



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE HIDROCIENCIAS

LOS BENEFICIOS DE LA UTILIZACIÓN DE *Prosopis laevigata* COMO AGENTE EN LA BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON AGUAS RESIDUALES

ROLANDO TREJO PÉREZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, ESTADO DE MÉXICO

2018

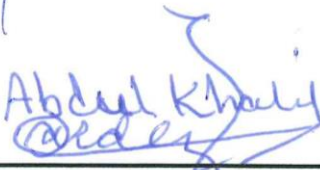
CONSENTIMIENTO DE USO DE LOS DERECHOS DE AUTOR Y DE LAS REGALIAS COMERCIALES DE PRODUCTOS DE INVESTIGACIÓN

En adición al beneficio ético, moral y académico que he obtenido durante mis estudios en el Colegio de Postgraduados, el que suscribe Rolando Trejo Pérez, estudiante de esta institución, estoy de acuerdo en ser participe de las regalías económicas y/o académicas, de procedencia nacional e internacional, que se deriven del trabajo de investigación que realicé en esta institución, bajo la dirección del Profesor Abdul Khalil Gardezi, por lo que otorgo los derechos de autor de mi tesis “Los beneficios de la utilización de *Prosopis laevigata* como agente en la biorremediación de suelos contaminados con aguas residuales”, y de los productos de dicha investigación al Colegio de Postgraduados. Las patentes y secretos industriales que se puedan derivar serán registrados a nombre del Colegio de Postgraduados y las regalías económicas que se deriven serán distribuidas entre la Institución, El Consejo o Director de Tesis y el que suscribe, de acuerdo a las negociaciones entre las partes, por ello me comprometo a no realizar ninguna acción que dañe el proceso de explotación comercial de dichos productos a favor de esta Institución.

Montecillo, Mpio. de Texcoco, Edo. de México, a 22 de febrero de 2018.



Rolando Trejo Pérez
Estudiante de Maestría en Ciencias

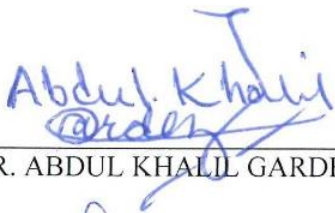





Dr. Abdul Khalil Gardezi
Vo.Bo. Consejero y Director de Tesis

La presente tesis titulada “**Los beneficios de la utilización de *Prosopis laevigata* como agente en la biorremediación de suelos contaminados con aguas residuales**”, realizada por el estudiante Rolando Trejo Pérez, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS
HIDROCIENCIAS**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO	 DR. ABDUL KHALIL GARDEZI GARDEZI
ASESOR	 DR. HÉCTOR FLORES MAGDALENO
ASESOR	 DR. GUILLERMO CARRILLO CASTAÑEDA
ASESOR	 DR. SERGIO ROBERTO MÁRQUEZ BERBER

Montecillo, Texcoco, Estado de México, febrero de 2018.

LOS BENEFICIOS DE LA UTILIZACIÓN DE *Prosopis laevigata* COMO AGENTE EN LA BIORREMEDIACIÓN DE SUELOS CONTAMINADOS CON AGUAS RESIDUALES

Rolando Trejo Pérez
Colegio de Postgraduados, 2018

RESUMEN

La microcuenca del Río Grande Tulancingo enfrenta una degradación de la calidad del suelo derivado del uso de aguas residuales, y producción de monocultivos en áreas de secano. La rehabilitación de su productividad requiere nuevas modalidades de producción. En laboratorio, un experimento completamente al azar fue empleado en la germinación de semillas de *Prosopis laevigata* con cepas de *Pseudomonas fluorescens*. En invernadero, se estableció un diseño experimental completamente al azar en arreglo factorial 2x3x5. Los factores suelo (vertisol y phaeozem), cepas de bacterias de *P. fluorescens* (A7 y Sv) y vermicomposta (0, 25, 50, 75 y 100 ton/ha) fueron analizados durante 180 días. Se evaluaron 27 variables de respuesta en árboles de mezquite; también incrementos morfológicos relacionados a la temperatura y la humedad relativa fueron analizados. Los resultados mostraron que la cepa A7 inhibió la germinación de semillas. El suelo vertisol mostró diferencias significativas en comparación al suelo phaeozem para 16 variables de respuesta. Además, respecto al tratamiento testigo y con diferencias significativas a los 180 días: el uso de 25 ton/ha de vermicomposta aumentó la biomasa aérea y subterránea, área foliar y volumen radical; la cepa bacteriana Sv elevó la biomasa en sección aérea y subterránea, área foliar e índice de Dickson; y la cepa bacteriana A7 fue útil en el incremento del número de ramas y folíolos. El aumento de la temperatura se correlacionó significativamente con el incremento de altura y número hojas. Una mayor humedad relativa disminuyó el incremento del índice de esbeltez. En conclusión, el uso de los siguientes niveles son óptimos para el crecimiento de mezquite: suelo vertisol irrigado con aguas residuales, dosis de 25 ton/ha de vermicomposta, y cepa bacteriana Sv.

Palabras clave: bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB), microcuenca, rehabilitación de suelos, vermicomposta, y *Pseudomonas fluorescens*.

BENEFICIAL USES OF *Prosopis laevigata* TREES AS AN AGENT IN THE BIOREMEDIATION OF CONTAMINATED SOILS WITH SEWAGE WATER

**Rolando Trejo Pérez
Colegio de Postgraduados, 2018**

ABSTRACT

The Río Grande Tulancingo micro basin versant faces a degradation of soil quality because of the use of sewage water and monoculture production in rain-fed agriculture areas. The rehabilitation of soil productivity requires new production alternatives. In the laboratory, a completely randomized experiment was used to germinate seeds of *Prosopis laevigata* inoculated with strains of *Pseudomonas fluorescens*. In the greenhouse, a completely randomized experimental design was established in a 2x3x5 factorial arrangement. The factors assessed were: soil (vertisol and phaeozem), strains of *P. fluorescens* (A7 and Sv) and vermicompost (0, 25, 50, 75 and 100 ton/ha) for 180 days. Twenty-seven variables were measured in mesquite trees (*P. laevigata*). In addition, morphological increases related to temperature and relative humidity were analyzed. Results showed that strain A7 inhibited seed germination. Moreover, there were significant difference in 16 variables for vertisol soil. Regarding the control plot and a significant difference at 180 days there were the following results: the use of 25 tons/ha of vermicompost increased the shoot and root biomass, leaf area, and root volume; the bacterial strain Sv enhanced the biomass in the shoot and root section, leaf area and Dickson index; and the bacterial strain A7 was useful for increasing the number of branches and leaflets. An increase in temperature was correlated significantly with an augmentation in height and leaf number. Higher relative humidity decreased the increase in the slenderness index. In conclusion, the use of the following factor levels are optimal for the growth of mesquite: vertisol soil, 25tons/ha of vermicompost, and strain Sv.

Keywords: *plant growth promoting bacteria (PGPB), micro basin versant, soil rehabilitation, vermicompost, and Pseudomonas fluorescens.*

AGRADECIMIENTOS

El desarrollar esta investigación fue posible gracias a la colaboración de profesores y personal administrativo del Colegio de Postgraduados, así como la participación de los productores agrícolas de la comunidad de Encinillos, municipio de Acatlán, estado de Hidalgo.

Quiero agradecer profundamente a mi Consejo Particular, en especial al Dr. Abdul Khalil Gardezi por su valiosa colaboración científica en la realización de este trabajo.

Un especial gracias a Oswaldo Trejo por su soporte técnico en experimentación en invernadero del Colegio de Postgraduados.

Agradezco las asesorías y apoyo estadístico brindado por la Dra. María de los ángeles Velázquez Hernández y el M.C. Mario Ulises Larqué Saavedra.

También, un reconocimiento a l'Institut de recherche en biologie végétale (IRBV) de la Université de Montréal, en especial al Dr. Michel Labrecque por su soporte incondicional en mi estancia de investigación.

Este trabajo de investigación fue apoyado financieramente por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT).

DEDICATORIA

A MIS PADRES,
HERMANOS(AS) Y SOBRINOS,
AMIGOS(AS),
Y A J.M. BOISVERT.

CON USTEDES ES IMPOSIBLE NO APRENDER COSAS NUEVAS.

