamente regulado en muchos países (Lavado et al, 2005)

2.6.2. Normativa en México sobre el uso de biosólidos

Para su aprovechamiento como mejorador de suelo y fertilizante, los biosólidos deben ser declarados “residuos no peligrosos” para el ambiente (NOM-052-SEMARNAT-2005), con base en el análisis CRETIB (corrosividad, reactividad, explosividad, toxicidad, inflamabilidad y biológico-infeccioso) de la Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente (LGEEPA) de la SEMARNAT.

La inadecuada disposición final de los biosólidos puede contribuir de manera importante a la contaminación de la atmósfera, de las aguas y de los suelos, afectando al ecosistema del área donde se depositen.

Por tal motivo, en México, la norma NOM-004-SEMARNAT-2002 establece límites máximos permisibles para metales pesados, patógenos y parásitos en lodos residuales y biosólidos. Clasifica los biosólidos en tipo: excelente y bueno, en función de su contenido de metales pesados; y en clase: A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos. Los límites máximos permisibles de metales de pesados y los límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en los biosólidos se establecen los Cuadro 2.5 y 2.6.

Cuadro 2.5. Límites máximos permisibles para metales pesados en biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002).

Determinados en forma total	Excelentes (mg kg ⁻¹ en base seca)	Buenos (mg kg ⁻¹ en base seca)
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1200	3000
Cobre	1500	4300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2800	7500

Cuadro 2.6. Límites máximos permisibles para patógenos y parásitos en lodos y biosólidos **(NOM-004-SEMARNAT-2002)**.

Clase	Indicador bacteriológico de contaminación	Patógenos	Parásitos
	Coliformes fecales NMP* g ⁻¹ en base seca	Salmonella spp. NMP g ⁻¹ en base seca	Huevos de helmintos g ⁻¹ en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1 ^(a)
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

*NMP: Número Más Probable ^(a) Huevos de helmintos viables

En México, la aplicación de biosólidos en terrenos con fines agrícolas y mejoramiento de suelos se sujetará a lo establecido en la Ley Federal de Sanidad Vegetal y conforme a la normatividad vigente en la materia **(NOM-004-SEMARNAT-2002)**, y el uso en terrenos comprendidos en zonas declaradas como áreas naturales protegidas sólo podrá realizarse con previa autorización de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

2.6.3. Normativa en el mundo sobre el uso de biosólidos

Los biosólidos son una valiosa fuente de nutrientes para los cultivos. Sin embargo, principalmente debido a la presencia de organismos patógenos y elementos potencialmente tóxicos (PTE), este producto tiene diferentes restricciones. Por lo tanto, la utilización de lodos de depuradora en agricultura está estrictamente regulada en la mayoría de los países.

Con el fin de minimizar o evitar los riesgos de contaminación, las diferentes regulaciones nacionales o supranacionales buscan como objetivo un control en diferentes factores como transmisión de patógenos, contaminación del suelo y de las aguas superficiales y subterráneas.

En Europa, esta aplicación está regulada a través de la Directiva 86/278/CEE, relativa a la protección del medio ambiente y, en particular, de los suelos, en la utilización de los lodos de depuradora en agricultura.

En los EEUU, los biosólidos deben cumplir los requerimientos especificados en “The Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge” (40 CFR Part 503 Biosolids Rule), antes de ser usados.

2.7 USO DE BIOSÓLIDOS EN LA AGRICULTURA

Los lodos residuales han sido usados en la agricultura por muchos años como fertilizante, y en la actualidad existe un creciente interés sobre el aprovechamiento de los mismos en el sector (Figura 2.3). La cantidad necesaria a aplicar en el terreno, las características del lodo y el suelo, el clima y el cultivo que se piensa sembrar son factores influyentes en su aprovechamiento.

La aplicación de biosólidos en suelos es la práctica más empleada en diversos países de La Unión Europea, así como en los Estados Unidos, representando aproximadamente un 45% y 56% respectivamente (Bastian, 1997). Alemania aplica el 45%, Inglaterra 55%, Holanda 54%, Francia 38%, Italia 32% y EEUU 42% de los lodos producidos (Bastian, 1997).

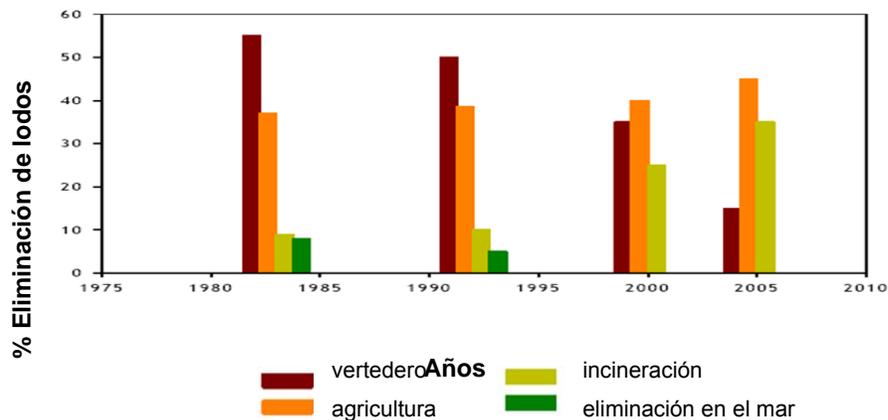


Figura 2.3. Evolución de las rutas de eliminación de lodos en la Comunidad Europea hasta el 2005 (Hall y Dalimier, 1994).

En América Latina se iniciaron investigaciones en 1995 para ver la posibilidad de su uso en agricultura y, en 1996 surgieron prácticas específicas sobre el reciclaje de lodos y uso agrícola, ya que ofrecen una alternativa ambientalmente aceptable y agrónomicamente favorable de reciclar

componentes importantes como MO, macro y micronutrientes **(Magnarelli, 2002)**.

Aunque son muy diversos los posibles usos de los biosólidos en la agricultura, su valor se concreta en tres variantes: como mejorador de suelo, para sustrato de plántulas y como abono por el aporte de nutrimentos. El mejoramiento de suelos consiste en la aplicación de los biosólidos en terrenos para mejorar sus características físicas, químicas o microbiológicas **(NOM-004-SEMARNAT-2002)**.

Respecto a su uso como abono, los lodos contienen una riqueza en N y P varias veces superior a los compuestos orgánicos de origen ganadero. Por otro lado, su uso principal está determinado por el objetivo final de su aplicación. El uso de este material en la agricultura, ofrece un manejo ambientalmente seguro a la alternativa de eliminación de éstos, por lo tanto se reduce la cantidad de material que entraría al relleno sanitario o a un incinerador **(Salcedo, 2000)**.

La aplicación de residuos orgánicos urbanos como enmienda orgánico-mineral para la recuperación de suelos degradados implicaría dos soluciones ambientales: a) una alternativa para su aplicación de bajo costo y b) adicionar al suelo un material orgánico que libera nutrientes, con lo que se mejorarían las propiedades físicas, químicas y biológicas del mismo. El uso de residuos no está exento de riesgos, debido principalmente a su contenido en metales pesados; si bien en ecosistemas semiáridos la probabilidad de que los elementos trazas se lixivien hacia las aguas subterráneas es muy baja, debido a que estos suelos son generalmente calcáreos y tienen un pH elevado, lo que favorece la inmovilización de dichos metales **(Rostagno y Sosebee, 2001)**.

La concentración y la disponibilidad de metales pesados es probablemente el principal factor que se debe tener en cuenta cuando los biosólidos son aplicados al suelo como abonos o mejoradores del suelo **(Walter et al, 2006)**. Otro problema es la naturaleza fitotóxica de los desechos orgánicos principalmente como resultado de la combinación de varios factores, tales como su alta salinidad y de un exceso de iones amonio, compuestos orgánicos,

o cualquier ácido graso de bajo peso molecular que ellos puedan transportar. Todos ellos pueden también inhibir la germinación de las semillas (Wong et al., 2001).

La mejor estrategia para decidir la dosis de aplicación deberá basarse en la composición específica de los biosólidos en cada área, con el propósito de verificar la máxima aplicación de biosólidos. Sin embargo, en muchos casos estos materiales son aplicados a los suelos sin esta información debido al costo y el tiempo que toma su caracterización (Gálvez-Sola et al., 2011).

En cuanto a la aplicación de estos materiales, Lovell (1996) menciona algunos puntos a considerar, como es la fecha de aplicación, evitando hacerlo cuando se pueda compactar el suelo o cuando los equipos de aplicación puedan tener problemas durante el trabajo.

La cantidad de biosólidos que podrían ser aplicados a un terreno está en función de la cantidad de nutrientes requerido por la vegetación y de la concentración de metales en los biosólidos. El Cuadro 2.7 resume la frecuencia, los periodos y las dosis de aplicación para diversos tipos de áreas.

Cuadro 2.7 Escenarios típicos de aplicación de biosólidos

Tipo de área/vegetación	Periodo	Frecuencia de aplicación	Tasa de aplicación
Terreno agrícola Maíz	abril, mayo, luego de la cosecha	Anualmente	5 a 10 toneladas secas / acre
Granos pequeños	marzo a junio, agosto y en el otoño	Hasta 3 veces por año	2 a 5 toneladas secas / acre
Semilla de soya	abril a junio y en el otoño	Anualmente	5 a 20 toneladas secas / acre
Heno	Después de cada poda	Hasta tres veces por año	2 a 5 toneladas secas / acre
Área de bosques	Todo el año	Una vez cada 2 a 5 años	5 a 100 toneladas secas / acre
Terreno de pastoreo	Todo el año	Una vez cada 1 a 2 años	2 a 60 toneladas secas / acre
Áreas de recuperación	Todo el año	Una vez	60 a 100 toneladas secas / acre

Fuente: U.S. EPA, 1984

2.7.1 Utilización en el mundo

El Institute of Arable Crops de la Estación Experimental de Rothamsted (U. K.) realizó un experimento durante 1942-1961, consistió en aplicar lodos de aguas residuales del oeste de Londres. El resultado fue que las concentraciones en el suelo de metales: Zn, Cd, Cu, Cr, Ni y Pb aumentaron, hasta un intervalo por debajo y por arriba de la Directiva Europea de 1986 para suelos tratados con lodos. Después de 25 años de haber dejado de aplicar lodos el 80% de los metales permanecían en el epipedón, lo que muestra el elevado riesgo de permanencia durante muchos años **(Porta, 1999)**.

Nyamangara y Mzezewa (1999) reportaron que la incorporación continua de lodos durante 19 años en Zimbawe, incrementó el contenido de los metales Zn, Cu, Ni, y Pb en el horizonte superficial del suelo.

En Canadá se ha comprobado que la aplicación de biosólidos en terrenos agrícolas es una alternativa ambientalmente segura y productiva. En los últimos 20 años no se ha presentado problema alguno con el uso de este material en cuanto a la salud humana se refiere. Además los suelos presentan poca acumulación de metales como resultado de la aplicación de biosólidos **(Salcedo, 2000)**.

Benítez et al., (2000) en un experimento aplicaron 100 t ha^{-1} de biosólidos a un suelo degradado donde evaluaron las formas totales y asimilables de Cu, Zn, Co, Cd Cr, Pb y Ni. Los resultados obtenidos indican que la aplicación de los biosólidos aumentó los niveles totales y asimilables de Cu, Zn y Pb en el suelo. En cambio las concentraciones de Ni, Co y Cr fueron escasamente afectadas. Pese a los aumentos observados, los niveles alcanzados de Cu, Zn y Pb no constituyen un riesgo de contaminación por metales pesados en el suelo utilizado.

En Egipto, resultados obtenidos a partir de la aplicación de biosólidos mezclado con agua de jacinto, en el cultivo de ajonjolí, demuestran que mejoran la pigmentación y aumentan su contenido de carbohidratos y minerales. Además, hubo un incremento significativo en el contenido de aceites y proteínas. Así

mismo, no se observó desequilibrio fisiológico alguno sobre el crecimiento de la planta, teniendo en cuenta que la concentración de metales pesados en las semillas estuvo por debajo de los niveles máximos permisibles **(Abel-Saour y Abo El-Seoud, 1996)**.

De igual forma la aplicación de lodos residuales de la planta tratadora de Alejandría, Egipto, en cultivos de alfalfa, trigo, soya y haba demuestra que aportan gran cantidad de nutrimentos, lo que incrementó los rendimientos de dichos cultivos. Aunado a esto, las concentraciones de metales pesados en la planta estuvieron por debajo de los niveles determinados por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos **(Abdel-Ghaffar, et al., 1985)**.

La producción de lodos residuales en España fue de aproximadamente 1177 000 toneladas en 2008, y 68.8% de esa cantidad fue usada para propósitos agrícolas. **(Galvez-Sola et al., 2011)**.

En España la aplicación de biosólidos a suelos calcáreos con bajo contenido de materia orgánica, dio como resultado un incremento en la concentración de N y P, mientras que la concentración de K permaneció constante. Así mismo los niveles de Fe, Cu, Zn y Pb aumentaron. La aplicación de lodos incrementó los rendimientos de maíz y cebada **(Hernández et al., 1991)**. Además, estos mismos autores concluyen que la absorción de metales pesados por las plantas depende de la especie vegetal.

Walter et al., (2003) reportan los resultados obtenidos en la aplicación de biosólidos y residuos sólidos urbanos, sobre un suelo degradado semiárido de Madrid, en tres dosis (40, 80 y 120 t ha⁻¹), la concentración de los elementos traza totales (extraídos con HCl-HNO₃) y asimilables (extraídos con DTPA) aumentó, de forma general, significativamente, en las parcelas tratadas con residuos sólidos urbanos. Los contenidos de Zn, Pb y Cu asimilables aumentaron en todos los tratamientos con residuos sólidos urbanos y la concentración de Cd experimentó un incremento en los tratamientos 80 y 120 t ha⁻¹. Estos aumentos se observaron desde el primer año después de la aplicación. Las parcelas tratadas con biosólidos experimentaron un incremento en Zn, Pb y Cu, siendo este aumento significativo a partir del cuarto año de la

aplicación. Los valores alcanzados en las parcelas tratadas con biosólidos fueron generalmente inferiores a los obtenidos en las parcelas tratadas con residuos sólidos urbanos, los resultados se atribuyen al diferente comportamiento de la materia orgánica de ambos residuos.

Por otro lado, estudios realizados para determinar la concentración de nutrimentos y metales pesados en las plantas en suelos mejorados con biosólidos, reflejan que la aplicación de este material aumenta el rendimiento de los cultivos e incrementa la concentración nutrimental en el tejido vegetal. En este sentido, **Tamoutsidis et al., (2002)** señalan que la aplicación de biosólidos aumentó el contenido de materia orgánica, así como la concentración de los nutrimentos excepto el manganeso y el cobalto. Estos autores mencionan que estudios realizados en hortalizas tales como lechuga, espinaca, rábano, zanahoria y remolacha demostraron que las concentraciones de cobre y zinc aumentaron, mientras que hubo una disminución de manganeso, la concentración de hierro permaneció inalterable en las hojas, siendo más bajas en los cultivos donde se aprovecha la raíz. Por otro lado, los niveles de cadmio, cobalto y plomo en la planta fueron bajos.

Para medir la concentración de nutrimentos y de metales pesados en las plantas es necesario tener en cuenta la fisiología de éstas. Al respecto, **Hamon et al., (1999)** señalan que en suelos tratados con dosis altas de biosólidos (15-30 t ha⁻¹), el cultivo de rábano presentó una alta concentración de metales, debido a que se saturan los sitios de adsorción en el suelo y los de absorción en la planta.

Para la aplicación de biosólidos es necesario considerar las dosis adecuadas que requiere el suelo, para evitar efectos de acumulación de metales pesados, de igual forma evitar altas concentraciones de nutrimentos de las requeridas por un determinado cultivo. En este sentido **Barbarick e Ippolito (2003)** encontraron que con la aplicación de 40 t ha⁻¹ de lodos residuales al suelo hubo un incremento en el rendimiento del cultivo de trigo, además de aumentar la concentración de N y P en el grano, sin llegar a niveles excesivos de metales pesados y nutrimentos.

2.7.2 Utilización en México

En las regiones donde se localizan las plantas de tratamiento de aguas residuales se generan lodos durante el proceso. Es por ello que se han dado alternativas para su uso.

En México los principales sistemas de tratamiento de agua residual generan lodos residuales en el que se depositan los contaminantes removidos durante el tratamiento del agua, como patógenos, metales pesados y tóxicos orgánicos. En el país, los lodos se disponen en las corrientes de aguas superficiales, basureros a cielo abierto o rellenos sanitarios lo que provoca la contaminación en el aire, suelo y acuífero. En cuanto a la disposición del lodo residual existe otra tendencia opuesta y es la de utilizar el lodo como un abono para suelos agrícolas, como corrector de suelo y recuperación de áreas erosionadas. El uso del lodo implica una infraestructura adicional al tratamiento del agua residual, pero se justifica porque soluciona un problema de contaminación, convirtiendo un desecho ambientalmente peligroso, en un recurso económico (Cardoso, 2003). La normativa mexicana está favoreciendo el aprovechamiento de los lodos residuales, sin embargo existen factores limitantes para su uso.

En México, el tratamiento de agua residual con lodos activados, además de ser el más eficiente en cuanto a tiempo y volumen de agua que trata, también es el que más cantidad de biosólidos genera. El volumen aproximado de biosólidos producidos con este proceso en todo el país es de 0.58 millones de toneladas por año (CONAGUA, 2010).

En las regiones donde se localizan las plantas de tratamiento de aguas residuales se generan lodos durante el proceso. Uno de los principales problemas de estas plantas es el destino final de los biosólidos. El confinamiento en relleno sanitario, la incineración y el uso agrícola son los principales métodos de disposición de estos residuos.

Cardoso (2002), hizo un estudio de los biosólidos producidos en varias plantas de tratamiento de aguas residuales de la república mexicana (no especifica el número), para determinar las potencialidades y limitaciones para su uso en

suelos agrícolas y concluyó y recomendó lo siguiente, el 30% de los lodos deben ser dispuestos en rellenos sanitarios ya que no cumplen con la NOM-052-ECOL-1993. El 70% de los lodos pasaron las pruebas CRETIB y al ser analizados de acuerdo a la NOM-004-SEMARNAT-2002, obtuvieron una categoría de lodos Tipo Excelente por su concentración de tóxicos inorgánicos y de Clase C por su concentración de organismos indicadores y parásitos. El 80% de los lodos no cumple con la reducción de sólidos volátiles marcado en la norma NOM-004-SEMARNAT-2002, por lo que presentan problemas de olores y vectores. Al analizar otras características agronómicas de los lodos se detectaron otros problemas como la presencia de aniones y cationes en concentraciones altas. Una alta conductividad eléctrica restringe su uso a cultivos resistentes a sales. Los principales aspectos benéficos que van a aportar estos lodos al suelo se encuentra su contenido de materia orgánica y de nutrimentos. Los aspectos dañinos son, poca estabilidad, olores, atracción de vectores y presencia de patógenos.

En el estado de Morelos la planta de tratamiento de aguas residuales de la empresa ECCACIV de Cuernavaca, depura las aguas industriales y domésticas de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, Morelos, México, trabaja mediante el proceso denominado lodos activados. Se generan 20 toneladas de lodos por día, equivalente a 4 t día^{-1} en base seca, durante 15 años se dispusieron en los alrededores de la planta y actualmente se envían a un relleno sanitario ubicado en el occidente del estado de Morelos, que no cumple con los requisitos de la legislación mexicana. [Ortiz et al., \(1995\)](#) hicieron un estudio para caracterizar los lodos y proponer su uso como mejoradores de suelo. Llegaron a las siguientes conclusiones: Los lodos son ricos en materia orgánica (MO), macro y micro nutrimentos y únicamente del 1 al 10% de la concentración total de elementos tóxicos se encuentran en formas solubles. Los resultados microbiológicos muestran la presencia de *Salmonella sp* y coliformes totales. Por su composición, los lodos se consideran adecuados para mejorar la calidad de los suelos y se plantea una ecuación para calcular las dosis de aplicación máximas y evitar la acumulación de metales potencialmente tóxicos; sin embargo, debido a su contenido de Zn

recomiendan incorporar $4.4 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, durante 50 años como dosis máxima, en esa región.

Por otra parte, **Díaz et al., (1997)** compararon la aplicación de biosólidos de las plantas de tratamiento de aguas residuales de Irapuato y Salamanca, Guanajuato, en dosis equivalentes a 60, 120 y 240 kg de N ha^{-1} y obtuvieron rendimientos de maíz trigo y sorgo, similares a los tratamientos con fertilización inorgánica. El análisis CRETIB de los lodos residuales indicó que son residuos no peligrosos por lo que se pueden emplear como fertilizante orgánico en cereales.

En la región agrícola de Delicias, Chihuahua, el INIFAP desarrolló un proyecto de investigación con el uso agrícola de biosólidos, donde en una primera etapa se evaluó la aplicación de 60 t ha^{-1} y se encontró que en los cultivos de alfalfa y avena los más altos rendimientos se obtuvieron con 45 t ha^{-1} de biosólidos, mientras que en maíz forrajero y algodonero se obtuvieron con 40 t ha^{-1} . En este mismo estudio, en general la aplicación de biosólidos no afectó la concentración de elementos tóxicos en el suelo, donde las concentraciones más altas reportadas por los análisis fueron 0.46, 0.468, 6.55, 29 y 8.93 mg kg^{-1} de suelo, para Cd, Hg, Ni, Pb y Cr, respectivamente. Se concluyó que en la región agrícola de Delicias, Chihuahua, en maíz forrajero la dosis más adecuada de biosólidos desde el punto de vista agronómico y económico es de 10 t ha^{-1} en base seca (**Uribe et al., 2002**).

En Ciudad Juárez, Chihuahua, existen dos plantas de tratamiento de aguas residuales, que tratan $3.5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ y generan 175 t día^{-1} de residuos sólidos. Una de las opciones de uso que les han dado es en la producción agrícola (**Flores Margez et al., 2008**).

En una planta de la ciudad de Monterrey, Nuevo León, durante el año 2000 se generaron 53 mil 200 toneladas de biosólidos (aproximadamente 146 t día^{-1}), los cuales se distribuyeron en 112 mil hectáreas de suelos agrícolas (**Núñez, 2001**). En general los tratamientos con biosólidos (8 t ha^{-1} en base seca) generaron una mayor producción de maíz (**Woo Reza et al., 2003**)

Jurado, et al., (2007), evaluaron el efecto de aplicaciones de biosólidos en dosis de 15 a 20 t ha⁻¹ en pastizales de pasto navajita en el estado de Jalisco. La producción de forraje seco fue de más de siete t ha⁻¹, comparado con 476 kg ha⁻¹ obtenidos con el tratamiento testigo.

En el rancho Los Ángeles propiedad de la Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro ubicado al sur de Saltillo, Coahuila, **Bolivar et al., (2007)**, estudiaron la producción y calidad de forraje con la aplicación de biosólidos en pastizales y encontraron que la mejor dosis fue la de 30 t ha⁻¹.

En la ciudad de Puebla, México, se generan cerca de 40 toneladas diarias de biosólidos que se producen en las diferentes plantas tratadoras de aguas residuales. Desde 2003 se han aplicado estos biosólidos en suelos degradados ubicados en la región central del estado de Puebla, **(Rodríguez et al., 2009)**.

Del 2005 a 2010 la aplicación de biosólidos en la zona sur de la ciudad de Puebla (295 ha) incrementó hasta en 600 % el rendimiento de cosechas de maíz beneficiándose con esto a 1472 agricultores **(SOAPAP, 2010)**.

La ciudad de Aguascalientes, cuenta con una planta de tratamiento de aguas residuales, operada mediante lodos activados, con capacidad para tratar hasta 2000 litros por segundo. Esta actividad genera de 150 a 170 m³ de biosólidos residuales diariamente, que son acumulados en áreas aledañas a la planta porque no tienen un uso inmediato y representan un riesgo de contaminación para el suelo, aire y agua **(Robledo et al., 2000)**.

2.8 Literatura Citada

Abdel-Ghaffar, A. S., El-Attar, H. A. y Elsokkary, I. H. 1985. Egyptian experience in the treatment and use of sewage and sludge in agriculture. *In: Treatment and use of sewage effluent for irrigation*. Butterworths. UK.

Abel-Sabour, M. F y Abo El-Seoud M. 1996. Effects of organic-waste compost addition on sesame growth yield and chemical composition. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 60: 157-164.

Alloway, B. J. 1995. *Heavy Metals in Soils*. 2nd Edition. Blackie Academia Professional. London, UK.

- Barbarick, K. A e Ippolito J. A. 2003. Termination of sewage biosolids application affects wheat yield and other agronomic characteristics. *Agronomy Journal*. 95: 1288-1294.
- Bastian, R. K. 1997. Biosolids management in the United States, A state-of-the-nation overview. *Water environment and technology*, USA.
- Benítez, E, Romero F, Gallardo F y Nogales R. 2000. Asimilabilidad de metales pesados en un suelo enmendado con diferentes biosólidos residuales urbanos. *Edafología*. Vol. 7-2. España. [http:// edafologia.ugr.es/ Revista/ tomo7bis/ art157t.htm](http://edafologia.ugr.es/Revista/tomo7bis/art157t.htm).
- Bigeriego, M. 1993. Notas del Curso sobre tratamiento de residuos urbanos. Aplicación agronómica de los lodos residuales. CIT-INIA. Madrid, España.
- Bolivar, M. Perez, L. Figueroa, U. Morales, M. 2007. Efecto de la aplicación de Biosólidos en Pastizales semiáridos Naturales. En: memorias del XVII congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Leon, Gto. México. pp. 245-247.
- Bontoux L, Vega M y Papameletiou D. 1998. Tratamiento de las aguas residuales urbanas en Europa: el problema de los lodos. IPTS report. Vol.23.
- California Plant Health Association, 2004. Manual de fertilizantes para cultivos de alto rendimiento. Limusa. México.
- Cardoso, V. L. 2003. Uso potencial de lodos residuales como biosólidos en México. XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria. México.
- Castellanos, J. Z.; Uvalle, B. J. X. y Aguilar, S. A. 2000. Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. 2ª Edición. Colección INCAPA. Guanajuato, México.
- Chandra, K.S. and Prasad. M .N. V. 2005. Risk Assessment, Pathways, and Trace Element Toxicity of Sewage Sludge-Amended Agroforestry and Soils. *In*: Prasad, M.N.V.; K.S. Sajwan and R. Naidu. (Eds.). Trace Element in the Environment. Boca Raton, FL. USA.
- CONAGUA. 2010. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de aguas residuales en Operación Diciembre de 2008. Comisión Nacional del Agua.

- Csizinski, A. A. 1986. Influence of total soluble salt concentration on growth and elemental concentration of winged bean seedlings (*Psophocarpus tetragonolobus* L.). *Commun. Soil Sci. Plant anal.* 17: 1009-1018.
- Díaz S, Romero E y Webber M. 1997. Experiencias en el manejo de lodos residuales municipales en agricultura en Guanajuato. *In: Memorias del XXVIII Congreso Nacional de la Ciencia del Suelo.* Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. Villahermosa, Tabasco, México.
- De Browere, K. and Smolders, E. 2006. Yield Response of crops amended with sewage sludge in the field is more affected by sludge properties than by final soil metal concentration. *European Journal of Soil Science.* 57: 858-867.
- EPA, 2000. Aplicación de Biosólidos al terreno. Parte 1. En: Folletos Informativos de la EPA. United States Environmental Protection Agency. Office of Water, Washington, D.C.
- Escalas, C. A. 2006. Estimación propia de la generación y recolección de aguas residuales en 1992, a partir de datos de años posteriores. En línea, consultado el 14 de mayo de 2009: http://tecspar.org/curso_chile/a_escalas/tecnologias_y_usos_de_aguas_residuales_en_mexico_a_escalas.pdf
- Felipó, O. M. T. 1995. Reutilización de residuos urbanos y posible contaminación. *In: Gestión y Utilización de residuos urbanos para la agricultura.* Fundación La Caixa. AEDOS. 27-37.
- Flores-Margez, J. C. Sapien, M.G. Corral, D.B. Figueroa, V. U. 2008. Calidad Nutricional de Avena forrajera en suelos tratados con biosólidos y agua residual en el Valle de Juárez, Chihuahua. *Ciencia en la Frontera.* Vol. VI pp. 105-115.
- Galvez-Sola, L.; Marhuenda-Egea, F.C.; Perez-Murcia, M.D.; Pérez Espinosa, A.; Moreno-Caselles, J.; Morales, J.; Moral, R. 2011. Estimation of Key Agronomic Parameters of biosolids by Near Infrared Reflectance Spectroscopy (NIRS). *Sigera II International Symposium On Agricultural and Agroindustrial Waste Management.* Iguazu, Brasil.
- Gamrasni, M. A. 1985. Aprovechamiento agrícola de aguas negras urbanas. Editorial Limusa. México.
- García C. 2000. Manejo del suelo y de la materia orgánica en los agroecosistemas. *In: Lombricultura y agricultura sustentable.* 173 - 184.

- George, T.; Singleton, P. W. and Bohlool, B. B. 1988. Yield, soil nitrogen uptake, and nitrogen fixation by soybean from maturity groups grown at three elevation. *Agronomy J.* 80: 563-567.
- Girovich M. 1996. *Biosolids treatment and management: processes for beneficial use.* Marcel Dekker. USA.
- González M. 1999. Tolerancia a los metales pesados en plantas. *In: Contaminación ambiental por metales pesados. Impacto en los seres vivos.* AGT. México.
- Hall, J. E. y Dalimier, F. 1994. Waste management – sewage sludge: survey of sludge production, treatment, quality and disposal in the EC. EC Reference No: B4-3040/014156/92. Report No: 3646.
- Hamon R. E, Holm P. E, Lorenz S. E, McGrath S. P y Christensen T. H. 1999. Metal uptake by plants from sludge-amended: caution is required in the plateau interpretation. *Plant and Soil.* 216: 53-64.
- INEGI, 2009. "Estadísticas a propósito del día mundial del agua" Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 22 de marzo de 2009. México, D.F.
- Jumberi, A.; Yamada M.; Yamada S. And Fugiyama, H. 2001. Salt tolerance of Grain Crops in relation to Ionic Balance and Ability to Absorb Microelements. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 47 (4), 657-664.
- Jurado, P.; T. Arredondo, E. F.; Olalde, V.y Frías, J. 2007. Efecto de los Biosólidos Sobre la Humedad y los Nutrimientos del Suelo y La Producción de Forraje en pastizales Semiáridos. *Terra Latinoamericana* 25: 211-218.
- Kabatas-Pendias, A. y Pendias, H. 2000. *Trace elements in soils and plants.* CRC Press. USA. P.432.
- Lavado, R.S.; Rodríguez, M.B.; Taboada M.A. 2005. Treatment with biosolids affects soil availability and plant uptake of potentially toxic elements. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 109:360–364
- Lovell, B. 1996. Aplicación en suelos de biosólidos de drenaje para la producción de cosechas. *Factsheet.* Orden Núm. 95-069. Notario 8 p.
- Magnarelli, R. A. 2002. Biosólidos (lodos cloacales) y compostaje de los residuos con énfasis en biosólidos. Fundación América. Argentina. En línea, consultado el 20 de marzo de 2009: <http://www.ecofield.com.ar/servicios/cv-magnarelli.html>

- Mass, E. V. 1984. Salt tolerance of plants. In: The handbook of plant science in agriculture. B. R. Christie (ed). CRC Press, Boca Raton, Fla. USA.
- Moeller, C. G. y Ferat, T. C. 2000. Remoción de microorganismos por medio del tratamiento de las aguas residuales. México, D.F.
- Munns, R. and Termaat, A. 1986. Whole-plant Responses to salinity. Aust. J. Plant Physiol. 13, 143-160.
- Norma Oficial Mexicana NOM-001-ECOL-1996. Que establece los límites máximos permisibles de contaminantes en las descargas de aguas residuales en aguas y bienes nacionales publicada en el Diario Oficial de la Federación el 6 de enero de 1997 y entrando en vigor al día siguiente de su publicación.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 13 de agosto de 2003.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 31 de diciembre de 2002.
- Norma Oficial Mexicana NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos. Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 23 de junio de 2006.
- Nebel, B. and Wright, R. T. 1999. Ciencias Ambientales "Ecología y Desarrollo Sustentable" Pearson. México. 212-243.
- Núñez S. 2001. Tratamiento de aguas en área metropolitana de Monterrey generan lodos con alta capacidad fertilizante. Agro-Red, periódico de información agrícola. México.
- Nyamangara, J., and J. Mzezewa. 1999. The effect of long-term sewage sludge application on Zn, Cu, Ni and Pb levels in a clay loam soil under pasture grass in Zimbabwe. Agriculture, Ecosystems and Environment 73: 199-204.
- Oberle, S. L. and Keeney, D.R. 1994. Interaction of Sewage Sludge with Soil-Crop-Water Systems. In: C. E. Clapp, W.E. Larson, and R.H. Dowdy (Ed.) Sewage Sludge: Land Utilization and the Environment. ASA.CSSA. SSSA. Madison. WI.

- Ortiz, H. L.; Gutiérrez, R. M. y Sánchez, S. E. 1995. Propuesta de Manejo de los Lodos Residuales de la Planta de Tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. *Rev. Int. Contam. Ambient.* 11 (2): 105-115.
- Omran, M. S. y Waly, T. M. 1988. Effect of sewage irrigation on yield, tree components and heavy metals accumulation in leaves orange trees. *Biol. Wastes.* 23: 17-24.
- Oudeh, M.; Khan, M. and Scullion, J. 2002. Plant accumulation of potentially toxic elements in sewage sludge as affected by soil organic matter level and mycorrhizal fungi. *Enviromental Pollution.* 116: 293-300.
- Pescod M. 1992. Wastewater treatment and use in agriculture. FAO. Italia.
- Pierzynski, G. M. 1994. Plant Nutrient Aspects of Sewage Sludge. In: C. E. Clapp, W.E. Larson, and R.H. Dowdy (Ed.) *Sewage Sludge: Land Utilization and the Enviroment.* ASA.CSSA. SSSA. Madison. WI.
- Porta, C. J.; Acevedo M. y Roquero, C. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente.* 3ª Edición. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Robledo, S. E., Corlay Ch. L, Pineda P. J., y Álvarez S. E. 2000. Caracterización y Aplicación Agrícola de Lodos Residuales. In: *Memorias del Seminario de Avances de la Investigación 2000 de los Programas Universitarios de Investigación en Diagnóstico, Conservación y Recuperación del Suelo, Recursos Naturales y Ecología y Agricultura Orgánica.* Universidad Autónoma Chapingo. pp. 27-32.
- Rodríguez T. T.; Cruz, M. A.; Linares F. G.; Tamariz, F, V. 2009. Disponibilidad de Metales en suelos Debido a la Aplicación de Biosólidos. XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. 16 - 20 de noviembre, 2009. San José, Costa Rica.
- Rostagno, C. M. y Sosebee, R. 2001. Biosolids application in the Chihuahuan desert: effects on runoff water quality. *J. Environ. Qual.*30, 160-170.
- Salcedo P. 2000. Alternativa de uso agrícola y forestal de lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas negras. Tesis de maestría. UACH. México.
- Shing, R.P. y Agrawal. M. 2007. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal acumulation and cosequent respond of *Beta vulgaris* plants. *Chemosfere.* 67: 2229-2240.

- Shtangeeva, I. 2006. Phytoremediation of trace element contaminated soil with cereal crops: Role of fertilizers and bacteria on bioavailability. . In: Prasad, M.N.V., K.S. Sajwan and R. Naidu. (Eds.). Trace Element in the Environment. CRC. Boca Raton, FL. USA.
- Shuman, L.M. 1999. Effect of organic waste amendments on Zn adsorption by two soils. *Soil Science*. 164: 97-205.
- SOAPAP, 2010. Aplicación de Biosólidos como Mejorador de Suelo y fuente de Nutrientes Para el Maíz. El Delfin Año 6. Puebla, Pue.
- Sukkariyah, B., Haering, K., Evanilo, G., 2005. Land application of Biosolids to Provide Plant Nutrients, Enhance Soil Properties, and Prevent Water Quality Impairment. Mid-Atlantic Regional Water Program. pp. 6.
- Tamoutsidis, E.; Papadopoulos, I.; Tokatlidis, I.; Zotis, S. and Mabropoulos, T. 2002. Wet sewage sludge application effects on soil properties and element content of leaf and root vegetables. *J. Plant Nutrition*. 25 (9):1941-1955.
- Uribe, M. H. R., Chavez, S. N., Orozco, H. N. 2003. Uso de Biosólidos como Fertilizantes en cultivos forrajeros y algodón. In: Salazar, S. E.; Fortis, H. M.; Vázquez, A. A. y Vázquez, V. C. (Eds.). *Agricultura Orgánica*. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, Gómez Palacio, Durango.
- U.S. Environmental Protection Agency, 1984. Environmental Regulations and Technology, Use and Disposal of Municipal Wastewater Sludge (EPA 625/10-84-003.) Cincinnati. U.S. Environmental Protection Agency.
- USEPA, 1993. Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge (40 Code of Federal Regulations Part 503). Washington D.C., U.S. Environmental Protection Agency.
- SAS. 1995. ANOVA. In: SAS User Guide: Statistics. Cary, N.C. pp: 113-138.
- Wong, J. W. C., Li, K., Fang, M., Su, D.C. 2001. Toxicity evaluation of sewage sludge in Hong Kong. *Environ. Int.* 27, 373-380.
- Walter, I., Martínez, F., Cala, V., 2005. Heavy metal speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses. *Environmental Pollution* 139: 507-514.
- Woo R., Vázquez A., Olivares S., Zavala F., González G., Valdés R. y Gallegos C. 2003. Evaluación del rendimiento del cultivo del maíz (*Zea mays*) aplicando lodos activados y urea. En: VII Simposio Internacional y II Congreso Nacional de Agricultura Sostenible., Monterrey, México.

CAPÍTULO III

3.0 ÁREA DE ESTUDIO

Las parcelas experimentales se ubican en el poblado Salto de los Salado, dentro del municipio de Aguascalientes, Ags., México (Figura 3.2).

El estado de Aguascalientes se localiza en la parte central de México, cuya extensión territorial es de 5,589 km², que corresponde al 0.3% del total de la República Mexicana. Limita al suroeste, norte y noreste con el estado de Zacatecas, y al suroeste, sur y sureste con el estado de Jalisco (Figura 3.1). Está ubicado entre los 21° 39' y 22° 28' de latitud norte y los 102° 54' y 102° 53' longitud oeste, con altitudes sobre el nivel del mar que van de los 1,630 a los 3,050 m con una media de 2,053 m (INEGI, 2003).

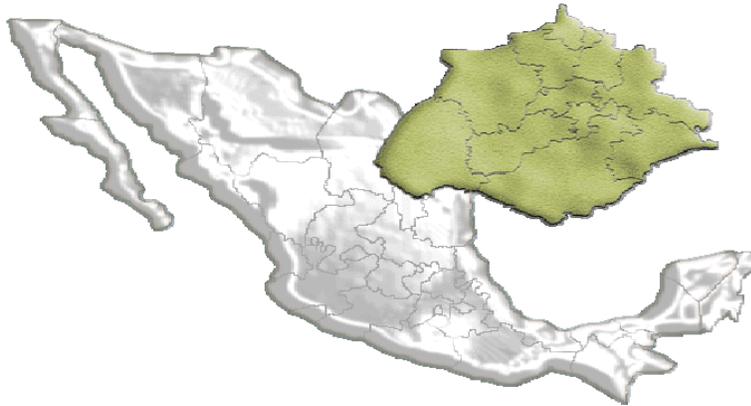


Figura 3.1 Mapa de localización del estado de Aguascalientes, México

El estado de Aguascalientes cuenta con una población de casi un millón de habitantes de los cuales aproximadamente el 70% vive en el municipio del mismo nombre. Cabe resaltar que el 80% de la población de este municipio vive en la ciudad de Aguascalientes y área conurbana (COESPO, 2002).

En la República Mexicana existen 1833 PTARs en operación, con una capacidad instalada de 113.02 L/s; así mismo, en el estado de Aguascalientes, hay 115 PTARs en operación, con una capacidad instalada de 4.23 m³/s y un caudal tratado de 3.47 m³/s (CONAGUA, 2010).

El municipio de Aguascalientes representa el 20.9% de la superficie del estado; colinda al norte con los municipios de Jesús María, San Francisco de los Romo y Asientos; al este con los municipios de Asientos, El Llano y el estado de Jalisco; y al sur con estado de Jalisco y los municipios de Calvillo y Jesús María.

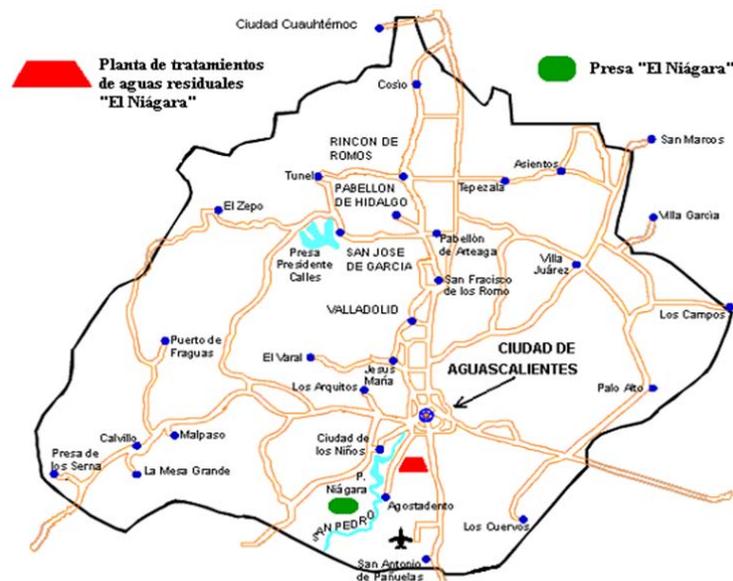


Figura 3. 2. Ubicación de la PTAR y la presa “El Niágara”, dentro del municipio de Aguascalientes.

En el estado existen varias plantas de tratamientos de aguas residuales. La PTAR “El Niágara” es la de mayor capacidad instalada, funciona con lodos activados y por ello es la que mayor cantidad de lodos genera (150-170 m³/día). Está situada al sur de la ciudad de Aguascalientes (Figura 3.2).

3.1. CARACTERÍSTICAS AGROCLIMÁTICAS Y EDÁFICAS DE LA ZONA

En el estado de Aguascalientes existen dos grandes regiones fisiográficas: la Montañosa Occidental, que comprende la mitad poniente del estado y la Planicie Oriental, que abarca la porción oriente. En esta última es donde está ubicado el municipio de Aguascalientes, cuyas características son: temperatura

promedio anual de 18.2 °C, precipitación promedio de 513.2 mm anuales y altitud de 1870 m.

La superficie dedicada a la agricultura está estimada en 42.35%, mientras que para el estado es de 34.77% (INEGI, 2003). Además, ocupa el tercer lugar nacional en la producción de maíz forrajero con 12.8% del total nacional y el segundo lugar en la producción de guayaba con 38% del total de la producción. Aún así, de la población económicamente activa sólo el 2.5% se ubica en el sector primario.

Los suelos de la zona están clasificados como *xerosoles*, los cuales están formados por capas superficiales claras y de bajo contenido en materia orgánica. Por debajo de los 20 cm se observa un aumento en el contenido de arcilla, pero de menor intensidad que los *planosoles*. Son moderadamente salinos y ocupan la región central del estado y colindan con suelos fluviales y fértiles de las riberas del Río San Pedro. En México, los *xerosoles* han sido bien caracterizados en relación a la agricultura de regadío, ya que su rendimiento agrícola está en función del agua para riego (Aguilera-Herrera et al, 1979). Son de baja susceptibilidad a la erosión, salvo en laderas o cuando están directamente sobre caliche y tepetate a escasa profundidad.

Los suelos de la zona son de textura media (migajón arenoso) y el tepetate se encuentra entre los 30 y 100 cm de profundidad (Campos, 2000). Estos suelos pueden presentar un pH que va de 7.3 hasta 8.4 sin llegar a ser sódicos, pero su pH no puede ser alterado fácilmente, por lo que no es económico neutralizar estos suelos mediante la adición de ácidos, sino solamente mejorarlos adecuadamente para que no se presenten problemas de disponibilidad nutrimental. En estos suelos los principales factores limitativos es la disponibilidad de hierro y zinc, en menor proporción de manganeso y en ocasiones la del fósforo (Castellanos et al., 2000).

3.2. Características Generales de la PTAR “El Niágara”

La PTAR “El Niágara” de Aguascalientes (Figura 3.3) tiene una capacidad instalada de 4000 L/s, trata un caudal de 2,139.00 L/s y dispone de un proceso

dual de tratamiento: biofiltros – lodos activados; el cuerpo receptor de las aguas tratadas es el río San Pedro (CONAGUA, 2010).



Figura 3.3. Vista aérea de la PTAR “El Niágara”, Aguascalientes.

3.2.1 Métodos de Tratamiento de la PTAR “El Niágara”

El esquema del funcionamiento de la planta se representa en la Figura 3.4.

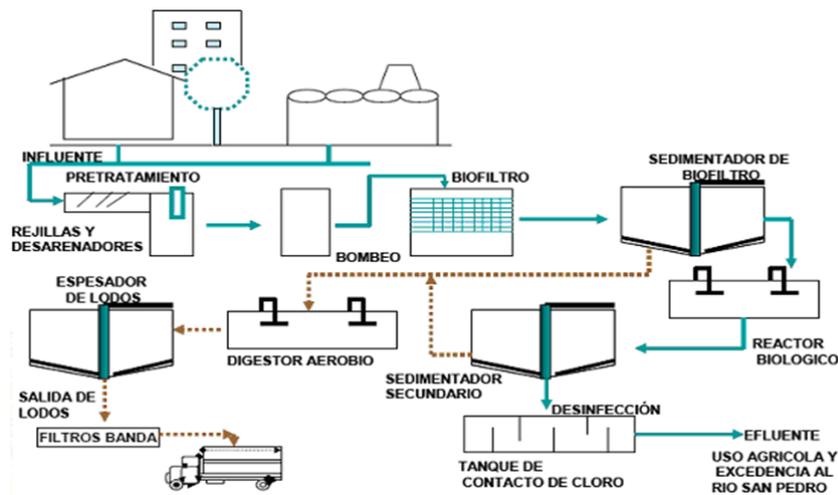


Figura 3.4. Esquema del proceso de la PTAR de Aguascalientes (CONAGUA, 2010)

3.2.2. Métodos de tratamiento en el circuito de agua

3.2.2.1. PRETRATAMIENTO

Las aguas residuales que llegan a la planta pasan a través de tres rejillas de diferente anchura, donde se eliminan los elementos de mayor tamaño. Posteriormente, el influente pasa al desarenador, para eliminar la mayor parte arena y sólidos en suspensión.



Figura 3.5. Filtración del agua a través de Rejillas de diferente anchura

3.2.2.2. Tratamiento biológico

El tratamiento biológico reduce la cantidad de materia orgánica en el agua, ya que supone acelerar los procesos naturales de eliminación de los residuos.

Los procesos microbianos empleados normalmente son aeróbicos, es decir, los microorganismos actúan en presencia de oxígeno disuelto. Las bacterias aeróbicas convierten la materia orgánica en formas estables, como dióxido de carbono, agua, nitratos y fosfatos, así como otros materiales orgánicos.

Para que esta transformación biológica sea eficiente, deben establecerse las condiciones adecuadas para el crecimiento bacteriano: a) temperatura: 30-40°C, b) oxígeno: 2 ppm, c) pH = 6,5-8,0, y d) salinidad < 3.000 ppm. Para evitar la inhibición de este crecimiento es preciso la ausencia de sustancias tóxicas, como metales pesados (Cd, Cu, Cr, Hg, Ni, Pb y otros), así como cianuros, fenoles y aceites.

Los procesos de tratamiento biológico se pueden dividir según el estado en que se encuentren las bacterias responsables de la degradación. La biomasa bacteriana puede estar: i) sobre lecho fijo, soportada sobre superficies inertes (rocas, escoria, material cerámico o plástico); o ii) suspendida en el agua a tratar. En cada una de estas situaciones la concentración de oxígeno en el agua determina la existencia de bacterias aeróbicas, facultativas o anaeróbicas.

En la PTAR de Aguascalientes se lleva a cabo un proceso dual a través de biofiltros y lodos activados:

- Biofiltros

Los biofiltros consisten en un lecho de material sintético, sobre el cual son aplicadas las aguas residuales por medio de brazos distribuidores móviles. Sobre este lecho fijo se encuentra adherida la población bacteriana que descompone las aguas residuales a medida que éstas percolan hacia el fondo del tanque.

Después de cierto tiempo, la capa bacteriana adquiere un gran espesor y se desprende hidráulicamente del lecho. Por eso el agua pasa a un sedimentador donde se efectúa la separación de los lodos formados.

La sedimentación separa tanto los sólidos decantables como aquellos que flotan. Durante esta decantación primaria existe la tendencia a que las partículas floculables formen agregados, hecho que puede ayudarse con la adición de compuestos químicos. El material que flota consiste en aceites, ceras, ácidos grasos y jabones insolubles que se conoce, genéricamente, como grasa.



Figura 3.6 sistema de tratamiento de aguas por medio de biofiltros

- Lodos Activados

Consiste básicamente en una unidad que pone en contacto los lodos activados con las aguas residuales que contienen materia orgánica. La función del lodo activado es absorber y flocular materia orgánica. Como es un proceso de contacto aeróbico, requiere de un abastecimiento permanente de oxígeno, que se consigue por aireación.

Posteriormente al tratamiento en el reactor biológico, las aguas pasan a un sedimentador secundario, de forma análoga después de los biofiltros.



Figura 3.7. Sistema de tratamiento del agua por medio de lodos activados

3.2.2.2. Tratamiento terciario

Es el último componente requerido, y en la PTAR de Aguascalientes se aplica una desinfección con cloro a las aguas. Posteriormente, el efluente se almacena en una laguna de estabilización antes de incorporarse al cuerpo receptor. Constituye un sistema natural, ya que cuando las aguas residuales son descargadas, se realiza de forma espontánea un proceso de autodepuración o estabilización natural, con fenómenos de depuración de tipo físico, químico y biológico.



Figura 3.8. Desinfección con cloro del agua tratada

El estrato superior de las lagunas se suele llenar de algas microscópicas, que en presencia de luz solar producen grandes cantidades de oxígeno; en cambio, en el estrato inferior de estas lagunas suele estar en condiciones anaerobias, debido a que la penetración de la luz solar es limitada. La estabilización de la materia orgánica se lleva a cabo a través de la acción de organismos aeróbicos cuando hay oxígeno disuelto en el agua, y de organismos anaerobios cuando no hay oxígeno disuelto en la misma.

3.2.3. Métodos de tratamiento en el circuito de lodos

La estabilización o tratamiento de los lodos permite reducir su contenido de agua, minimizar las altas concentraciones de bacterias y parásitos intestinales, contenido de materia orgánica, olores desagradables y constituyentes peligrosos, con el fin de hacerlos más adecuados para su aprovechamiento o disposición final.

3.2.3.1. Digestión Aerobia

La digestión aerobia es la transformación bioquímica de la materia orgánica presente en los lodos, que es transformada en bióxido de carbono y agua por los microorganismos en presencia de oxígeno **(NOM-004-SEMARNAT-2002)**.

La digestión aerobia se basa en el oxígeno disuelto, que debe estar siempre presente en un depósito que no esté cubierto ni recalentado, similar al proceso de lodos activados para tratar aguas residuales. Para ello se disponen de paletas giratorias. Las ventajas son los bajos costos, la fácil operación y la producción de menos olores **(Moeller y Ferat, 2000)**.



Figura 3.9. Tratamiento de los lodos residuales (digestión aeróbica)

3.2.3.2. Espesamiento

El lodo, una vez terminada su digestión, tiene que contener solamente 5% de sólidos totales para su uso, por lo que es necesario su espesamiento. Se utilizan espesamientos por gravedad o por flotación con aire disuelto para mejorar la operación de los digestores, rebajar el costo de la digestión y reducir el volumen de lodo.

3.2.3.3. Deshidratación o Secado

Con en proceso de secado del lodo se busca reducir el contenido de agua a menos de 85%. Los objetivos del secado de lodos es reducir la humedad para disminuir el volumen de lodo, facilitar su manejo y hacer más económico su tratamiento posterior y disposición final, además de minimizar la producción de

lixiviados si la disposición final se realiza en un relleno sanitario. El sistema utilizado en la PTAR de Aguascalientes es a través de filtros banda.



Figura 3.10. Deshidratación de los lodos por medio de filtros banda

3.2.3.4 Disposición Final

Los biosólidos son almacenados a cielo abierto ó son aplicados a suelos agrícolas sin regulación alguna.



Figura 3.10. Disposición final de los biosólidos.

3.3. Literatura Citada

Aguilera-Herrera, N.; Hernández-Silva, G y Vallejo-Giménez, E. 1979. Estudio edafológico del distrito de riego 04, estados de Coahuila y Nuevo León.

Universidad Nacional Autónoma de México, Inst. Geol. Revista 3 (1): 59-80

Castellanos, J. Z., Uvalle, B. J. X. y Aguilar, S. A. 2000. Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. 2ª Edición. Colección INCAPA. Guanajuato, México.

Consejo Estatal de Población 2002, Programa operativo de población 2002 “Un millón de habitantes ¿cómo ves nuestro futuro? COESPO Aguascalientes, Aguascalientes México, 30pp.

CONAGUA. 2010. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de aguas residuales en Operación Diciembre de 2008. Comisión Nacional del Agua.

INEGI, 2003. Cuaderno Estadístico Municipal de Aguascalientes, INEGI, Aguascalientes; México.

Moeller, C. G. y Ferat, T. C. 2000. Remoción de microorganismos por medio del tratamiento de las aguas residuales. México, D.F.

Norma Oficial Mexicana, NOM-004-SEMARNAT-2002, 2003. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 13 de agosto de 2003.

CAPITULO IV

4.0. BIOSÓLIDOS: UNA ALTERNATIVA PARA LA PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Resumen

Con el objetivo de establecer una dosis optima a aplicar de biosólidos generados en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de la Ciudad de Aguascalientes para el cultivo de maíz (*Zea mays*), en un suelo calcáreo dentro del área de influencia de la planta. Mediante un experimento de campo se determinaron los cambios en algunas características químicas del suelo y en las variables del crecimiento del cultivo. Este estudio se realizó en una parcela de aproximadamente dos hectáreas. Se determinaron y aplicaron, siete tratamientos, 0, 20, 40, 80, 120, 160 y 200 t ha⁻¹ de biosólidos en base seca al suelo, con cuatro repeticiones, obteniendo 28 unidades experimentales de 495m², únicamente al tratamiento 0 (Testigo) se le aplicó fertilizante inorgánico (120-80-0). Se colectaron muestras de suelo antes de aplicar los biosólidos y a 1, 3 y 8 meses de incorporados los biosólidos al suelo, a la semana de haber sido incorporados los lodos se sembró maíz, proporcionándole la humedad necesaria a través de riego rodado. A los tres meses de establecido el cultivo, se midieron algunas variables de crecimiento. Al término de las evaluaciones se pudo apreciar que la aplicación de los biosólidos al suelo, incrementó notablemente las características vegetativas evaluadas, alcanzando sus máximos valores en rendimiento de maíz con las dosis de 120 y 160 t ha⁻¹. Con la incorporación de la dosis más alta (200 t ha⁻¹) se observó un ligero decremento en biomasa de planta, biomasa de mazorca y rendimiento de forraje. La adición de biosólidos al suelo estudiado mejoró notablemente sus características químicas como son: disminución a pH cercano a la neutralidad, aumento en el porcentaje de la materia orgánica y la capacidad de intercambio catiónico, incrementos en la concentración de N inorgánico, P, K, Ca y Mg intercambiables; de igual manera, mayor disponibilidad de micronutrientes como: Fe, Cu, Zn y Mn. La concentración de metales pesados (Cd, Pb, Ni) no rebasa los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-004-ECOL-2002.

Palabras clave: Lodos Residuales, Forraje, Aguas Residuales

SUMMARY

The objective is to establish an ideal doses to applying of sewage sludges (biosolids) generated in the Plant of Treatment of Water Wastes of Aguascalientes City for the crop of maize (*Zea mays*), in a calcareous soil inside the area of influence of the plant. Deciding the changes in some chemical characteristics of the soil and in the variables of the growth of the crop in the above mentioned soil, by means of a field experiment. This study was realized in plot of approximately two hectares. They determined and were applied, seven treatments, 0, 20, 40, 80, 120, 160 and 200 t ha⁻¹ of biosolids in dry base to the soil, with four repetitions, obtaining 28 experimental units of 495 m², only to the control treatment 0 t ha⁻¹ there was applied to him inorganic fertilizer (120-80-0). Samples of soil were collected before applying the sewage sludges and 1, 3 and 8 months before incorporated the biosolids to the soil, to the week of been credit incorporated the sludges maize was sowed, providing the necessary dampness to the maize across rolled irrigation. To three months of established the crop, some variables of growth measured up. At the end of the evaluations it was possible to estimate that the application of the biosolids to the soil, increased notably the vegetative evaluated characteristics, reaching it maximum values in yield of maize with the doses of 120 and 160 t ha⁻¹. With the incorporation of the highest dose (200 t ha⁻¹) a light decline was observed in biomass of plant, biomass of ear and yield of forage. The addition of biosólids to the studied soil improved notably his chemical characteristics like the decrease to pH near to the neutrality, increase in the percentage of the organic matter and the capacity of exchange catiónico, increases in the concentration of inorganic N, P, K, Ca and interchangeable Mg; of equal way, major availability of micronutrients as: Fe, Cu, Zn and Mn. The concentration of heavy metals (Cd, Pb, Ni) does not exceed the maximum permissible limits established by the NOM-004-ECOL-2002.

Key words: Sewage Sludge, Forage, Sewage Water

4.1. Introducción

El agua es un recurso esencial para la vida y soporte del desarrollo económico y social de cualquier país; es un elemento fundamental para la sustentabilidad ambiental y desde este punto de vista, la calidad del agua y el saneamiento del agua residual son importantes para la salud humana y el equilibrio de los ecosistemas (INEGI, 2009).

Con la finalidad de preservar la calidad del agua y proteger los cuerpos receptores y bienes nacionales, en México la instalación de depuradoras de aguas residuales ha ido en aumento. En los 12 años anteriores el volumen de agua tratada casi se ha triplicado. En el año 2008, las 1833 plantas de tratamiento de aguas residuales municipales (PTAR) en operación en el país trataron $83.6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ con lo cual se generaron 0.58 millones de toneladas de lodos residuales por año (CONAGUA, 2010). Estos materiales se separan del agua y forman un lodo biológicamente inestable (lodos residuales), con alto contenido de humedad. Cuando este lodo residual recibe un tratamiento físico, químico o biológico para estabilizarlo y reducir su potencial contaminante, se le denomina biosólido (USEPA 1993; NOM-004-SEMARNAT-2002). El volumen de producción de estos residuos llega a convertirse en un grave problema en ciudades muy pobladas y su gestión se hace más urgente a medida que el crecimiento demográfico se acelera (Lovell, 1996).

El destino final de estos materiales es una de las mayores preocupaciones ambientales en el mundo (Papadimitriou, *et al.*, 2007). Las prácticas de disposición en el pasado incluían, los rellenos sanitarios, descargas en el océano o incineración (Bright, 2003), estas estrategias son caras y causan problemas de contaminación (Walter, *et al.*, 2006), actualmente la aplicación al suelo es una de las principales alternativas de su disposición (Singh y Agrawl, 2008). Los biosólidos por su alto contenido de materia orgánica y de minerales pueden ser agregados a suelos agrícolas, con lo cual disminuyen los costos ambientales y económicos de su disposición (Bright, 2003). En algunos lugares son una buena fuente de nutrientes para las plantas y un mejorador del suelo; en otros son vistos como un material indeseable, ya que también contienen componentes considerados como nocivos para el ambiente (Chandra y Prasad, 2005). La composición de los biosólidos depende en gran

medida del origen de las aguas residuales. Si los lodos provienen de aguas domésticas la concentración de componentes riesgosos es baja **(Zhihong, 1998)**.

A pesar de las buenas características agronómicas que presentan los biosólidos, algunos no pueden ser utilizados en la agricultura, ya que contienen elementos potencialmente tóxicos para los vegetales y las personas o animales que los ingieran o contaminar suelos y aguas subterráneas. Debido a la naturaleza heterogénea de los biosólidos producida por los diferentes tratamientos y las variaciones estacionales, se requieren análisis químicos para determinar el contenido de nutrientes y elementos potencialmente tóxicos antes de aplicarlos al suelo **(Singh y Agrawl, 2008)**.

La aplicación de estos biosólidos en suelos agrícolas (siempre que reúnan los estándares adecuados para ser aplicados al terreno) reduce la demanda de fertilizantes inorgánicos, constituyendo una buena fuente de nutrientes para las plantas y mejorando ciertos parámetros físicos del suelo **(López, et al, 2011)**. Sin embargo, los biosólidos también pueden contener EPT que pueden afectar a la cadena alimenticia a través de los cultivos, así como contaminar el suelo y las aguas freáticas; estos elementos son principalmente el alto contenido de nutrientes, microorganismos patógenos y metales pesados **(Pescod, 1992)**.

El contenido de metales pesados en los biosólidos es el principal factor que restringe su uso en la agricultura **(Chandra y Prasad 2005; De Brouwere y Smolders 2006)**, pero éste varía de acuerdo a la región en que se localice la PTAR y al origen de éstas. En ECCACIV, planta que depura aguas industriales y domésticas de la ciudad de Cuernavaca, Morelos, el Zinc es el metal pesado más abundante que resultó un factor limitante para la aplicación de estos lodos en campos agrícolas **(Ortiz et al. 1995)**.

Los biosólidos tienen valor fertilizante y mejoran las propiedades físicas y químicas de los suelos **(Tester, 1990)**. Este material contiene cantidades considerables de materia orgánica, N, P y K, además de otros nutrimentos como Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn y B **(Lovell, 1996)**. La productividad del suelo aumenta por causa del incremento de la materia orgánica ocurrido después de

la aplicación de biosólidos, debido a una mayor movilización y adsorción de diferentes elementos en los suelos (Schnitzer, 1991).

El Estado de Aguascalientes se ubica en el centro de la República Mexicana entre los Estados de Jalisco y Zacatecas; con una población de casi un millón de habitantes de los cuales aproximadamente el 70% vive en el municipio del mismo nombre. Cabe resaltar que el 80% de la población de este municipio vive en la ciudad de Aguascalientes y área conurbada (COESPO, 2002).

El proceso de la PTAR más importante de la Ciudad de Aguascalientes, corresponde a un proceso convencional dual de BIOFILTROS-LODOS ACTIVADOS, con una capacidad para tratar hasta 2000 L/s (CONAGUA, 2010), con un DBO de 350 mg/L requerido a la entrada del agua y obteniendo un DBO de 30 mg/L a su salida, con una eficiencia de 91%. Esta actividad genera 150-170m³ de biosólidos diariamente los cuales son acumulados en áreas aledañas a la planta ó son aplicados, sin control ni regulación en parcelas de agricultores cercanas a la planta (con posibles riesgos de contaminación de suelos y plantas por metales pesados), obteniendo diferentes rendimientos en la producción de maíz, (cultivo representativo de la región), pero en algunas parcelas hubo afectaciones como, endurecimiento del suelo en las capas superficiales y quemaduras de las plantas (Robledo *et al.*, 2000).

En Aguascalientes, el cultivo de maíz tiene gran importancia económica y social debido a que aproximadamente 17000 agricultores lo siembran en un área de 8400 ha. Esta superficie representa 63 % del área agrícola sembrada en el estado, de la cual, 80 % corresponde a maíz cultivado bajo condiciones de temporal y el resto bajo riego, con rendimientos medios de 291 y 4,500 kg ha⁻¹, respectivamente (SAGARPA 2000). En el estado de Aguascalientes la producción de forrajes es una necesidad creciente, destacan el maíz y avena forrajera por ser los cultivos que aportan mayores ingresos representando el 66 % del total de los cultivos cíclicos (Ortiz, 2000). Se siembran aproximadamente entre 12 y 18000 ha de maíz de riego anualmente para forraje en verde de los cuales se obtienen 52 t/ha en promedio (González, *et a.l.*, 2003). El objetivo de este trabajo, fue evaluar mediante un experimento de campo el efecto de la

aplicación de biosólidos sobre un suelo calcáreo, en algunas de sus características y en las variables de crecimiento de maíz cultivado en ese suelo, con la finalidad de establecer la dosis óptima de este subproducto, que permita obtener un mayor rendimiento y calidad de este forraje.

4.2. Materiales y Métodos

El experimento se estableció en una superficie de aproximadamente dos hectáreas, en un suelo calcáreo, somero, (el tepetate se encuentra a menos de 20 cm de profundidad), representativo del área de influencia de la PTAR.

4.2.1. Establecimiento del experimento de campo

Los biosólidos de la PTAR fueron llevados al terreno antes del temporal de lluvias (Abril) y fueron extendidos para favorecer la pérdida de humedad y ser incorporados posteriormente al suelo. La preparación del terreno fue la convencional de la región ([González, et al, 2003](#)). Con base en la experiencia de los productores de la región, se determinaron y aplicaron, siete tratamientos, 0, 20, 40, 80, 120, 160 y 200 t ha⁻¹ de biosólidos en base seca al suelo, con cuatro repeticiones, obteniendo 28 unidades experimentales, únicamente al tratamiento 0 se le aplicó fertilizante inorgánico (120-80-0). A la semana de haber sido incorporados los biosólidos se sembró maíz, de la variedad AS910, proporcionándole la humedad necesaria a través de riego rodado.

Los tratamientos fueron distribuidos en campo con un diseño experimental de bloques al azar, Se trazaron 28 parcelas de 495 m² (unidad experimental) correspondientes a siete tratamientos con cuatro repeticiones, al mes de la incorporación de los biosólidos al suelo, se realizó la siembra de maíz (2 de mayo) con tractor y una sembradora mecánica, con una densidad de población de 70 mil plantas/ha. Para el tratamiento control (0 t/ha), se aplicó la fórmula 120-80-00, el N se distribuyó en dos etapas, la primera correspondiente a 60 kg/ha aportados con urea al momento de la siembra y los otros 60 kg/ha como NH₄NO₃ durante la escarda. Las prácticas de cultivo realizadas fueron las recomendadas para la producción de maíz de riego en la región donde se llevó a cabo el experimento.

4.2.2. Variables evaluadas en plantas

A tres meses de establecido el cultivo, se determinaron las siguientes variables: Altura de planta, biomasa de planta, biomasa de la mazorca, número de mazorcas por planta y rendimiento de forraje verde.

4.2.3. Variables evaluadas en suelos y biosólidos

Se colectaron muestras de suelo antes de aplicar y a 1, 3 y 8 meses de incorporados los biosólidos al suelo, a las que se les determinaron los parámetros señalados en el Cuadro 4.1.

Cuadro 4.1. Determinaciones analíticas y metodologías empleadas en la caracterización de suelos plantas y biosólidos (NOM-021-SEMARNAT-2000).

Determinación	Método	Análisis de	
		Biosólido	Suelo
pH	Potenciometría (Rel. 1:2)	X	X
N inorgánico	Volumetría (extracción con KCl)	X	X
N total	extracto con mezcla diácida	X	X
Ca ²⁺ , Mg ²⁺ intercambiables	Volumetría (Acetato de NH ₄ ⁺)	X	X
Na ⁺ , K ⁺ intercambiables	Flamometría (Acetato de NH ₄ ⁺)	X	X
Ca ²⁺ , Mg ²⁺ Na ⁺ , K ⁺ totales	Absorción atómica (extracto con mezcla diácida)	X	X
P disponible	Fotocolorimetría (Bray P1)	X	X
P total	Fotocolorimetría (extracto con mezcla diácida)	X	
M.O. total	Combustión seca y Walkley y Black	X	X
Zn, Fe, Mn, Cu, Pb, Ni, Cd extractables	Absorción atómica extracto con DTPA	X	X
Zn, Fe, Mn, Cu, Pb, Ni, Cd totales	Absorción atómica (extracto con mezcla diácida)	X	
B	Fotocolorimetría	X	X
Contenido de humedad	Gravimetría (secado en estufa)	X	

4.2.6. Método estadístico

Con los datos obtenidos en campo y laboratorio se realizó un análisis de varianza con base en el diseño experimental empleado (SAS, 1995). Para diferencias significativas, se aplicó la prueba de separación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$).

4.3. Resultados y Discusión

4.3.1 Características de los biosólidos

Los biosólidos presentaron un 73.5% de humedad, cercano al valor referido (80%) por el personal de la PTAR de Aguascalientes. El porcentaje de saturación de los mismos fue del 545% (su capacidad de retención de agua se debe, entre otros, al elevado contenido de MO). En el Cuadro 1 se presenta la composición química de los biosólidos. El pH presentó un valor ligeramente ácido, un alto contenido de materia orgánica y una capacidad de intercambio catiónico (CIC) baja, en cuanto a los nutrientes, estos se encuentran en concentraciones consideradas como muy altas

Cuadro 4.2. Composición química de los biosólidos procedentes de la planta de tratamiento de aguas residuales El Niágara.

	pH	MO	N	P	K	Ca	Mg	Na	B	CIC
		%	----- mg kg ⁻¹ -----							
E	6.6	--	3290	617	1093	7920	329	460	13	21
T	--	63.3	40188	5388	35374	18230	1850	14086	97	--

E: extractables; T: totales.

La concentración de los metales pesados está dentro de los límites considerados como máximos permisibles en lodos (LMPL) para uso agrícola (Porta et al, 2003; NOM-004-SEMARNAT-2002). Relacionando la concentración total de metales pesados con el LMPL en México, son considerados como excelentes según la NOM-004-SEMARNAT-2002;

Cuadro 4.3. Concentración media de metales pesados en los biosólidos.

	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Ni	Cd
Totales (mg kg ⁻¹)	3563	940.2	267.2	1214	117.6	15.0	46.8
Extractables (mg kg ⁻¹)	81.9	25.7	22.7	434.6	15.3	1.1	15.6
LMPLa (mg kg ⁻¹)	NR	1750	1307	4000	1200	140	400
LMPLb (mg kg ⁻¹) E	NR	1500	NR	2800	300	35	420
LMPLb (mg kg ⁻¹) B	NR	4300	NR	7500	840	85	420
PRR (%)	2.3	2.7	8.5	35.8	13.0	7.4	33.3

LMPLa = Límite Máximo Permitido en lodos para uso agrícola en España (Porta, 2003); LMPLb (E: Excelente; B: Bueno)= Límite Máximo Permitido en lodos para uso agrícola en México (NOM-004-SEMARNAT-2002); NR = No reportado; PRR = Porcentaje Relativo de Recuperación.

El suelo es representativo de la región, tiene poca profundidad (20-25cm).

Cuadro 4.4. Características químicas del suelo antes de la incorporación de los biosólidos sobre el terreno.

	pH	MO %	CIC	N*	P*	K*	Ca*	Mg*	Na*
				----- mg kg ⁻¹ -----					
Valor	8.78	0.98	29	20	51	384	2637	417	1547
*Categoría	Alcalino	Pobre	Alta	Bajo	Alto	Muy rico	Rico	Muy rico	Normal

*NOM 021-SEMARNAT-2000. Concentración en forma extractable

Cuadro 4.5. Metales en el suelo antes de la incorporación de los biosólidos

	Fe*	Mn*	Cu*	Zn*	Cd*	Pb*
	----- mg kg ⁻¹ -----					
Valor	14	8.7	3.7	2.64	0.27	0.05
Clase	Media	Bajo	Alto	Bajo	Normal	Normal

NOM 021-SEMARNAT-2000. * Concentración de metales extractables

Cuadro 4.6. Aportación de nutrimentos inmediatamente disponibles para las plantas de los biosólidos (kg t⁻¹) a los suelos de acuerdo con el tratamiento.

Nutriente	Dosis de biosólidos (t ha ⁻¹) en base seca						
	0	20	40	80	120	160	200
N	*120	65.80	131.60	263.20	394.8	526.4	658
P	*40.6	12.33	24.67	49.34	74.00	98.67	123.34
K	-	21.86	43.71	87.42	131.14	174.85	218.56
Ca	-	158.40	316.80	633.60	950.40	1267.2	1584
Mg	-	6.58	13.17	26.34	39.50	52.67	65.84
Na	-	0.24	18.40	36.80	55.20	73.60	92.00
Fe	-	1.64	3.28	6.55	9.83	13.10	16.38
Mn	-	8.71	17.42	34.85	52.27	69.70	87.12
Zn	-	8.69	17.38	34.77	52.15	69.54	86.92
Cu	-	0.51	1.03	2.06	3.08	4.11	5.14
Cd	-	0.02	0.04	0.09	0.13	0.18	0.22
Pb	-	0.31	0.61	1.22	1.84	2.45	3.06

*Añadidos como fertilizante químico

En el Cuadro 4.5 se muestra la concentración de distintos micronutrientes, sin embargo el alto contenido de CaCO₃ no permite la disponibilidad de algunos de

estos elementos debido a su antagonismo, principalmente con B, Fe, Mn, Cu, Zn, Pb y Ni ([Kabata y Pendias, 2000](#)).

Con la aplicación de biosólidos, se están incorporando al suelo en estudio los nutrimentos y metales pesados (inmediatamente disponibles) para las plantas indicados en el cuadro 4.6.