CONTENIDO

RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE CUADROS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 - ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN.....	3
1.1 Antecedentes.....	3
1.1.1 Hidrología de la microcuenca del Río Grande Tulancingo.....	3
1.1.2 Agua residual: la agricultura de riego en la microcuenca del Río Grande Tulancingo.....	3
1.1.3 Agua de lluvia: áreas de producción agrícola con régimen de secano.....	4
1.2 Justificación.....	5
CAPÍTULO 2 – HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	6
2.1 Hipótesis	6
2.2 Objetivos	7
2.2.1 Objetivo general	7
2.2.2 Objetivos específicos	7
CAPÍTULO 3 – MARCO TEÓRICO.....	9
3.1 Restauración ecológica	9
3.2 Rehabilitación de suelos.....	10
3.3 Reclamación de suelos	10
3.4 Remediación de suelos.....	10
3.5 Degradación de suelos	11
3.6 Fuentes de contaminación en suelos	11
3.7 Propiedades físicas y químicas en suelo.....	12
3.7.1 pH	12
3.7.2 Conductividad eléctrica.....	13
3.7.3 Materia orgánica	13
3.7.4 Textura.....	14
3.7.5 Macronutrientes.....	14
3.7.5.1 Nitrógeno	14
3.7.5.2 Fósforo asimilable.....	15
3.7.5.3 Potasio intercambiable.....	15
3.7.5.4 Calcio intercambiable.....	16
3.7.5.5 Magnesio intercambiable	16
3.7.6 Micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn, y Mo).....	16
3.7.7 Boro	18
3.7.8 Elementos potencialmente tóxicos (Pb, Cr, Cd, Ni, y Co).....	18
3.8 Uso de fitotecnologías en la mejora de la calidad ambiental	20

3.8.1	Importancia del uso de leguminosas arbóreas y microorganismos asociados como fitotecnologías.....	21
3.8.2	Mezquite como árbol de usos múltiples.....	21
3.8.2.1	Distribución geográfica	22
3.8.2.2	Clasificación taxonómica	23
3.8.2.3	Descripción de la especie <i>Prosopis laevigata</i>	23
3.8.2.4	Morfología y anatomía.....	23
3.8.2.5	Importancia económica.....	24
3.8.2.6	Importancia ecológica.....	25
3.8.3	Microorganismos promotores del crecimiento vegetal.....	26
3.8.3.1	Caracterización de <i>Pseudomonas</i> spp. fluorescentes y <i>Pseudomonas fluorescens</i>	27
3.8.3.2	Clasificación taxonómica	28
3.8.3.3	Ecología	28
3.8.3.4	Interacciones <i>Rhizobium-Pseudomonas</i>	29
CAPÍTULO 4 - DESARROLLO EXPERIMENTAL.....		30
4.1	Origen de los suelos.....	30
4.1.1	Ubicación del área de estudio.....	30
4.1.2	Muestreo de suelos.....	31
4.1.3	Caracterización de suelos.....	32
4.1.3.1	Propiedades físico-químicas y elementos contaminantes del suelo	32
4.2	Origen de vermicomposta, cepas bacterianas de <i>Pseudomonas fluorescens</i> y semillas de <i>Prosopis laevigata</i>	33
4.3	Germinación de semillas de <i>Prosopis laevigata</i>	34
4.3.1	Diseño experimental completamente al azar.....	34
4.3.2	Germinación de semillas de <i>Prosopis laevigata</i> en asociación con cepas A7 y Sv de células bacterianas de <i>Pseudomonas fluorescens</i>	34
4.3.3	Germinación de semillas de <i>Prosopis laevigata</i> en sulfato de cobre penta hidratado.....	35
4.4	Uso de factores suelo, vermicomposta y cepas bacterianas de <i>Pseudomonas fluorescens</i> en crecimiento de <i>Prosopis laevigata</i>	36
4.4.1	Diseño experimental factorial completamente al azar, factores y niveles.....	36
4.4.2	Organización	38
4.4.3	Tratamientos y variables de respuesta.....	39
4.4.3.1	VARIABLES EVALUADAS DESDE LOS 30 DÍAS HASTA LOS 180 DÍAS.....	39
4.4.3.2	VARIABLES EVALUADAS A LOS 180 DÍAS	42
4.4.3.3	VARIABLES AMBIENTALES E INCREMENTOS MORFOLÓGICOS.....	44
4.4	Labores culturales en experimento de invernadero.....	44
4.5	Otras consideraciones	45
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN		47
5.1	Caracterización del suelo	47
5.1.1	Propiedades físicas y químicas de los suelos	47
5.1.1.1	Suelo phaeozem en agricultura de secano	47
5.1.1.2	Suelo vertisol irrigado con aguas residuales	48
5.1.2	Elementos contaminantes del suelo	49
5.2	Caracterización de vermicomposta	50
5.2.1	Propiedades físicas y químicas de la vermicomposta.....	50
5.2.2	Elementos contaminantes de la vermicomposta.....	51

5.3 Germinación de semillas de <i>Prosopis laevigata</i> en asociación con cepas A7 y Sv de células bacterianas de <i>Pseudomonas fluorescens</i>	52
5.3.1 Porcentaje de germinación de semillas de <i>Prosopis laevigata</i>	52
5.3.2 Porcentaje de sobrevivencia de semillas de <i>Prosopis laevigata</i>	53
5.4 Germinación de semillas de <i>Prosopis laevigata</i> en diluciones de sulfato de cobre penta hidratado.....	54
5.4.1 Porcentaje de germinación de semillas de <i>Prosopis laevigata</i>	54
5.4.2 Peso anhidro de plántulas.....	56
5.5 Variables agronómicas en invernadero.....	57
5.5.1 Variables evaluadas desde los 30 días hasta los 180 días.....	58
5.5.1.1 Altura de plántula.....	58
5.5.1.2 Diámetro de tallos.....	60
5.5.1.3 Número de hojas.....	62
5.5.1.4 Volumen aéreo.....	63
5.5.1.5 Medición de clorofila.....	65
5.5.1.6 Índices morfológicos.....	66
5.5.1.6.1 Índice de esbeltez.....	66
5.5.2 Variables evaluadas a los 180 días.....	68
5.5.2.1 Número de fascículos y ramas.....	68
5.5.2.2 Número, longitud y ancho de foliolos.....	69
5.5.2.3 Longitud radicular.....	70
5.5.2.4 Número de nódulos.....	71
5.5.2.5 Volumen radical.....	71
5.5.2.6 Biomasa aérea y subterránea.....	72
5.5.2.7 Índices morfológicos.....	74
5.5.2.7.1 Área Foliar (AF).....	74
5.5.2.7.2 Índice de calidad de Dickson.....	75
5.5.2.7.3 Relación biomasa aérea entre biomasa subterránea.....	75
5.6 Variables ambientales e incrementos morfológicos.....	76
5.6.1 Temperatura.....	77
5.6.2 Humedad relativa.....	79
5.7 Otras consideraciones.....	80
5.7.1. Análisis de tejido vegetal: hojas y tallos.....	80
5.7.2 Análisis de impactos económicos.....	81
6-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	83
6.1 Caracterización de suelos.....	84
6.2 Germinación.....	84
6.3 Uso de factores suelo, vermicomposta y cepas bacterianas de <i>Pseudomonas fluorescens</i> en crecimiento de <i>Prosopis laevigata</i>	85
6.3.1 Factor suelo.....	85
6.3.2 Factor materia orgánica: vermicomposta.....	85
6.3.3 Factor cepas bacterianas de <i>Pseudomonas fluorescens</i>	86
6.4 Variables ambientales e incrementos morfológicos en <i>Prosopis laevigata</i>	86
6.5 Recomendaciones.....	86
7- LITERATURA CITADA.....	88
8- ANEXOS.....	103