4.3.2. Características del Suelo

Con respecto al suelo, en la Figura 4.1 se observa que al mes de incorporados los biosólidos, conforme se incrementaron las dosis, el **pH** disminuyó progresivamente hasta estabilizarse aproximadamente en 7.3 (tratamientos con mayores dosis de biosólidos). Después de transcurridos tres meses, con las dosis menores, se observa que el pH tiende a recuperarse (incrementarse), mientras que con las mayores de 80 t ha⁻¹ sigue disminuyendo; y a los ocho meses se observa una tendencia creciente de este parámetro con todos los tratamientos. Esta disminución en el pH del suelo permite una mayor disponibilidad de los micronutrimentos presentes en el mismo.

La materia orgánica (Figura 4.1), se incrementó en más de 100 % con todos los tratamientos desde el primer mes de la incorporación de los biosólidos, siguiendo esa misma tendencia a los tres meses y con ligera disminución a los ocho meses, pasando de muy pobre a una clasificación de nivel medio, en su contenido de materia orgánica ([NOM 021-SEMARNAT-2000](#)).

El contenido de **N** inorgánico (Figura 4.1), inmediatamente disponible para las plantas (N-NH₄ y N-NO₃) se incrementó en más de 500 % con las tres dosis mayores en los diferentes meses evaluados, observándose decrementos a los tres y a los ocho meses después de la adición de los lodos; esto puede deberse a la dinámica que se presenta en el suelo, por ejemplo la inmovilización microbiana, pérdidas por lixiviación, volatilización y absorción por las plantas ([California Plant Health Association, 2004](#); [Castellanos, 2000](#); [Robledo et al, 2002](#)).

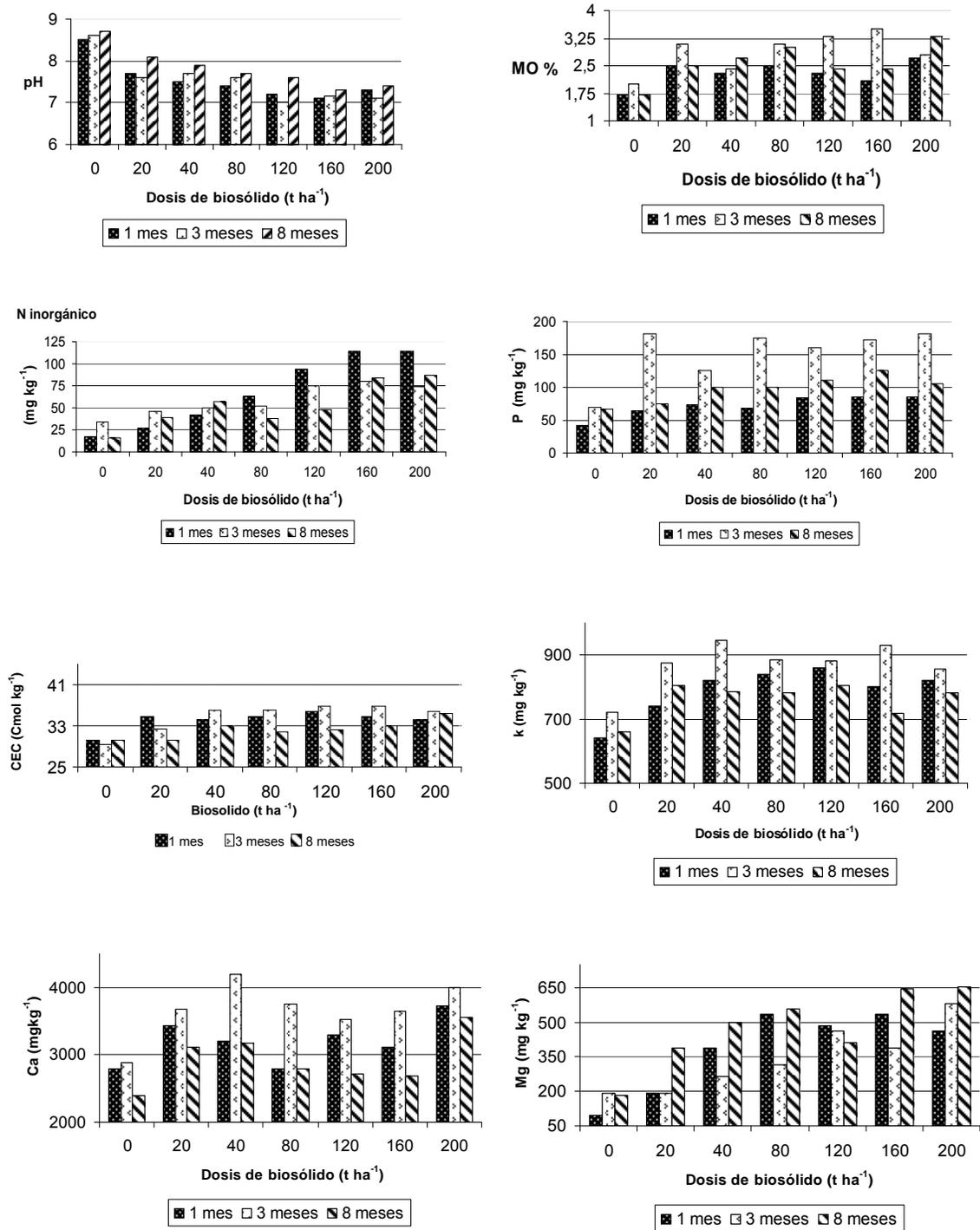


Figura 4.1. Efecto de diferentes dosis de biosólidos, en algunas características del suelo, a uno, tres y ocho meses después de incorporados.

En cuanto al P, en la Figura 4.1 se observan incrementos superiores al 100% en el primer y tercer mes con todos los tratamientos y un decremento a los ocho meses de aplicados los biosólidos este decremento pueden ser debido a que al incrementarse el pH en ese lapso de tiempo y por ser un suelo calcáreo los fosfatos reaccionan con el Ca de suelo formando fosfatos de calcio insolubles ([California Plant Health Association, 2004](#)).

La capacidad de intercambio catiónico está referida al intercambio de los cationes de los coloides del suelo con la solución del mismo y que de esta forma pueden ser absorbidos por las plantas, siendo una de las fuentes importantes de nutrientes. La CIC es una propiedad importante del suelo, ya que controla la retención y toxicidad de los metales en suelos tratados con biosólidos y puede verse afectada por diferentes factores como el pH, materia orgánica y textura. Esta propiedad desde el punto de vista de la fertilidad del suelo se encuentra en una categoría alta ([Cottenie, 1989; NOM 021-RECNAT-2000](#)), lo cual permite que exista una mayor retención de nutrimentos en el suelo, al no perderse éstos por lixiviación.

Debido a la cantidad de materia orgánica que aportan los lodos residuales al suelo, los niveles de cationes intercambiables se vieron incrementados en el total de tratamientos (Figura 4.1). El K como se puede apreciar en la grafica, se encuentra en un nivel muy rico, el Ca en un nivel medio en todos los tratamientos y mantiene este nivel a través de los distintos lapsos de tiempo analizados, con excepción del tratamiento de 200 t ha⁻¹. El Mg se encuentra con valores medios y se incrementa a niveles muy ricos a partir del tratamiento de 40 t ha⁻¹.

Como se puede apreciar en la Figura 4.1, el Potasio se encuentra en general muy rico. Se sabe de manera general que este elemento ocupa junto con el calcio la mayor parte de la materia mineral de la planta aproximadamente el 3 % de la materia seca de los vegetales ([Gros y Dominguez, 1992](#)).

Para el caso del Calcio, que se encuentra con un valor rico en todos los tratamientos y se mantiene a través de los distintos lapsos de tiempo analizados. A los tres meses se observa que se presentan las concentraciones

mayores en el total de tratamientos (Figura 4.1). La importancia de este elemento en el suelo se puede atribuir a la unión del calcio con la arcilla y el humus en suspensión, formando un coágulo (flóculo), conocido como complejo arcilloso-húmico jugando un papel fundamental en las propiedades físicas y químicas del suelo. Gracias a la condición que toma este complejo arcilloso-húmico por la presencia suficiente de calcio, permite la fijación del fosfato (PO_4), único anión fijado en los coloides del suelo, que aprovecha un puente formado por los cationes Ca (**Gros y Dominguez, 1992**).

El Mg se encontró con la categoría de muy rico y su concentración incremento hasta en un 200 por ciento con respecto al tratamiento de 0 t ha^{-1} . (Figura 4.1). El incremento a niveles muy ricos se presenta a partir del tratamiento de 40 t ha^{-1} . **Teuscher y Adler (1981)** reportan que en suelos calcáreos (alcalinos) la presencia de calcio provoca restricciones del magnesio para moverse al interior de las células, recomendando el incremento de la MO del suelo, como medida correctiva.

El Na se incrementó notablemente al primer y tercer mes de aplicados los biosólidos, pero a los 8 meses decreció hasta quedar casi al nivel del testigo. Aunque no es considerado como elemento esencial para las plantas, las cenizas de éstas contienen cantidades apreciables. En ausencia de potasio los cultivos responden benéficamente a las aplicaciones de Na. Cabe mencionar que este elemento representa un peligro para la estructura del suelo cuando se posee de un 8 al 15 % de la capacidad de cambio de cationes (**Gros y Dominguez, 1992**).

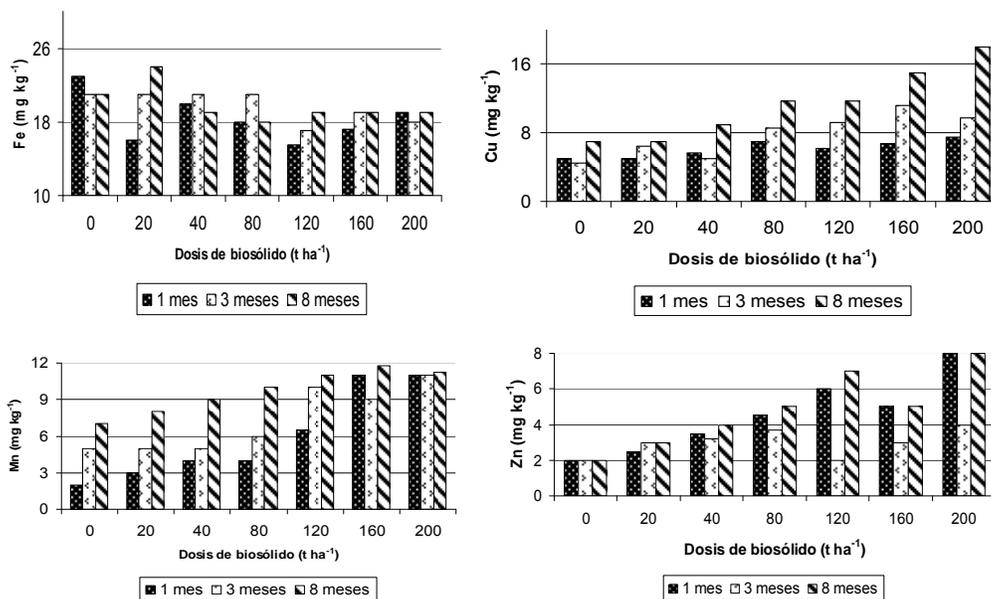


Figura 4.2. Efecto de diferentes dosis de biosólidos, en el contenido de micronutrientes del suelo, a 1, 3 y 8 meses después de incorporados.

El Fe y el Mn están presentes en todos los suelos y ejercen una acción enzimática importante sobre las plantas (Vázquez- Yanes, 1987), ambos elementos se encuentran en disponibilidad adecuada para el cultivo en todos los tratamientos, como se puede apreciar en la Figura 4.2. En cuestiones de fertilidad el Cu y Zn no presentaron concentraciones consideradas como deficientes para la nutrición vegetal como se puede apreciar en las gráficas respectivas. Cabe señalar que la biodisponibilidad de estos dos últimos nutrientes tuvo un incremento directamente proporcional con la dosis aplicada del biosólido.

4.3.3. Características del cultivo

En el Cuadro 4.7 se puede apreciar que la aplicación de biosólidos al suelo, incrementó notablemente las características vegetativas evaluadas, alcanzando sus máximos valores con las dosis de 120 y 160 t ha⁻¹, observándose diferencias significativas con respecto al testigo a partir del tratamiento 20 t ha⁻¹ en todas las variables, excepto en biomasa de mazorca donde la diferencia significativa se alcanza a partir de 80 t ha⁻¹.

Cuadro 4.7. Comparación de medias para diferentes variables vegetativas.

Dosis	Biomasa de planta	Biomasa de mazorca	Mazorca/ planta	Altura de planta	Rend. de forraje
t ha ⁻¹	g	(g)	No.	m	t ha ⁻¹
0	746 d	387 c	1.0 b	1.87 d	42 d
20	929 cb	475 cb	1.5 a	2.51cb	51 c
40	924 dc	498 cb	1.2 ba	2.31 c	51 c
80	1024 cba	569 ba	1.3 ba	2.51 cb	57 cb
120	1182 ba	603 ba	1.3 ba	2.69 ba	65 ab
160	1387 a	634 a	1.4 a	2.71 ba	77 a
200	1148 cba	558 ba	1.5 a	2.77 a	63 ab

Medias en columnas con diferente letra son significativamente diferentes según Tukey, $\alpha \leq 0.05$

Cabe hacer mención, que con la incorporación de la dosis más alta (200 t ha⁻¹) se observa un ligero decremento, aunque no significativo estadísticamente en biomasa de planta, biomasa de mazorca y rendimiento de forraje, aunque presentó los mayores incrementos en variables como altura de la planta, longitud de mazorca, así como en el número de mazorcas por planta.

González et al, (2003) mencionan que la producción promedio de forraje en verde en Aguascalientes es de 52 t ha⁻¹ en promedio, en este estudio con la dosis de biosólidos de 160 t ha⁻¹ se obtuvieron incrementos de 48 y de 67% con respecto al promedio y al testigo.

4.4. Análisis de Costos

En el estado de Aguascalientes la producción de forrajes es una necesidad creciente, destacan el maíz y avena forrajera por ser los cultivos que aportan mayores ingresos representando el 65.95 % del total de los cultivos cíclicos (**Ortiz, 2000**). Se siembran aproximadamente entre 12 y 18000 ha de maíz de riego anualmente para forraje en verde de los cuales se obtienen 52 t/ha en promedio.

Los biosólidos se aplican en suelos aledaños a la planta de tratamiento de aguas residuales, éstos son, calcáreos (20-23% de carbonatos) con poca profundidad (25-35cm) y con bajo contenido de materia orgánica (menos de

1%) y de nutrimentos, razón por la cual requieren de altas cantidades de este subproducto.

Los biosólidos son proporcionados y transportados gratuitamente hasta las parcelas de los productores que los soliciten, hasta una distancia de aproximadamente 20 km de la planta tratadora de aguas residuales, para distancias mayores únicamente les cobran el transporte.

Cuadro 4.8. Análisis del costo/beneficio de la producción del maíz forrajero verde aplicando biosólidos al suelo

DESCRIPCIÓN	Dosis de biosólidos (t ha ⁻¹)						
	0 *	20	40	80	120	160	200
Precio/kg de forraje verde maíz = \$ 0.6							
Rendimiento forraje verde (t/ha)	42	51	51	57	65	77	63
Beneficio bruto \$	25200	30600	30600	34200	39000	46200	37800
Costo de fertilizante \$ (120-90-00)	3225	-	-	-	-	-	-
Costo de aplicación \$ (fertilizante o biosólido)	450	450	600	600	750	750	900
Beneficio Neto \$	22425	30150	30600	33600	38250	45450	36900

*Fertilización Química (120- 90-00)

En el cuadro 4.8, se presenta un análisis del costo/ beneficio de la producción de forraje verde de maíz aplicando biosólidos en diferente dosis, comparado con la fertilización inorgánica que acostumbran aplicar los productores de la región de estudio (120-90-00), el costo del forraje en el año 2011 fue de 60 centavos por kg, como se aprecia en el mismo cuadro, con la dosis de 160 t ha⁻¹ se obtiene un beneficio de aproximadamente el 100% con respecto al testigo.

Los requerimientos de nutrimentos para una producción óptima de maíz para forraje se presentan en el cuadro 4.9, si se aplicaran estas cantidades de nutrimentos como fertilizantes inorgánicos, los costos de fertilización se incrementarían bastante y obviamente no se llegaría a la producción óptima, ya que por la falta de materia orgánica las plantas no aprovecharían esas cantidades de nutrimentos, además de que les faltarían los micronutrimentos

los cuales se tendrán que agregar foliarmente y eso también incrementaría los costos de la fertilización.

Cuadro 4.9 Absorción de nutrientes por el maíz forrajero

CULTIVO	<i>Absorción Total de nutrientes (kg/ha)</i>					Rendimiento Óptimo
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	Mg	S	
Maíz para silo	298	128	298	73	37	80 t/ha

Con la aplicación de dosis de 120 o de 160 t/ha de biosólidos se alcanzaron los máximos rendimientos del cultivo y con esas cantidades se estarían agregando la cantidad de nutrimentos señalados en el cuadro 4.6.

4.5. Conclusiones.

- Los biosólidos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad de Aguascalientes, no representan riesgos significativos para el uso agrícola, de acuerdo con sus características químicas y contenido de metales pesados, al adecuarse a la legislación que rige en México.
- La adición de biosólidos al suelo estudiado mejoró notablemente sus características químicas como son: disminución de pH cercano a la neutralidad, incrementó el porcentaje de la materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, la concentración de N inorgánico, P disponible, K, Ca y Mg intercambiables; así como la disponibilidad de micronutrientes como: Fe, Cu, Zn y Mn.
- La concentración de metales pesados (Cd, Pb, Ni) no rebasa los límites máximos permisibles establecidos por la NOM-004-ECOL-2002.
- Los máximos valores en rendimiento de maíz fueron obtenidas con las dosis de 120 y 160 t ha⁻¹ de biosólidos en base seca.
- El beneficio económico obtenido con la aplicación de biosólidos se incrementó en aproximadamente 100%
- Con la incorporación de la dosis más alta (200 t ha⁻¹) se observó un ligero decremento en biomasa de planta, biomasa de mazorca y rendimiento de forraje.

4.6. Literatura Citada

- Bastian, R.K. 1997, Biosolids management in the United States, A state-of-the-nation overview. Water environment and technology, USA, Mayo p.45-50.
- Bright, D.A. and Healey, N. 2003. Contaminant risks from biosolids land application: Contemporary organic contaminant levels in digested sewage sludge from five treated plants in Greater Vancouver, British Columbia. Environmental Pollution. 126, 39-49.
- California Plant Health Association, 2004. Manual de fertilizantes para cultivos de alto rendimiento. Limusa. México.
- Castellanos, J. Z., Uvalle, B. J. X. y Aguilar, S. A. 2000. Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. 2ª Edición. Colección INCAPA. Guanajuato, México.
- Chandra, K.S. and M.N.V. Prasad, 2005. Risk Assessment, Pathways, and Trace Element Toxicity of Sewage Sludge-Amended Agroforestry and Soils. In: Prasad, M.N.V.; K.S. Sajwan and R. Naidu. (Eds.). Trace Element in the Environment. Boca Raton, FL. USA.
- Consejo Estatal de Población 2002, Programa operativo de población 2002 "Un millón de habitantes ¿cómo ves nuestro futuro? COESPO Aguascalientes, Aguascalientes México, 30pp.
- CONAGUA, 2010. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de aguas residuales en Operación. Diciembre de 2008. Comisión Nacional del Agua.
- Csizinski, A.A. 1986. Influence of total soluble salt concentration on growth and elemental concentration of winged bean seedlings (*Psophocarpus tetragonolobus* L.). Commun. Soil Sci. Plant anal. 17: 1009-1018.
- De Browere, K. and Smolders E., 2006. Yield Response of crops amended with sewage sludge in the field is more affected by sludge properties than by

final soil metal concentration. *European Journal of Soil Science*. 57: 858-867

EPA, 2000. Aplicacion de Biosólidos al terreno. Parte1. En: Folletos Informativos de la EPA. United Estates Environmental Protection Agency. Office of Water, Washington, D.C.

Gamrasni M. A. 1985 Aprovechamiento agrícola de aguas negras urbanas, Limusa, México, D.F.,143 pp.

George, T., P. W. Singleton, and B. B. Bohlool 1988. Yield, soil nitrogen uptake, and nitrogen fixation by soybean from maturity groups grown at three elevation. *Agronomy J.* 80: 563-567.

González, C. F. Peña R. A., Robles, E. F. J. 2003. Guía Para Producir Maíz de Alta Calidad Forrajera. INIFAP. Centro de Investigación Regional Norte-Centro Campo experimental Pabellón. Folleto para Productores No. 33. pp 18.

INEGI, 2009. "Estadísticas a propósito del día mundial del agua" Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 22 de marzo de 2009. México, D.F.

Jumberi, A., M. Yamada, S. Yamada and H. Fugiyama. 2001. Salt tolerance of Grain Crops in relation to Ionic Balance and Ability to Absorb Microelements. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 47 (4), 657-664.

Jurado, P., T. Arredondo E. Flores, V. Olalde y J. Frías. 2006. Efecto de los Biosólidos Sobre la Humedad y los Nutrimientos del Suelo y La Producción de Forraje en pastizales Semiáridos. *Terra Latinoamericana* 25: 211-218.

Kabatas-Pendias, A. y Pendias, H. 2000. Trace elements in soils and plants. CRC Press. USA. P.432.

López, C., Herva, M., Franco-Uria, A. and Roca, E. 2011. Inventory of heavy metal content in organic waste applied as fertilizer in agricultura: evaluating the risk of transfer into the food chain.

- Lovell, B. 1996. Aplicación en suelos de biosólidos de drenaje para la producción de cosechas. Factsheet. Orden Núm. 95-069. Notario 8 p.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 13 de agosto de 2003.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 31 de diciembre de 2002.
- Nebel, B. and R.T. Wright 1999. Ciencias Ambientales "Ecología y Desarrollo Sustentable" Pearson. México. 212-243.
- Nyamangara, J. and J. Mzezewa. 1999. The effect on long- term sewage sludge application on Zn, Cu, Ni and Pb levels in a clay loam soil under pasture grass in Zimbabwe. Agriculture Ecosystems and Enviroment 73: 199-204.
- Oberle, S. L. and D.R. Keeney. 1994. Interaction of Sewage Sludge with Soil-Crop-Water Sytems. . In C. E. Clapp, W.E. Larson, and R.H. Dowdy (Ed.) Sewage Sludge: Land Utilization and the Enviroment. ASA.CSSA. SSSA. Madison. WI.
- Ortiz. H. L., R. M. Gutiérrez y S. E. Sánchez. 1995. Ppropuesta de Manejo de los Lodos Residuales de la Planta de Tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. Rev. Int. Contam. Ambient. 11 (2): 105-115.
- Oudeh, M., M. Khan and J. Scullion. 2002. Plant accumulation of potentially toxic elements in sewage sludge as affected by soil organic matter level and mycorrhizal fungi. Enviromental Pollution. 116: 293-300.

- Papadimitriou, C. A. Haritou, I.; Samaras, P. Zoubolis, A. I. 2007. Evaluation of leaching and ecotoxicological properties of sewage sludge-fly ash mixtures. *Environmental Research*, 106, 340-348.
- Porta, C. J., M. Acevedo y C. Roquero. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3ª Edición. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Robledo, S. E., Corlay, Ch. L., Pineda P. J., y Álvarez S. E. 2000. Caracterización y Aplicación Agrícola de Lodos Residuales. *En: Memorias del Seminario de Avances de Investigación 2000 de los Programas Universitarios de Investigación en Diagnóstico, Conservación y Recuperación del Suelo, Recursos Naturales y Ecología y Agricultura Orgánica*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Shing, R.P. y M. Agrawal, 2007. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal accumulation and cosequent respond of *Beta vulgaris* plants. *Chemosphere*. 67: 2229-2240.
- Shtangeeva, I. 2006. Phytoremediation of trace element contaminated soil with cereal crops: Role of fertilizers and bacteria on bioavailability. . In: Prasad, M.N.V., K.S. Sajwan and R. Naidu. (Eds.). *Trace Element in the Environment*. CRC. Boca Raton, FL. USA.
- Shuman, L.M. 1999. Effect of organic waste amendments on Zn adsorption by two soils. *Soil Science*. 164: 97-205.
- Tamoutsidis, E., I. Papadopoulos, I. Tokatlidis, S. Zotis, and T. Mabropoulos. 2002. Wet sewage sludge application effects on soil properties and element content of leaf and root vegetables. *J. Plant Nutrition*. 25 (9):1941-1955
- USEPA, 1993. *Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge (40 Code of Federal Regulations Part 503)*. Washington D. C., U. S. Environmental Protection Agency.
- SAS. 1995. ANOVA. In: *SAS User Guide: Statistics*. Cary, N.C. pp: 113-138.

Schnitzer M. 1991. Soil organic matter- the next 75 years. *Soil Sci.* 151(1): 41-58.

Tester, C.F. 1990. Organic amendment effects on physical and chemical properties of a sandy soil. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 54(3): 827-831.

Vázquez-Yanes C., 1987. *Como viven las plantas*, Fondo de Cultura Económica, México D.F., 93pp.

Walter, I., Martínez, F., Cala, V., 2005. Heavy speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses. *Environmental Pollution* 139: 507-514.

Woo R., Vazquez A., Olivares S., Zavala F., González G., Váldez R. y Gallegos C. 2003 Evaluación del rendimiento del cultivo del maíz (zea mays) aplicando lodos activados y urea. En: VII Simposio Internacional y II Congreso Nacional de Agricultura Sostenible., Monterrey, México del 17-20 de noviembre., p 141.

CAPITULO V

RENDIMIENTO DE *Ballico perenne* Y CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE UN SUELO MEJORADO CON BIOSOLIDOS

RESUMEN

Con el tratamiento de las aguas residuales, se busca solucionar un problema de contaminación pero se genera otro que al parecer puede ser o no una preocupación. Las plantas de tratamientos de aguas generan toneladas de lodos o biosólidos diariamente, los cuales pueden convertirse en una buena fuente de nutrimentos para las plantas y un excelente material para mejorar el suelo. En la planta de tratamiento de aguas residuales “El Niagara” de Aguascalientes, se colectaron muestras de biosólidos y en un suelo aledaño a esta donde se llevo a cabo el experimento. Con la finalidad de conocer la cantidad de nutrimentos absorbidos por la planta, además de la biomasa producida, se estableció este experimento, aplicando dosis crecientes de biosólidos al suelo, utilizando pasto ballico perenne (*Lolium perenne*) como cultivo indicador. Con la incorporación de biosólidos se incrementaron las concentraciones de N, P, M.O., Na, Ca y Mg en el suelo, lo cual mejoró su fertilidad. La dosis óptima fue de 160 t ha⁻¹ ya que con ellas se obtuvieron los mayores rendimientos (biomasa) del pasto ballico perenne, tanto en el primer corte como en el segundo. Además, el cultivo no presentó alteración fisiológica por acumulación de metales pesados.

Palabras clave: Aguas Residuales, Lodos Activados

Abstract

The purpose of treatment of wastewater is to resolve its potential risk of pollution, but the process generates a high amount of sewage sludge that could be or not a problem. Wastewater treatment plants, by an activated sludge process, produce a lot of tons of sewage sludge per day, which could be a good source of nutrients for crops and an excellent soil amendment. In “El Niagara”, a plant of treatment of wastewater from Aguascalientes City, sewage sludge were collected and in a soil near there the experiment was done. In order to determine the quantity of nutrients absorbed by plants, besides their yield, this

experiment was established. Different sludge levels and a chemical fertilization (90-60-00) treatment, were incorporated into the soil, using rye grass (*Lolium perenne*) as a indicator crop. With the incorporation of sewage sludge into the soil the concentrations of all the macronutrients increased and this fact improve its fertility. The highest crop yields were obtained with 160 o 200 t ha⁻¹ in both cases. Also, the metals concentration accumulated in the ray grass could not be physiology alteration.

Key Words: Waste Water, Actived Sludge

5.1 Introducción

Como resultado de la aplicación de la normativa encaminada a la protección de las aguas superficiales La instalación de depuradoras de aguas residuales ha ido en aumento en los últimos años. En México, de acuerdo con **CONAGUA (2010)**; existen 1833 plantas que tratan aguas residuales municipales (de origen doméstico) y 2082 plantas que tratan aguas industriales; aunque no en todas las ciudades se separan las aguas domésticas de las industriales, empleándose en el 46.19 % de los casos el tratamiento con lodos activados.

Como consecuencia de la depuración de las aguas residuales urbanas se producen los lodos que al ser tratados se les conoce como “biosólidos”. El volumen de producción de estos residuos llega a convertirse en un grave problema en ciudades muy pobladas y su tratamiento posterior es más urgente a medida que el crecimiento demográfico se acelera.

En el ámbito mundial, actualmente la tecnología de *Lodos Activados* en sus distintas modalidades (Convencional, Contacto-Estabilización, Aireación Prolongada, etc.), es la más empleada para el tratamiento de las aguas residuales urbanas. En México, el tratamiento de agua residual con lodos activados, además de ser el más eficiente en cuanto a tiempo y volumen de agua que trata, también es el que más cantidad de lodos residuales genera. El volumen aproximado de lodos producidos en todo el país es de 0.58 millones de toneladas por año (**CONAGUA, 2010**).

Actualmente, el manejo integral de los biosólidos ha cobrado gran importancia debido a su potencial de uso. La aplicación de estos biosólidos en la agricultura (cuando reúnen los estándares adecuados para ser aplicados al suelo), puede resolver dos problemas: i) reduce una fuente de contaminación y ii) favorecen la productividad al mejorar la fertilidad del suelo, con lo cual disminuye la demanda de fertilizantes inorgánicos. (Walter et al, 2005). Además de que constituyen una buena fuente de nutrimentos para las plantas, mejoran la retención de humedad, lo que representa una alternativa para esta actividad.

Sin embargo, también pueden contener elementos potencialmente tóxicos que pueden afectar a la cadena alimenticia a través de los cultivos y contaminar las aguas freáticas. Por lo que antes de aplicarlos al suelo se requiere evaluar su contenido de nutrientes y de metales pesados.

En la ciudad de Aguascalientes Ags. las aguas residuales se tratan mediante un proceso convencional dual de BIOFILTROS-LODOS ACTIVADOS, la planta tratadora depura 2000 litros por segundo y genera 150-170 m³ de biosólidos diariamente mismos que son acumulados en áreas aledañas a la planta porque no tienen un uso inmediato. Por lo que en este trabajo, con la finalidad de establecer la dosis óptima de aplicación de biosólidos al suelo, se evaluó el efecto de la aplicación de dosis crecientes de biosólidos sobre algunas características químicas de un suelo calcáreo y sobre el crecimiento de pasto cultivado en el mismo.

5.2 Materiales y Métodos

La parcela experimental donde se llevó a cabo el experimento tiene aproximadamente 0.5 ha, de superficie plana, con una ligera pendiente para posibilitar el riego por gravedad.

Los análisis químicos de los materiales se realizaron en el Laboratorio de Análisis Químico de Suelos de la Universidad Autónoma Chapingo,

El material incorporado en el suelo estuvo conformado por biosólidos generados en la PTAR “El Niágara”, de la ciudad de Aguascalientes, Ags., México, Fertilizante químico y pasto ballico perene.

5.2.1 Diseño experimental

La parcela se dividió en unidades experimentales donde se aplicaron dosis crecientes de biosólidos (Cuadro 5.1). Los tratamientos se distribuyeron en campo de acuerdo con un diseño experimental de bloques al azar (Figura 5.1), de forma que éstos fueron:

Cuadro 5.1. Dosis de biosólidos correspondiente a cada tratamiento.

Biosólidos	Tratamiento (t ha ⁻¹)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Base húmeda	0	*FQ	100	200	400	600	800	1000
Base seca	0	*FQ	20	40	80	120	160	200

* FQ = fertilización química inorgánica (90-60-00).

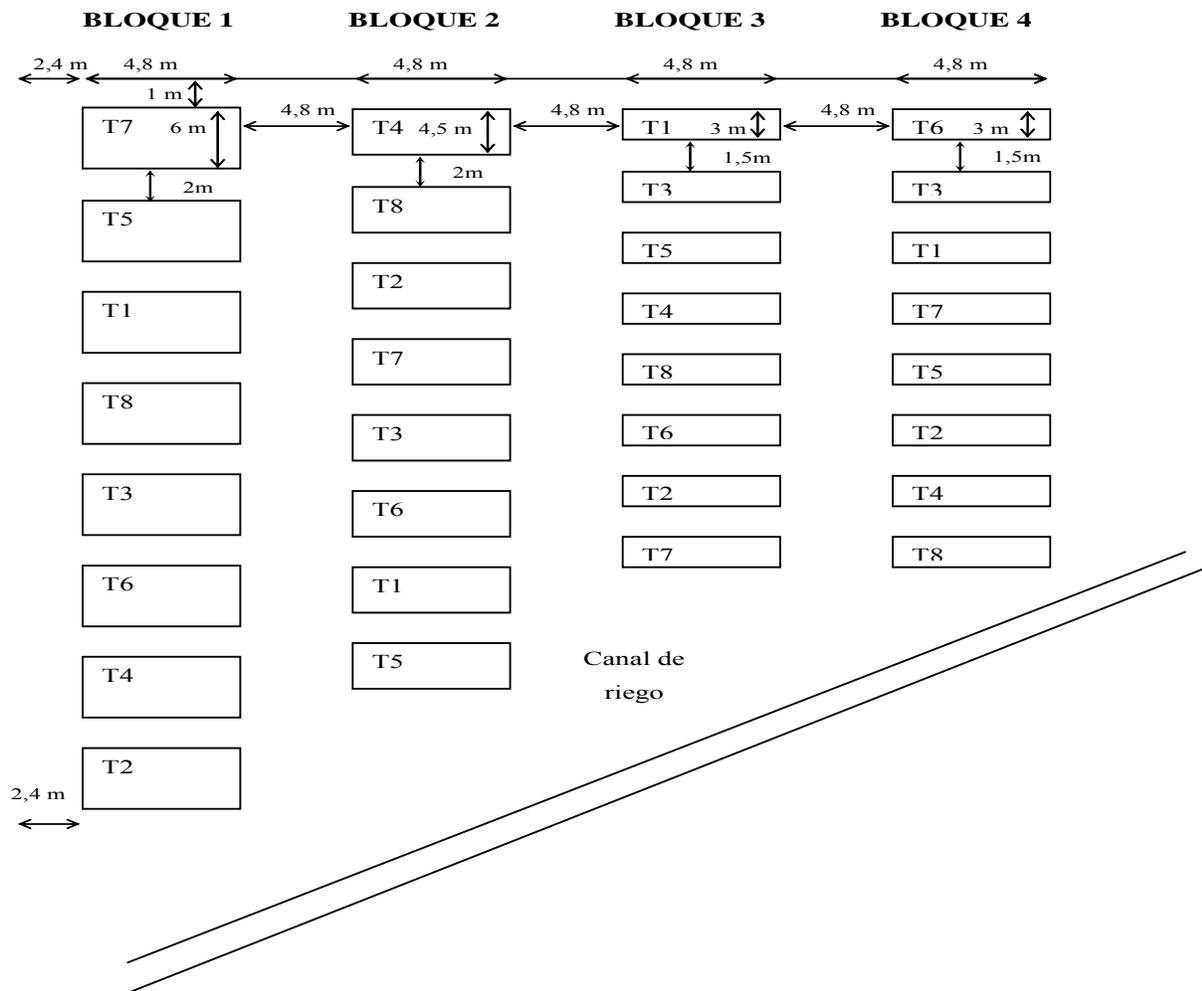


Figura 5.1 Croquis de la distribución de tratamientos en campo.

5.2.2 Establecimiento del experimento en campo. En la parcela experimental se trazaron 32 unidades experimentales (ocho tratamientos con cuatro repeticiones), las cuales se distribuyeron aleatoriamente, (Figura 5.1).

Cuadro 5.2 Cantidad de biosólidos a aplicar por unidad experimental.

		Cantidad de biosólidos (t)			
		Bloque I	Bloque II	Bloque III	Bloque IV
Superficie experimental		28.8 m ²	21.6 m ²	14.4 m ²	14.4 m ²
Tratamientos con biosólidos	T1	–	–	–	–
	T2	–	–	–	–
	T 3	0.288	0.216	0.144	0.144
	T 4	0.576	0.432	0.288	0.288
	T 5	1.152	0.864	0.576	0.576
	T 6	1.728	1.296	0.864	0.864
	T 7	2.304	1.728	1.152	1.152
	T 8	2.880	2.160	1.440	1.440

5.2.4 Variables a evaluar y Metodología Analítica

En el Cuadro 5.3 se muestran las variables a evaluar, así como la metodología empleada en el análisis de las muestras de suelo y de biosólidos.

Cuadro 5.3 Determinaciones analíticas y metodologías empleadas en la caracterización de los suelos y los biosólidos.

Muestra	Parámetro	Metodología
Suelos, Biosólidos	Extracto de saturación	Succión de vacío
Suelos, Biosólidos	Conductividad eléctrica	Conductimetría (ext. sat. ¹)
Suelos, Biosólidos	pH _s	Potenciometría (ext. sat.)
Suelos, Biosólidos	Cationes solubles: Ca ⁺ , Mg ⁺	Volumetría (ext. sat.)
Suelos, Biosólidos	Cationes solubles: Na ⁺ , K ⁺	Flamometría (EEA) (ext. sat.)
Suelos, Biosólidos	Aniones: CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻	Volumetría (ext. sat.)
Suelos, Biosólidos	Aniones solubles: SO ₄ ²⁻	Turbidimetría (ext. sat.)
Suelos, Biosólidos	Boro (B ⁺)	Fotocolorimetría (ext. sat.)
Suelos, Biosólidos	RAS, PSI	Cálculo matemático
Suelos, Biosólidos	Zn, Fe, Mn, Cu, Pb, Ni, Cd	Absorción atómica (EAA) (extracto en DTPA)
Biosólidos	Zn, Fe, Mn, Cu, Pb, Ni, Cd	Absorción atómica (EAA) (extracto con mezcla diácida)
Biosólidos	Contenido de humedad	Gravimetría (secado en estufa)
Biosólidos	M.O. total	Combustión seca
Suelos, Biosólidos	N inorgánico	extracción con KCl y destilación por arrastre de vapor
Suelos, Biosólidos	P disponible	Fotocolorimetría (Bray P1)

¹ext.sat.: extracto de saturación.

5.2.3 Colecta y Preparación de Muestras

Por cada unidad experimental se obtuvo una muestra compuesta de suelo, la cual consistió de cuatro submuestras, éstas se tomaron a una profundidad de 0-20 cm, posteriormente, se secaron, y se pasaron por un tamiz de malla 10.

5.2.5 Siembra y seguimiento del cultivo

Un mes después de la incorporación de los biosólidos al suelo, se realizó la siembra de pasto empleando un tractor y una sembradora mecánica. Para el tratamiento control, al momento de la siembra se aplicó la fórmula 90-60-00. Se realizaron las prácticas de cultivo recomendadas en la región para la producción de pasto ballico perenne ([González et al, 2003](#)). Se colectaron muestras de suelo y de pasto de tres cortes, para ello se obtuvo una muestra compuesta, la cual consistió de cuatro submuestras por cada unidad experimental, obteniéndose un total de 32 muestras de pasto ballico perenne, para cada uno de los cortes. A los suelos y biosólidos se les realizaron las siguientes determinaciones: pH, MO, N inorgánico, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Mn, y Zn con las metodologías propuestas por la [NOM-004-SEMARNAT-2002](#).

En el pasto ballico perenne se evaluó su rendimiento (biomasa), en los tres cortes, así como los nutrimentos (N inorgánico, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Cu, Mn, Zn) absorbidos por el cultivo.

5.2.6 Método Estadístico

Con los datos obtenidos en campo y en el laboratorio y con base en el diseño experimental empleado, para determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos y entre bloques, se realizó un análisis de varianza (ANOVA) con el programa informático "The SAS System for Windows V8". Cuando se detectaron diferencias significativas, se aplicó la prueba de comparación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$)

5.3 Resultados y Discusión

5.3.1 Características de los biosólidos

De las características químicas determinadas en los biosólidos, el pH presentó un rango ligeramente ácido, un alto contenido de materia orgánica con respecto a otros abonos orgánicos, en general fueron muy ricos tanto en sus concentraciones totales de nutrimentos como en los extractables (inmediatamente disponibles para las plantas). Esto es benéfico en cuanto a usarlos como abonos del suelo, aunque pueden representar un problema si se aplican en cantidades inadecuadas.

Cuadro 5.4 Características químicas de los biosólidos estudiados.

	pH	M.O.	N	P	K	Ca	Mg	Na	CIC
		%	-----mg kg ⁻¹ -----						Cmol kg ⁻¹
Totales	6,8	63,3	52780	3120	64960	25600	7750	27840	21.4
E	-	-	4650	370	1530-	11000	1300-	920-	-

E = Extractables

Las concentraciones de micronutrimentos y metales pesados totales y extractables en los biosólidos (Cuadro 5.5), presentaron rangos adecuados. Los niveles de Cd, Pb y Ni estuvieron por debajo de los límites máximos permisibles, por lo que se clasifican como excelentes según la Norma Oficial Mexicana. ([NOM-004-SEMARNAT-2002](#)).

Cuadro 5.5 Micronutrimentos y metales pesados en los biosólidos estudiados.

	Mn	Cu	Fe	Zn	Ni	Pb	Cd
	-----mg kg ⁻¹ -----						
Totales	688	258	3563	2905	45	70.45	47.8
Extractables	66	8	81.9	865	15	10	15

5.3.2. Características del suelo

La aplicación de biosólidos al suelo, modificó significativamente algunas características químicas del mismo (Cuadro 5.6). El pH cambió de

moderadamente alcalino a ligeramente ácido con la dosis más alta lo cual es benéfico, ya que éste es el más adecuado para la mayoría de los nutrientes. El contenido de materia orgánica se incrementó significativamente en aproximadamente un 40 % con respecto al testigo con los tratamientos 7 y 8 (160 y 200 t ha⁻¹ de biosólidos en base seca), pasando a un rango considerado como muy rico al igual que el nivel de nitrógeno inorgánico y el P asimilable, la capacidad de intercambio catiónico y el K se mantuvieron constantes con todos los tratamientos (**NOM-021-RECNAT-2002**). Las concentraciones de Ca y Mg se incrementaron significativamente con respecto al testigo con las dosis más altas.

Cuadro 5.6 Características químicas del suelo después del primer corte del pasto.

Dosis biosólidos	pH	M.O.	C.I.C	N	P	K	Ca	Mg	Na
t. ha ⁻¹		%	Cmol/kg	-----mg kg ⁻¹ -----					
Testigo	7.9 a	3.22 c	19.7 a	19 c	17 bc	888 ab	1553 b	149 b	404 a
FQ	7.9 a	3.22 c	19.1 a	22 bc	15 c	909 a	1466 b	140 b	408 a
20	7.8 ab	3.56 bc	20.6 a	34 abc	28 a	800 ab	1600 ab	157 b	452 a
40	7.7 ab	3.48 bc	20.5 a	25 bc	27 ab	834 ab	1623 ab	151 b	393 a
80	7.4 ab	4.02 abc	21.5 a	32 abc	29 a	815 ab	1587 b	162 ab	381 a
120	7.4 ab	4.27 abc	20.8a	39 ab	33 a	770 ab	1789 ab	182 ab	406 a
160	7.2 bc	4.47 ab	19 a	37 abc	34 a	661 b	1678 ab	167 ab	398 a
200	6.6 c	5.06 a	22 a	47 a	35 a	810 ab	1921 a	200 a	381 a

Valores en la misma columna con diferente letra son estadísticamente diferentes (Tuckey, $\alpha \leq ,05$)

La concentración de micronutrientes se encontró en el suelo en cantidades adecuadas para el crecimiento de los cultivos y los niveles de concentración de

metales pesados se consideraron normales y quedaron muy por debajo de los límites máximos permisibles con todos los tratamientos aplicados (Cuadro 5.7), hubo diferencias significativas entre tratamientos por efecto de adición de biosólidos para el Fe, Zn y Cd, el incremento en la concentración del suelo de los dos primeros es benéfico para los cultivos, ya que éstos son nutrimentos esenciales para ellos, en cuanto al Cd, aunque hubo incrementos significativos con la dosis mas alta su concentración quedó muy lejos del límite máximo permisible para considerarse como tóxicos (Kabat-Pendias y Pendias, 2000).

Cuadro 5. 7 Metales pesados en el suelo despues de tres meses de incorporados los biosólidos.

Tratamientos t ha ⁻¹	Fe	Zn	Mn	Cu	Pb	Ni	Cd
	-----mg kg ⁻¹ -----						
0	6.68d	1.34d	2.37a	1.93a	2.66	1.28a	0.15b
0°	8.85d	1.33d	2.68a	2.94a	2.93a	0.62a	0.15b
20	10.15dc	3.9cd	2.41a	2.99a	2.58a	1.88a	0.18b
40	10.12bc	6.0bc	3.61a	3.92a	2.92a	1.58a	0.16b
80	12.45b	6.26bc	2.57a	2.48a	2.77a	1.24a	0.20ab
120	11.75b	7.52b	2.71a	2.48a	2.62a	1.08a	0.19ab
160	13.73ab	8.91ab	3.10a	4.16a	2.84a	1.18a	0.21ab
200	15.28a	11.73a	3.82a	4.17a	2.89a	1.18a	0.24a
Interpretación ¹	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Normal	Normal	Normal
LMP _s ² (mg kg ⁻¹)	nr	300	4000	100	200	100	7.0

Valores en la misma columna con diferente letra son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0.05$); °Fertilización química (90-60-00). ¹ NOM-021-SEMARNAT-2000. ²LMP_s = límite máximo permisible para suelos agrícolas (Kabat-Pendias y Pendias, 2000). ³ nr = no reportado.

5.3.3. Características del cultivo

En cuanto a la biomasa del pasto ballico (Figura 5.2) en el primer corte no hubo diferencia significativa en rendimiento entre los tratamientos 20, 40, 80 y 120 t/ha y el fertilizante químico utilizado. En cambio si hay diferencia

significativa al aplicar el tratamiento de 160 t/ha, donde el rendimiento aumenta considerablemente en relación al resto de tratamientos aplicados. En el segundo corte, no se observaron diferencias significativas entre tratamientos. La obtención de menor rendimiento en el segundo corte pudo deberse que transcurrió muy poco tiempo entre el primer y el segundo corte, solamente un mes, por lo que posiblemente la mineralización de los nutrientes aportados por los biosólidos no pudo hacerse latente en tan poco tiempo y las plantas tuvieron que abastecerse de los nutrientes presentes en el suelo, en el tercer corte se observó un decremento de la biomasa con todos los tratamientos, aunque con las dosis mayores se obtuvo mayor rendimiento de biomasa.

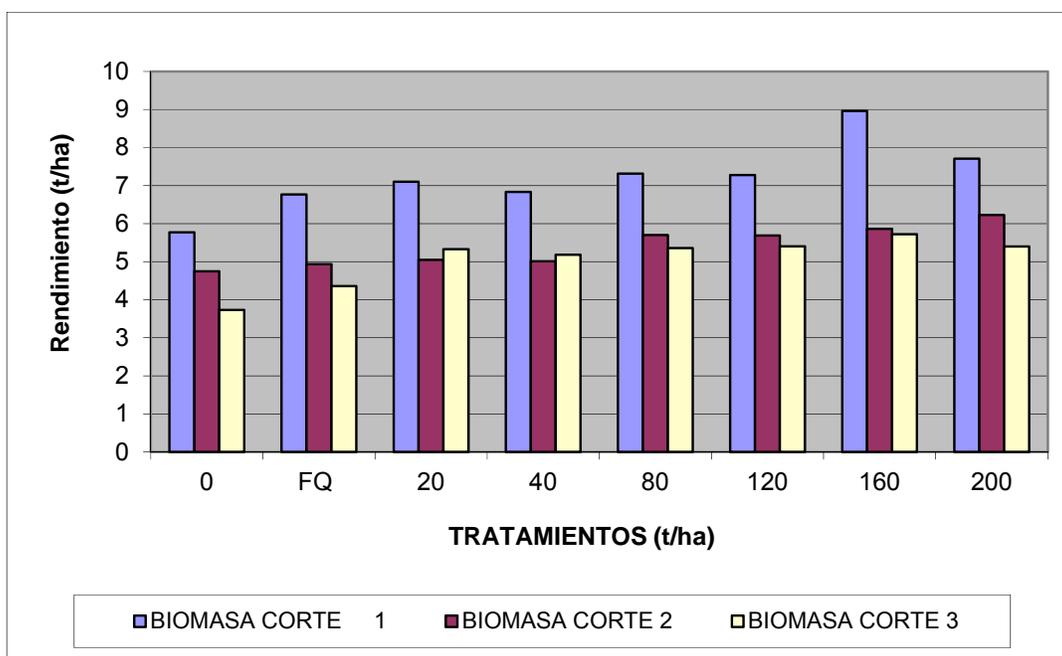


Figura 5.2. Biomasa de pasto ballico perenne en el primero, segundo y tercer corte.

El pasto ballico perenne absorbió mayores cantidades de nitrógeno en el primer corte, para todos los tratamientos aplicados (Figura 5.3), quedando la concentración dentro del rango considerado como óptimo (Fageria, 2011), en el segundo corte el pasto con los tratamientos fertilización química y 20 t ha⁻¹ absorbieron cantidades de N por debajo del rango óptimo, en cuanto al P, éste

fue absorbido en mayor cantidad en el primer corte que en el segundo, sin embargo en los dos cortes estuvo dentro del rango óptimo establecido.

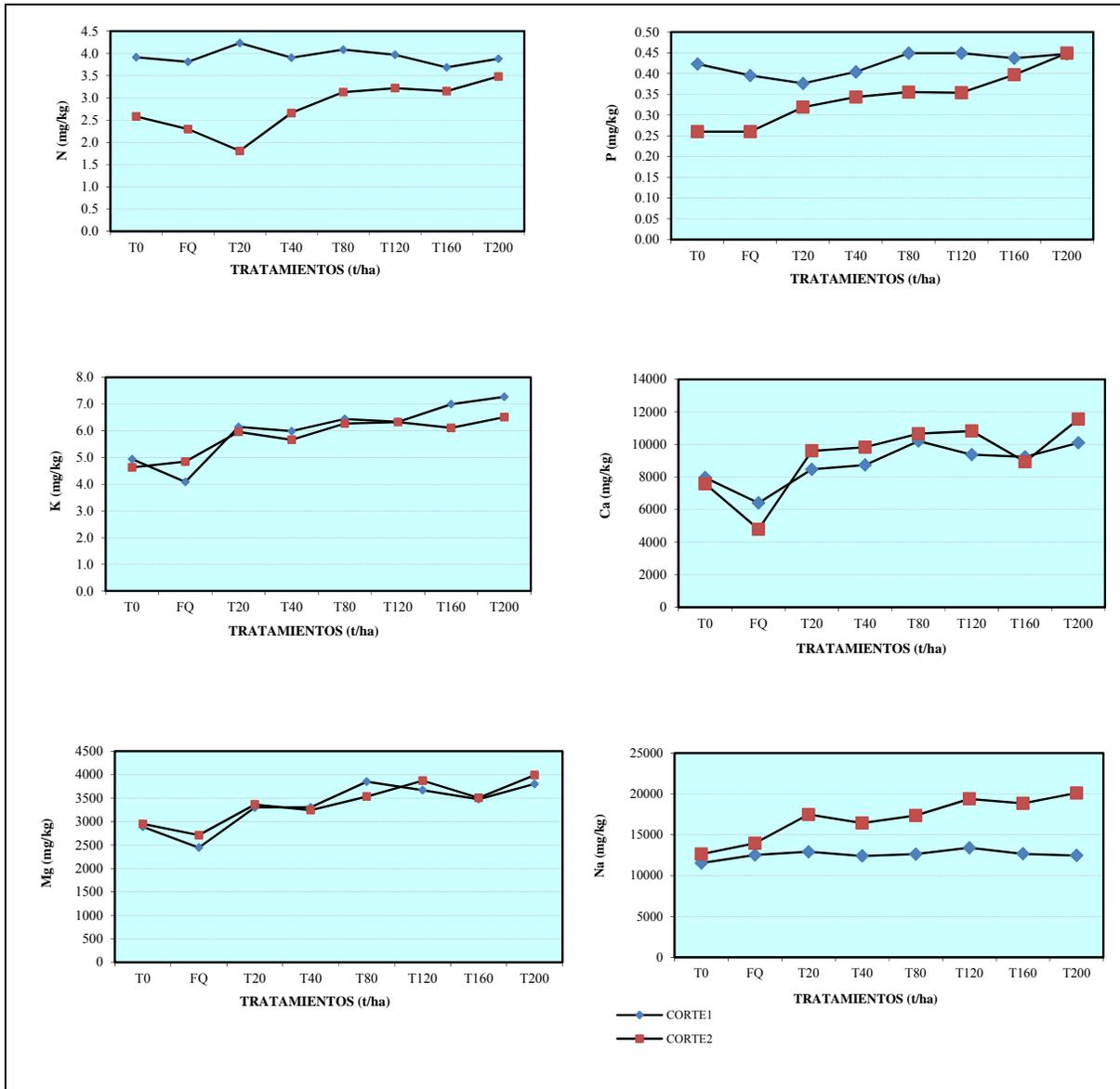


Figura 5.3 Concentración de nutrientes en el primero y segundo corte del Pasto ballico perenne

El K y el Ca en ambos cortes fueron absorbidos por el pasto en cantidades superiores a lo óptimo y el Mg sólo en los tratamientos 80, 120 y 200 t ha⁻¹ se presentó en cantidades mayores a la óptima en los dos cortes El sodio fue absorbido, en mayores cantidades, en el segundo corte. Probablemente hubo

una mayor mineralización de este ión.

5.4 Conclusiones

Con base en las condiciones experimentadas que se presentaron durante el desarrollo del cultivo, se concluye que: Los biosólidos presentaron una alta concentración de nutrimentos. Con la incorporación de biosólidos se incrementaron las concentraciones de nitrógeno, fósforo, materia orgánica, sodio, calcio y magnesio en el suelo, lo cual mejoró su fertilidad y se incrementó la producción de biomasa de pasto ballico. La dosis óptima fue de 160 o 200 t ha⁻¹ de biosólidos en base seca, ya que con ellas se obtuvo la mayor producción de biomasa en pasto ballico perenne, tanto en el primero como en el segundo corte.

5.5 Literatura Citada

- Castañeda S. O., 2000. Determinación de la toxicidad de los lodos generados por una planta potabilizadora, utilizando bioensayos. En: XII Congreso Nacional 2000, Ciencia y Conciencia Morelia, Mich.; México. p 751.
- Fageria K. 2011. Growth and mineral nutrition of field crops. 3^a ed. Marcel Dekker. USA.
- CONAGUA, 2010. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de aguas residuales en Operación. Diciembre de 2008. Comisión Nacional del Agua.
- California Plant Health Association, 2004. Manual de fertilizantes para cultivos de alto rendimiento. Limusa. México.
- González, C. F. Peña R. A., Robles, E. F. J. 2003. Guía Para Producir Maíz de Alta Calidad Forrajera. INIFAP. Centro de Investigación Regional Norte-Centro Campo experimental Pabellón. Folleto para Productores No. 33. pp 18.
- INEGI, 2003. Cuaderno Estadístico Municipal de Aguascalientes, INEGI, Aguascalientes; México.

Kabatas-Pendias, A. y Pendias, H. 2000. Trace elements in soils and plants. CRC Press. USA. P.432

Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 13 de agosto de 2003.

Norma Oficial Mexicana. NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación. Publicada el 31 de diciembre de 2002.

Walter, I., Martínez, F., Cala, V., 2005. Heavy speciation and phytotoxic effects of three representative sewage sludges for agricultural uses. Environmental Pollution 139: 507-514.

CAPITULO VI

6.0. SALES SOLUBLES Y METALES PESADOS EN SUELOS MEJORADOS CON BIOSÓLIDOS

Resumen

Las plantas de tratamientos de aguas residuales (PTAR), diariamente generan toneladas de lodos (biosólidos), los cuales pueden tener un uso agrícola como fuente de nutrientes y material mejorador del suelo, aunque también pueden ser fuente de contaminación por metales pesados y sales solubles. En este estudio se evaluó, en un suelo representativo de la zona de influencia de la PTAR de la ciudad de Aguascalientes, México, la aplicación de biosólidos y el efecto de su contenido de metales pesados y sales solubles en el suelo y plantas de pasto ballico, con la finalidad de establecer su aprovechamiento agrícola sin riesgo potencial de degradación y contaminación de suelos y plantas. Se hizo una caracterización química de los biosólidos y los suelos estudiados. Los biosólidos presentaron pH ligeramente ácido, alto contenido en sales solubles y concentración de metales pesados dentro de los límites máximos permisibles según la NOM-004-SEMARNAT-2002, por lo que se les puede dar uso agrícola. Dosis crecientes de biosólidos incorporados al suelo no presentaron efectos en éste, en cuanto a acumulación de metales pesados, pero sí se incrementó el contenido de sales solubles y con dosis superiores a 80 t ha^{-1} se llegó a niveles que pueden reducir el rendimiento de la mayoría de cultivos.

Palabras clave: contaminación, degradación agrícola, plantas de tratamiento de aguas residuales

SUMMARY

Wastewater treatment plants (WTP) generate tons of sewage sludge or biosolids every day, which can take an agricultural use as nutrient source and improvement soil amendment material, although they also can be a pollution source by heavy metals and soluble salts. In this work was evaluated, in

representative soils of Aguascalientes, Mexico, WTP influence zone, biosolids application effect in heavy metal and soluble salts content, for the purpose of establishing his agricultural exploitation without potential degradation and pollution soil risks.

Increasing biosolids doses application effect was evaluated in an experimental plot on PTE and soluble salts contents. Three field soils with preceding biosolids incorporation by farmers themselves were studied. Finally, Aguascalientes WTP biosolids were chemically characterized.

Biosolids presented lightly acid pH, high soluble salts content and PTE concentrations inside permissible maximum limits, so agricultural use can be given to them. Increasing biosolids doses in soil did not present effects as for PTE concentrations but salts content increased, and with higher 80 t ha^{-1} doses, levels that could reduce majority crop yield are reached.

Key words: wastewater treatment plants, sewage sludge, potential toxic elements, pollution, Aguascalientes.

6.1. Introducción

Desde el punto de vista de la sustentabilidad, la calidad del agua y el tratamiento del agua residual son importantes para el cuidado de la salud humana y el equilibrio de los ecosistemas. En el contexto de los problemas ambientales, la contaminación del agua ocupa un lugar prioritario a nivel mundial. Las aguas residuales resultantes de usos domésticos e industriales, antes de su vertido a los cauces receptores, deben sanearse para minimizar su impacto contaminante (INEGI, 2009). La instalación de plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) en México ha ido en aumento en los últimos años, como resultado de la aplicación de la normativa encaminada a la protección de las aguas superficiales (CONAGUA, 2005). Con ello se producen volúmenes importantes de lodos, que pueden definirse como residuos urbanos procedentes de la depuración de aguas residuales cuya materia orgánica puede aprovecharse en la agricultura (Porta, 2003; EPA, 2000)

La mayoría de los procesos para el saneamiento de aguas de desecho producen partículas sólidas sedimentables y decantables, constituidas por minerales inertes y materiales orgánicos fermentables, sobre los que se absorben y adsorben sales minerales y algunos patógenos (bacterias, parásitos, etc.), que se encuentran en las aguas de desecho (Gamrasni, 1985). Estos materiales se separan del agua y forman un lodo biológicamente inestable (lodos residuales), con alto contenido de humedad. Cuando este lodo residual recibe un tratamiento físico, químico o biológico para estabilizarlo y reducir su potencial contaminante, se le denomina biosólido **(USEPA 1993; NOM-004-SEMARNAT-2002)**.

Para mejorar su imagen pública y utilizarlos como fertilizantes orgánicos, estos desechos también se clasifican en lodos crudos y lodos tratados o biosólidos **(Nebel y Wright, 1999)**. El tratamiento de los lodos, o su estabilización, consiste en los procesos físicos, químicos o biológicos a los que se someten estos residuos para acondicionarlos para su aprovechamiento o disposición final y reducir o evitar sus efectos contaminantes al medio ambiente **(NOM-004-SEMARNAT-2002)**.

El volumen de producción de estos residuos llega a convertirse en un grave problema en ciudades muy pobladas; su gestión se hace más urgente a medida que el crecimiento demográfico se acelera **(Lovell, 1996)**.

Actualmente, el manejo integral de los biosólidos ha cobrado gran importancia debido a su potencial uso benéfico. La aplicación de éstos en suelos agrícolas (siempre que reúnan los estándares adecuados para aplicarse al terreno) reduce la demanda de fertilizantes inorgánicos, ya que constituyen una fuente de nutrientes para las plantas y mejoran algunas características físicas, químicas y biológicas del suelo. Su uso agrícola, ofrece una alternativa económica y ambiental aceptable, y agronómicamente favorable para reciclar componentes importantes como materia orgánica (MO), macro y micronutrientes para los cultivos **(Oberle y Keney, 1994; Oudeh, 2002)**.

Sin embargo, los biosólidos también pueden contener elementos potencialmente tóxicos (EPT) los cuales al aplicarse a suelos agrícolas pueden

afectar a la cadena alimenticia, a través de los cultivos, contaminar el suelo y las aguas freáticas; estos elementos son, principalmente, metales pesados y son el factor principal que restringe su uso en la agricultura (**Chandra y Prasad 2005; De Brouwere y Smolders 2006**), pero éste varía de acuerdo a la región en que se localice la planta de tratamiento de aguas residuales y al origen de éstas. Al respecto, **Nyamangara y Mzezewua (1999)** reportaron que la incorporación continua de biosólidos durante 19 años en Zimbawe, incrementó el contenido de Zn, Cu, Ni y Pb en el horizonte superficial del suelo.

La planta de tratamiento de aguas residuales, “El Niágara” de la ciudad de Aguascalientes, Ags., con capacidad para procesar hasta 2 000 litros por segundo (**CONAGUA, 2008**), genera 130-150 m³ de biosólidos diariamente, los cuales son acumulados en áreas aledañas a la planta y representan un riesgo de contaminación del suelo, aire y agua debido a que no tienen un uso inmediato. La infiltración de elementos tóxicos hasta alcanzar subsuelo y mantos freáticos, la proliferación de moscas y roedores, reactividad, síntesis de compuestos indeseables, diseminación de olores desagradables, etc., son algunos de los problemas derivados de la inutilización de estos biosólidos. En parcelas agrícolas cercanas a la PTAR, los biosólidos son aplicados en diferentes dosis, sin bases científicas, obteniendo buenos resultados en algunos casos (incrementos en el rendimiento de sus cultivos), en otros los suelos presentaron afectaciones como el endurecimiento en las capas superficiales y quemaduras en las plantas. .

Por otra parte, existen evidencias visuales de la presencia de sales en los suelos de la zona de estudio. La incorporación de biosólidos, por su alto contenido de sales solubles, puede incrementar éstas en el suelo (**Schroder et al., 2008**), provocando acumulación y posible contaminación, con efectos negativos en el desarrollo de algunos cultivos.

El alto contenido de sales solubles en el suelo, es uno de los factores limitativos para el buen desarrollo de los cultivos. Éstas reducen el potencial osmótico de la solución del suelo, lo cual disminuye la disponibilidad del agua para las plantas, aún cuando el suelo tenga suficiente humedad, lo que

ocasiona una disminución en el crecimiento de los cultivos (Jumberi, *et al* 2001; Csizinski, 1986; George, *et al* 1988). También se pueden ver afectados por el efecto del ion específico (Na, Cl o B) o una inadecuada absorción de nutrientes (Munns yTermaat, 1986). En este estudio se evaluó en un suelo representativo de la zona de influencia de la PTAR, el efecto de la aplicación de biosólidos en el contenido de metales pesados y sales solubles en el suelo y en la producción de biomasa de pasto ballico, con la finalidad de establecer su aprovechamiento agrícola sin potenciales riesgos de degradación y contaminación de los suelos.

6.2 Materiales y Métodos

6.2.1. Diseño experimental

6.2.2. Establecimiento del experimento en campo

Los métodos de análisis químicos, utilizados para caracterizar, el suelo estudiado y los biosólidos aplicados a éste, se presentan en el Cuadro 6.1.

Se estableció un experimento de campo, en una parcela con una superficie de media hectárea y con un suelo representativo del área de influencia de la PTAR, se empleó un diseño experimental de bloques completos al azar, con base en la experiencia de los productores de la región, se determinaron y aplicaron ocho tratamientos: 0, 20, 40, 80, 120, 160 y 200 t ha⁻¹ de biosólidos en base seca, y un testigo al que se le aplicó la dosis de fertilizante químico que se recomienda para la región según los productores (90-60-00), con cuatro repeticiones. Se midió el terreno y se trazaron las unidades experimentales, las cuales se distribuyeron aleatoriamente. Los lodos residuales de la PTAR se llevaron al terreno con la ayuda de un remolque y posteriormente se incorporaron al suelo, Un mes después de la aplicación de los biosólidos al terreno, se realizó la siembra de pasto ballico con tractor y una sembradora mecánica.

Cuadro 6.1 Determinaciones analíticas y metodologías empleadas en la caracterización de suelos y biosólidos (NOM-021-SEMARNAT-2000).

		Análisis en:	
		Biosólidos	Suelos
Extracto de saturación	Succión de vacío	X	X
CE	Conductimetría (ext. sat. ¹)	X	X
pH	Potenciometría (ext. sat.)	X	X
Ca ²⁺ , Mg ²⁺ solubles	Volumetría (ext. sat.)	X	X
Na ⁺ , K ⁺ solubles	Flamometría (EEA) (ext. sat.)	X	X
CO ₃ ²⁻ , HCO ₃ ⁻ , Cl ⁻ solubles	Volumetría (ext. sat.)	X	X
SO ₄ ²⁻ solubles	Turbidimetría (ext. sat.)	X	X
Boro soluble	Fotocolorimetría (ext. sat.)	X	X
RAS, PSI	Cálculo matemático	X	X
Zn, Fe, Mn, Cu, Pb, Ni, Cd extractables	Absorción atómica (EAA) (extracto en DTPA)	X	X
Zn, Fe, Mn, Cu, Pb, Ni, Cd totales	Absorción atómica (EAA) (extracto con mezcla diácida)	X	
Contenido de humedad	Gravimetría (secado en estufa)	X	
M.O. total	Combustión seca	X	
N inorgánico	Volumetría (extracción con KCl y destilación por arrastre de vapor)	X	
P disponible	Fotocolorimetría (Bray P1)	X	

¹ext. sat.: extracto de saturación.

6.2.3. Colecta y preparación de muestras

Se colectaron muestras de biosólidos de la PTAR y tres meses después de la incorporación de éstos, se tomaron muestras de suelos en la parcela, en cada unidad experimental se tomaron cuatro submuestras de suelos a una profundidad de 0-20 cm, se mezclaron y homogeneizaron para formar muestras compuestas. Posteriormente éstas se secaron al aire, con un mazo de madera se disgregaron los terrones, se pasaron por un tamiz de malla 10 y se almacenaron en bolsas de plástico, para su posterior caracterización.

Con los datos obtenidos en campo y en el laboratorio se realizó un análisis de varianza, SAS (1995), con base en el diseño experimental empleado. Cuando se detectaron diferencias significativas, se aplicó la prueba de separación de medias de Tukey ($\alpha \leq 0.05$).

6.3 Resultados y Discusión

6.3.1 Características químicas de los biosólidos

Los biosólidos presentaron las siguientes características; 75% de humedad, porcentaje de saturación de agua de 575, lo cual es congruente con su alto contenido de materia orgánica (MO) (68.55%), pH ligeramente ácido y capacidad de intercambio catiónico (CIC) baja (Cuadro 2). En cuanto a los macronutrientes totales (N, P, K, Ca y Mg), la concentración en estos materiales fue mayor que la de otros abonos orgánicos (Ortiz, 1995); además, también presentaron altos contenidos de la fracción extractable de esos elementos, la cual es la que pueden absorber inmediatamente las plantas. Esto es un factor positivo en cuanto a usarlos como abonos del suelo, aunque pueden representar un problema si no se aplican en cantidades adecuadas.

Cuadro 6. 2 Características químicas de los biosólidos estudiados.

	pH	MO	N	P	K	Ca	Mg	CIC
		----- %-----						Cmol(+) kg ⁻¹
Total	6.8	63.3	5.3	0.31	6.5	2.5	0.8	21
Extractables (mg kg ⁻¹)	-	-	4650	370	1530	11000	1300	-

MO = materia orgánica, CIC= capacidad de intercambio catiónico

6.3.2 Características químicas del suelo

Las características químicas de los suelos que principalmente cambian por adición de abonos orgánicos son: pH, MO, N, P, Ca, Mg y CIC (Tamoutsidisis, 2002). En este estudio, con excepción de la CIC, éstas fueron las características que tuvieron modificaciones estadísticamente significativas por efecto de la aplicación de biosólidos al suelo (Cuadro 4). Con la dosis más alta el pH disminuyó de moderadamente alcalino a ligeramente ácido, lo cual es benéfico, ya que es el más adecuado para la disponibilidad de la mayoría de los nutrientes para las plantas.

La MO tuvo incrementos estadísticamente significativos sólo con las dosis de 160 y 200 t ha⁻¹ de biosólidos, por lo que de ser un suelo con contenido ligeramente bajo, cambió a uno muy rico. La capacidad de intercambio catiónico es una propiedad química a partir de la cual es posible inferir acerca del tipo de arcilla presente, la magnitud de la reserva nutricional y del grado

de intemperismo de los suelos. El resultado numérico de su determinación sirve, además, como base en el cálculo del porcentaje de saturación de bases, el cual es un dato ampliamente usado en los estudios pedológicos y de fertilidad, (**NOM-021-SEMARNAT-2000**). En el suelo estudiado, los biosólidos aplicados, a pesar de su alto contenido de MO, no influyeron en esta propiedad química, debido a que en su mayoría ésta consistía de residuos orgánicos sin humificar y por lo tanto, con baja CIC.

Los nutrimentos N, P, Ca y Mg se incrementaron significativamente, con respecto a los tratamientos testigo y fertilización química, también con las dosis más altas (160 y 200 t ha⁻¹), para el K no hubo diferencias significativas (Cuadro 4).

Cuadro 6.3 Características químicas del suelo, después de tres meses de incorporados los biosólidos.

Dosis t ha ⁻¹	pH	MO %	CIC Cmol kg ⁻¹	N -----	P -----	K -----	Ca -----	Mg -----
				mg kg ⁻¹ -----				
0	7.87 ab	3.2 c	19.8 a	19 c	17 bc	888 a	1553 b	149 b
FQ	7.93 a	3.2 c	19.2 a	22 bc	15c	909 a	1466 b	140 b
20	7.80 ab	3.6 bc	20.6a	24 bc	28ab	800 a	1600 ab	157 b
40	7.73 ab	3.5 bc	20.5 a	25 bc	27 ab	834 a	1623 ab	151 b
80	7.43 ab	4.0 abc	21.5 a	32 abc	29 ab	815 a	1587 b	162 ab
120	7.37 ab	4.3 abc	20.9 a	39 ab	33 a	770 a	1789 ab	182 ab
160	7.22 bc	4.5 ab	19.0 a	39 ab	34 a	771 a	1678 ab	167 ab
200	6.63 c	5.1 a	22.0 a	47 a	35 a	810 a	1921 a	202 a

Valores en la misma columna con diferente letra son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0,05$). FQ = fertilizante químico (90-60-00), MO = materia orgánica, CIC= capacidad de intercambio catiónico

6.3.3 Sales solubles en biosólidos y suelos

Los biosólidos presentaron altas concentraciones de sales solubles (Cuadro 5); esto puede representar un problema, si se aplican los biosólidos en dosis excesivas. El incremento de sales en el suelo se traduce en un aumento del potencial osmótico, lo cual puede ser un perjuicio para las plantas, ya que éstas deben emplear más energía para reducir el potencial osmótico del agua de la raíz y se pueda mantener el flujo de agua del suelo hacia la raíz (Ayers y Westcot, 1987). Además, un alto contenido de bicarbonatos induce la

precipitación de Ca^{2+} y Mg^{2+} , originando acumulación de sodio en la solución del suelo, el cual al adsorberse a las arcillas, provocará la sodificación de éste.

El contenido de nitrógeno amoniacal en el extracto de saturación de los biosólidos fue muy alto (84.2 me L^{-1}). Esto significa que los biosólidos suministraron una importante cantidad del N-NH_4^+ inmediatamente disponible para las plantas y con el tiempo (una a dos semanas) mediante el proceso de nitrificación promovido por las bacterias *Nitrosomonas* y *Azotobacter*, una de las fuentes de la acidificación del suelo ([California Plant Health Association, 2004](#)),

Cuadro 6.4. Conductividad eléctrica y sales solubles en los biosólidos.