LISTA DE CUADROS

Cuadro 3.1. Deficiencias o excesos de macro y micronutrientes en plantas.....	19
Cuadro 3.2 Ventajas del uso de leguminosas arbóreas y sus microorganismos asociados ..	22
Cuadro 3.3. Clasificación taxonómica de mezquite (<i>Prosopis laevigata</i>).....	23
Cuadro 3.4 Morfología y anatomía de <i>Prosopis laevigata</i>	24
Cuadro 3.5. Usos y aplicaciones del mezquite	25
Cuadro 4.1. Clasificación hidrológica del sitio de estudio.....	30
Cuadro 4.2. Propiedades físicas y químicas, y elementos contaminantes en el suelo.....	32
Cuadro 4.3. Metodología de determinación de propiedades físico-químicas y elementos contaminantes del suelo.....	33
Cuadro 4.4. Factores y niveles empleados en el diseño experimental factorial completamente al azar.....	38
Cuadro 4.5. Aleatorización y ubicación de las unidades experimentales en invernadero.	38
Cuadro 4.6. Tratamientos en el diseño experimental factorial completamente al azar.....	39
Cuadro 4.7. Clasificación de las variables de respuesta	41
Cuadro 4.8. Interpretación de la relación biomasa aérea y biomasa subterránea	43
Cuadro 4.9. Intervalos de calidad de planta de atributos morfológicos	44
Cuadro 4.10. Ponderación de impactos económicos.....	46
Cuadro 5.1. Propiedades físicas y químicas del suelo.....	49
Cuadro 5.2. Elementos contaminantes del suelo	50
Cuadro 5.3. Propiedades físicas y químicas de la vermicomposta	51
Cuadro 5.4. Elementos contaminantes de la vermicomposta.....	52
Cuadro 5.5. Porcentaje de germinación y sobrevivencia de semillas de <i>Prosopis laevigata</i>	54
Cuadro 5.6. Porcentaje de germinación y peso anhidro de semillas de <i>Prosopis laevigata</i> en diluciones de sulfato de cobre penta hidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).	57
Cuadro 5.7. Variables evaluadas en árboles de <i>Prosopis laevigata</i> en condiciones de invernadero en Jalisco y Durango.....	57
Cuadro 5.8. Comparación de medias de Tukey: altura de plántula (30-90 días).....	58
Cuadro 5.9. Comparación de medias de Tukey: altura de plántula (105-180 días).....	59
Cuadro 5.10. Comparación de medias de Tukey: diámetro de tallos (30-90 días)	60
Cuadro 5.11. Comparación de medias de Tukey: diámetro de tallos (105-180 días)	61

Cuadro 5.12. Comparación de medias de Tukey: número de hojas (30-90 días)	62
Cuadro 5.13. Comparación de medias de Tukey: número de hojas (105-180 días)	63
Cuadro 5.14. Comparación de medias de Tukey: volumen aéreo (30-90 días)	64
Cuadro 5.15. Comparación de medias de Tukey: volumen aéreo (105-180 días)	65
Cuadro 5.16. Comparación de medias de Tukey: clorofila SPAD (60-180 días)	66
Cuadro 5.17. Comparación de medias de Tukey: Índice de esbeltez (30-90 días)	67
Cuadro 5.18. Comparación de medias de Tukey: Índice de esbeltez (105-180 días)	68
Cuadro 5.19. Comparación de medias de Tukey: número de fascículos y ramas	69
Cuadro 5.20. Comparación de medias de Tukey: número, longitud y ancho de folíolos	70
Cuadro 5.21. Comparación de medias de Tukey: sección radicular	72
Cuadro 5.22. Comparación de medias de Tukey: biomasa aérea y subterránea	74
Cuadro 5.23. Comparación de medias de Tukey: índices morfológicos	76
Cuadro 5.24. Variables ambientales: temperatura y humedad relativa en germinación y crecimiento de <i>Prosopis laevigata</i> durante 180 días	77
Cuadro 5.25. Coeficientes de correlación de Pearson: temperatura (°C) e incrementos morfológicos de los factores suelo y cepas bacterianas de <i>Prosopis fluorescens</i>	79
Cuadro 5.26. Coeficientes de correlación de Pearson: temperatura (°C) e incrementos morfológicos del factor vermicomposta	79
Cuadro 5.27. Coeficientes de correlación de Pearson: humedad relativa (%) e incrementos morfológicos de los factores suelo y cepas bacterianas de <i>P. fluorescens</i>	80
Cuadro 5.28. Coeficientes de correlación de Pearson: humedad relativa (%) e incrementos morfológicos del factor vermicomposta	80
Cuadro 5.29. Análisis de nitrógeno, fósforo y potasio en tejido vegetal de hojas y tallos de <i>Prosopis laevigata</i>	81
Cuadro 5.30. Matriz de identificación de impactos económicos y ambientales para el uso de tres formas distintas de fertilización	82

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1. Germinación diaria de semillas de <i>P. laevigata</i> inoculadas con cepas bacterianas de <i>Pseudomonas fluorescens</i>	53
Figura 5.2. Germinación acumulada de semillas de <i>Prosopis laevigata</i> inoculadas con cepas bacterianas de <i>Pseudomonas fluorescens</i>	54
Figura 5.3. Germinación diaria de semillas de <i>Prosopis laevigata</i> en diluciones de sulfato de cobre penta hidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).	55
Figura 5.4. Germinación acumulada de semillas de <i>Prosopis laevigata</i> de las soluciones de sulfato de cobre penta hidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) (%).	56
Figura 5.5. Temperatura promedio, máxima y mínima asociada a germinación y crecimiento de <i>Prosopis laevigata</i> durante 180 días.....	78
Figura 5.6. Humedad relativa promedio, máxima y mínima asociada a germinación y crecimiento de <i>Prosopis laevigata</i> durante 180 días.....	78
Figura 3.1. Distribución Mundial del género <i>Prosopis</i>	108
Figura 3.2. Distribución y usos del mezquite en la República Mexicana.....	108
Figura 4.1. Ubicación de las parcelas a muestrear con riego de aguas residuales y secano de la microcuenca baja de Río Grande.	109
Figura 4.2. Ubicación de la parcela con riego de aguas residuales en la microcuenca baja del Río Grande Tulancingo.....	109
Figura 4.3. Ubicación de la parcela a muestrear correspondiente a agricultura de secano.	110
Figura 4.4. Distribución de puntos de muestreo en suelo phaeozem irrigado con aguas residuales.....	110
Figura 4.5. Distribución de puntos de muestreo en suelo vertisol con agricultura de secano.....	110
Figura 4.6. Muestras de suelo de 0-5, 0-10 y 10-40 cm en suelo phaeozem irrigado con aguas residuales.....	111
Figura 4.7. Muestras de suelo de 0-5, 0-10 y 10-40 cm en suelo vertisol con agricultura de secano.....	111
Figura 4.8. Árbol de <i>Prosopis laevigata</i> ubicado en la microcuenca baja del Río Grande Tulancingo.....	111
Figura 4.9. Dimensiones de hojas y vainas de <i>Prosopis laevigata</i>	111
Figura 4.10. Vainas de <i>Prosopis laevigata</i> : exocarpo carnoso, leñoso y semillas.....	111

Figura 4.11. Semillas de <i>Prosopis laevigata</i>	111
Figura 4.12. Inoculación de semillas de <i>Prosopis laevigata</i> con cepas bacterianas de <i>Pseudomonas fluorescens</i>	112
Figura 4.13. Germinación de semillas de <i>Prosopis laevigata</i> inoculadas con <i>Pseudomonas fluorescens</i>	113
Figura 4.14. Germinación de semillas de <i>Prosopis laevigata</i> en diluciones de sulfato de cobre penta hidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) desde 10^{-2} hasta 10^{-7} M y tratamiento testigo.....	114
Figura 4.15. Sitio de experimentación.	114
Figura 4.16. Adición de vermicopmposta (0-100 ton/ha) a suelos vertizol y phaeozem.	114
Figura 4.17. Plántulas de <i>Prosopis laevigata</i> en camas semillero.	114
Figura 4.18. Árboles de <i>Prosopis laevigata</i> después de 180 días de crecimiento.	114

INTRODUCCIÓN

Se estima que el promedio de la degradación edáfica en México es de 1.3 millones de km², lo que representa cerca del 70% del territorio nacional (López, 2016). Las variadas formas de degradación de los suelos, derivadas primordialmente del uso y manejo que se le da a las tierras, se han transformado en la mayor limitación para la expansión e intensificación de la agricultura en todo el mundo (Lugo-Morín y Rey, 2009). Sin embargo, Cotler *et al.* (2007) señalan que la conservación y rehabilitación del suelo, lleva consigo de forma inherente la conservación y rehabilitación del conjunto de los elementos bióticos y abióticos del paisaje.

Actualmente, se requieren tecnologías de aceptación social, compatibles con el medio ambiente y de bajo costo en la rehabilitación de la productividad de suelos agrícolas degradados por uso de aguas residuales y deterioro por prácticas de manejo específicas. Por una parte hay un incremento del interés en el desarrollo de tecnología respetuosa con el ambiente centradas en el uso de bacterias promotoras del crecimiento vegetal que son conocidas por mejorar el crecimiento en cultivos agrícolas (Egamberdieva, 2008; Karakurt *et al.*, 2011; Radhapriya *et al.*, 2015). Por otro lado, existe el creciente uso de materiales locales que parten del aprovechamiento de abonos, estiércoles, especies fijadoras de nitrógeno, etc., cuya utilización integrada de éstas tecnologías promueven la producción sustentable en áreas agrícolas.

Las especies de flora arbórea y arbustiva de importancia económica y ecológica presentes en la microcuenca del Río Grande Tulancingo se compone por aquellas distribuidas entre áreas con limitaciones de agua y por los individuos que forman parte de la vegetación riparia tales como *Salix spp.*, *Fraxinus uhdei*, *Quercus spp.*, *Schinus molle*, *Prunus setina spp. capulí*, *Crataegus mexicana*, *Yucca filifera*, *Opuntia spp.*, *Agave inaequidens*, *Mimosa biuncifera* y *Prosopis laevigata*. Por tanto, éste trabajo analiza el uso de tres factores específicos, es decir, suelos con prácticas de manejo diferenciados por el uso de aguas residuales y agricultura bajo condiciones de secano en la microcuenca baja del Río Grande Tulancingo, la adición de vermicomposta como fuente alternativa de nutrientes, y el uso de cepas bacterianas específicas de *P. fluorescens* inoculadas en las raíces de mezquite (*P. laevigata*). Este último elemento, es una especie con funciones en la rehabilitación de la calidad de los suelos agrícolas degradados (Osuna y Meza, 2003; Ruiz, 2011), control de la erosión, fijación del nitrógeno de la atmosfera al suelo mejorando su fertilidad, alimento y refugio de la fauna silvestre, entre otras (Carrillo *et al.*, 2007).

CAPÍTULO 1 - ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN

Este capítulo describe la problemática asociada en los sistemas de producción agrícola empleados por los agricultores en la sección baja de la microcuenca del Río Grande Tulancingo (ver delimitación geográfica en figura 4.1-4.3 del anexo 15) de donde se originan las semillas y suelos empleados en ésta investigación. Por un lado, se presentan los retos encaminados al riego rodado con aguas residuales; por el otro los desafíos encaminados en el sistema de producción de secano. Ambos sistemas agrícolas están influidos por el deterioro de la calidad del suelo debidos a procesos de degradación de distinta naturaleza; ya sea por el aporte de aguas residuales, o por la degradación debido al arrastre de material edáfico y erosión eólica ocasionado por la reducción de la cobertura vegetal y los monocultivos.

1.1 Antecedentes

1.1.1 Hidrología de la microcuenca del Río Grande Tulancingo

Los escurrimientos de la microcuenca del Río Grande Tulancingo alimentan las aguas que atraviesan la Reserva de la Biósfera de Metztitlán. El principal rasgo hidrológico superficial de la Reserva lo conforma un río identificado en tres tramos importantes, que a lo largo de sus 100 km toma el nombre de acuerdo a la región. El primer tramo corresponde a su entrada al Sur de la Barranca con el nombre de Río Grande Tulancingo; el segundo, en la unión con el Río San Sebastián conocido como el Río Venados; y el tercero donde inicia el Distrito 08 Metztitlán con el nombre de Río Metztitlán, al Norte de la Reserva (CNANP, 2003). La precipitación anual de acuerdo a las estaciones 13059 y 13061 de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) presenta 523.0-525.9 mm, que se concentra en los meses de abril-septiembre (Lira, 2010).

1.1.2 Agua residual: la agricultura de riego en la microcuenca del Río Grande Tulancingo

Aunque sabemos que el uso de aguas residuales en riego agrícola presenta ventajas como el incremento de nutrimentos como nitrógeno, fósforo, potasio y materia orgánica, además de proporcionar humedad a los cultivos, también se presentan desventajas cuando su uso es inadecuado o no se consideran las condiciones del suelo en los que serán vertidas. Otra forma de contaminación al suelo por el uso de aguas residuales es la posible acumulación de metales pesados (Montoya, 2010).

El uso de aguas residuales para el riego de cultivos es cada vez más común, sobre todo en zonas áridas y semiáridas. Los rendimientos de los cultivos son más elevados, ya que las aguas residuales no sólo contienen el agua para el crecimiento de los cultivos, sino también los nutrientes de las plantas (principalmente nitrógeno y fósforo). Sin embargo, existe el riesgo de que el riego con aguas residuales pueda facilitar la transmisión de patógenos y la movilidad de elementos potencialmente tóxicos (Zamora *et al.*, 2008; Montoya, 2010).

Sánchez, *et al.* (2008) encontraron que en el municipio de Acatlán las concentraciones de Pb, Cd y N-NH₃ superaron los límites permisibles de las normas de calidad en agua para consumo humano, las cuales fueron de 0.025 ppm para Pb, 0.20 ppm para Cd y 0.40 ppm para N-NH₃ (NOM-127-SSA-1994), lo que indicó que las continuas descargas de aguas residuales en los cuerpos de agua pudieron afectar sus propiedades naturales.

El plan de desarrollo municipal de Acatlán 2012-2016 (H. A. A., 2012) señala en sus líneas de acción el establecimiento con toda claridad de la reglamentación municipal de las condiciones para el manejo de las aguas residuales domésticas, pluviales e industriales, en un municipio con actividades productivas como el cultivo de forraje (cebada, maíz, alfalfa, etc.), la ganadera (ovinos, bovinos, porcinos, etc.), forestal y plantas productoras de queso y muebles. Sin embargo, el vertimiento de aguas residuales es llevado a cabo por la industria y por las actividades urbanas.

1.1.3 Agua de lluvia: áreas de producción agrícola con régimen de secano

Las condiciones de aridez de la región centro-norte de México limitan la producción agrícola y pecuaria, ya que la disponibilidad de agua está en función de la cantidad, distribución espacial y temporal de la precipitación (Pineda-Martínez *et al.*, 2013). Esta limitante se refleja en la producción de áreas de producción agrícola, que reduce la producción y rendimiento de cultivos como maíz y frijón en la microcuenca del Río Tulancingo.

De acuerdo a Íñiguez-Covarrubias *et al.* (2014), en el 2013 se cultivaron en promedio cerca de 20 millones de hectáreas que representaron un promedio de 70% de la superficie agrícola potencial, con un rango de variación anual de 60% a 85% de dicha superficie. La mayor parte de la agricultura se practicó bajo condiciones de temporal, totalizando 75% la superficie anualmente

establecida. Esta limitante hídrica se aprecia en las áreas destinadas a la producción agrícola en la microcuenca del Río Tulancingo.

1.2 Justificación

En la actualidad, los productores agropecuarios de la microcuenca baja de Río Grande Tulancingo se enfrentan a problemas relacionados con la utilización de aguas residuales provenientes de la industria lechera y descargas municipales. Además, existe un amplio uso de zonas de agricultura de secano para diversos monocultivos, principalmente la producción de maíz (*Zea mays*), cebada (*Hordeum vulgare*) y trigo (*Triticum aestivum*), que se caracterizan por el acceso restringido de agua.

En zonas con accesibilidad de agua, es habitual el riego con aguas residuales en los cultivos de alfalfa (*Medicago* spp.) y trébol (*Trifolium* spp.). En adición, es frecuente la incorporación de materia orgánica proveniente de las explotaciones de ganado bovino a sitios con alta disponibilidad de agua de riego. Por otra parte, en el sistema de agricultura de secano ubicado principalmente en zonas de laderas se tiene el inconveniente de erosión del suelo provocado por escurrimientos y vientos.