Σ Cationes ¹	Σ Aniones ²	CE
me L ⁻¹	me L ⁻¹	dS m ⁻¹
119.4	103.1	9.85

¹ $\Sigma(\text{K}^+, \text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{Mg}^{2+} \text{ y } \text{NH}_4^+)$ ² $\Sigma(\text{CO}_3^{2-}, \text{HCO}_3^-, \text{Cl}^- \text{ y } \text{SO}_4^{2-})$

Existe una relación entre la CE en la solución del suelo y el rendimiento de los cultivos, dependiendo de la tolerancia de éstos hacia las sales. Según [Mass y Hoffman \(1977\)](#) y [Mass \(1984\)](#), con una CE de hasta 5.6 dS m^{-1} el rendimiento potencial del pasto ballico (*Lolium perenne*, cultivo forrajero moderadamente tolerante) es de 100%; pero con conductividades de 7.4 y 9.5 dS m^{-1} , el rendimiento desciende a 90% y 75%, en ese orden. Para otro cultivo forrajero de la zona, como la alfalfa (*Medicago sativa*), moderadamente sensible a la salinidad, con CE de hasta 2.0 dS m^{-1} se obtienen rendimientos de 100%, pero éstos se reducen a 90% y 75% con 3.4 y 5.4 dS m^{-1} respectivamente. La conductividad eléctrica y el contenido de sales solubles del suelo, se incrementaron por efecto de las dosis de biosólidos y fertilizante aplicados, hasta un valor de 5.3 dS m^{-1} con el tratamiento más alto (Cuadro 6). Por lo que el pasto cultivado en este suelo no tuvo problemas para su desarrollo por efecto de sales solubles. Resultados similares (incremento en la CE y disminución en el pH del suelo) encontraron [Jurado et al., \(2006\)](#) con la aplicación de biosólidos (90 t ha^{-1}) de la PTAR “El Niagara”, a un pastizal de

Ojuelos, Jalisco y Shing y Agrawal, (2007) en suelos agrícolas (pH de 8.05) de la India.

Cuadro 6.5 Efecto de los biosólidos, en sales solubles y conductividad eléctrica del suelo

Dosis de biosólidos (t ha ⁻¹)	Σ Cationes ¹ -----meq L ⁻¹ -----	Σ Aniones ²	CE dS m ⁻¹
0	14.56	15.45	1.69
0*	17.13	19.93	2.41
20	18.82	18.43	2.18
40	15.68	18.20	2.42
80	16.23	18.45	2.90
120	18.35	21.58	3.45
160	18.82	25.15	3.60
200	46.01	51.98	5.25

¹ Σ(K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Mg²⁺). ² Σ(CO₃²⁻, HCO₃⁻, Cl⁻, SO₄²⁻). CE = conductividad eléctrica

La [California Plant Health Association \(2004\)](#) menciona que en la solución del suelo la concentración relativa de los cationes es comúnmente Ca > Mg > K > Na y el Ca²⁺ es el que predomina en el complejo de intercambio. Según la Figura 1, aunque las concentraciones de Na⁺ son superiores a los otros iones y tiende a incrementarse con la aplicación creciente de biosólidos, la relación de adsorción de sodio (RAS) y el porcentaje de sodio intercambiables (PSI) disminuyen (Figura 2), porque, a su vez, aumentan las concentraciones de Ca²⁺ y Mg²⁺. Además, se incrementa la relación Ca²⁺/Na⁺, lo que evita la sodificación de los suelos ([Castellanos et al., 2000](#)). Respecto a los aniones, los cloruros y los sulfatos se incrementaron a partir de la dosis de 160 t ha⁻¹.

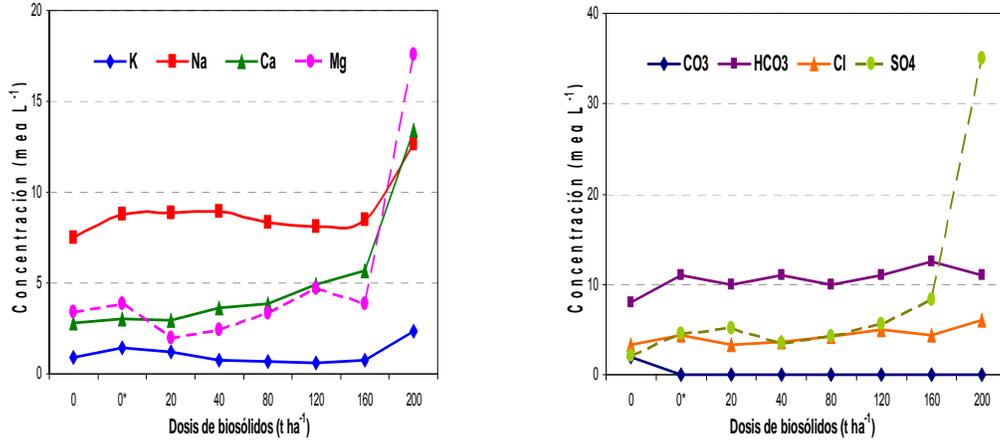


Figura 6.1 Cationes y aniones en el suelo de la parcela experimental según sus tratamientos.

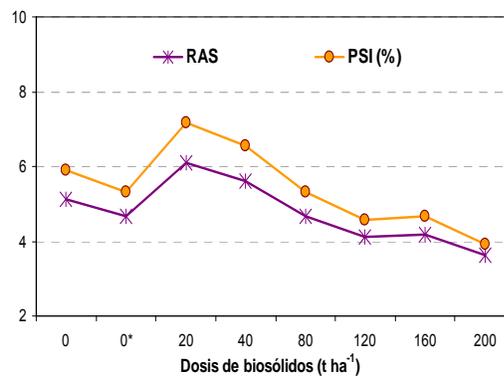


Figura 6. 2. Valores promedio de RAS y PSI en el suelo de la parcela experimental

6.3.4. Metales Pesados en los biosólidos y el suelo

Las concentraciones de micronutrientos y metales pesados totales y extractables en los biosólidos (Cuadro 3), presentaron valores considerados como adecuados, por lo que en México se clasifican como excelentes para su uso en la agricultura (**NOM-004-SEMARNAT-2002**).

Cuadro 6.6. Micronutrientos y metales pesados en los biosólidos estudiados.

	Mn	Cu	Fe	Zn	Ni	Pb	Cd
	-----mg kg ⁻¹ -----						
Total	688	258	3563	2905	45	70	47
Extractable	66	8	81	865	15	10	15
LMP _B ¹ (mg kg ⁻¹) E	nr	2800	Nr	1500	300	420	39
LMP _B ¹ (mg kg ⁻¹) B	nr	7500	Nr	4300	840	420	85
LMP _B ² (mg kg ⁻¹)	nr	4000	1307	1750	1200	400	140

¹LMP_B (E:excelente, B:bueno) = Límite máximo permisible para biosólidos (NOM-004-SEMARNAT-2002). ²LMP_B = Límite máximo permitido en biosólidos (uso agrícola) (Porta *et al.*, 2003). nr = no reportado.

Los niveles de concentración de metales pesados en el suelo estudiado se consideraron adecuados o normales y quedaron muy por debajo de los límites máximos permisibles con todos los tratamientos aplicados (Cuadro 6.7), hubo diferencias significativas entre tratamientos por efecto de adición de biosólidos para el Fe, Zn y Cd, el incremento en la concentración del suelo de los dos primeros es benéfico para los cultivos, ya que éstos son nutrientes esenciales para ellos, en cuanto al Cd, aunque hubo incrementos significativos con la dosis mas alta su concentración quedó muy lejos del límite máximo permisible para considerarse como tóxicos (Kabatas-Pendias y Pendias, 2000).

Cuadro 6. 7 Metales pesados en el suelo despues de tres meses de incorporados los biosólidos y biomasa de pasto Ballico.

Tratamientos	Fe	Zn	Mn	Cu	Pb	Ni	Cd	Biomasa
t ha ⁻¹	-----mg kg ⁻¹ -----							t ha ⁻¹
0	6.68d	1.34d	2.37a	1.93a	2.66	1.28a	0.15b	5.77 c
0°	8.85d	1.33d	2.68a	2.94a	2.93a	0.62a	0.15b	6.77 bc
20	10.15dc	3.9cd	2.41a	2.99a	2.58a	1.88a	0.18b	7.10 bc
40	10.12bc	6.0bc	3.61a	3.92a	2.92a	1.58a	0.16b	6.83 bc
80	12.45b	6.26bc	2.57a	2.48a	2.77a	1.24a	0.20ab	7.32 abc
120	11.75b	7.52b	2.71a	2.48a	2.62a	1.08a	0.19ab	7.28 abc
160	13.73ab	8.91ab	3.10a	4.16a	2.84a	1.18a	0.21ab	8.96 a
200	15.28a	11.73a	3.82a	4.17a	2.89a	1.18a	0.24a	7.70 ab
Interpretación ¹	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Adecuado	Normal	Normal	Normal	—
LMP _S ² (mg kg ⁻¹)	nr	300	4000	100	200	100	7.0	—

Valores en la misma columna con diferente letra son estadísticamente diferentes (Tukey, $\alpha \leq 0.05$); °Fertilización química (90-60-00). ¹NOM-021-SEMARNAT-2000. ²LMP_S = límite máximo permisible para suelos agrícolas (Kabatas-Pendias y Pendias, 2000).³ nr = no reportado.

La baja aportación de los biosólidos de metales pesados al suelo, se debe a varios factores: el pH alcalino del suelo disminuye la solubilidad de los metales pesados y éstos se precipitan como fosfatos, carbonatos, óxidos e hidróxidos insolubles (FeOOH , $\text{Fe}(\text{OH})_3$, $\text{Zn}(\text{OH})_2$, MnO_4 (Shtangeeva, 2005), el alto contenido de materia orgánica en los biosólidos (63%), disminuye la biodisponibilidad de los metales pesados por la adsorción y formación de complejos organometálicos estables (Shuman, 1999).

En cuanto al rendimiento de pasto ballico no hubo efectos negativos por metales pesados, por el contrario, se encontraron incrementos significativos (55.3% y 33.5%) con respecto al testigo con las dosis mayores de biosólidos (cuadro 7).

6.4. Conclusiones

La aplicación de dosis crecientes de biosólidos al suelo de la parcela experimental no presentó efectos negativos en cuanto a las concentraciones de metales pesados en suelos y plantas, pero incrementó el contenido de sales solubles, sin llegar a afectar el rendimiento del cultivo.

Con dosis de biosólidos de 120 t ha^{-1} en este tipo de suelos se llegó a concentraciones de sales que podrían reducir el rendimiento de la mayoría de cultivos.

Se puede dar un uso agrícola a los biosólidos analizados en el área de estudio, sin riesgo de contaminación por metales pesados, pero condicionado al control del aporte de sales solubles por los mismos, para evitar salinización y degradación del suelo.

6.5. Literatura Citada

AYERS, R. S. y WESTCOT, D. W. 1987. La calidad del agua en la agricultura. Estudio FAO Riego y Drenaje N° 29. FAO. Roma, Italia.

CALIFORNIA PLANT HEALTH ASSOCIATION, 2004. Manual de fertilizantes

- para cultivos de alto rendimiento. Limusa. México.
- CASTELLANOS, J. Z.; UVALLE, B. J. X. y AGUILAR, S. A. 2000. Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. 2ª Edición. Colección INCAPA. Guanajuato, México.
- CHANDRA, K.S. AND PRASAD. M .N. V. 2005. Risk Assessment, Pathways, and Trace Element Toxicity of Sewage Sludge-Amended Agroforestry and Soils. *In*: Prasad, M.N.V.; K.S. Sajwan and R. Naidu. (Eds.). Trace Element in the Environment. Boca Raton, FL. USA.
- CONAGUA. 2008. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de aguas residuales en Operación Diciembre de 2007. Comisión Nacional del Agua.
- CSIZINSKI, A. A. 1986. Influence of total soluble salt concentration on growth and elemental concentration of winged bean seedlings (*Psophocarpus tetragonolobus* L.). *Commun. Soil Sci. Plant anal.* 17: 1009-1018.
- DE BROWERE, K. AND SMOLDERS, E. 2006. Yield Response of crops amended whit sewage sludge in the fieldis more affected by sludge properties than by final soil metal concentration. *European Journal of Soil Science.* 57: 858-867
- EPA, 2000. Aplicacion de Biosólidos al terreno. Parte1. En: Folletos Informativos de la EPA. United Estates Enviromental Protection Agency. Office of Water, Washington, D.C.
- GAMRASNI, M. A. 1985. Aprovechamiento agrícola de aguas negras urbanas. Editorial Limusa. México.
- GEORGE, T.; SINGLETON, P. W. AND BOHLOOL, B. B. 1988. Yield, soil nitrogen uptake, and nitrogen fixation by soybean from maturity groups grown at three elevation. *Agronomy J.* 80: 563-567.
- INEGI, 2009. "Estadísticas a propósito del día mundial del agua" Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 22 de marzo de 2009. México, D.F.
- JUMBERI, A.; YAMADA M.; YAMADA S. AND FUGIYAMA, H. 2001. Salt tolerance of Grain Crops in relation to Ionic Balance and Ability to Absorb Microelements. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 47 (4), 657-664.
- JURADO, P.; T. ARREDONDO, E. F.; OLALDE, V. y FRÍAS, J. 2006. Efecto de los Biosólidos Sobre la Humedad y los Nutrimentos del Suelo y La

- Producción de Forraje en pastizales Semiáridos. *Terra Latinoamericana* 25: 211-218.
- KABATAS-PENDIAS, A. y PENDIAS, H. 2000. Trace elements in soils and plants. CRC Press. USA. P.432
- LOVELL, B. 1996. Aplicación en suelos de biosólidos de drenaje para la producción de cosechas. Factsheet. Orden Núm. 95-069. Notario 8 p.
- MAAS, E. V., AND HOFMAN, G. J. 1977. Crops salt tolerance Current assessment. *J. Irrig. Drain. Div.* 103: 115 – 134.
- MASS, E. V. 1984. Salt tolerance of plants. In: *The handbook of plant science in agriculture*. B. R. Christie (ed). CRC Press, Boca Raton, Fla. USA.
- MUNNS, R. AND TERMAAT, A. 1986. Whole-plant Responses to salinity. *Aust. J. Plant Physiol.* 13, 143-160
- NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. *Diario Oficial de la Federación*. México. Publicada el 13 de agosto de 2003.
- NORMA OFICIAL MEXICANA, NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. México. Publicada el 31 de diciembre de 2002.
- NEBEL, B. AND WRIGHT, R. T. 1999. *Ciencias Ambientales “Ecología y Desarrollo Sustentable”* Pearson. México. 212-243.
- NYAMANGARA, J. AND MZEZEWA. J. 1999. The effect on long- term sewage sludge application on Zn, Cu, Ni and Pb levels in a clay loam soil under pasture grass in Zimbabwe. *Agriculture Ecosystems and Environment* 73: 199-204.
- OBERLE, S. L. AND KEENEY, D.R. 1994. Interaction of Sewage Sludge with Soil-Crop-Water Systems. . In C. E. Clapp, W.E. Larson, and R.H. Dowdy (Ed.) *Sewage Sludge: Land Utilization and the Environment*. ASA.CSSA. SSSA. Madison. WI.
- ORTIZ. H. L.; GUTIÉRREZ, R. M. y SÁNCHEZ, S. E. 1995. Propuesta de Manejo de los Lodos Residuales de la Planta de Tratamiento de la Ciudad

- Industrial del Valle de Cuernavaca, Estado de Morelos, México. Rev. Int. Contam. Ambient. 11 (2): 105-115.
- OUDEH, M.; KHAN, M. AND SCULLION, J. 2002. Plant accumulation of potentially toxic elements in sewage sludge as affected by soil organic matter level and mycorrhizal fungi. Environmental Pollution. 116: 293-300.
- PORTA, C. J.; ACEVEDO M. y ROQUERO, C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª Edición. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- SHING, R.P. y AGRAWAL. M. 2007. Effects of sewage sludge amendment on heavy metal acumulation and cosequent respond of Beta vulgaris plants. Chemosfere. 67: 2229-2240.
- SHTANGEEVA, I. 2006. Phytoremediaton of trace element contaminated soil whit cereal crops: Role of fertilizersand bacteria on bioavailability. . In: Prasad, M.N.V., K.S. Sajwan and R. Naidu. (Eds.). Trace Element in the Environment. CRC. Boca Raton, FL. USA.
- SHUMAN, L.M. 1999. Effect of organic waste amendmets on Zn adsorption by two soils. Soil Science. 164: 97-205.
- TAMOUSDIDIS, E.; PAPADOPOULS, I.; TOKATLIDIS, I.; ZOTIS S. AND MABROPOULOS, T. 2002. Wet sewage sludge application effects on soil properties and element content of leaf and root vegetables. J.Plant Nutrition. 25 (9):1941-1955
- USEPA, 1993. Standards for the Use or Disposal of Sewage Sludge (40 Code of Federal Regulations Part 503). Washington D. C., U. S. Enviromental Protection Agency.
- SAS. 1995. ANOVA. In: SAS User Guide: Statistics. Cary, N.C. pp: 113-138.

CAPITULO VII

METALES PESADOS EN SUELOS MEJORADOS CON BIOSÓLIDOS Y RENDIMIENTO DE CEBADA

Resumen

En la planta de tratamiento de aguas residuales “El Niágara” de Aguascalientes, México, se generan aproximadamente $160 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ de biosólidos que se aplican en parcelas aledañas a la planta con posibles riesgos de contaminación por metales pesados. Se colectaron muestras de biosólidos en diferentes épocas del año (secano y lluvias), y de suelos de la zona de estudio para determinar sus concentraciones de metales pesados (Fe, Cu, Mn, Pb, Cd, Ni y Zn). Se analizó la variación de estos metales pesados en los biosólidos y su efecto al aplicarlos en un suelo representativo de la zona (calcimórfico con pH de 8.5), con la finalidad de determinar la cantidad adecuada a aplicar sin rebasar los límites máximos permisibles de metales pesados, La aplicación de biosólidos disminuyó el pH del suelo e incremento su contenido de materia orgánica. Las concentraciones de cada metal en biosólidos no superaron los límites máximos permisibles; en el suelo se incrementaron pero tampoco se rebasaron los límites permisibles, por lo que se pueden utilizar como abonos y como mejoradores en estos suelos.

Palabras clave: Aguas residuales, biofertilizantes, contaminación

7.1. Introducción

Con el tratamiento de las aguas residuales se producen diariamente toneladas de lodos residuales (Biosólidos), los cuales en algunos lugares son una buena fuente de nutrimentos para las plantas y un buen material para mejorar el suelo; en otros son vistos como un material indeseable, ya que también contienen componentes considerados como nocivos para el ambiente (Chandra y Prasad, 2005) . El destino final de estos materiales es una de las mayores preocupaciones ambientales en el mundo, la aplicación al suelo es una de las principales alternativas de su disposición (Singh y Agrawl, 2008).

El contenido de metales pesados en los Biosólidos es el principal factor que restringe su uso en la agricultura ([Chandra y Prasad 2005](#); [De Brouwere y Smolders, 2006](#)), pero éste varía de acuerdo a la región en que se localice la planta de tratamiento de aguas residuales y al origen de éstas. En ECCACIV, planta que depura aguas industriales y domésticas, el Zinc es el metal pesado más abundante que resultó un factor limitante para la aplicación de estos lodos en campos agrícolas ([Ortiz et al., 1995](#)).

A pesar de las buenas características agronómicas que presentan los biosólidos, algunos de ellos no pueden ser utilizados en la agricultura ya que contienen diferentes tipos de sustancias que en concentraciones superiores a ciertos niveles y en determinadas condiciones del medio pueden producir efectos tóxicos sobre los vegetales y las personas o animales que los ingieran o contaminar los suelos y las aguas subterráneas. Debido a la naturaleza heterogénea de los lodos residuales producida por los diferentes tratamientos y las variaciones estacionales, se requieren análisis químicos para determinar el contenido de nutrientes y metales pesados antes de aplicarlos al [suelo \(Singh y Agrawl, 2008\)](#).

En la planta de tratamiento de aguas residuales “El Niágara” de Aguascalientes, México, se generan aproximadamente $150-170 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ de Biosólidos que se aplican en parcelas aledañas a la planta, con posibles riesgos de contaminación de suelos y plantas por metales pesados.

7.1. Objetivo General

En esta investigación se determinó el contenido de metales pesados en los biosólidos generados en esa planta de tratamiento de aguas residuales y su efecto al aplicarlos a un suelo representativo de la región cultivado con cebada.

7.2. Materiales y Métodos

En diferentes épocas del año (2008), de marzo a mayo (sin lluvias) y de junio a julio (con lluvias), en diferentes fechas se tomaron muestras al azar de biosólidos en el momento en que estaban siendo trasladados de la planta a los

sitios de confinamiento o parcelas. Se secaron al aire libre, a la sombra. Una vez secas, se trituraron con un mazo de madera y se tamizaron (malla 10) y se determinó el contenido de metales pesados totales y extractables (Fe, Cu, Mn, Zn, Pb, Ni y Cd). Los primeros mediante digestión con una mezcla diácida ($H_2SO_4-HClO_3$) y los segundos fueron extraídos con una disolución de DTPA.

En una parcela aledaña a la planta de tratamiento, donde se incorporaron $120 t ha^{-1}$ en base seca de biosólidos, se colectaron muestras de suelo (0-20 cm), antes y después de 12 meses de la aplicación de biosólidos. En suelo se determinó, pH, materia orgánica y metales pesados extractables con DTPA los cuales se cuantificaron por espectrometría de absorción atómica.

7.2.1 Caracterización química de los biosólidos

Para la determinación de los metales pesados (Fe, Cu, Mn, Zn, Pb, Cd y Ni) extractables se usó una disolución de ácido di-etilen, tri-amino, penta-acético (DTPA), mientras que para cuantificar la concentración total de estos elementos se realizó una digestión con una mezcla diácida ($H_2SO_4-HClO_3$). En ambos casos, los metales pesados se cuantificaron mediante espectrofotometría de absorción atómica.

7.2.2 Muestreo del suelo

Las muestras de suelo se colectaron en tres parcelas aledañas a la planta de tratamiento de aguas residuales en Aguascalientes, donde aún no se aplicaban biosólidos y, según los productores de la zona, presentaban características de fertilidad alta, media y baja. Las muestras se tomaron a una profundidad de 0-20 cm, se secaron a la sombra y posteriormente se disgregaron los terrones y se pasaron por un tamiz de malla 10.

7.2.3 Caracterización química del suelo

A las muestras de suelo se les determinó la concentración de metales pesados extractables (Fe, Cu, Mn, Zn, Pb, Cd y Ni), como se indica para los biosólidos, y otros elementos (Ca, Mg, Na, K, P, N inorgánico, B), al igual que pH,

capacidad de intercambio catiónico y contenido de materia orgánica (**NOM-021-SEMARNAT-2000**).

7.2.4 Establecimiento del experimento en invernadero

Para establecer el experimento en invernadero se utilizaron macetas con 3 kg de cada suelo, adicionado de diferentes dosis de biosólidos, en las proporciones que los productores del área de estudio acostumbran aplicar. Dado que los biosólidos se aplican a los terrenos en base húmeda, se calculó la cantidad equivalente en materia seca, tomando en cuenta que 80% de éstos es agua (Cuadro 7.1).

Cuadro 7.1. Dosis de biosólidos correspondiente a cada tratamiento.

Biosólidos	Tratamiento (t ha ⁻¹)							
	1	2	3	4	5	6	7	8
Base húmeda	0	50	100	200	400	600	800	1000
Base seca	0	10	20	40	80	120	160	200

La cantidad de biosólidos a aplicar, se calculó a partir de la densidad aparente de cada suelo, de la siguiente manera: Se consideró que una hectárea (100 m x 100 m) y con una profundidad de 0.20 m (capa arable), tiene un volumen de 2000 m³. Se sustituyó este valor en la ecuación de Densidad aparente ($D_a = m/v$) y se calculó la masa de una hectárea de suelo (Cuadro 7.2).

Cuadro 7.2. Densidad aparente y masa calculados para cada tipo de suelo.

Tipo de suelo	Densidad aparente (t/m ³)	Masa (Toneladas)
Suelo 1	1.19	2380
Suelo 2	1.28	2560
Suelo 3	1.16	2324

Con los valores de masa de cada suelo y la cantidad de biosólidos en base seca para cada tratamiento, se obtuvieron las cantidades de biosólidos para cada maceta como se muestra en el siguiente ejemplo:

Suelo 1 con 10 t ha⁻¹ de biosólidos.

$$\begin{array}{l} 2,380,000,000 \text{ g suelo} \text{ -----} 10,000,000 \text{ g de biosólidos} \\ 3,000 \text{ g suelo} \text{ -----} x \\ x = 0.012605 \text{ kg de biosólidos} = 12.6 \text{ g de biosólidos / maceta} \end{array}$$

En el Cuadro 7.3 se muestran las cantidades de biosólidos en base seca para cada tratamiento y tipo de suelo, los cuales se calcularon como se muestra en el ejemplo anterior.

Cuadro 7.3. Cantidad de biosólido seco (g) aplicado a cada maceta con 3 kg de suelo

suelos	Tratamientos (t ha ⁻¹)							
	0	10	20	40	80	120	160	200
Suelo 1	0	12.6	25.2	50.4	100.8	151	201.6	252
Suelo 2	0	11	23	46	93	140	187	234
Suelo 3	0	12	25	51	103	154	206	258

Cada tratamiento se preparó mezclando suelo con la cantidad de biosólidos indicada en el Cuadro 7.3, con tres repeticiones. Se humedecieron a capacidad de campo y un día después se sembraron 40 semillas de cebada en cada maceta, a una profundidad de 1.5 a 2 cm. Dos semanas después de la emergencia, se dejaron 20 plantas por maceta.

Los tratamientos se distribuyeron completamente al azar en dos bancales del invernadero, manteniéndolos a capacidad de campo hasta una semana antes de la cosecha. Durante el experimento se hicieron tres muestreos del suelo, el primero a un mes después de la siembra; el segundo a los dos meses y el tercer después de haber cosechado, cuatro meses y medio después de la siembra.

La cosecha se realizó el 28 de mayo, separando paja, granos y paja de espigas. En cuanto a la raíz, solo se tomó una muestra por cada maceta para su análisis en laboratorio. Todos estos materiales se lavaron con agua corriente y posteriormente con agua destilada. Se secaron a 70 °C hasta peso constante

y se molieron (malla 40). Para determinar la concentración total de los elementos: Fe, Cu, Mn, Pb, Cd, Ni y Zn, los materiales antes mencionados se digitaron con 4 mL de mezcla diácida (H₂SO₄-HClO₃) y se cuantificaron mediante espectrofotometría de absorción atómica.

7.3. Resultados y Discusión

7.3.1 Metales Pesados en los Biosólidos

El Fe, Mn, y Pb presentaron la mayor variación en la concentración de metales pesados totales en los biosólidos colectados en diferentes fechas, obteniéndose los valores más bajos de Fe, Mn y Cd en el mes de abril, y el Pb en mayo y julio. Mientras que los valores mas altos se encontraron en el mes de mayo para el Mn, y Cd y Fe en junio (Cuadro 7.4), la época de secano o de lluvias no tuvo influencia en el contenido de los metales pesados, excepto en el Fe, ya que éste se incrementó en aproximadamente 58% cuando llovió.

Cuadro 7.4. Concentración de metales pesados (totales), en biosólidos colectados en diferentes fechas en la planta de tratamiento de aguas residuales

Fecha	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Cd	Ni
	mg kg ⁻¹						
1: 20-marzo	3088	822	292	1194	115	19	45
2: 30-marzo	3705	733	273	1290	144	14	50
3: 3-abril	2470	866	292	1290	115	18	47
4: 4-abril	3088	1066	156	1252	173	12	48
5: 17-abril	2779	933	175	1107	115	13	49
6: 27-abril	2779	1088	234	1155	115	15	47
7: 5-mayo	2779	1000	253	1242	86	15	51
8: 15-mayo	3088	1044	195	1338	115	14	48
9: 20-mayo	3088	1088	253	1396	115	12	51
10: 1-junio	4323	800	370	1300	115	19	43
11: 15-junio	4323	888	331	1117	115	15	44
12: 2-julio	5558	955	331	915	115	14	42
13: 22-julio	5250	933	312	1184	87	14	43
CV	28.0	12.3	24.1	10.2	18.6	15.6	6.4

CV: Coeficiente de variación

En relación a los metales pesados extractables con DTPA la mayor variación en la concentración en los biosólidos la presentaron Pb, Cu, Mn y Cd, el valor mas bajo fue encontrado en mayo para Pb y Mn, en junio para Cu y en abril Cd.

En cuanto a los valores más altos los presentaron en abril Mn y en mayo Cu y Cd (Cuadro 7.5).

La concentración de los metales pesados está dentro de los límites considerados como máximos permisibles en biosólidos (LMPL) para uso agrícola (Porta, 2003; NOM-004-SEMARNAT-2002). Relacionando la concentración total de metales pesados con el LMPL en México, son considerados como excelentes según la NOM-004-SEMARNAT-2002; el Cu es el metal que más se acerca al LMPL con un 62.68%, seguido del Zn (43.36%), Cd (42.8%), Pb (39.2%), Mn (20.44%) y Ni (11.14%), aún cuando en la concentración total de metales pesados en biosólidos, se encontró la siguiente secuencia Fe > Zn > Cu > Mn > Pb > Ni > Cd; en cuanto a los metales extractables, la secuencia fue Zn > Fe > Cu > Mn > Ni > Pb > Cd.

Cuadro 7.5. Concentración de metales pesados (extractables), en muestras de biosólidos colectadas en diferentes fechas en la planta de tratamiento de aguas residuales El Niágara.

Fecha	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Cd	Ni
	(mg kg ⁻¹)						
1: 20-marzo	83	30	24	446	14	1.2	16
2: 30-marzo	83	18	19	423	23	1.2	18
3: 3-abril	93	22	16	458	15	1.3	17
4: 4-abril	91	32	26	404	19	1.3	16
5: 17-abril	82	37	19	418	12	1.2	15
6: 27-abril	60	16	32	397	10	0.6	11
7: 5-mayo	77	26	20	472	10	1.1	19
8: 15-mayo	87	22	21	446	11	1.0	18
9: 20-mayo	80	40	15	465	17	1.2	17
10: 29-mayo	90	32	30	464	10	1.5	14
11: 15-junio	88	24	25	467	16	0.9	13
12: 2-julio	58	15	30	358	25	0.7	10
13: 22-julio	92	19	17	432	15	1.1	16
CV	13.7	31.3	24.0	7.8	32.4	23.1	17.6

CV: Coeficiente de variación

El Fe total y el Zn extractables son los metales que se encontraron en mayor concentración en los biosólidos, mientras que los más bajos fueron Ni y Cd

(totales y extractables). Esto representa una ventaja para su utilización puesto que el Fe y Zn son elementos esenciales para las plantas, mientras que Ni y Cd son elementos tóxicos.

Cuadro 7.6. Concentración media de metales pesados en biosólidos.

	Fe	Cu	Mn	Zn	Pb	Cd	Ni
Total (mg kg ⁻¹)	3563	940.	267	1214	118	15	47
Extractables (mg kg ⁻¹)	82	26	23	435	15	1.1	16
LMPL ^a (mg kg ⁻¹)	NR	1750	1307	4000	1200	140	400
LMPL ^b (mg kg ⁻¹) E	NR	1500	NR	2800	300	35	420
LMPL ^b (mg kg ⁻¹) B	NR	4300	NR	7500	840	85	420
PRR (%)	2.3	2.7	8.5	35.8	13.0	7.4	33.3

LMPL^a = Límite Máximo Permitido en lodos para uso agrícola en España (Porta, 1999); LMPL^b (E: Excelente; B: Bueno)= Límite Máximo Permitido en lodos para uso agrícola en México (NOM-004-ECOL-2001); NR = No reportado; PRR = Porcentaje Relativo de Recuperación.

El porcentaje relativo de recuperación (PRR) o proporción de concentración extractable con respecto a su concentración total, se puede considerar como un indicador de la concentración activa del metal; o sea, es la porción que va a ser más reactiva al mezclar biosólidos con suelo, pues el resto corresponde a la fase mineral que únicamente se puede solubilizar en condiciones ácidas (Ortiz *et al.*, 1995).

El Zn presentó el PRR más alto (33.7-39.1), es decir, del 33.7 al 39.1% de su concentración total está disponible y puede reaccionar con los componentes del suelo o ser aprovechado por las plantas, pudiendo representar un riesgo para ellas o sus consumidores si se acumula en cantidades excesivas. El Cu, cuya concentración se acerca más a su LMPL (62%), mostró un intervalo en el PRR de 2.06 a 3.65 por lo que su reactividad en el suelo será poca, al igual que el Fe (PRR = 1.6 a 2.3). Estos elementos no son potencialmente tóxicos como Cd, Pb y Ni, que aunque la concentración de los dos primeros es relativamente cercana a sus LMPL (42.8 % y 39.2 %, respectivamente), por su bajo PRR (5.08 a 7.9 y 11.4 a 14.5, respectivamente), no representan riesgo alguno.

7.3.2 Características de los Suelos

De acuerdo con la NOM-021-SEMARNAT-2000, los tres suelos estudiados muestran altos contenidos de N y P (Cuadro 7.7), lo cual pone de manifiesto que continuamente se les aplican estos elementos mediante fertilizantes

inorgánicos. Su alto contenido de Ca se relaciona con el tipo de suelo, ya que en la región de estudio predominan suelos calcáreos.

Cuadro 7.7. Características de fertilidad de los tres tipos de suelo de la zona de influencia de la planta de tratamiento El Niágara.

	pH	MO %	N -----	P -----	K -----	Ca mg kg ⁻¹	Mg -----	Na -----	B -----	CIC Cmol kg ⁻¹
Suelo 1	8.5	2.6	39	21	560	2480	191	221	5.5	16.3
Suelo 2	8.6	2.2	42	25	412	2400	97	136	4.9	14.4
Suelo 3	8.5	2.7	50	32	817	5040	233	327	6.6	30.6

Según los productores de la zona de influencia de la planta de tratamiento, por la productividad agrícola que obtienen en estos suelos, los consideran de fertilidad alta (Suelo 1), media (Suelo 2) y baja (Suelo 3). Aunque los tres suelos tienen altas concentraciones de N y P su CIC se encuentra dentro de la clase baja, excepto el suelo 3 (CIC alta). La reserva nutrimental es abundante cuando la CIC es mayor de 25 Cmol₍₊₎kg⁻¹ de suelo ([NOM-021-SEMARNAT-2000](#)). En lo que respecta al Suelo 3; su baja fertilidad se le puede atribuir a su alta concentración de Ca y que es un suelo somero (20 cm de profundidad). El alto contenido de Ca no permite la disponibilidad de algunos nutrientes para los cultivos por su antagonismo, principalmente con B, Cu, Fe, Mn, Pb, Ni y Zn (Kabata y Pendias, 2001).

7.3.3. Efecto de la aplicación de biosólidos en pH y contenido de MO en los tres suelos

Los tres tipos de suelos presentan características alcalinas, mientras que los biosólidos aplicados son ligeramente ácidos. En las gráficas se observa claramente la influencia de estos últimos en la disminución del pH de los tres suelos (Figura 7.1), el cual se encuentra más marcado en el primer muestreo; en el segundo y tercero éste vuelve a tener un leve ascenso debido a diferentes factores como son la absorción de nutrientes por las plantas y a la mineralización de la materia orgánica. Cabe mencionar que el suelo tiene una capacidad de amortiguamiento, que para todo ecosistema se le conoce como resiliencia, lo que significa que después de una perturbación tiende a recuperarse hasta llegar a su estado inicial.