La utilización de árboles de *P. laevigata* inoculados con cepas bacterianas específicas de *P. fluorescens* es una alternativa a la reducción de la pérdida de suelos en laderas, fijación de nitrógeno y disposición de fósforo como elementos limitantes en la producción de alimentos básicos y forrajes. De hecho, la experimentación en invernadero provee de información importante a ser utilizada, tanto en aplicaciones de agricultura protegida y toma de decisiones futuras en sitios donde los suelos han sido recolectados, especialmente en la disminución de erosión y aumento de disponibilidad de nutrientes. En el caso de sitios donde existe acumulación de nutrientes tales como el fósforo, el uso de árboles y cobertura vegetal evita problemas como la pérdida de este elemento hacia cuerpos de agua.

CAPÍTULO 2 – HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

En la microcuenca baja del Río Grande Tulancingo se presenta un deterioro de recursos naturales detonado por las actividades agrícolas, gestión de aguas municipales, estiércol de explotaciones ganaderas, entre otros. Sin embargo aún con este deterioro, es posible encontrar siempre distintas especies nativas de flora con utilidad potencial y compatibles para las actividades agrícolas y ganaderas, ya que pueden ser integradas como especies de usos múltiples. En adición, el uso de fuentes alternativas de fertilización como vermicomposta y microorganismos son fundamentales en el desarrollo de nuevas estrategias de producción.

2.1 Hipótesis

Las cuatro hipótesis de ésta investigación son:

1. El uso de aguas residuales en el suelo vertisol, en comparación con el suelo phaeozem con agricultura de secano, presenta concentraciones peligrosas de los elementos contaminantes plomo, níquel, cobalto, cromo y cadmio.
2. La germinación de semillas de *P. laevigata* difiere con el medio de germinación empleado:
 - a) El sulfato de cobre penta hidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) inhibe la germinación de semillas de *P. laevigata* en dilución 10^{-2} M.
 - b) *P. fluorescens* favorece la germinación de semillas y sobrevivencia de plántulas en cama semillero de *P. laevigata*.
3. Los niveles de los factores cepas bacterianas (A7 y Sv) de *P. fluorescens*, suelos (phaeozem y vertisol), y vermicomposta (0, 25, 50, 75, y 100 ton/ha) producen efectos diferentes en variables agronómicas, fisiológicas e indicadores morfológicos de calidad de planta de *P. laevigata*.
4. El aumento de la temperatura y la humedad relativa en invernadero se correlacionan con los incrementos de altura, diámetro, volumen, hojas e índice de esbeltez.

Las hipótesis presentadas se apoyan sobre la teoría de los autores tales como Gardezi *et al.*, 1988, 1989, 1990ab, 1991, 1992, 1995, 2006, 2007, 2008, 2009; Egamberdieva, 2008; Karakurt *et al.*, 2011; Radhapriya *et al.*, 2015; Andrade *et al.*, 2000; Sánchez, 2012; David y

Struchtemeyer, 1990; Rodríguez *et al.*, 2006; Elekhtyar, 2015; Bashan *et al.*, 2012; Radhapriya *et al.*, 2015; Navarrete *et al.*, 2011; entre otros, y todas fueron consideradas dentro de los diseños experimentales (campo, laboratorio e invernadero), los cuales permiten cuestionar el planteamiento de éstas suposiciones.

2.2 Objetivos

El objetivo general y los objetivos específicos de la investigación propuesta son centrados sobre cuatro preocupaciones: la importancia del mezquite (ver sección 3.8.2.5 y 3.8.2.6), del interés de substituir fertilizantes químicos por biofertilizantes en la agricultura sustentable (ver sección 3.8.3), la disponibilidad potencial de vermicomposta (ver sección 1.2) y las problemáticas de sistemas de producción agrícola sobre los dos tipos principales de suelos que se encuentran en la cuenca considerada (ver sección 1.1.2 y 1.1.3).

2.2.1 Objetivo general

Experimentar en laboratorio e invernadero el uso de germoplasma de mezquite utilizada como leguminosa arbórea de interés local, diferentes niveles de vermicomposta y la utilización de cepas bacterianas de *P. fluorescens* como fuentes alternativas de fertilización en la agricultura de la microcuenca baja del Río Tulancingo en suelos agrícolas con diferentes prácticas de manejo, y por tanto, participar en el desarrollo de conocimientos que permitan una producción agrícola sustentable compatible con la protección del ambiente natural.

2.2.2 Objetivos específicos

5. Determinar las características físicas y químicas de los suelos phaeozem (agricultura de secano), vertisol (irrigado con aguas residuales), y vermicomposta para determinar si existe un nivel peligroso de los elementos contaminantes plomo, níquel, cobalto, cromo y cadmio.
6. Realizar experimentación en laboratorio e invernadero con semillas de *P. laevigata* que permitan comparar los medios de germinación tales como uso de cepas de *P. fluorescens* y sulfato de cobre penta hidratado $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$.
7. Conducir un experimento en invernadero que permita identificar los niveles de los factores suelo (phaeozem y vertisol), cepas bacterianas (A7 y Sv) y vermicomposta (0,

25, 50, 75, y 100 ton/ha) con resultados favorables en variables agronómicas, fisiológicas e indicadores morfológicos de calidad de planta de *P. laevigata*.

8. Correlacionar las variables ambientales temperatura y humedad relativa con los incrementos morfológicos de plántulas de *P. laevigata* con la finalidad de obtener información que permita su utilización futura en campo.

CAPÍTULO 3 – MARCO TEÓRICO

La civilización moderna, con su rápido crecimiento en población, gran escala de urbanización e industrialización en el mundo entero, resulta en el deterioro del suelo y la calidad del agua usada en el riego. Por tanto, se convierte en una necesidad el entendimiento de la respuesta de los cultivos frente a estos temas ambientales (Naz *et al.*, 2016). Algunos autores señalan que la degradación del suelo puede ocurrir con el lixiviado de nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, mezclados con escurrimientos de agua (Tilaman *et al.*, 1998; Gyaneshwar *et al.*, 2002; Radhapriya *et al.*, 2015).

De acuerdo a Castillo (2004), citado por Cotler *et al.* (2007), la degradación del suelo está considerada como el mayor problema ambiental que amenaza la producción mundial de alimentos y una de las principales amenazas para el desarrollo sostenible de los terrenos agrícolas. Esto lleva a la búsqueda de tecnologías alternativas de producción agrícola compatibles con el ambiente; este capítulo introduce a conceptos relacionados con el deterioro de suelos, fertilidad de suelos, al igual que el uso de plantas y organismos en la rehabilitación de la calidad estos.

3.1 Restauración ecológica

Un ecosistema es definido como una serie de interacciones entre un conjunto particular de organismos y entre aquellos organismos y su ambiente físico. La restauración de un ecosistema requiere elementos de entrada y salida, y una dinámica interna del flujo de materia y energía. Típicamente, la medición de elementos de entrada incluye luz, agua, nutrientes, y organismos; mientras que los elementos de salida incluyen agua, suelo erosionado y organismos. El flujo interno se compone del ciclo de nutrientes, productividad primaria y descomposición. Procesos adicionales en el ecosistema conciernen a la interacción de la biota al disturbio (resistencia, resiliencia, sucesión, invasión) y al desarrollo de estructura y biodiversidad (Walker y del Moral, 2003; Walker, 2005).

Por tanto, la restauración ecológica es definida como el proceso de asistencia en la recuperación de un ecosistema que ha sido degradado, dañado, o destruido. Es una actividad intencional que inicia o acelera el restablecimiento de un ecosistema respecto a su salud, integridad y sustentabilidad (SERI, 2002; Mansourian, 2005).

3.2 Rehabilitación de suelos

La rehabilitación no implica llegar a un estado original. Por esta razón la rehabilitación se puede usar para indicar cualquier acto de mejoramiento desde un estado degradado (Bradshaw, 2002; Vargas, 2007), sin tener como objetivo final producir el ecosistema original (Vargas, 2007). Cotler *et al.* (2007) Señalan que la conservación y rehabilitación del suelo lleva consigo el restablecimiento del conjunto de elementos bióticos y abióticos del paisaje, ya que algunos procesos de degradación afectan a sólo un recurso natural: suelos, agua, bosques; sin embargo, dada la naturaleza interactiva de los ecosistemas siempre ocurren cambios asociados a otros recursos naturales.