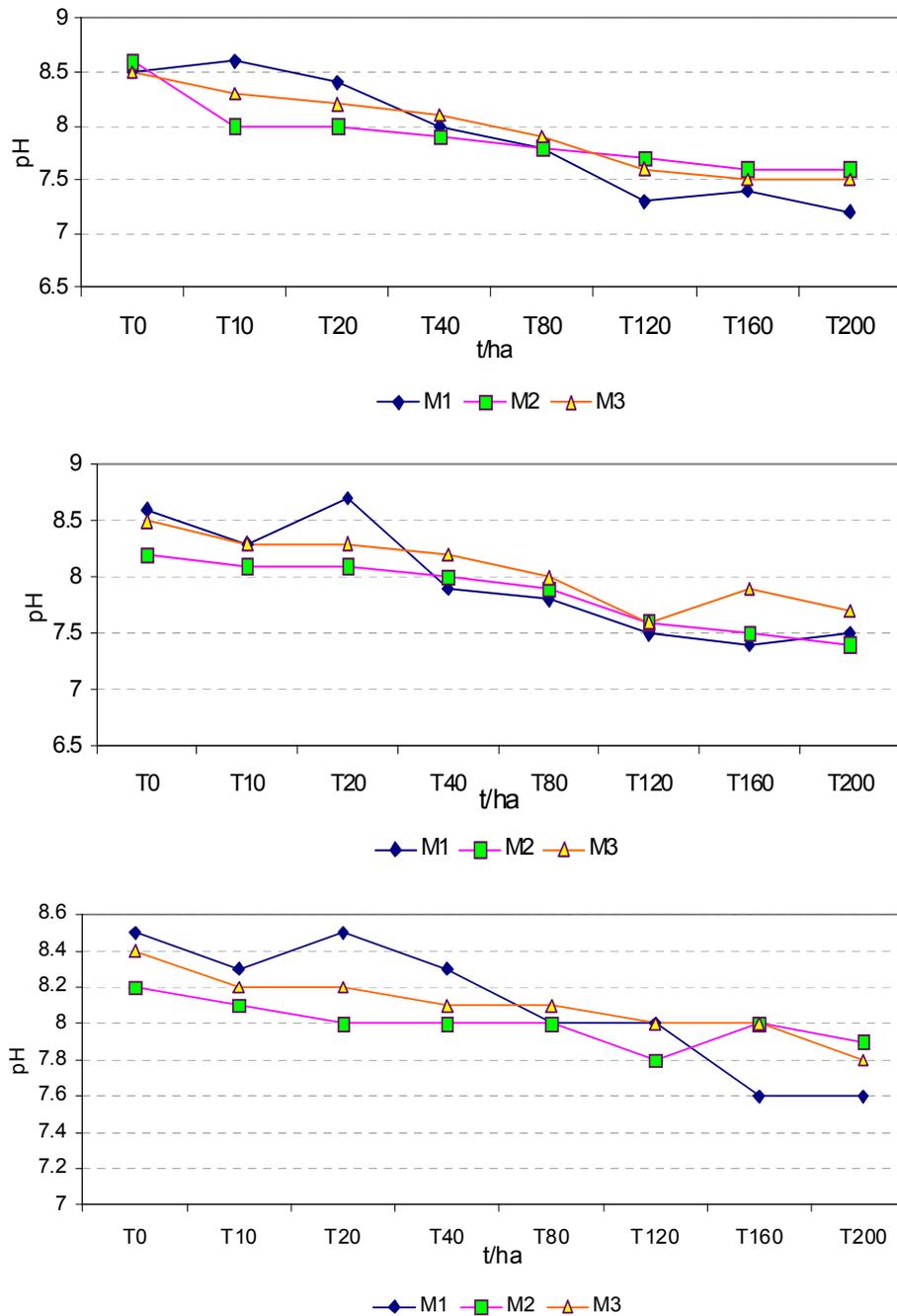


Figura 7.1. Variación del pH en los Suelos 1, 2 y 3 en diferentes fechas (M1= un mes después de la siembra, M2= dos meses después de la siembra y M3= cuatro meses después de la siembra) y dosis de biosólidos (T= Tratamientos con 0, 10, 20, 40, 80, 120, 160 y 200 t ha⁻¹).

En la Figura 7.2, se presenta la variación en la concentración de materia orgánica con cada dosis de biosólidos y para cada muestreo y tipo de suelo. Observando la de pH (Figura 7.1) y la de los metales (Fe, Cu, Mn, Pb, Cd, Ni y Zn; Figura 7.3 correspondientes a los Suelos 1, 2 y 3); existe una relación

lógica entre estas características, ya que al aumentar las dosis de biosólidos, el pH baja y el contenido de materia orgánica aumenta dando como resultado una mayor disponibilidad de nutrientes para la planta, ya que menor pH implica más solubilidad de metales; mayor contenido de materia orgánica más mineralización y aporte de metales, aunque también los puede retener.

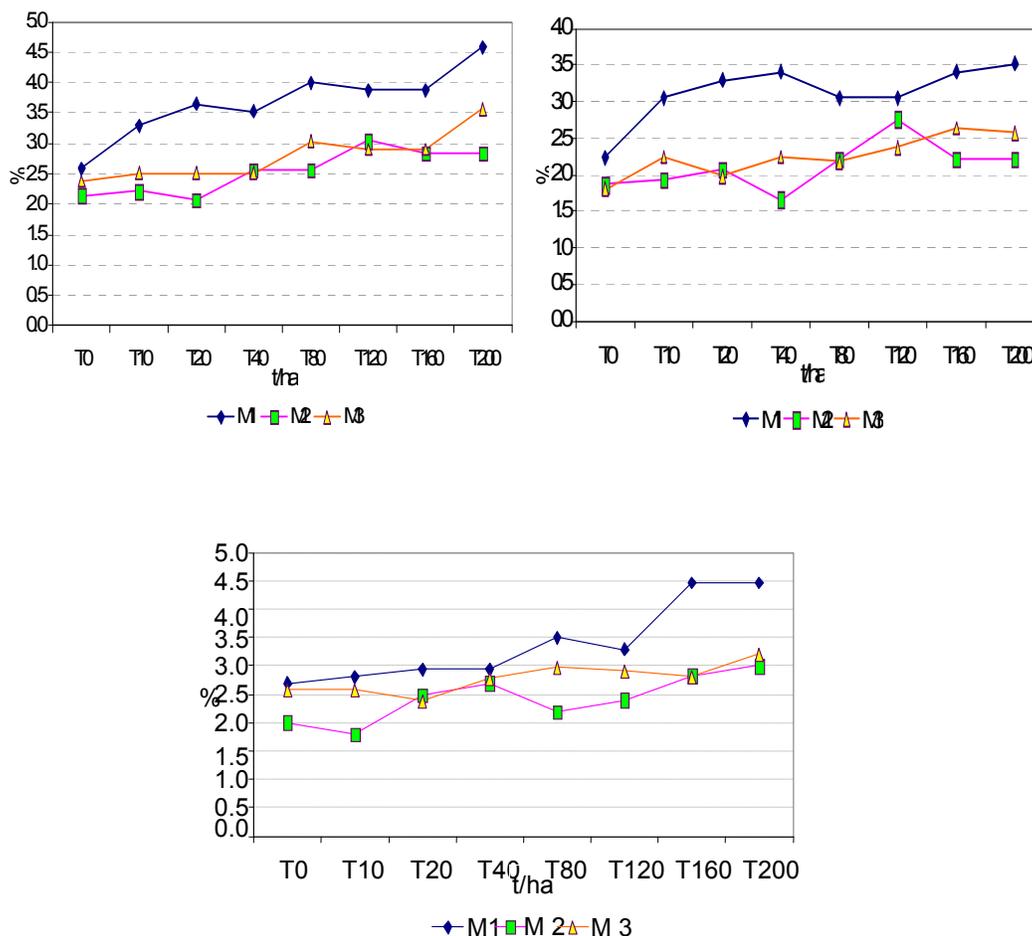


Figura 7.2. Variación en la concentración de **materia orgánica** en los Suelos 1, 2 y 3 en diferentes fechas (M1= un mes, M2= dos meses y M3= cuatro meses después de la siembra) y dosis de biosólidos (T= Tratamientos con 0, 10, 20, 40, 80, 120, 160 y 200 t ha⁻¹).

7.3.4. Efecto de la aplicación de biosólidos en el contenido de metales pesados en los tres suelos

7.3.4.1. Suelo 1

Las concentraciones de los metales pesados en los suelos estudiados se encuentran muy por abajo de los LMPS propuestos por [Kabata y Pendias](#)

(2001) siendo el Cu el metal con la concentración más alta (5%) con respecto a su límite permitido. Sin embargo, con la adición de las diferentes dosis de biosólidos (un mes después de ser aplicado), las concentraciones de Cu, Mn, Pb, Cd, Ni y Zn se incrementaron notoriamente sin rebasar los LMPS, mientras que el Fe presentó un mínimo incremento con las dosis aplicadas (Figuras 7.3 y 7.4).

El incremento en la concentración del Fe con respecto al tratamiento 0 solo se presentó en los tratamientos con 20 y 40 t ha⁻¹ (17.9 y 34%, respectivamente), a partir del cual empieza a disminuir hasta presentar 0% de incremento por efecto de solubilidad pH y secuestro por MO. Algunos metales presentaron comportamientos similares, como es el caso del Cu, Mn, Pb y Cd que incrementaron sus concentraciones hasta los tratamientos con 80 y 120 t ha⁻¹ a partir de los cuales se mantienen más o menos estables o disminuyen hacia el tratamiento con 200 t ha⁻¹. Por otra parte, el Ni mostró un comportamiento extraño, el cual no reflejó un aumento definido, mientras que el Zn fue el único metal que con excepción del tratamiento con 160 t ha⁻¹ presentó un incremento continuo.

En las Figuras 7.3 y 7.4 correspondientes al Suelo 1, se presenta la variación en la concentración de cada metal a través del tiempo, donde se observa que con todas las dosis de biosólidos aplicadas, el Fe, Mn y Pb aumentaron considerablemente su concentración a través del tiempo (a los dos meses: 151.4, 19.8 y 44.4% y a los cuatro meses: 559, 69 y 153.8% en promedio, respectivamente). Caso contrario ocurrió con el Cu, el cual disminuyó en 56% a los dos meses y en 58.6% a los cuatro meses, debido a que su disponibilidad es determinada por el pH, el contenido de materia orgánica (mayor contenido, mayor secuestro del Cu) y de la presencia de iones metálicos como hierro, manganeso y aluminio (Havlin *et al.*, 1999). El mismo autor menciona que a medida que aumenta el contenido de materia orgánica en el suelo, el Cu queda retenido en ella y las plantas no pueden absorberlo. No hay que dejar a un lado el cultivo, cuya demanda en mayor o menor cantidad de estos elementos en sus procesos fisiológicos posiblemente reflejen efectos en los resultados mostrados en las gráficas para cada metal analizado. Esto se puede relacionar

con lo que se observa para Fe (Figura 7.3), en el segundo muestreo mostró una concentración en promedio de 151% superior a la encontrada en el primer muestreo, y en más del 500% hacia el tercer muestreo, es decir, a cuatro meses de incorporados los biosólidos. Cabe mencionar que este elemento es requerido en mayor concentración por el cultivo de cebada en sus primeras etapas de crecimiento **(Reuter y Robinson, 1986)**.

El tiempo, como se mencionó anteriormente, influyó en el contenido de Fe, Mn, Pb y Cu, ya que mostraron correlaciones estadísticamente significativas con este factor ($Pr=0.0001$, 0.0009 , 0.0001 y 0.0014), presentando coeficientes de Pearson de 0.84457 , 0.63315 , 0.81655 y -0.61502 respectivamente; es decir, al paso del tiempo, estos elementos aumentaron su concentración extractable con excepción del Cu que disminuyó; posiblemente estos cambios se deben a la mineralización de la materia orgánica de los biosólidos que permitió la liberación de dichos elementos.

También se encontró una correlación estadísticamente significativa entre las dosis de biosólidos aplicado con Zn y pH, ambos con un $Pr=0.0001$ y coeficientes de Pearson de 0.96609 y -0.89075 , respectivamente; indicando con esto que a medida que se incrementan las dosis de biosólidos, se incrementa también la concentración extractable de Zn (7.9 a 32.9) y el pH tiende a disminuir (de 8.5 a 7.5).

En las Figuras 7.3 y 7.4 se muestran las concentraciones extractables de metales encontradas en las tres diferentes fechas de muestreo en el Suelo 1; sin embargo, hay que recalcar que se estableció un cultivo (cebada), el cual absorbió metales cuyas concentraciones se presentan en los Cuadros 7.8, 7.9, 7.10 y 7.11. Específicamente en el Cuadro 7.8 se puede observar el caso del Fe, donde se presentan las concentraciones que fueron absorbidas y retenidas en la raíz, mostrando poca variación con las dosis de biosólidos, aun así las concentraciones más altas se encontraron en las dosis más altas. El Cu solo mostró un incremento con relación a los tratamientos en la paja; de la misma forma el Pb, solo que éste en la espiga (Cuadros 7.8 y 7.11).

Algunos metales (Mn, Cd y Ni) fueron absorbidos de manera regular o mostrando pocas variaciones con las dosis de biosólidos. Por otra parte, el Zn fue el único metal que incrementó su concentración en las diferentes partes de la planta (raíz, paja, espiga y grano) en relación con las dosis aplicadas (Gráficas 7.8, 7.9, 7.10 y 7.11).

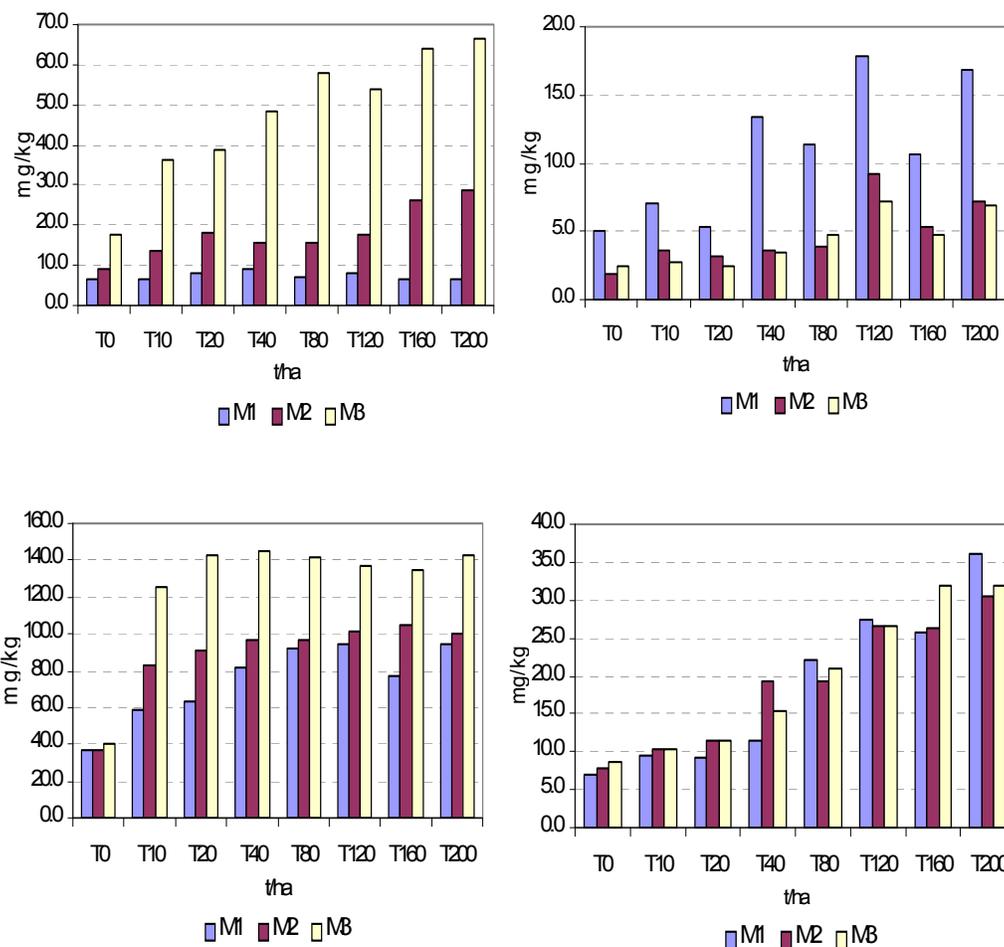


Figura 7.3. Variación en el tiempo de la concentración de **Fe y Cu Mn y Zn** para el Suelo 1 adicionado de diferentes dosis de biosólidos. M1= un mes, M2= dos meses y M3= cuatro meses después de la siembra.

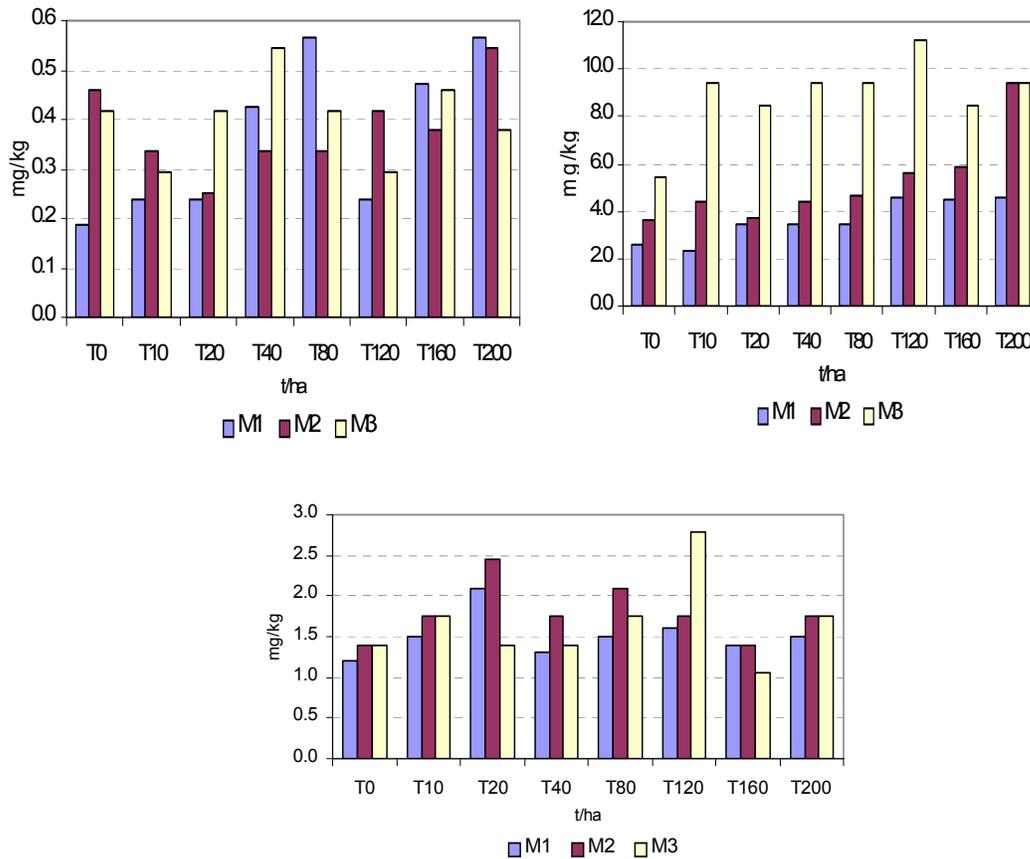


Figura 7.4. Variación en el tiempo de la concentración de Pb y Cd y Ni para el Suelo 1 adicionado de diferentes dosis de biosólidos. M1= un mes, M2= dos meses y M3= cuatro meses después de la siembra.

7.3.4.2. Suelo 2

De la misma forma que en el Suelo 1, nuevamente fue el Cu el metal que presentó el porcentaje más alto (6.9%) con respecto a su límite máximo permisible. Con la aplicación de las diferentes dosis de biosólidos, el Fe no presentó incremento en su concentración, más bien, los tratamientos con biosólidos disminuyeron con respecto al tratamiento 0. En lo que respecta a los demás metales (Cu, Mn, Pb, Cd, Ni y Zn), éstos mostraron un aumento notorio en sus concentraciones (hasta en un 221, 125, 84, 100, 66 y 1146%, respectivamente con las dosis más altas), aunque Mn, Pb y Ni se estabilizaron

en las dosis más altas de biosólidos, es decir, aplicaciones de biosólidos superiores a 120 t ha^{-1} , no tuvieron efecto en la concentración de estos elementos.

Las dosis de biosólidos influyeron en el aumento de la concentración del Cu, Pb, Zn y en la disminución del pH, ya que estadísticamente se encontró una correlación significativa (Pr de 0.0006 para Cu y, 0.0001 para Pb, Zn y pH) con un coeficiente de Pearson de 0.64853, 0.70824, 0.89804 y -0.86055 , respectivamente.

La concentración de algunos metales se vio afectada por otros factores como el tiempo, las dosis de biosólidos, la materia orgánica, el pH y por supuesto, el cultivo de cebada.

En las Figuras Gráficas 7.5 y 7.6 se observa claramente la variación a través del tiempo en la disponibilidad de cada elemento analizado (Fe, Cu, Mn, Pb, Cd, Ni y Zn, respectivamente). En cada gráfica se llega a observar lo que [Hamon et al., \(1999\)](#) denomina “*plateau*”, es decir, con el aumento de las dosis de biosólidos incrementan las concentraciones extractables de metales, pero hasta cierto punto, a partir del cual se mantienen constantes. Esto no ocurrió con el Cu y Cd; este último porque muestra un ligero descenso en su concentración hacia el tercer muestreo y con las dosis más altas, mientras que el Cu como ya se mencionó, fue el que más disminuyó con el tiempo.

De la misma forma que en el Suelo 1, el Cu y la materia orgánica disminuyeron considerablemente su concentración a través del tiempo, presentando una correlación estadística significativa (Pr=0.0005) con coeficientes de Pearson de -0.65849 y -0.65474 , respectivamente. El tiempo también influyó en la concentración del Fe, en donde se encontró una correlación estadística altamente significativa (Pr=0.0001) y un coeficiente de Pearson de 0.81545, es decir, hubo un incremento hacia el tercer muestreo (cuatro meses después de aplicar los biosólidos al suelo), al igual que otros metales analizados, producto de la mineralización de la materia orgánica.

De acuerdo a la secuencia de concentración de metales en el Suelo 2, el Mn fue el metal que presentó los valores más altos en el primero y segundo muestreos, sin embargo el Fe empezó a mostrar valores similares al Mn en el tercero. Esto se debe a que el Mn tiene una mayor disponibilidad en suelos con pH alcalino o cercano a la neutralidad, mientras que el Fe se encuentra más disponible que el Mn a valores bajos de pH (Havlin *et al.*, 1999). Aunque, relacionando nuevamente con el tiempo, es el Fe el metal que en promedio mostró el porcentaje más alto de incremento (313% a los dos meses y 427% a los cuatro meses) con respecto al primer muestreo (a un mes después de la siembra), mientras que el Mn, Pb, Cd, Ni y Zn presentaron porcentajes promedios de 40, 26, 36, 19 y 33% a los dos meses y, 34, 37, 2, 0.8 y 32% a los cuatro meses respectivamente; y fue únicamente el Cu el que se redujo en 59 y 69% a los dos y cuatro meses después de la siembra, respectivamente.

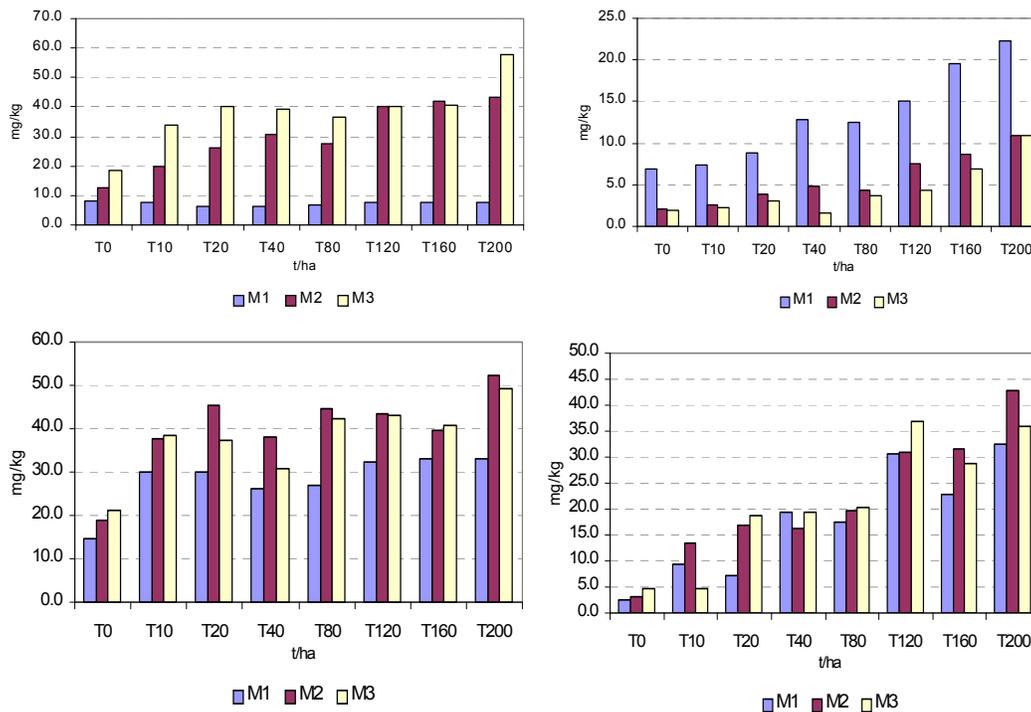


Figura 7.5. Variación en el tiempo de la concentración de **Fe, Cu, Mn** y **Zn** para el Suelo 2 adicionado de diferentes dosis de biosólidos. M1= un mes, M2= dos meses y M3= cuatro meses después de la siembra.

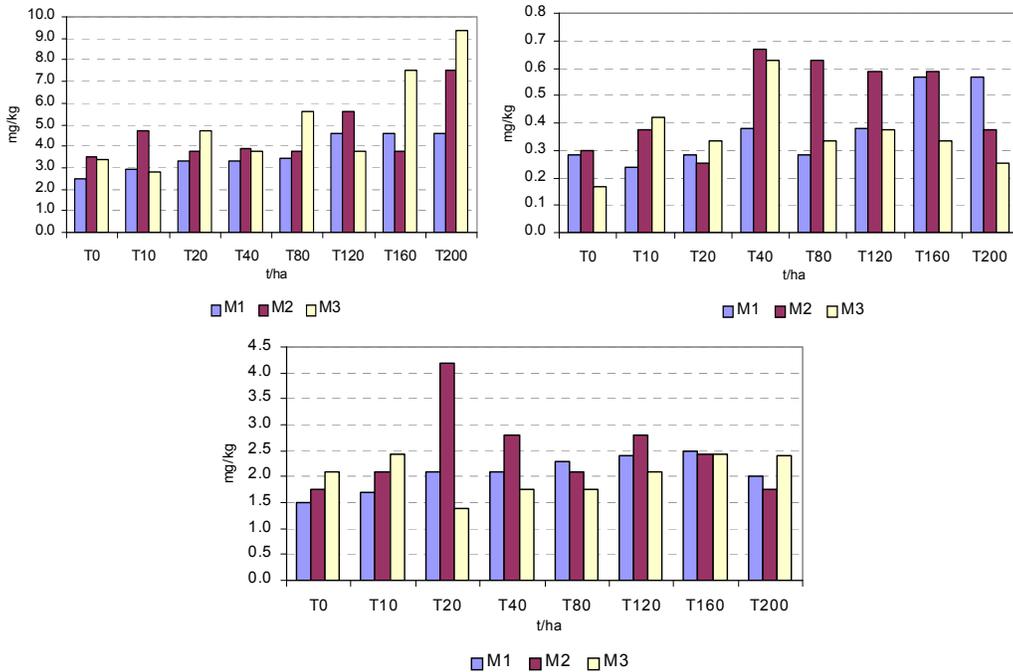


Figura 7.6. Variación en el tiempo de la concentración de **Pb**, **Cd** y **Ni** para el Suelo 2 adicionado de diferentes dosis de biosólidos. M1= un mes, M2= dos meses y M3= cuatro meses después de la siembra.

Los porcentajes indican que el Mn, Cd, Ni y Zn disminuyeron sus concentraciones extractables en el tercer muestreo. La disminución del Zn se puede deber a que el cultivo lo haya absorbido en mayor cantidad en su última etapa de crecimiento, ya que las concentraciones más altas se encontraron en la espiga (Cuadro 7.11). Cabe mencionar que Zn aumentó su concentración conforme a los tratamientos en raíz, paja, espiga y grano, mientras que Fe, Cu y Mn en raíz; Fe y Mn en paja, Cu en grano y espiga (Cuadros 7.9, 7.10, 7.11).

7.3.4.3. Suelo 3

En el Suelo 3, solo el Cd fue el elemento cuya concentración se acercó más al LMPS (4.2%); aun con la aplicación de las diferentes dosis de biosólidos, los metales analizados (Fe, Cu, Mn, Pb, Cd, Ni y Zn) no rebasaron los LMPS

En el primer muestreo, de la misma manera que en el Suelo 1, el Fe se incrementó con las dosis de biosólidos presentando su mayor incremento (45.2%) en el tratamiento con 80 t ha⁻¹, con respecto al tratamiento 0 (testigo). El resto de los metales (Cu, Mn, Pb, Cd, Ni y Zn) presentaron incrementos mas

marcados, hasta en un 604, 354, 84, 133, 75 y 534% respectivamente con las dosis de biosólidos aplicadas, aunque algunos (Cd y Ni) vuelven a estabilizarse en los últimos tratamientos.

El Fe a través del tiempo tuvo un considerable incremento promedio con respecto a los datos del primer mes, 301% a los dos meses y 720% a los cuatro meses después de la siembra (Figura 7.7).

Nuevamente, el caso del Cu con respecto al tiempo se repite, ya que en los tres suelos analizados es el metal que muestra mayor descenso en su concentración, aunque en este Suelo 3, a los cuatro meses después de la siembra muestra un ligero incremento en su concentración (Figura 7.7). Por otra parte, el Mn es el metal que presentó los valores más altos en su concentración, así como los porcentajes de incremento más altos (148% a los dos meses y 203% a los cuatro meses) en relación a los dos suelos anteriores, aun cuando este suelo es el más calcáreo de los tres.

En lo que respecta a Pb, Cd, Ni y Zn, éstos tuvieron un incremento en promedio hacia el segundo muestreo de 128.6, 20.7, 45.2 y 35.2%, respectivamente. En el tercer muestreo se tuvo un incremento menor, incluso el Cd se reduce en 8.6% en promedio con respecto a los datos del primer muestreo.

Los incrementos en la concentración de metales pesados en el suelo a medida que transcurre el tiempo se deben a que al ir mineralizándose los biosólidos van liberando en forma diferencial a estos elementos, así se tiene que en este tercer suelo, la fecha de muestreo presentó correlación estadísticamente significativa con Fe y Mn ($Pr=0.0001$) con un coeficiente de Pearson de 0.86435 y 0.72482 respectivamente, dando a entender con esto que al paso del tiempo estos elementos aumentan su concentración extractable. También los tratamientos influyeron en la concentración de algunos elementos como el Pb y Zn, incluso el pH. Estadísticamente mostraron una correlación significativa (0.0011 para Pb y 0.0001 para el Zn y pH) con coeficientes de Pearson de 0.62335, 0.70867 y -0.79807, respectivamente, indicando que al aumentar las

dosis de biosólidos, estos metales también incrementan, mientras que el pH baja debido a la acidez de los biosólidos.

Las Figuras 7.7 y 7.8 correspondientes a Fe, Cu, Mn, Pb, Cd, Ni y Zn, respectivamente, muestran las variaciones en las concentraciones de cada metal con respecto a las dosis de biosólidos y al tiempo. En algunos tratamientos se observa un aumento en el segundo muestreo y un decremento en el tercero como en el caso del Cu, Pb, Cd, Ni y Zn, aunque el Cu como ya se mencionó anteriormente, tuvo un ligero incremento en el tercer muestreo. Esto se debe al efecto del pH, mineralización de la materia orgánica y a la absorción por el cultivo de cebada, cuya demanda de algunos elementos varía dependiendo de su etapa de crecimiento, según [Reuter y Robinson \(1986\)](#).

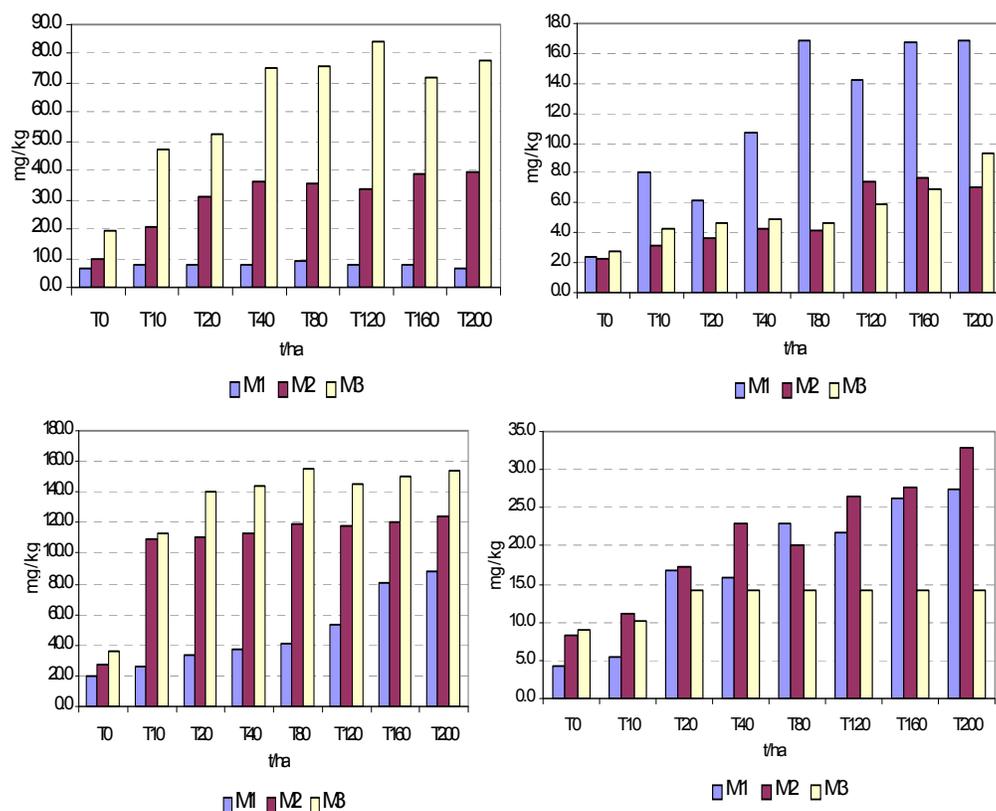


Figura 7.7. Variación en el tiempo de la concentración de **Fe, Cu, Mn y Zn** para el Suelo 3 adicionado de diferentes dosis de biosólidos. M1= un mes después de la siembra, M2= dos meses después de la siembra y M3= cuatro meses después de la siembra.

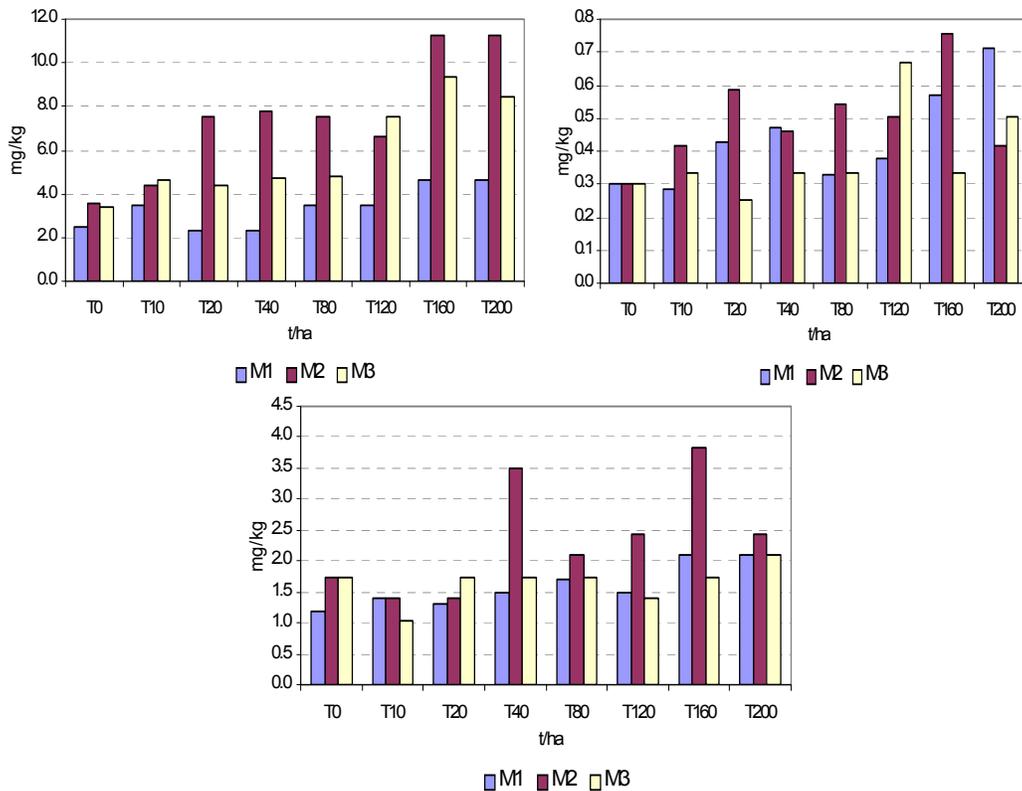


Figura 7.8. Variación en el tiempo de la concentración de **Pb, Cd y Ni** para el Suelo 3 adicionado de diferentes dosis de biosólidos. M1= un mes, M2= dos meses y M3= cuatro meses después de la siembra

7.4 CONTENIDO DE METALES PESADOS EN EL TEJIDO DE CEBADA (*HORDEUM VULGARE* L.)

Según [Hamon et al., \(1999\)](#), la absorción de metales en cultivo de rábano (*Raphanus sativus* L.) en suelos tratados con biosólidos ($15-30 \text{ t ha}^{-1}$ en materia seca) frecuentemente presenta una respuesta de “plateau” entre dosis de biosólidos y concentración total de metales en el suelo. Este tipo de respuesta ha sido generalmente atribuido a la atenuación de la biodisponibilidad del metal por el incremento de los sitios de adsorción provistos por los componentes del biosólido a altas dosis.