3.3 Reclamación de suelos

Reclamación es un término comúnmente usado en el contexto de minería en América del Norte y el Reino Unido. Tiene con objetivo principal la estabilización del terreno, garantizar la seguridad pública, mejoramiento estético, y usualmente un regreso del suelo, en el contexto regional, a un propósito útil (SERI, 2002; Mansourian, 2005).

3.4 Remediación de suelos

Las tecnologías de remediación de suelos están atrayendo ahora una especial atención ya que las prácticas convencionales de reclamación de suelos, por ejemplo vertederos y excavación son con frecuencia costosas en comparación con opciones alternativas que son rentables y ambientalmente sostenibles tales como la inmovilización/solidificación de suelos (Mulligan *et al.* 2001; Kumpiene *et al.* 2008; Amanullah, 2016).

La biorremediación puede ser aplicada a cualquier sistema o proceso, en el cual los métodos biológicos son empleados para transformar o inmovilizar los contaminantes en el suelo o agua. De hecho, el éxito de la biorremediación es frecuentemente medido por el porcentaje de reducción en la concentración del contaminante en el suelo o agua (Ike *et al.*, 2012). Una nueva y rápida variante del desarrollo de la biorremediación es la fitorremediación, la cual usa plantas y su biota asociada para destruir, remover, contener, o simplemente desintoxicar el ambiente de contaminantes (Cunningham *et al.*, 1996 ; Rittman y McCarty, 2001). Son cuatro tipos de reacciones de destrucción y remoción que pueden llevarse a cabo en la fitorremediación: fitovolatilización, fitodegradación, fitoextracción y rizodegradación (Rittman y McCarty, 2001).

Además, la fitorremediación puede secuestrar contaminantes por medio del proceso de fitoestabilización (Cunningham *et al.*, 1996 ; Rittman y McCarty, 2001).

Los suelos contaminados pueden ser remediados por los métodos: a) Remoción del suelo contaminado del sitio; envuelve el despojo del suelo contaminado y limpieza mediante métodos con calor o químicos, b) cubrir el suelo contaminado con una barrera de suelo; suelo contaminado puede ser cubierto con suelo limpio para proveer un medio no contaminado para las raíces de las plantas, c) remediación del suelo in situ; involucra el riego del suelo con agentes químicos para extraer contaminantes peligrosos o usando cultivos microbianos para descomponer contaminantes orgánicos persistentes, d) remediación de suelos a través de la reducción de la biodisponibilidad; mediante el encalado de suelos para elevar el pH a 7, reduciendo la movilidad de los metales. También, la adición de materia orgánica puede bloquear los metales pesados (Vasudevan, 2006)

3.5 Degradación de suelos

Algunos autores como Oldeman (1998) dividen la degradación de suelos en dos grandes categorías. La primera hace referencia a la degradación por desplazamiento del material edáfico. En ella se encuentran incluidas la erosión hídrica y la eólica. Una segunda categoría se refiere a la degradación como resultado de un deterioro interno. En esta categoría se encuentra 1) la degradación química: como la pérdida de nutrientes, la contaminación, la acidificación y la salinización; 2) la degradación física: que abarca el encostramiento, la compactación y el deterioro de la estructura del suelo; y 3) la degradación biológica: resultado de un desequilibrio en la actividad biológica en el suelo (Cotler *et al.*, 2007).

3.6 Fuentes de contaminación en suelos

El suelo es el ambiente natural para la germinación, crecimiento, y desarrollo de plantas que producen alimentos y fibras para el hombre. Es un componente esencial de los ecosistemas terrestres, donde la mayoría de la flora y fauna viven. Es también el lugar donde prácticamente toda el agua pluvial, en forma de ríos, lagos y agua subterránea atraviesa. Sin embargo, la contaminación de los suelos por varias fuentes de contaminantes tiene un importante significado para la humanidad actual. En este sentido la incorporación de metales pesados a los suelos,

provenientes de diversas fuentes antropogénicas ha provocado efectos que deterioran la diversidad de los ecosistemas y también a la vida de animales y humanos (Selim, 2013).

Además, el suelo juega un importante papel en la regulación de contaminantes en los ecosistemas y actúa como un importante depósito para contaminantes a través de las reacciones de precipitación, absorción e inmovilización. La contaminación del suelo es producto de fuentes como desechos industriales, desechos urbanos, contaminantes radioactivos, prácticas agrícolas, contaminantes químicos y metálicos y agentes biológicos. Tales contaminantes permanecen en contacto directo con los elementos del suelo por un periodo largo de tiempo y alteran las propiedades químicas y biológicas del suelo (Vasudevan, 2006).

3.7 Propiedades físicas y químicas en suelo

El suelo es ampliamente más complejo que la roca simple. Este contiene componentes inorgánicos y orgánicos en varias etapas de descomposición y desintegración, una solución acuosa de elementos, iones y moléculas inorgánicas y orgánicas, además de una fase gaseosa que contiene nitrógeno, oxígeno, dióxido de carbono, agua, argón, metano, y otros gases (Conklin, 2014a).

3.7.1 pH

El pH tiene un efecto dominante sobre la solubilidad, y por tanto, en la disponibilidad y fitotoxicidad potencial de los iones (nutrientes así como aquellos tóxicos). Mientras que un pH bajo desplaza el equilibrio hacia cationes metálicos libres y aniones protonados, un pH más alto favorece los complejos carbonato e hidróxilo. Además, la disponibilidad de los micronutrientes e iones tóxicos presentes en la solución del suelo como cationes (por ejemplo aluminio y hierro) incrementa con el aumento de la acidez del suelo (Khabaz-Saberi *et al.* 2010a, b ; Rengel, 2011); mientras que la disponibilidad de aquellos presentes como aniones [MoO_4^{2-} , CrO_4^{2-} , SeO_4^- , SeO_3^- y B(OH)_4^-] incrementa con el aumento del pH (Rengel 2002, 2003, 2011).

En suelos ácidos, no sólo se incrementa la disponibilidad de aluminio y hierro, sino también se tiene una baja disponibilidad de cationes esenciales básicos como calcio, magnesio y potasio que pueden causar problemas de crecimiento. En adición, la disponibilidad de fosfato en suelos ácidos es más bajo debido a la formación de fosfatos de aluminio y hierro poco solubles. Ésta

baja disponibilidad de fósforo, calcio, magnesio y potasio son importantes limitantes en la productividad de los suelos ácidos desgastados (Rengel 2002, 2011).

En general, las concentraciones tóxicas de manganeso, aluminio, boro, sodio, cloro y hierro ocurren frecuentemente en suelos agrícolas. Las toxicidades de manganeso y aluminio se presentan en suelos minerales ácidos, las toxicidades de boro y sodio en suelos sódicos (ricos en sodio), y las toxicidades de sodio y cloro se presentan en suelos salinos, en todo el mundo. Las toxicidades de sodio, boro y cloro e imbalances de calcio, magnesio y potasio también se presentan en la agricultura de riego (Marschner, 1995; White y Brown, 2010).

3.7.2 Conductividad eléctrica

Las sales son usualmente presentes en suelo y la conductividad eléctrica (CE) del suelo o del agua depende de la presencia de los tipos y cantidades de estas. En regiones húmedas, las sales se encuentran a bajas concentraciones y no afectan el crecimiento de las plantas, mientras que en zonas semiáridas, áridas y cercanas de lagos salados u océanos, pueden presentarse en altas concentraciones que pueden tener efectos perjudiciales en el crecimiento de las plantas (Conklin, 2014b).

3.7.3 Materia orgánica

La materia orgánica (M.O) del suelo se compone por todas las sustancias que contienen carbono en el suelo, excepto los carbonatos inorgánicos. Es una mezcla de residuos de plantas y animales en varias etapas de descomposición, los cuerpos de microorganismos vivos como muertos, y sustancias sintetizadas a partir de los productos de descomposición de todos estos. La materia orgánica (M.O) en el suelo juega un papel importante en el mantenimiento de la productividad del sitio y es un sumidero para el carbón atmosférico (Fisher y Binkley, 2012a).

La materia orgánica del suelo (M.O) es esencial en el mantenimiento de las funciones físicas, químicas y biológicas en el suelo, y por lo tanto, en la salud del suelo. De hecho, la materia orgánica (M.O.) es un indicador clave de la salud del suelo. Ésta contiene tanto componentes vivos como no vivos. También, es descrita por sus componentes químicos tales como proteínas, lípidos, almidón, carbohidratos, hemicelulosas, celulosa, ligninas, polifenoles, pectinas y taninos o por ácido húmico, ácido fúlvico, etc. (Dalal *et al.*, 2011).

3.7.4 Textura

La arena, limo y arcilla son los tres componentes principales de la textura del suelo. Las composiciones relativas, expresadas en porcentajes, son empleadas para dar a los suelos un nombre de textura tales como arena-limosa, o limosa-arcillosa. El nombre de textura de un suelo se establece al determinar su porcentaje relativo de arena, limo y arcilla en un triángulo de texturas (Conklin, 2014c).

3.7.5 Macronutrientes

Hay diecisiete nutrientes esenciales para las plantas que se requieren para el crecimiento y desarrollo adecuado de estas. Estos nutrientes son requeridos en cantidades diferentes, por tanto, estas diferencias han llevado a la agrupación de estos elementos esenciales en tres clases más amplias, a saber, nutrientes primarios (macro), nutrientes secundarios y micronutrientes (Kumar *et al.*, 2016) (ver cuadro 3.1).

3.7.5.1 Nitrógeno

Al menos 80% de la atmósfera está compuesta por nitrógeno. De hecho, en formas reactivas este es esencial para la vida en la tierra y crucial para el desarrollo sustentable. En el ambiente natural es un factor limitante para el crecimiento, lo que permite una rica diversidad de estrategias para la adquisición, manejo y preservación del nitrógeno. Comparado con elementos como el carbono, el azufre o el fósforo, el nitrógeno contribuye a una variedad de impactos negativos, la mayoría interrelacionados, tales como el cambio climático, la eutrofización, la acidificación del suelo, la degradación de la salud humana, la pérdida de la biodiversidad, etc. (Erisman, 2011).

De acuerdo a Bibi (2016), la ganancia y pérdida de nitrógeno en el agroecosistema están asociadas con muchos procesos complejos e interrelacionados. En los sistemas agrícolas, las principales rutas para la pérdida del nitrógeno son: a) emisiones gaseosas como la volatilización y desnitrificación del amonio, b) lixiviación (por ejemplo: la remoción por debajo de la zona radicular por percolación del agua), c) captura por la planta, y d) escorrentía superficial. El ciclo del nitrógeno puede ser fácilmente entendido con la ayuda de una simple ecuación matemática como sigue:

$$N_{net} = N[e + bf + c + om + min] - N[pl + g + i + l + r] \quad (\text{ecuación 3.1})$$

El signo positivo indica la adición de nitrógeno, y el signo negativo indica la pérdida del nitrógeno en el suelo. Donde, N_{net} es el nitrógeno total añadido en el suelo, e se refiere a la descarga eléctrica, bf corresponde a los procesos biológicos de fijación, c es el fertilizante químico, om es el abono orgánicos, min es la mineralización, pl es la captación por las plantas, g son las emisiones como volatilización y mineralización, pl es la captura de nitrógeno por las plantas, l corresponde a la lixiviación y r se refiere a la escorrentía superficial.

3.7.5.2 Fósforo asimilable

El fósforo no sólo es un micronutriente esencial requerido por todos los organismos, sino también es uno de los nutrientes más indisponibles e inaccesibles presentes en el suelo. El fósforo es adquirido por las plantas en forma de fosfato inorgánico de la solución del suelo a través de las raíces. La cantidad de fosfato disponible para las plantas en la solución del suelo está determinada por la interacción entre el fosfato en la solución del suelo, compuestos orgánicos e inorgánicos en el suelo y las formas de fosfato absorbidas por las plantas (Raghothama 1999; Hammond y White, 2008).

Los suelos que nunca se han fertilizado con fósforo generalmente presentan una concentración baja de fósforo en la solución del suelo, que está por debajo de las necesidades del cultivo. En suelos ácidos, el fósforo agregado se adsorbe en las superficies de los óxidos o hidróxidos de hierro y aluminio, mientras que en los suelos calcáreos se precipita principalmente como fosfato de calcio. La fuente original de fósforo en el suelo es la roca a partir de la cual se ha formado el suelo. Las rocas ígneas y metamórficas contienen pequeñas cantidades de fósforo principalmente en forma de apatita y fluorapatita, siendo esta última la más común (Yli-Halla, 2016).

3.7.5.3 Potasio intercambiable

De acuerdo a Nieves-Cordones *et al.* (2012) el potasio es un macronutriente esencial para las plantas, que compone hasta el 10% del peso seco total (Taiz y Zeiger 1991) y que cumple importantes funciones en el metabolismo, crecimiento y adaptación al estrés. El potasio es el tercer nutriente más importante requerido en las plantas en grandes cantidades. Este juega un papel muy importante en el equilibrio de carga, los ajustes osmóticos y la activación enzimática

en las células vegetales. Es muy móvil en la planta debido a que no es parte estructural del tejido vegetal, pero está presente en forma iónica en las plantas (Wakeel *et al.* 2016).

A diferencia del nitrógeno, el fósforo y la mayoría del resto de elementos esenciales, el potasio no se transforma en parte de la estructura química de las plantas. Por lo tanto, su movilidad en las plantas permite influir en casi todos los aspectos del crecimiento en las plantas. Sin el nivel adecuado de potasio las plantas tendrían raíces poco desarrolladas, crecimiento lento, producción de semillas pequeñas y rendimientos más bajos (Jaiswal, 2016).

3.7.5.4 Calcio intercambiable

El calcio es el catión dominante en la mayoría de las soluciones del suelo forestal por ejemplo, donde las principales excepciones se encuentran en suelos con valores de pH por debajo del 4.5, debido a que los iones de aluminio disueltos se vuelven importantes (Fisher y Binkley, 2012b). Como nutriente, el calcio es crítico para reacciones bioquímicas dentro de la mitocondria y cloroplastos, tiene funciones estructurales dentro de la pared celular, está involucrado en la dinámica de la membrana y ha sido implicado en la medición o regulación de la muerte celular programada (White y Broadley 2003; Pittman *et al.* 2011).

3.7.5.5 Magnesio intercambiable

Las concentraciones de magnesio son comúnmente entre el 20 y 50 % de las concentraciones de calcio, aunque algunos tipos de suelo pueden tener más magnesio que calcio (Fisher y Binkley, 2012b). El magnesio es esencial para los cloroplastos, siendo el elemento central en la clorofila, y actúa como un cofactor en varios procesos enzimáticos asociados con la fotosíntesis, respiración y metabolismo energético. Las reacciones fotoquímicas, las tasas de fijación de dióxido de carbono y la conductancia estomática pueden verse fuertemente afectadas por el magnesio como nutriente (Laing *et al.*, 2000; Anza M y Garbisu, 2005; Ruan *et al.*, 2011).

3.7.6 Micronutrientes (Fe, Cu, Zn, Mn, y Mo)

Los micronutrientes son tan importantes para las plantas como los macronutrientes (N, P y K), a pesar de que la planta los requiere solamente en cantidades muy pequeñas (Bradl, 2005; Sánchez, 2012) (ver cuadro 3.1):

Hierro (Fe): es un micronutriente esencial para la mayoría de los organismos vivos. Aunque el hierro es abundante en la corteza terrestre (4.2 %) y en muchos suelos (2-60 %), la disponibilidad del hierro es limitante para el crecimiento de organismos vivos en todos los niveles (Thomine y Lanquar, 2011). El hierro está presente en varias enzimas peróxidasa, catalasa y citocromo oxidasa, que se encuentran en la ferredoxina, que participa en reacciones de óxido-reducción, e importantes en la formación de clorofila (Brady, 2002; Kumar *et al.*, 2016).

Cobre (Cu): es un micronutriente esencial para el metabolismo normal de la planta y juega un papel importante en diversos procesos fisiológicos tales como fotosíntesis, respiración, distribución de carbohidratos, y metabolismo de proteínas. Sin embargo, el exceso de cobre puede causar disturbios en el desarrollo normal mediante la afectación adversa de reacciones bioquímicas y procesos fisiológicos en las plantas (Guzel y Terzi, 2013; Sağlam *et al.*, 2016).