En los Cuadros 7.8, 7.9 y 7.10 se muestra el contenido de metales pesados absorbidos por las plantas y en que partes se acumularon. De manera general, en los tres suelos el comportamiento del cultivo fue similar, ya que la absorción de metales fue prácticamente igual en cada uno de los suelos, así el Fe y Mn se concentraron en mayor cantidad en la raíz seguido por el grano; Cu y Zn en la espiga; Pb y Ni en la paja; y Cd en el grano. Según Fageria *et al.*, (1997), el Fe es el elemento que se queda concentrado en mayor cantidad en la raíz, el Zn en el grano, Cu en la espiga y Mn en la paja, de los cuales, solo el Fe y Cu coinciden con los datos obtenidos en este experimento.

Cuadro 7.8. Concentración de metales pesados en la raíz de cebada cultivada en suelos adicionados de diferentes dosis de biosólidos.

Dosis de biosólidos (t ha ⁻¹)	Fe	Cu	Mn	Pb	Cd	Ni	Zn
mg kg ⁻¹							
Suelo 1							
0	1173	9	63	38	13	14	38
10	1166	12	48	44	10	14	34
20	1962	13	61	39	9	18	36
40	1723	9	37	49	10	14	30
80	1334	12	49	44	10	15	45
120	2642	13	63	49	12	17	62
160	2085	15	46	53	10	15	48
200	1882	13	55	44	11	16	44
Suelo 2							
0	1308	8	34	34	10	16	38
10	1502	8	38	34	10	14	55
20	1590	9	49	53	13	15	38
40	2244	14	53	53	10	16	48
80	1917	149	50	53	10	17	54
120	1626	14	41	49	11	16	58
160	2236	14	82	44	11	17	52
200	3190	17	62	39	10	14	69
Suelo 3							
0	1678	12	51	44	12	10	45
10	1316	7	43	34	7	10	27
20	1767	10	50	39	12	16	43
40	1626	10	39	39	7	13	33
80	2421	16	60	34	12	20	58
120	1953	17	46	39	10	20	61
160	2368	21	61	44	12	16	72
200	2112	19	51	49	11	15	62

Cuadro 7.9. Peso de la paja y su concentración total de metales pesados.

Dosis de biosólidos (t ha ⁻¹)	Fe	Cu	Mn	Pb	Cd	Ni	Zn	PP
	mg kg ⁻¹							g
Suelo 1								
0	195	20	33	170	15	29	37	20
10	195	24	29	219	15	30	38	16
20	200	25	18	184	15	28	45	21
40	205	28	24	219	13	30	31	23
80	168	24	27	177	17	29	40	24
120	195	28	33	234	15	24	41	27
160	254	25	33	177	15	30	38	28
200	298	31	40	163	14	26	65	29
Suelo 2								
0	135	26	18	234	14	24	26	14
10	238	23	35	191	14	26	33	14
20	205	28	20	227	17	30	32	17
40	189	23	27	212	14	28	31	20
80	292	265	24	156	16	28	51	23
120	238	26	25	156	15	29	43	18
160	184	26	29	227	14	29	39	27
200	265	23	35	177	16	25	48	25
Suelo 3								
0	222	31	35	205	15	29	38	11
10	243	26	35	191	15	25	35	12
20	216	27	29	205	14	28	28	13
40	151	27	20	170	16	33	31	16
80	233	23	27	170	15	29	35	19
120	211	28	27	198	18	25	44	20
160	168	25	25	205	18	28	46	22
200	243	26	24	170	15	31	43	21

PP: Peso de Paja.

Cuadro 7.10. Peso de los granos y su concentración total de metales pesados.

Dosis de biosólidos (t ha ⁻¹)	Fe	Cu	Mn	Pb	Cd	Ni	Zn	PG
	----- mg kg ⁻¹ -----							g
Suelo 1								
0	285	16	48	64	17	17	40	2.0
10	285	16	35	64	18	17	35	2.8
20	337	13	23	64	17	15	44	2.3
40	272	18	50	64	18	18	53	2.6
80	298	16	31	64	17	18	56	1.5
120	272	17	40	61	17	15	56	2.5
160	311	19	25	67	17	19	67	1.9
200	259	13	42	64	17	19	58	2.0
Suelo 2								
0	285	17	35	64	17	17	40	1.6
10	259	19	50	88	17	19	34	1.1
20	330	13	46	57	18	15	41	1.0
40	337	13	41	67	18	16	44	2.0
80	259	18	37	64	18	17	53	1.4
120	324	12	28	64	18	16	51	3.0
160	363	13	40	61	17	16	55	2.1
200	252	13	42	57	19	17	59	0.6
Suelo 3								
0	271	16.0	28	74	18	21	34	1.5
10	272	17.6	38	61	16	16	33	1.7
20	272	13.7	40	88	13	14	32	0.9
40	324	17.6	37	64	17	15	59	1.2
80	311	13.7	34	58	18	15	50	1.0
120	272	17.6	38	102	18	280	57	0.4
160	298	19.1	40	67	17	16	56	1.1
200	324	23.7	35	67	17	16	56	1.4

PG: Peso de grano.

Cuadro 7.11. Peso de paja de espigas y su concentración total de metales pesados.

Dosis de biosólidos (t ha ⁻¹)	Fe	Cu	Mn	Pb	Cd	Ni	Zn	PE
	mg kg ⁻¹							g
Suelo 1								
0	220	31	19	73	6.8	11	40	3.1
10	218	34	24	105	6.8	15	38	3.5
20	237	30	25	106	8.1	18	46	4.7
40	237	34	27	116	9.8	20	58	4.5
80	255	32	25	97	7.7	21	69	4.0
120	218	41	26	97	10.7	19	79	4.5
160	237	38	26	97	8.5	16	67	4.9
200	237	31	24	106	6.8	14	69	5.3
Suelo 2								
0	251	23	23	78	8.1	15	53	3.4
10	237	24	24	87	6.4	16	37	3.2
20	237	27	25	87	8.5	17	49	4.0
40	237	24	21	87	6.0	17	44	4.0
80	237	21	19	87	5.5	16	62	3.6
120	237	34	16	87	7.7	17	61	3.2
160	219	34	18	87	7.2	17	71	5.3
200	200	37	22	68	6.4	15	88	3.0
Suelo 3								
0	201	31	21	78	7.7	16	31	1.7
10	255	20	22	87	6.8	16	46	2.4
20	273	24	24	68	7.2	19	40	2.7
40	255	20	20	106	7.2	15	41	3.7
80	273	27	20	87	5.5	18	65	3.5
120	237	30	18	106	8.5	13	55	1.7
160	218	27	23	106	7.2	16	67	3.4
200	219	31	30	87	6.4	17	73	3.5

PE: Peso de Espiga.

7.5. CONCLUSIONES

1. Los biosólidos generados en la planta de tratamiento de aguas negras “El Niágara”, presentaron buena riqueza nutrimental y dado que sus concentraciones de metales pesados no rebasaron los límites máximos

permisibles para lodos y biosólidos, pueden utilizarse en los campos agrícolas de la zona como fertilizantes y mejoradores de suelos.

2. En las diferentes fechas de muestreo, los biosólidos presentaron poca variación significativa en la concentración de metales pesados debido al origen doméstico de las aguas residuales.
3. La aplicación de las diferentes dosis de biosólidos a los tres suelos estudiados, aumentó la concentración de metales pesados, sin rebasar los límites máximos permisibles. Además, mejoró sus condiciones de pH, contenido de materia orgánica y las concentraciones de macro y micronutrientes.
4. El mejor crecimiento del cultivo en los Suelos 1 y 2 se encontró con las dosis de 80, 120 y 160 t ha⁻¹, mientras que en el Suelo 3 en 80 a 200 t ha⁻¹.

7.5 Literatura Citada

- Alloway, B. J. 1995. Heavy Metals in Soils. 2nd Edition. Blackie Academia Professional. London, UK.
- Bastian, R. K. 1997. Biosolids management in the United States. A state-of-the-nation overview. Water Environment and Technology. USA. May. 45-50.
- Bigeriego, M. 1993. Notas del Curso sobre tratamiento de residuos urbanos. Aplicación agronómica de los lodos residuales. CIT-INIA. Madrid, España.
- Bontoux, L., Vega, M. y Papameleitou, D. 2002. Tratamiento de las aguas residuales en Europa: el problema de los lodos. IPTS rept. Vol 23. En línea, consultado el 10 de abril de 2007: <http://www.jrc.es/pages/f-report.es.html>
- Campos, M. R. G., Jiménez, P. G., Rodríguez, A. I., Arévalo, D. C. y Jiménez, C. B. 1997. Producción de biosólidos a partir de los lodos de una planta de tratamiento primario avanzado. *En: Federación Mexicana de Ingeniería Sanitaria y Ciencias ambientales A. C. Memorias técnicas del XI Congreso Nacional de Ingeniería Sanitaria y Ciencias Ambientales. México, D.F. Tomo II. 320-325.*

- Chandra, K.S. and M.N.V. Prasad, 2005. Risk Assessment, Pathways, and Trace Toxicity of Sewage Sludge-Amended Agroforestry and Soils
- CNA. 1999. Comisión Nacional del Agua. En línea, consultado el 16 de abril de 2008:
http://tecspar.org/curso_chile/a_escalas/tecnologias_y_usos_de_aguas_residuales_en_mexico_a_escalas.pdf
- .CONAGUA. 2005. Inventario Nacional de Plantas Municipales de Potabilización y de Tratamiento de aguas residuales en Operación. Comisión Nacional del Agua.
- De Brouwere K. and Smolders E, 2006. Yield response of crops amended with sewage sludge in the field is more affected by sludge properties than by final soil metal concentration. *European Journal of Soil Science*. 57: 858-867
- Díaz, L. J. A. 1991. Depuración de aguas residuales. Edit. MOPT. Unidades temáticas ambientales de la Secretaría del Estado para las políticas del agua y el medio ambiente.
- Escalas, C. A. 2006. Estimación propia de la generación y recolección de aguas residuales en 1992, a partir de datos de años posteriores. En línea, consultado el 14 de mayo de 2008:
http://tecspar.org/curso_chile/a_escalas/tecnologias_y_usos_de_aguas_residuales_en_mexico_a_escalas.pdf
- Felipó, O. M. T. 1995. Reutilización de residuos urbanos y posible contaminación. In: *Gestión y Utilización de residuos urbanos para la agricultura*. Fundación La Caixa. AEDOS. 27-37.
- Gamrasni, M. A. 1985. Aprovechamiento agrícola de las aguas negras urbanas. Limusa, México D.F.
- García, C. N. E. 2000. Manejo del suelo y de la materia orgánica en los agroecosistemas. In: *Lombricultura y agricultura sustentable*. 173-184. Martínez, C. C., Ramírez, F. L. SAGAR. México.
- Girovich, M. J. (Ed). 1996. *Biosolids treatment and management: processes for beneficial use*. Marcel Dekker. New York, USA. 1-43.
- González, A. M. 2000. Memorias prevención y control de la contaminación de los suelos. En línea, consultado el 20 de marzo de 2008:
<http://www.cnpml.org/html/archivos/Ponencias/Ponencias-ID70.pdf>

- Hall, J. E., Draw, A. P. y Bayes, C. D. 1986. The use of sewage sludge in land reclamation. Water Research Centre, Marlow.
- Hall, J. E. y Dalimier, F. 1994. Waste management – sewage sludge: survey of sludge production, treatment, quality and disposal in the EC. EC Reference No: B4-3040/014156/92. Report No: 3646.
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., y Nelson, W. L. 1999. Soil fertility and fertilizers, an introduction to nutrient management. 6th Edition. Prentice Hall. New Jersey, USA.
- Kabata, A. y R.D. Pendias. 2000. Trace elements in soils and plants. 4th printing. CRC Press, Inc. Boca Raton, Fl. USA
- Lovell, B. 1996. Aplicación en suelos de biosólidos de drenaje para la producción de cosechas. Factsheet. Orden Núm. 95-069. Notario 8 p.
- Magnarelli, R. A. 2002. Biosólidos (lodos cloacales) y compostaje de los residuos con énfasis en biosólidos. Fundación América. Argentina. En línea, consultado el 20 de marzo de 2009: <http://www.ecofield.com.ar/servicios/cv-magnarelli.html>
- Moeller, C. G. y Ferat, T. C. 2000. Remoción de microorganismos por medio del tratamiento de las aguas residuales. México, D.F.
- Nebel, B. y Wright, R. T. 1999. Ciencias ambientales “Ecología y desarrollo sustentable”. Pearson. México. 211-343.
- Norma Oficial Mexicana NOM-004-SEMARNAT-2002. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 13 de agosto de 2003.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo análisis. Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 31 de diciembre de 2002.
- Omran, M. S. y Waly, T. M. 1988. Effect of sewage irrigation on yield, tree components and heavy metals accumulation in leaves orange trees. Biol. Wastes. 23: 17-24.
- Ortiz H. L., R.M. Gutiérrez y S.E. Sánchez. 1995. Propuesta de manejo de lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, Morelos, México. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 11 (2): 105-115.

- Ortiz, H. M. L., Gutiérrez, R. M. E. y Sánchez, S. E. 1995. Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, estado de Morelos, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 2: 105-115.
- Potisek, T., 2006. Potencial de uso de biosólidos en un suelo de matorral desértico. Ed. INIFAP, CENID-RASPA, Folleto Técnico 6
- Potisek T.,, U. Figueroa V., R. Jasso I., G. González C. & J. Villanueva D. 2006. *Potencial Uso de biosólidos en un suelo de Matorral Desértico*. CENID-RASPA INIFAP 38 pp.
- Page A. L. y Chang A. C. 1994. Overview of past 25 years: technical perspective. *In: Sewage sludge: Land utilization and the environment*. Clap C., Larson W. and Dowdy R, SSSA Misc. USA.
- Porta, C. J., Acevedo, M. y Roquero C. 2003. Edafología para la agricultura y el medio ambiente. 3ª Edición. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Robledo, S. E., Corlay, Ch. L., Pineda P. J., y Álvarez S. E. 2000. Caracterización y Aplicación Agrícola de Lodos Residuales. *En: Memorias del Seminario de Avances de Investigación 2000 de los Programas Universitarios de Investigación en Diagnóstico, Conservación y Recuperación del Suelo, Recursos Naturales y Ecología y Agricultura Orgánica*. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Salcedo, P. E. 2000. Alternativas de uso agrícola y forestal de lodos residuales de plantas de tratamiento de aguas negras. Tesis de maestría. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, México.
- Singh y Agrawl, 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management* 28: 347-358.
- Tester, C. F. 1990. Organic amendment effects on physical and chemical properties of a sandy soil. *Soil Science Society of American Journal*. 54(3): 827-831.

CAPITULO VIII

8.0 Discusión General y Conclusiones Generales

En México, el tratamiento de agua residual con lodos activados genera una gran cantidad de lodos residuales. La planta de tratamiento "El Niagara" en la ciudad de Aguascalientes, Ags. genera 130-150 m³ de lodos diariamente, los cuales son almacenados en áreas cercanas a la planta, presentándose problemas para su disposición. lo que representan un riesgo de contaminación para suelo, aire y agua. Como una alternativa para reducir el problema los lodos han sido aplicados en parcelas de agricultores cooperantes, sin control ni regulación, obteniéndose resultados positivos en algunos casos, sin embargo en otros se detectó endurecimiento de los suelos ó quemaduras de las plantas.

El objetivo general de este trabajo fue generar estrategias para la disposición y aprovechamiento de los biosólidos para mejorar suelos agrícolas y la calidad y rendimiento de los cultivos, sin perjuicio para el ambiente y sin riesgo para la salud humana.

La estrategia se basó en caracterizar y evaluar agrónomicamente los biosólidos, realizar experimentos en invernadero y campo con cultivos de maíz, cebada y pasto ballico y realizar una evaluación económica del uso agrícola de estos subproductos, con base en los objetivos siguientes: a) Caracterizar los biosólidos física y químicamente, b) Mejorar las condiciones físicas, químicas y biológicas de suelos de la región, c) Establecer la dosis óptima de biosólidos a aplicar a un suelo calcáreo representativo de la región y su efecto en sus características químicas y en las variables de crecimiento del maíz cultivado en ese suelo, d) Evaluar la aplicación de biosólidos en el crecimiento y contenido nutrimental en los cultivos de maíz, pasto *ballico perenne* y cebada en experimentos de campo e invernadero, para determinar la dosis más adecuada, e) Evaluar el efecto de la aplicación de biosólidos en el contenido de metales pesados en suelos y plantas y g) Reducir costos de producción e incrementar la rentabilidad de los cultivos de la región.

8.1 Características de los Biosólidos

La aplicación de biosólidos a suelos agrícolas es una manera efectiva de reciclar la materia orgánica (MO) y nutrientes contenidos en estos materiales para un uso sustentable a través de la conservación y mejora de las características del suelo y los rendimientos de los cultivos. Para un uso adecuado de los biosólidos en la agricultura debe conocerse los contenidos de metales pesados para evaluar si su concentración permite su uso sin que el suelo se contamine o puedan presentarse daños a la salud humana. Los biosólidos se caracterizaron con base en su pH, contenido de materia orgánica, macro y micronutrientes y metales pesados tóxicos

8.1.1 Materia Orgánica

La planta de tratamiento de aguas residuales (PTAR) “El Niagara” de la ciudad de Aguascalientes, Ags. la cual opera con un sistema dual de tratamiento (biofiltros y lodos activados), con capacidad para depurar 2000 L s^{-1} , produce de 150 a $170 \text{ m}^3/\text{día}$ de biosólidos con una humedad de aproximadamente 80%. Los lodos residuales generados en esta planta reciben un tratamiento de estabilización (digestión aerobia y secado en filtros prensa) para reducir su volumen y su contenido de contaminantes proceso con lo cual son denominados biosólidos (**NOM-004-SEMARNAT-2002**). El alto contenido de materia orgánica en los biosólidos es uno de sus principales atributos para usarse como abono y mejorador de suelos. El contenido orgánico de los biosólidos producidos en la PTAR varía, dependiendo del contenido de sólidos, el tipo de tratamiento para su estabilización y la metodología empleada para su determinación.

. El contenido de materia orgánica en los biosólidos de la PTAR fue de 63%. **Jurado et al. (2007) y Flores y Flores (2005)** reportan para la misma planta contenidos de 35.2 y 32.9% respectivamente, esta diferencia con respecto los reportados en este estudio, puede deberse a que estos autores utilizaron para la determinación de MO el método de digestión húmeda de Walkley y Black y que en este trabajo el contenido de MO se determinó por combustión seca a $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$, el primer método solo estima la materia orgánica humificada (parcialmente descompuesta) y el segundo toda la materia orgánica y además

algunos compuestos volátiles. Se han reportado contenidos de materia orgánica hasta del 70% (Epstein, 2003).

Se considera que un contenido de 63.3% de MO en los biosólidos los hace adecuados como mejoradores del suelo.

8.1.2 Nitrógeno.

El contenido de N total en los biosólidos de Aguascalientes fue en promedio de aproximadamente 4%. El N que aportan los biosólidos al suelo, es el que está en forma inorgánica (N-NH₄ y N- NO₃) y el N orgánico potencialmente mineralizable. En un estudio de campo sobre mineralización del N en los biosólidos (Flores-Márquez, et al. 2007), se aplicaron dosis creciente de biosólidos en base seca de 0, 9.8, 19.7 y 29.5 Mg ha⁻¹ y se encontró una mineralización de 0, 20, 7 y 4% respectivamente por lo que se observa una relación decreciente de la mineralización en función a la dosis, a mayor cantidad de biosólidos aplicados menor mineralización. Barbarick e Ippólito (2000) encontraron que la aplicación de biosólidos continua durante 6 años en un agroecosistema de Colorado en un cultivo de trigo de invierno (tres aplicaciones a dos conjuntos de parcelas) aportó 8,2 kg de N equivalentes a N de fertilizante inorgánico por tonelada de biosólidos. También estimaron tasas de mineralización del N el primer año de 25 a 32%.

Si se considera que la mineralización de N es de 20% durante el primer año, se deduce que el aporte de N sería de 8 Kg, equivalentes a fertilizante inorgánico por tonelada de biosólidos. Sin embargo, es necesario hacer pruebas de mineralización de estos materiales *in situ* y durante el crecimiento del cultivo, ya que ésta varía de acuerdo con muchos factores (tipo de suelo, humedad, clima, microorganismos, etc.), para determinar realmente la cantidad de N que aportan estos subproductos.

Cuando el rendimiento de los cultivos es bajo debido al escaso contenido de MO del suelo, los biosólidos proporcionarían nutrientes, sin embargo, el exceso de N puede reducir la calidad del cultivo y acumular grandes cantidades

de NO_3 en el suelo, los cuales estarán sujetos a la lixiviación y probable contaminación de los mantos acuíferos

8.1.3. Fósforo

La cantidad de P disponible para las plantas que contienen los biosólidos estudiados, sí, se considera un 20% de mineralización, fue de 1.08 kg por tonelada de biosólidos equivalentes a P de fertilizante inorgánico (Cuadro 4.2), Por lo anterior la dosis óptima de aplicación de biosólidos para abastecer el P sería de aproximadamente 55 t ha^{-1} .

Un problema al aplicar biosólidos, es que la dosis se calcula en cantidades para abastecer el requerimiento de N de los cultivos, por lo cual el P es abastecido en exceso debido a que el requerimiento de este nutrimento por los cultivos es solamente del 10 al 25% en relación al requerimiento de N, mientras que los biosólidos generalmente contienen 50% de P de lo que contiene de N (Smith, 1996). La acumulación de P en los suelos mejorados con biosólidos puede ser benéfico para la nutrición de los futuros cultivos, pero también es una fuente potencial de contaminación para los cuerpos de agua a través de la lixiviación y escurrimiento del P (Penn and Sims, 2002). Por lo anterior al calcular las dosis debe hacerse considerando la cantidad de N o P a aplicar.

8.1.4. Metales Pesados.

Uno de los principales problemas de la aplicación continua de biosólidos es el incremento en la concentración de metales traza en el suelo y la absorción de éstos por las plantas. Las concentraciones de estos elementos en el biosólido, su carga anual aceptable en los suelos y otros elementos de juicio relativos a estos temas constituyen una parte esencial de las regulaciones existentes a nivel mundial y es la principal medida a tener en cuenta antes de su aplicación como sustituto de los fertilizantes

La concentración total de metales pesados totales (Fe, Cu, Mn, Zn, Pb, Ni, Cd) de los biosólidos de la (PTAR) se comparó con los límites permisibles considerados como tóxicos, en la normatividad de México (NOM-004-SEMARNAT-2002) y España (Porta, 2003), los biosólidos se clasificaron como

excelentes en ambas clasificaciones, ya que en todos los casos son inferiores a los límites máximos permisibles establecidos, por lo cual los biosólidos pueden tener uso agrícola, ganadero o forestal o como mejoradores de suelos (cuadro 4.3 p62). **Flores y Flores (2005)** hicieron una caracterización física, química y microbiológica de los biosólidos generados en la planta de tratamiento “El Niagara” de la ciudad de Aguascalientes y también los encontraron aptos para su uso agrícola.

Hay controversia dentro de la comunidad científica sobre el destino de metales pesados después de un largo plazo de aplicación de biosólidos. Algunos investigadores han postulado que la aplicación a largo plazo de biosólidos daría lugar a la liberación de metales pesados en el suelo debido a la mineralización de la materia orgánica, también conocida como la hipótesis de “Bomba de Tiempo”. Otros investigadores han indicado que la aplicación a largo plazo de biosólidos no presentaría ningún peligro, debido a la alta capacidad de adsorción de las fases inorgánicas dentro de los biosólidos, también conocida como la hipótesis de la “Protection” (McBride, 2003; Bergkvist et al., 2005; Hettiarachichi et al., 2006).

El porcentaje relativo de recuperación (PRR) de los metales pesados o proporción de concentración extractable con respecto a su concentración total, se puede considerar como un indicador de la concentración activa del metal; o sea, es la porción que va a ser más reactiva al mezclar biosólidos con suelo, pues el resto corresponde a la fase mineral que únicamente se puede solubilizar en condiciones ácidas (Ortiz et al., 1995).

Los PRR para los metales en los biosólidos estudiados varían entre 2.3 y 33 % (cuadro 7.6). Los PRR para los metales que se consideran micronutrientes tuvieron los valores siguientes: Zn (35.8%), Mn (8.5%) y Fe (2.3). Los metales que se consideran contaminantes Ni (33.3%), Pb (13%), Cd (7.4%) y Cu (2.7%), es decir que de su concentración total el % indicado está disponible y puede reaccionar con los componentes del suelo o ser aprovechado por las plantas, pudiendo acumularse en cantidades excesivas y ser un riesgo para las plantas o los consumidores finales.

8.1.5. Dosis de aplicación

Las dosis de aplicación de biosólidos para la producción de cultivos se basan en muchos factores tales como, la capacidad de abastecimiento de nutrimentos, la fertilidad inherente al suelo, requerimiento de nutrientes del cultivo, contenido de elementos potencialmente tóxicos, etc.

La mejor estrategia para decidir la dosis de aplicación deberá basarse en la composición específica de los biosólidos en cada área, con el propósito de verificar la máxima aplicación. El nutriente de mayor interés en los biosólidos es el N debido al riesgo de contaminación de las aguas subterráneas. Es por esto que el consumo de N por el cultivo es un parámetro clave al momento de determinar las tasas de aplicación. En la mayoría de los casos la dosis de aplicación de los biosólidos es determinada por el requerimiento de N de los cultivos y porcentaje de mineralización de los biosólidos, aunque, en algunos casos se puede calcular con base en la carga de P. Las regulaciones de la USEPA Part 40 CFR 503 (USEPA, 1993) no permiten la aplicación de biosólidos en cantidades que excedan la tasa agronómica.

La tasa agronómica es la cantidad de biosólidos que se deben aplicar al suelo (sobre una base de peso seco) para proporcionar la cantidad de N necesaria para el cultivo o vegetación y reducir al mínimo la cantidad de nitrógeno que pasa por debajo de la zona raíz del cultivo o de vegetación a las aguas subterráneas. Una tasa de aplicación de lodos de aguas residuales superior a la tasa de agronómica podría dar lugar a una contaminación de las aguas subterráneas con nitratos.

En los experimentos iniciales que son de carácter exploratorio los biosólidos se aplicaron a los suelos sin esta información, debido al costo y el tiempo que toma su caracterización. Las dosis de biosólidos aplicadas en los experimentos de maíz y pasto ballico fueron de 0, 20, 40, 80, 120, 160 y 200 t ha⁻¹. El espacio de exploración se estableció con base en las cantidades que ya aplicaban algunos productores de la zona en estudio (80- 120 t ha⁻¹).

8.2. Características de los Suelos.

Los suelos del área de influencia del PTAR son delgados (20-30 cm), calcáreos (22% de carbonatos), por lo cual el pH es alcalino (8.5), ricos en Ca, Mg y K, están altamente degradados pues su contenido de MO (0.98%) y de N (20.2 mg kg⁻¹) es pobre (Cuadro 4.4), no presentan problemas de salinidad, ya que su conductividad eléctrica fue de 1.7 dS m⁻¹. Los contenidos de metales Cd y Pb son normales y los de nutrientes son bajos para Mn y Zn y medio y alto para Fe y Cu respectivamente (Cuadro 4.5). La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) es alta 33 mg kg⁻¹, por lo cual los nutrimentos liberados en el proceso de descomposición de la MO de los biosólidos pueden incrementar la fertilidad de los suelos. Con base en lo anterior, los suelos de la zona pueden mejorarse con la aplicación de biosólidos al ayudar éstos a incrementar el contenido de MO, reducir el pH y aumentar la cantidad de macro y micronutrientes. Por otra parte el suelo tiene contenidos normales de metales pesados por lo cual se espera que sean resilientes a los metales contenidos en los biosólidos.

Las características físicas y químicas indican que la fertilidad del suelo fue baja y es el principal factor que limita el crecimiento sostenible de las plantas en el suelo no enmendado, razón por la cual estos suelos son susceptibles de aceptar cantidades mayores que la tasa agronómica propuesta por USEPA (Cuadro 2.7).

8.3. Efectos de la aplicación de biosólidos en las características del suelo y rendimiento de los cultivos.

Todas las características químicas de suelo evaluadas tuvieron modificaciones estadísticamente significativas por efecto de la aplicación de biosólidos al suelo (Grafica 4.1). Tamoutsidisis, 2002 señala que Las características químicas de los suelos que principalmente cambian por adición de abonos orgánicos son: pH, MO, N, P, Ca, Mg y CIC.

Los efectos de la aplicación de biosólidos, sobre las propiedades químicas y contenidos nutrimentales de los suelos se discuten a continuación.

8.3.1. pH

El pH del suelo en el testigo se incremento ligeramente, sin embargo, con la aplicación de las dosis más altas de biosólidos (120, 160 y 200 t ha⁻¹) el pH de los suelos estudiados (7.9-8.5), disminuyó hasta en una unidad lo cual es benéfico, ya que se incrementa la disponibilidad de la mayoría de los nutrimentos para las plantas.

Jurado et al. (2007) en un estudio con biosólidos provenientes de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales de Aguascalientes, Ags. “El Niagara” encontraron que con la aplicación de la dosis mayor (90 t ha⁻¹ en base seca) a un suelo de pastizales en Ojuelos, Jalisco, el pH de éste disminuyó en una unidad (6.3 a 5.3). La aplicación de biosólidos estabilizados con cal a suelos ácidos puede beneficiarlos y a suelos cercanos a la neutralidad, pueden elevar el pH a niveles indeseables. **Pierzinski (1994)** señala que la adición de biosólidos al suelo puede decrecer, incrementar o no tener efecto sobre el pH del suelo, dependiendo del tratamiento de estabilización de los biosólidos (con o sin cal) y del tipo de suelo. La mineralización del C orgánico, la nitrificación de las formas amoniacales la hidrólisis de los compuestos de Fe y Al, y la oxidación de los sulfitos pueden actuar en el decremento del pH del suelo

8.3.2. Materia Orgánica.

La materia orgánica se incrementó en más de 100 % con todos los tratamientos desde el primer mes de la incorporación de los biosólidos, siguiendo esa misma tendencia a los tres meses y con ligera disminución a los ocho meses, pasando de muy pobre a una clasificación de nivel medio, en su contenido de materia orgánica (**NOM 021-SEMARNAT-2000**).

Hernández et al. (1991) considera que el uso de biosólidos como fertilizantes o regeneradores orgánicos es una opción interesante que agrega valiosos componentes orgánicos y nutrientes. **Darwish et al. (1995)** señala que el incremento de materia orgánica en el suelo mejora características físicas como, la agregación y porosidad en los alrededores de la raíz y el crecimiento de las plantas. Además, la incorporación de los biosólidos aumenta la actividad enzimática y biológica de los suelos (**Celis et al., 2009; Arriagada et al., 2009**). Asimismo los microorganismos que intervienen en los procesos de

recuperación de suelos degradados, estimulan el crecimiento de las plantas a través de sustancias, como hormonas y vitaminas, que mejoran la estructura, reducen la erosión y mejoran la disponibilidad de nutrientes (Waldrop *et al.*, 2003).

8.3.3. Nitrógeno

Los biosólidos son utilizados como fertilizantes debido a su alto contenido de materia orgánica, baja relación C/N y riqueza de nutrimentos tales como N y P (Shtanggeva, 2006) y también por mejorar la estructura del suelo, restaurar su fertilidad y aumentar la actividad microbiana (López- Valdez *et al.*, 2010).

El contenido de N inorgánico, inmediatamente disponible para las plantas (N-NH₄ y N-NO₃) se incrementó en más de 500 % con las tres dosis mayores (120, 160 y 200 t ha⁻¹), con respecto al testigo en los diferentes meses evaluados (Gráfica 4.1), lo cual es congruente, ya que con esos tratamientos se está añadiendo 395, 526 y 658 kg ha⁻¹ respectivamente de N inorgánico (Cuadro 4.6), además del aportado por la mineralización de N orgánico (aproximadamente 8 kg de N total por tonelada de biosólidos), observándose decrementos a los tres y a los ocho meses después de la adición de los biosólidos; esto puede deberse a la dinámica que se presenta en el suelo, por ejemplo la inmovilización microbiana, pérdidas por lixiviación, volatilización, arrastre por el agua de riego y absorción por las plantas (California Plant Health Association, 2004; Castellanos, 2000).

Janssen (1998) señaló que, en la agricultura tradicional, la eficiencia en el uso del N, en el mejor de los casos, es de 50% cuando el manejo del fertilizante se lleva a cabo adecuadamente. La baja eficiencia de utilización de los fertilizantes nitrogenados (15 a 20%) se debe fundamentalmente a pérdidas por procesos, como: volatilización, lixiviación y desnitrificación.

La aplicación de 120 t ha⁻¹ de biosólidos al suelo aporta 960 kg de N equivalentes a N de fertilizante inorgánico, si la eficiencia de mineralización fuera del 30% en este tipo de suelos (calcáreos) la cantidad de N disponible para las plantas sería de 288 kg ha⁻¹. Se ha reportado que los requerimientos

de N para el maíz y el pasto son de 298 y 241kg respectivamente ([Herrera y Lazcano, 2000](#)).

8.3.4. Fósforo

En cuanto al P, se observaron incrementos superiores al 100% en el primer y tercer mes de aplicados los biosólidos con todos los tratamientos y un decremento a los ocho meses, esto puede ser debido a que al aumentarse el pH en ese lapso de tiempo y por ser un suelo calcáreo los fosfatos reaccionan con el Ca de suelo formando fosfatos de calcio insolubles.

Sí los biosólidos aportaron 1.08 kg de P por tonelada y sí se considera que la dosis óptima de aplicación de este subproducto fue de entre 80 y 120 t ha⁻¹, se agregaron entre 80 y 100 kg ha⁻¹ de P, es decir se agregó casi el doble del P que requiere el cultivo de maíz (55 kg ha⁻¹) para alcanzar su máximo rendimiento.

[Jurado \(2007\)](#) encontró, con aplicaciones al suelo de 90 t ha⁻¹ de biosólidos procedentes de la PTAR de la ciudad de Aguascalientes, incrementos en N de 7 a 169 mg kg⁻¹ y de P de 5 a 55 mg kg⁻¹ de suelo.

Parte del exceso de P será fijado por el Ca, que es abundante en este suelo. Esta fijación en el suelo se puede atribuir a la unión del calcio con la arcilla y el humus en suspensión, formando un coágulo (flóculo), conocido como complejo arcilloso-húmico, el cual tiene un papel fundamental en las propiedades físicas y químicas del suelo. Gracias a la condición que toma este complejo arcilloso-húmico por la presencia suficiente de calcio, permite la fijación del fosfato (PO₄), único anión fijado en los coloides del suelo, que aprovecha un puente formado por los cationes Ca ([Gros y Dominguez, 1992](#)).

8.3.5. Capacidad de Intercambio Catiónico, Calcio y Magnesio

A pesar de las grandes cantidades de biosólidos aplicados al suelo y del alto contenido de materia orgánica, K, Ca y Mg no hubo efecto sobre la Capacidad de Intercambio Catiónico y el K de los suelos estudiados, solamente se presentó un incremento significativo de Ca y Mg con la dosis más alta (200 t ha⁻¹

¹), esto contribuye a un incremento de sales solubles en los suelos, sin embargo como son suelos calcáreos la concentración de estos tres elementos es alta.

8.3.6. Metales Pesados.

Los biosólidos contienen elementos potencialmente tóxicos (EPT) los cuales al aplicarse a suelos agrícolas pueden afectar a la cadena alimenticia a través de los cultivos, contaminar el suelo y las aguas freáticas; estos elementos son, principalmente metales pesados tóxicos y son el factor principal que restringe su uso en la agricultura (**Chandra y Prasad, 2005; De Brouwere y Smolders, 2006**). Un medio ambiente limpio (suelo, agua y aire) es un requisito para los sistemas de cultivo sostenibles, así como para la salud humana y animal (**Fageria, 2010**). Sin embargo, la cantidad de los EPT es variable dependiendo de la región en que se localice la planta de tratamiento de aguas residuales y al origen de éstas.

Los biosólidos de la PTAR presentaron cantidades apreciables de metales pesados, sin que estos rebasen los límites máximos permitidos en México (cuadro 4.3). Adicional a lo anterior la presencia de superficies químicamente activas en los biosólidos, tales como materia orgánica, óxidos de Fe/Mn y carbonatos de calcio, fijan los metales pesados. Por lo que debe tomarse en cuenta que la aplicación de biosólidos no es una simple adición de metales pesados, ya que también es la aplicación de otros compuestos que reducen su efecto nocivo. Los elementos traza añadidos al suelo como constituyentes de los biosólidos, son generalmente menos fitodisponibles que los agregados como sales metálicas (**Hettiarachchi et al., 2006**).

Aunque, el Zn mostró el mayor porcentaje relativo de recuperación (PRR) en los biosólidos, una vez que éstos se aplicaron a los suelos, el Mn fue el metal que resultó estar en mayor proporción en forma disponible para las plantas, seguido por el Fe y el Zn (Gráfica 7.3).

En los suelos analizados, las concentraciones de Cu aumentaron al incrementarse las dosis de biosólidos; sin embargo, al paso del tiempo disminuyeron en más del 50%. La disminución en la concentración disponible

del Cu no solo se debe a la demanda de la planta, también influyen otros factores como el pH, la materia orgánica, la presencia de altas concentraciones de otros nutrientes como el Fe, Zn y P (Havlin *et al.*, 1999).

La disponibilidad del Mn a pH bajo es menor a la del Fe (Havlin *et al.*, 1999). Esto demuestra el por qué este elemento mostró un aumento menor (de 40 a 200% en promedio) que el de el Fe, el cual aumentó (de 350 a más de 500% en promedio) al bajar el pH con las diferentes dosis de biosólidos, aunque también influye en su disponibilidad el contenido de Cu. Un aumento en la concentración del Cu puede causar una clorosis férrica.

Por otra parte, hubo incrementos en el Pb y el Cd de más de 100% (de 2.5 a 11.2 mg kg⁻¹ y de 0.15 a 0.8 mg kg⁻¹, respectivamente), sin embargo estos valores están muy lejanos a los límites máximos permitidos para suelos agrícolas de 200 y 7 mg kg⁻¹ respectivamente (Kabatas y Pendias, 2001), el Ni, a pesar del incremento significativo que presentó a partir de la dosis de 120 t ha⁻¹ también estuvo muy lejos del LMP

8.3.7. Rendimientos de los cultivos en relación a la aplicación de biosólidos.

La respuesta de los cultivos en suelos mejorados con biosólidos es con frecuencia igual o más alta que en los suelos donde se aplican dosis recomendadas de fertilizantes inorgánicos (Obbard, 2001). Los biosólidos contienen más de los 13 elementos minerales considerados como esenciales para el crecimiento de las plantas muchos de los cuales generalmente no son aplicados durante la fertilización química. Los biosólidos pueden también corregir las deficiencias de micronutrientes de las plantas (Chandra y Prasad, 2005). Valdez Pérez *et al.* (2011) señalan que las aplicaciones de materiales orgánicos pueden mejorar el desarrollo de las plantas e incrementar los rendimientos.

La producción promedio de maíz en forraje en verde en Aguascalientes es de 52 t ha⁻¹ en promedio (González *et al.*, 2003), en este estudio con la dosis de biosólidos de 120 t ha⁻¹ se obtuvieron incrementos de 55 y 27% y con 160 t ha⁻¹ de 48 y 67% con respecto al promedio y al tratamiento testigo

respectivamente. El máximo rendimiento fue de 77 t ha⁻¹, INFOPOS, menciona que el rendimiento óptimo es de 80 t ha⁻¹.

En cuanto al rendimiento de pasto ballico se encontraron incrementos significativos (55.3% y 33.5%) con respecto al testigo con los tratamientos mayores (120 y 160 t ha⁻¹). **Jurado et al. (2007)** con la aplicación de dosis de 60 y 90 t ha⁻¹ de biosólidos de la planta de tratamiento de aguas residuales de Aguascalientes Ags. obtuvo incrementos de 550 y 650% respectivamente en la producción de forraje de zacates.

La producción de biomasa de los cultivos estudiados (maíz, pasto ballico y cebada) se incrementó significativamente con respecto al testigo, con la aplicación de biosólidos, alcanzando su máxima producción con las dosis de 120 y 160 t ha⁻¹

8.5 CONCLUSIONES GENERALES

- 1* Los biosólidos generados en la planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad de Aguascalientes no representaron riesgos significativos para el uso agrícola, de acuerdo con sus características químicas y por su contenido de metales pesados, se clasifican como excelentes, ya que no rebasan los límites máximos permisibles establecidos por la **NOM-004-SEMARNAT-2002** por lo cual pueden tener uso agrícola, forestal o como mejoradores de suelos.
- 2* La adición de biosólidos a los suelos estudiados mejoró notablemente sus características químicas como: disminución de pH (de alcalino a cercano a la neutralidad), incremento de materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, concentración de N inorgánico, P disponible, K, Ca y Mg intercambiables; así como de la disponibilidad de micronutrientes como: Fe, Cu, Zn y Mn.
- 3* La aplicación de dosis crecientes de biosólidos al suelo de la parcela experimental no presentó efectos negativos en cuanto a las concentraciones de metales pesados en suelos y plantas, pero incrementó el contenido de

- sales solubles, sin llegar a afectar el rendimiento del cultivo.
- 4* Con dosis de biosólidos de 120 t ha^{-1} en este tipo de suelos se llegó a concentraciones de sales solubles que podrían reducir el rendimiento de la mayoría de cultivos.
- 5* La concentración de metales pesados en los suelos estudiados aumentó sin representar un riesgo para su aplicación como fertilizantes, ya que no se rebasaron los límites considerados como máximos permisibles.
- 6* El mayor rendimiento de los cultivos se logró con las dosis de 80, 120 y 160 t ha^{-1} ; sin embargo, con 200 t ha^{-1} se frenó el desarrollo del cultivo en las primeras etapas de crecimiento, sin presentarse acumulación de metales pesados en concentraciones consideradas como fitotóxicas.
- 7* Se puede dar un uso agrícola a los biosólidos analizados en el área de estudio, sin riesgo de contaminación por metales pesados, pero condicionado al control del aporte de sales solubles por los mismos, para evitar salinización y degradación del suelo.
- 8* Con la aplicación de biosólidos a los suelos de la región de estudio se disminuyen los costos de producción y se incrementan las ganancias hasta en un 100%

8.6. RECOMENDACIONES

Se recomienda establecer un programa de aplicación de biosólidos para la zona de influencia de la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales “El Niagara” de la ciudad de Aguascalientes Ags. (Anexo 1).

Además, se recomienda, sí la dosis de biosólidos que se van a añadir al suelo se basan en la tasa agronómica calculada con base en los requerimientos de N o P del cultivo, hacer estudios de mineralización de la materia orgánica de los biosólidos aplicados al suelo, ya que la mineralización depende de muchos factores, como tipo de suelo, contenido de humedad de los biosólidos y del suelo, microorganismos presentes, clima, precipitación, etc. Puesto que,

diversos autores difieren bastante en el porcentaje de mineralización durante el ciclo del cultivo (7 a 55%)

8.7. LITERATURA CITADA

- Arriagada, C., P. Pacheco, G. Pereira, A. Machuca, M. Alvear, and J. Ocampo. 2009. Effect of arbuscular mycorrhizal fungal inoculation on *Eucalyptus globules* seedlings and some soil enzyme activities under application of sewage sludge amendment. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal* 9:89-101.
- Barbarick, K.A., and J.A. Ippolito. 2000. Nitrogen fertilizer equivalency of sewage biosolids applied to dryland winter wheat. *J. Environ. Qual.* 29:1345–1351.
- Bergkvist, P., D. Berggren, and N. Jarvis. 2005. Cadmium solubility and sorption in a long-term sludge-amended arable Soil. *J. Environ. Qual.* 34:1530–1538.
- California Plant Health Association, 2004. Manual de fertilizantes para cultivos de alto rendimiento. Limusa. México.
- Castellanos, J. Z., Uvalle, B. J. X. y Aguilar, S. A. 2000. Manual de Interpretación de Análisis de Suelos y Aguas. 2ª Edición. Colección INCAPA. Guanajuato, México.
- Chandra, K. S.; Prasad. M .N. V. 2005. Risk Assessment, Pathways, and Trace Element Toxicity of Sewage Sludge-Amended Agroforestry and Soils. *In: Prasad, M.N.V.; K.S. Sajwan and R. Naidu. (Eds.). Trace Element in the Environment. Boca Raton, FL. USA.*
- Celis, J., Sandoval, M. y Zagal, E. 2009. Actividad Respiratoria de Microorganismos en un Suelo Patagónico Enmendado con Lodos Salmonícolas. *Arch. Med. Vet.* 41: 275-279.
- De Browere, K. and Smolders, E. 2006. Yield Response of crops amended whit sewage sludge in the fieldis more affected by sludge properties than by final soil metal concentration. *European Journal of Soil Science.* 57: 858-867
- Elliott, H. A. 1986. Land application of Municipal Sewage Sludge. *J. Soil Water Conserv.* 41: 5-10.
- Epstein, E. 2003. Land Application of Sewage Sludge and Biosolidos. CRC Press LLC. Boca Raton, London, New York Washington, D.C.

- Fageria, N. K., Baligar, V. C., Jones, Ch. A. 2010. Growth and Mineral Nutrition of Field Crops. Third Edition. Taylor & Francis Group. Boca Raton London New York.
- Fiores-Márgez, J.P., Corral-Díaz, B.,I., Sapien- Mediano, G. 2007. Mineralización de Nitrógeno de Biosólidos Estabilizados con Cal en Suelos Agrícolas. Terra Latinoamericana 25: 409-407.
- Flores, T. F. J. y Flores, P. L. 2005. Los biosólidos de la planta tratadora de aguas residuales de la Ciudad de Aguascalientes: Características i Usos. Investigación y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes. 33: 4-11.
- González, C. F. Peña R. A., Robles, E. F. J. 2003. Guía Para Producir Maíz de Alta Calidad Forrajera. INIFAP. Centro de Investigación Regional Norte-Centro, Campo experimental Pabellón. Folleto para Productores No. 33. pp 18.
- Gros A. y Domínguez, V. 1992. Abonos: Guía práctica de fertilización 8ª ed. Mundi-Prensa, Madrid; España, 450 pp
- Havlin, J. L., Beaton, J. D., Tisdale, S. L., y Nelson, W. L. 1999. Soil fertility and fertilizers, an introduction to nutrient management. 6th Edition. Prentice Hall. New Jersey, USA.
- Hernández, T., Moreno, J.I., and Costa, F. 1991. Influence of Sewage Sludge Application on Crop Yields and Heavy Metal Availability. Soil Science Plant Nutrition, 37 (2), 201-210.
- Herrera, A. y Lazcano, F. I., 2000. ¿Sequía?, ¿Inundaciones?... El Potasio Ayuda al Maíz a Soportar el Estrés Hídrico. Informaciones Agronómicas, INFOPOS. 4 (2), 1-3.
- Hettiarachchi, G.M., K.G. Scheckel, J.A. Ryan, S.R. Sutton, and M. Newville. 2006. μ -XANES and μ -XRF investigations of metal binding mechanisms in biosolids. J. Environ. Qual. 35:342–351.
- Janssen, B.H. 1998. Efficient use of nutrients: An art of balancing. Field Crops Res. 56: 197-201.
- Jurado, P.; T. Arredondo, E. F.; Olalde, V. y Frías, J. 2007. Efecto de los Biosólidos Sobre la Humedad y los Nutrimientos del Suelo y La Producción de Forraje en pastizales Semiáridos. Terra Latinoamericana 25: 211-218.
- Kabata-Pendias, A. 2001. Trace Elements in Soils and Plants, 3rd edn. CRC Press, Boca Raton, FL.

- Lopez-Valdez F, Fernandez-Luqueno F, Luna-Guido ML, Marsch R, Olalde-Portugal V, Dendooven L. 2010. Microorganisms in sewage sludge added to an extreme alkaline saline soil affect carbon and nitrogen dynamics. *Appl. Soil Ecol.*, 45: 225-231.
- McBride, M.B. 2003. Toxic metals in sewage sludge-amended soils: Has promotion of beneficial use discounted the risks? *Adv. Environ. Res.* 8:5–19.
- Norma Oficial Mexicana, NOM-004-SEMARNAT-2002, 2003. Protección ambiental. Lodos y biosólidos. Especificaciones y límites máximos permisibles de contaminantes para su aprovechamiento y disposición final. Diario Oficial de la Federación. México. Publicada el 13 de agosto de 2003.**
- Obbard, J.P. 2001. Ecotoxicological assessment of heavy metals in sewage sludge amended soils. *Appl. Geochem* 16(11-12): 1404-1411.
- Oberle, S. L. and Keeney, D.R. 1994. Interaction of Sewage Sludge with Soil-Crop-Water Systems. . In C. E. Clapp, W.E. Larson, and R.H. Dowdy (Ed.) *Sewage Sludge: Land Utilization and the Environment*. ASA.CSSA. SSSA. Madison. WI.
- Ortiz, H. M. L., Gutiérrez, R. M. E. y Sánchez, S. E. 1995. Propuesta de manejo de los lodos residuales de la planta de tratamiento de la Ciudad Industrial del Valle de Cuernavaca, estado de Morelos, México. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*. 2: 105-115.
- Penn, J. C. and Sims, J. C. 2002. Phosphorus forms in biosolids-amended soil and losses in runoff: Effects of wastewater treatment process. *J. Environ. Qual.* 31:1349-1361.
- Pierzynski, G. M. 1994. Plant Nutrient Aspects of Sewage Sludge. In: C. E. Clapp, W.E. Larson, and R.H. Dowdy (Ed.) *Sewage Sludge: Land Utilization and the Environment*. ASA.CSSA. SSSA. Madison. WI.
- Porta, C. J., M. Acevedo y C. Roquero. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3ª Edición. Mundi-Prensa. Madrid, España.
- Smith, S. R. 1996. Agricultural Recycling of Sewage Sludge and the Environment. p. 155-206. *In Nutrients*. CAB Int., Wallingford. UK.
- Tamoutsidis, E.; Papadopoulos, I; Tokatlidis, S, I.; Zotis S. and Mabropoulos, T. 2002. Wet sewage sludge application effects on soil properties and

element content of leaf and root vegetables. J. Plant Nutrition. 25 (9):1941-1955.

Valdez-Perez MA, Fernandez-Luqueno F, Franco-Hernandez O, Flores-Cotera LB, Dendooven L 2011. Cultivation of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) in limed or unlimed wastewater sludge, vermicompost or inorganic amended soil. Sci. Hortic-Amsterdam 128: 380-387.

Waldrop, M.P., J.G. McColl, and R.F. Powers. 2003. Effects of forest postharvest management practices on enzyme activities in decomposing litter. Soil Science of America Journal 67:1250-1256.

8.8. ANEXOS

8.8.1. Anexo 1

Programa de aplicación de biosólidos en los suelos estudiados

El reciclaje de los biosólidos a través de la aplicación al terreno tiene varios propósitos. Estos mejoran las características del suelo, tales como la textura y la capacidad de absorción de agua, las cuales brindan condiciones más favorables para el crecimiento de las raíces e incrementan la tolerancia de la vegetación a la sequía. La aplicación de biosólidos también provee nutrientes esenciales para el crecimiento vegetal, incluyendo el nitrógeno y el fósforo, así como algunos micronutrientes esenciales, tales como el níquel, el zinc y el cobre. Los biosólidos pueden servir también como una alternativa o sustituto de los costosos fertilizantes químicos.

Los criterios del diseño de los programas de aplicación al terreno cubren los temas relacionados con las tasas de aplicación y lo adecuado del terreno. Los biosólidos, las áreas, y las características vegetativas son los factores de diseño más importantes a considerar.

1.1 Los biosólidos deben satisfacer los requisitos normativos referentes a la estabilización y el contenido de metales pesados.

De acuerdo con la NOM-004-SEMARNAT-2002, los biosólidos que se apliquen a suelos agrícolas deben cumplir con los siguientes requisitos:

1.1.1 Las personas físicas o morales interesadas en llevar a cabo el aprovechamiento o disposición final de los lodos y biosólidos a que se refiere esta Norma Oficial Mexicana, deberá de recabar la “constancia de no peligrosidad de los mismos” en términos del trámite SEMARNAT-07-007.

1.1.2 La aplicación de los biosólidos en terrenos con fines agrícolas y mejoramiento de suelos se sujetará a lo establecido en la Ley Federal de Sanidad Vegetal y conforme a la normatividad vigente en la materia.

1.1.3 Para la disposición final de los lodos y biosólidos, éstos deben cumplir con los límites máximos permisibles para el contenido del indicador de contaminación, patógenos y parásitos especificados en la tabla 2, para clase C.

1.1.4 Para efectos de esta Norma Oficial Mexicana los biosólidos se clasifican en tipo: excelente y bueno en función de su contenido de metales pesados; y en clase: A, B y C en función de su contenido de patógenos y parásitos.

TABLA 1. Límites Máximos Permisibles Para Metales Pesados En Biosólidos

Contaminante (determinados en forma total)	Excelentes mg/kg en base seca	Buenos mg/kg en base seca
Arsénico	41	75
Cadmio	39	85
Cromo	1 200	3 000
Cobre	1 500	4 300
Plomo	300	840
Mercurio	17	57
Níquel	420	420
Zinc	2 800	7 500

Los límites máximos permisibles de patógenos y parásitos en los lodos y biosólidos se establecen en la tabla 2.

Tabla 2. Límites Máximos Permisibles Para Patógenos Y Parásitos en Lodos y Biosólidos

CLASE	INDICADOR BACTERIOLOGICO DE CONTAMINACION	PATOGENOS	PARASITOS
	Coliformes fecales NMP/g en base seca	<i>Salmonella spp.</i> NMP/g en base seca	Huevos de helmintos/g en base seca
A	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 1(a)
B	Menor de 1 000	Menor de 3	Menor de 10
C	Menor de 2 000 000	Menor de 300	Menor de 35

(a) Huevos de helmintos viables; NMP número más probable

El aprovechamiento de los biosólidos, se establece en función del tipo y clase, como se especifica en la tabla 3 y su contenido de humedad hasta el 85%.

TABLA 3. APROVECHAMIENTO DE BIOSOLIDOS

TIPO	CLASE	APROVECHAMIENTO
EXCELENTE	A	<input type="checkbox"/> Usos urbanos con contacto público directo durante su aplicación <input type="checkbox"/> Los establecidos para clase B y C
EXCELENTE O BUENO	B	<input type="checkbox"/> Usos urbanos sin contacto público directo durante su aplicación <input type="checkbox"/> Los establecidos para clase C
EXCELENTE O BUENO	C	<input type="checkbox"/> Usos forestales <input type="checkbox"/> Mejoramientos de suelos <input type="checkbox"/> Usos agrícolas

1.2. Estabilización

1.2.1 Antes de aplicar lodos a un suelo, es necesario estabilizarlos

Los lodos producto del tratamiento de aguas residuales, deberán estabilizarse en los términos de las disposiciones legales y reglamentarias de la materia.

La estabilización es el proceso químico y biológico a que los lodos se someten para acondicionarlos para su aprovechamiento o disposición final, evitando o reduciendo los efectos dañinos al medio ambiente.

1.2.2. Procesos de estabilización

1. Digestión aerobia

Es la transformación bioquímica de la materia orgánica presente en los lodos, que es transformada en bióxido de carbono y agua por los microorganismos en presencia de oxígeno.

2. Digestión anaerobia

Es la transformación bioquímica de la materia orgánica presente en los lodos, que es transformada en gas metano y bióxido de carbono y agua por los microorganismos en ausencia de oxígeno disuelto y combinado.

3. Estabilización alcalina

Es el proceso mediante el cual se añade suficiente cal viva (óxido de calcio CaO) o cal hidratada (hidróxido de calcio Ca(OH)₂) o equivalentes, a la masa de lodos y biosólidos para elevar el pH.

4. Secado de los lodos

Es el proceso mediante el cual se reduce el volumen de los biosólidos

5. Composteo de los biosólidos

En el composteo de los lodos, la descomposición termofílica de los constituyentes orgánicos, producida por microorganismos aerobios, permite obtener un material relativamente estable, tal como el humus.

En la planta de tratamiento de aguas residuales de la ciudad de Aguascalientes, el proceso de estabilización a que someten los lodos residuales es digestión aerobia y secado mediante filtros prensa

1.2.3 Los sitios para su estabilización deberán: impermeabilizarse con materiales que no permitan el paso de lixiviados, y contar con drenes o con estructuras que permitan la recolección de lixiviados.

1.3 Caracterización de los biosólidos

Para que se cumpla con la normatividad mexicana y conocer el contenido nutricional y de elementos potencialmente tóxicos, se debe hacer una caracterización de los biosólidos antes de su aplicación al suelo.

La caracterización de los biosólidos deberá ser especialmente en lo referente a elementos inorgánicos acumulables, principalmente N, P y metales pesados, ya que en el caso de los compuestos orgánicos se debe cuidar su degradación pues no es posible una caracterización exhaustiva, ya que se considera que existen aproximadamente 400,000 sustancias peligrosas en este tipo de sistemas y una vez mezclado con un suelo esta cantidad aumenta.

1.4 Caracterización de los suelos

La caracterización química y física de los suelos donde se pretende aplicar biosólidos es indispensable, ya que no todos los suelos son aptos para recibir biosólidos.

1.5 Dosis de aplicación

La cantidad de biosólidos que podrían ser aplicados a un terreno es una función de la cantidad de nutrientes requeridos por la vegetación y de la cantidad de metales encontrados en los biosólidos.

La determinación óptima de las dosis y los lapsos de aplicación se puede establecer mediante experimentos en invernadero y en campo o mediante la determinación de la dosis agronómica basada en el requerimiento de N por los cultivos, esto es con la finalidad de no agregar N en exceso para evitar la contaminación de los cuerpos de agua con este elemento.

En los suelos aledaños a la planta de tratamiento de aguas residuales de Aguascalientes, (calcareos, con pH de 8.2 a 8.5), mediante experimentos de

campo e invernadero se estableció como dosis **óptima agronómica 80- 120 t ha⁻¹ de biosólidos**

1.6 Época y frecuencia de aplicación

La época de aplicación de biosólidos es muy importante, puesto que aplicaciones demasiado temprano a la siembra puede ocasionar competencia con malezas. Mientras que tardía no es aprovechada por el cultivo

Las frecuencias de aplicación son establecidas como medida para evitar que la carga acumulativa alcance niveles de toxicidad o daño al ambiente

La EPA no impone restricciones al uso frecuente de los biosólidos en tanto las concentraciones limite establecidos para metales pesados no sean rebasados y se utilicen dosis que no rebasen las necesidades de N de los cultivos.

1.7 Sitio de aplicación

Las prácticas de manejo ayudan a asegurar que la aplicación de biosólidos sea de tal manera que proteja la salud humana y el ambiente

Los sitios deben ser autorizados por las autoridades competentes en materia ambiental (parte 4.11 de la NOM-004-SEMARNAT-2002).

Uno de los problemas más importantes a tener en cuenta, es la elección de lugar en donde se aplicaran los biosólidos.

Las características de éste determinaran el diseño final.

Lo adecuado del terreno es determinado con base en factores tales como características del suelo, la pendiente, la profundidad del agua subterránea, y la proximidad al agua superficial.

Algunos ejemplos incluyen:

- El terreno debe ser suficiente para proporcionar áreas sin aplicación alrededor de los cuerpos de agua superficial, de pozos, y de humedales
- Debe haber una profundidad mínima de un metro de la superficie del terreno al agua subterránea.
- Un pH del suelo en el rango de 5.5 a 8.5 para reducir al mínimo el lixiviado de metales y para favorecer al máximo las condiciones de crecimiento de las cosechas.

Lo adecuado del terreno también está influenciado por las características de las áreas circundantes. Mientras que los olores y el tráfico de los camiones podrían no ser considerados como desagradables en áreas agrícolas, las dos

características pueden impactar adversamente los desarrollos residenciales y centros comunitarios cercanos a las áreas en donde se aplican los biosólidos.

El tipo de vegetación que se cultiva es también una consideración de diseño. La vegetación, así como las características del terreno, generalmente no excluyen la aplicación de biosólidos puesto que la mayoría de la vegetación se beneficia de esta práctica. Sin embargo, el tipo de vegetación afecta las opciones del equipo de aplicación, la cantidad de biosólidos que se aplican, y el periodo de aplicación.

Los biosólidos deben ser incorporados al suelo dentro de las 8 horas posteriores a su aplicación sobre el terreno. La incorporación se logra arando o mediante algún otro método que mezcle los biosólidos con el suelo

1.8 Control de las Aplicaciones

El productor debe mantener indefinidamente los registros siguientes:

- La ubicación de cada sitio (dirección exacta o latitud y longitud para el centro geográfico) en que se aplican los biosólidos
- El número de hectáreas en cada sitio
- La fecha y hora en que los lodos se aplicación a cada sitio
- La cantidad de biosólidos (en toneladas en base seca) que se aplica a cada sitio.
- La cantidad acumulada de cada contaminante en los biosólidos (en kilogramos por hectárea) aplicado a cada sitio, incluyendo cualquier cantidad de contaminantes procedentes de la aplicación anterior de lodos de depuradora.

8.8.2. ANEXO II. Artículo Publicado, “SALES SOLUBLES Y METALES PESADOS EN SUELOS TRATADOS CON BIOSÓLIDOS” EN: Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 16(2): 241-251, 2010.

Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente 16(2): 241-251, 2010.



SALES SOLUBLES Y METALES PESADOS EN SUELOS TRATADOS CON BIOSÓLIDOS

SOLUBLE SALTS AND HEAVY METALS IN BIOSOLIDS-TREATED SOIL.

Robledo- Santoyo¹; V. Espinosa Hernández²; R. Maldonado Torres¹; J. E. Rubiños Panta²; E. Hernández Acosta¹, E. Ojeda Trejo² y L. Corlay Chee¹

¹Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 Carr. México-Texcoco. Chapingo, Estado de México. C. P. 56230. MÉXICO.

Correo-e: erobledo@correo.chapingo.mx;

²Colegio de Postgraduados, km 36.5 Carr. México-Texcoco, Montecillo, Estado de México. C. P. 56230. MÉXICO.

RESUMEN

Las plantas de tratamientos de aguas residuales (PTAR) generan diariamente toneladas de lodos (biosólidos), los cuales pueden tener un uso agrícola como fuente de nutrientes y material mejorador del suelo, aunque también pueden ser fuente de contaminación por metales pesados y sales solubles. En este estudio se evaluó, en un suelo representativo de la zona de influencia de la PTAR de la ciudad de Aguascalientes, México, la aplicación de biosólidos y el efecto de su contenido de metales pesados y sales solubles en el suelo y plantas de pasto ballico, con la finalidad de establecer su aprovechamiento agrícola sin riesgo potencial de degradación y contaminación de suelos y plantas. Se hizo una caracterización química de los biosólidos y los suelos estudiados. Los biosólidos presentaron pH ligeramente ácido, alto contenido en sales solubles y concentración de metales pesados dentro de los límites máximos permisibles según la NOM-004-SEMARNAT-2002, por lo que se les puede dar uso agrícola. Dosis crecientes de biosólidos incorporados al suelo no presentaron efectos en éste, en cuanto a acumulación de metales pesados, pero sí se incrementó el contenido de sales solubles, y con dosis superiores a 80 t·ha⁻¹ se llegó a niveles que pueden reducir el rendimiento de la mayoría de cultivos.

Recibido: 9 de abril, 2010
Aceptado: 25 de julio, 2010
doi: 10.5154/rchscfa.2010.04.021
<http://www.chapingo.mx/revistas>

PALABRAS CLAVE:
Contaminación, degradación,
plantas de tratamiento de aguas
residuales

ABSTRACT

Wastewater treatment plants (WWTP) generate tons of sewage sludge or biosolids daily, which can have an agricultural use as a nutrient source and soil conditioner, although they can also be a source of pollution by heavy metals and soluble salts. This study evaluated, in soil representative of the WWTP area of influence in the city of Aguascalientes, Mexico, the application of biosolids and the effect of their heavy metals and soluble salts content on soil and ryegrass plants, in order to establish their agricultural use without potential degradation and soil-plant pollution risks. The biosolids and soils studied were chemically characterized. Biosolids had slightly acidic pH, high soluble salts content and heavy metals concentration within permissible maximum limits set by NOM-004-SEMARNAT-2002, meaning they can be used for agricultural purposes. Increasing biosolids doses in the soil had no effect on it, in terms of heavy metals concentrations, but soluble salts content did increase, and at doses higher than 80 t·ha⁻¹ levels were reached that can reduce most crop yields.

KEY WORDS: pollution,
degradation, wastewater
treatment plants.

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista de la sustentabilidad, la calidad del agua y el tratamiento del agua residual son importantes para el cuidado de la salud humana y el equilibrio de los ecosistemas. En el contexto de los problemas ambientales, la contaminación del agua ocupa un lugar prioritario a escala mundial. Las aguas residuales resultantes de usos domésticos e industriales, antes de su vertido a los cauces receptores, deben sanearse para minimizar su impacto contaminante (INEGI, 2009). La

INTRODUCTION

From the standpoint of sustainability, water quality and wastewater treatment are important elements for safeguarding human health and ecosystem balance. In the context of environmental problems, water pollution ranks as a high-priority concern on the world stage. Wastewater resulting from domestic and industrial uses, prior to its discharge into receiving channels, must be treated to minimize its pollution impact (INEGI). The installation of wastewater treatment plants (WWTP) in Mexico has been

8.8.3. ANEXO III. Ponencia presentada en el XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo del 16 - 20 de noviembre, 2009 en Costa Rica “**METALES PESADOS EN SUELOS MEJORADOS CON BIOSÓLIDOS**”.

**XVIII CONGRESO LATINOAMERICANO
DE LA CIENCIA DEL SUELO**

16 - 20 de noviembre, 2009 – Costa Rica

METALES PESADOS EN SUELOS MEJORADOS CON BIOSÓLIDOS

Edmundo Robledo S. (1), **Vicente Espinosa H.** (2), **Langen Corlay Ch.** (1), **Ranferi Maldonado T.** (1), **Enrique Rubiños P.** (2), **Enrique Ojeda T.** (2) y **Elizabeth Hernández A.** (1)

(1) *Universidad Autónoma Chapingo*

(2) *Colegio de Postgraduados, esantoyor@colpos.mx*

En la planta de tratamiento de aguas residuales “El Niágara” de Aguascalientes, México, se generan aproximadamente $160 \text{ m}^3 \text{ día}^{-1}$ de biosólidos que se aplican en parcelas aledañas a la planta con posibles riesgos de contaminación por metales pesados. Se colectaron muestras de biosólidos en diferentes épocas del año (secano y lluvias), y de suelos de la zona de estudio para determinar sus concentraciones de metales pesados (Fe, Cu, Mn, Pb, Cd, Ni y Zn). Se analizó la variación de estos metales pesados en los biosólidos y su efecto al aplicarlos en un suelo representativo de la zona (calcimórfico con pH de 8.5), con la finalidad de determinar la cantidad adecuada a aplicar sin rebasar los límites máximos permisibles de metales pesados. La aplicación de biosólidos disminuyó el pH del suelo e incrementó su contenido de materia orgánica. Las concentraciones de cada metal en biosólidos no superaron los límites máximos permisibles; en el suelo se incrementaron pero tampoco se rebasaron los límites permisibles, por lo que se pueden utilizar como biofertilizantes y como mejoradores en estos suelos.

Palabras clave: aguas residuales, biofertilizantes, contaminación

Introducción

Con el tratamiento de las aguas residuales se producen diariamente toneladas de lodos residuales (Biosólidos), los cuales en algunos lugares son una buena fuente de nutrimentos para las plantas y un buen material para mejorar el suelo; en otros son vistos como un material indeseable, ya que también contienen componentes considerados como nocivos para el ambiente (Chandra y Prasad 2005). El destino final de estos materiales es una de las mayores preocupaciones ambientales en el mundo, la aplicación al suelo es una de las principales alternativas de su disposición (Singh y Agrawl, 2008).

El contenido de metales pesados en los Biosólidos es el principal factor que restringe su uso en la agricultura (Chandra y Prasad 2005; De Brouwere y Smolders 2006), pero éste varía de acuerdo a la región en que se localice la planta de tratamiento de aguas residuales y al origen de éstas. En ECCACIV, planta que depura aguas industriales y domésticas, el Zinc es el metal pesado más abundante que resultó un factor limitante para la aplicación de estos lodos en campos agrícolas (Ortiz et al. 1995). A pesar de las buenas características agronómicas que presentan los biosólidos, algunos de ellos no pueden ser utilizados en la agricultura ya que contienen diferentes tipos de sustancias que en concentraciones superiores a ciertos niveles y en determinadas condiciones del medio pueden producir efectos tóxicos sobre los vegetales y las personas o animales que los ingieran o contaminar los suelos y las aguas subterráneas. Debido a la naturaleza heterogénea de los lodos residuales producida por los diferentes tratamientos y las variaciones estacionales, se requieren análisis químicos para determinar el contenido de nutrientes y metales pesados antes de aplicarlos al suelo (Singh y Agrawl 2008).

8.8.4 ANEXO IV. Ponencia presentada II International Symposium on Agricultural and Agroindustrial Waste Management March 13-15, 2011 – Foz do Iguaçu – Brazil, “EVOLUCIÓN DE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE UN SUELO CALCÁREO ACONDICIONADO CON BIOSÓLIDOS”.

EVOLUCIÓN DE ALGUNAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE UN SUELO CALCÁREO ACONDICIONADO CON BIOSÓLIDOS

Robledo- Santoyo¹; R. Maldonado Torres¹; V. Espinosa Hernández²E. Rubiños Panta²; E. Ojeda Trejo²; E. Hernández Acosta¹ y L. Corlay Chee¹
Universidad Autónoma Chapingo, km 38.5 carretera México-Texcoco¹ Colegio de Postgraduados² km 36.5 carretera México Texcoco, E mail: erobledo@correo.chapingo.mx

ABSTRACT

The objective is to establish an ideal doses to applying of sewage sludge (biosólidos) generated in the Plant of Treatment of Water Wastes of Aguascalientes City for the crop of maize (*Zea mays*), in a calcareous soil inside the area of influence of the plant. Deciding the changes in some chemical characteristics of the soil and in of the growth of the crop in the above mentioned soil, by a field experiment. This study was realized in plot of approximately two hectares. They determined and were applied, seven treatments, 0, 20, 40, 80, 120, 160 and 200 t ha⁻¹ of biosólidos in dry base to the soil, with four repetitions, obtaining 28 experimental units of 495m², only to the control treatment 0 t ha⁻¹ there was applied to him inorganic fertilizer (120-80-0). Samples of soil were collected before applying the sewage sludge and 1, 3 and 8 months before incorporated the biosólidos to the soil, to the week of been credit incorporated the sludge maize was sowed, providing the necessary dampness to the maize across rolled irrigation. To three months of established the crop, some variables of growth measured up. The addition of biosólidos to the studied soil improved notably his chemical characteristics like the decrease to pH, increase in the percentage of the organic matter and the capacity of exchange cationic, increases in the concentration of inorganic N and P, and K, Ca and Mg interchangeable, major availability of micronutrients as: Fe, Cu, Zn and Mn.

Keywords: Waterwastes, Sewage Sludge, calcareous soils

INTODUCCIÓN

En la actualidad, el manejo integral de los biosólidos ha cobrado gran importancia debido al potencial de uso benéfico que estos representan. Su aplicación en suelos es la práctica más empleada en diversos países de la Comunidad Europea, así como en los Estados Unidos de Norte América, representando aproximadamente un 45% y 56% respectivamente (Bastian 1997). En México solo el 30% de las aguas residuales son tratadas y se tiene registrado un volumen de aproximadamente 12'614,400 toneladas anuales de biosólidos y su destino se limita al depósito en vertederos y lagunas (Woo, et al, 2003).

Los biosólidos tienen valor fertilizante y mejoran las propiedades físicas y químicas de los suelos (Tester, 1990). Este material contiene cantidades considerables de materia orgánica, N, P y K, además de otros nutrimentos como Ca, Mg, Fe, Zn, Cu, Mn y B (Lovell, 1996). La productividad del suelo aumenta por causa del incremento de la materia orgánica ocurrido después de la aplicación de biosólidos, debido a una mayor movilización y adsorción de diferentes elementos en los suelos (Schnitzer, 1991). Los biosólidos pueden llegar a afectar la cadena alimenticia a través de los cultivos y contaminar las aguas freáticas, debido al alto contenido de nutrientes, microorganismos patógenos y diversos metales pesados.

La planta de tratamiento de aguas residuales de la Ciudad de Aguascalientes, tiene una capacidad de tratar hasta 2000 L s⁻¹. Esta actividad genera 150-170 m³ de biosólidos diariamente, los que son acumulados en áreas aledañas a la planta. Los biosólidos se están aplicando, sin control ni regulación en parcelas de agricultores cercanas a la planta, obteniendo diferentes rendimientos en la producción de maíz. Por lo que, en este trabajo se evaluó el efecto de la aplicación de dosis crecientes de biosólidos al suelo sobre algunas de sus características químicas del suelo y variables del crecimiento del cultivo de maíz.

Materiales y Métodos