Zinc (Zn): se ha convertido en la deficiencia de micronutrientes más extendida en suelos y cultivos en todo el mundo, lo que resulta en pérdidas severas de rendimiento y calidad nutricional. El zinc interactúa positivamente con el nitrógeno y el potasio y negativamente con el fósforo. Esto implica que los agricultores no deben abusar de los fertilizantes fosfatados, o de lo contrario, se reduce la absorción de zinc por los cultivos. El zinc actúa de manera antagónica con los tres nutrientes secundarios, azufre, calcio y magnesio; así como con otros micronutrientes como el hierro, manganeso, cobre y molibdeno. El zinc desempeña un papel clave en las plantas como constituyente estructural o cofactor regulador de una amplia gama de diferentes enzimas y proteínas de muchas rutas bioquímicas importantes (Das, 2016).

Manganeso (Mg): es un elemento esencial en la mayoría de los organismos vivos (Pittman, 2005), es particularmente importante en organismos fotosintéticos como las plantas, donde se requiere un grupo de átomos de manganeso para la oxidación inducida por la luz del agua que ocurre en el fotosistema II (Yasuor *et al.*, 2015).

Molibdeno (Mo): es un elemento traza que se encuentra en el suelo y se requiere para el crecimiento para la mayoría de los organismos biológicos, incluidas las plantas y animales. El molibdeno es un elemento de transición, que puede existir en varios estados de oxidación que varían desde cero hasta VI, donde VI es la forma más común que se encuentra en la mayoría de los suelos agrícolas (Williams y Frausto da Silva, 2002; Kaiser *et al.*, 2005).

3.7.7 Boro

Al igual que la mayoría de los elementos, el boro (B) se vuelve tóxico para el crecimiento de las plantas en niveles altos. La solubilidad del boro es elevada y puede lixiviarse en áreas con mucha lluvia. Sin embargo, puede persistir en los suelos agrícolas cuando la lluvia es baja. En estas áreas, la lixiviación parcial mueve al boro por el perfil del suelo donde las raíces encuentran la toxicidad del boro en su búsqueda de este líquido. El agua de riego puede incrementar la toxicidad del boro en las regiones donde este es moderado, si esta contiene altas concentraciones de boro (Naz *et al.*, 2016). El boro, activa ciertas enzimas deshidrogenasas, facilita la translocación y síntesis de ácidos nucleicos y hormonas vegetales, esencial para la germinación de granos y crecimiento de tubos de polen, esencial para la formación de semillas y pared celular, así como la promoción de la maduración (Brady, 2002; Kumar *et al*, 2016) (ver cuadro 3.1).

3.7.8 Elementos potencialmente tóxicos (Pb, Cr, Cd, Ni, y Co)

Metales pesados es un término empleado para describir metales o metaloides asociados a la contaminación, toxicidad potencial, o toxicidad ecológica, aunque no exista evidencia para ello (Duffus, 2002; Selim, 2011). La fuente de los metales pesados en el suelo es tanto natural como antropogénica. Las fuentes naturales son el material parental que deriva a los suelos a través del intemperismo de las rocas. Éstos existen en diferentes formas químicas que se manifiesta en la disponibilidad para las plantas (Selim, 2011).

Nuestro ambiente global actual consiste de numerosos metales naturales y artificiales. Los metales han jugado un papel importante en el desarrollo de la industria y sus avances tecnológicos. La mayoría de los metales no se pueden destruir; por el contrario, estos son acumulados a un ritmo acelerado debido a las demandas de la civilización moderna. El término “metales” se refiere a los elementos con una buena conductibilidad eléctrica (Lyubenova y Schröder, 2010; Anjum, *et al*, 2013).

Cuadro 3.1. Deficiencias o excesos de macro y micronutrientes en plantas.

Deficiencia o excesos en plantas	
Elemento	Macronutrientes
Nitrógeno (N)	Deficiencia: es el principal factor limitante en el crecimiento de las plantas y la producción de cultivos después de la luz y el agua (Chapman y Miller, 2010).
Fósforo (P)	Deficiencia: estatura reducida, ángulos foliares agudos, supresión del macollamiento, latencia prolongada, senescencia temprana y disminución del tamaño y número de flores y brotes (Bould <i>et al.</i> 1983; Bergmann 1992; Marschner 1995; Mengel y Kirkby 2001; Hammond y White, 2008).
Potasio (K)	Deficiencia: efectos en la fisiología de la planta tales como expansión celular limitada y reducción de fotosíntesis, que resulta en la reducción del crecimiento y el deterioro del desarrollo (Nieves-Cordones <i>et al.</i> , 2012)
Calcio (Ca)	Exceso: interactúa con el fosfato para formar complejos insolubles que interfieren con el papel del fosfato como donador de energía. Altas concentraciones de calcio también compiten con otros cationes como el magnesio, que funcionan como cofactores de enzimas y proteínas esenciales (Pittman <i>et al.</i> 2011).
Magnesio (Mg)	Deficiencia: afecta el metabolismo del azúcar, que se produce antes de cualquier efecto notable en la actividad fotosintética (Hermans <i>et al.</i> , 2006; Cakmak y Kirkby, 2008, Ruan <i>et al.</i> , 2011).
Micronutrientes	
Hierro (Fe)	Deficiencia: limita la producción de biomasa. Su habilidad para cambiar sus estados de oxidación en condiciones fisiológicas hace este elemento potencialmente muy tóxico para las células (Thomine y Lanquar, 2011).
Cobre (Cu)	Exceso: reduce la producción de biomasa en plantas, clorosis de hojas, inhibición del crecimiento de raíces, bronceado y necrosis (Marschner, 2011; Sağlam <i>et al.</i> , 2016). El incremento de niveles de cobre en el ambiente afecta adversamente la fotosíntesis (Aggarwal <i>et al.</i> , 2012; Sağlam <i>et al.</i> , 2016).
Zinc (Zn)	Deficiencia: retarda la fotosíntesis y el metabolismo del nitrógeno; reduce el desarrollo de flores y frutos; prolonga periodos de crecimiento, que resulta en el retraso de la maduración; y eficiencia subóptima del uso de nutrientes (Das, 2016).
Manganeso (Mn)	Deficiencia: afecta la estructura de los tilacoides y promueve la degradación de la clorofila (Papadakis <i>et al.</i> 2007; Simpson y Robinson 1984), lo que lleva al desarrollo de clorosis foliar entre venas (Schmidt <i>et al.</i> , 2013).
Boro (B)	Exceso: limitan el crecimiento de las plantas, especialmente en condiciones salinas (Naz <i>et al.</i> , 2016). El quemado de hojas y el desarrollo de áreas cloróticas y necróticas es el síntoma visible de la toxicidad en varias especies. (Eaton, 1994).
Molibdeno (Mo)	Deficiencia: afecta el metabolismo de las plantas en diferentes niveles. La respuesta está fuertemente ligada al requerimiento de molibdeno para varios tipos de enzimas en plantas (Mendel y Haensch, 2002; Kaiser <i>et al.</i> , 2005)

Estos metales potencialmente tóxicos son todos aquellos metales de la tabla periódica con un número atómico mayor a 20, excluyendo los metales alcalinos y los alcalinotérreos. Este término se utiliza para clasificar a los metales que son contaminantes ambientales en los que se encuentran: plomo, cadmio, cobre, zinc y níquel (Montoya, 2010). Los metales pesados incluyen alrededor de 53 elementos y la mayoría son peligrosos así como tóxicos para el medio ambiente, ya que muestran persistencia, son no biodegradables y poseen una alta densidad ($>5 \text{ g/cm}^3$) (Amanullah, 2016). Los elementos como cadmio, plomo, mercurio, arsénico, cromo, cobre, níquel, selenio y otros más son tóxicos para organismos vivos aún en niveles bajos (Aziz *et al.* 2015; Sabir *et al.* 2015; Amanullah, 2016).

Otro metal pesado es el cobalto, que como muchos metales pesados, representa un peligro a nivel global. La contaminación de suelos por cobalto proviene principalmente de actividades de minería y fundición, dispersión del lodo de aguas residuales y del uso de fertilizantes químicos (Hamilton, 1994). El cobalto es también presente en desechos radioactivos en niveles bajos. Tal como es el caso para todos los metales pesados, el cobalto no puede ser químicamente o biológicamente degradado y es, por tanto, muy difícil removerlo del suelo (Bakkaus *et al.*, 2005).

3.8 Uso de fitotecnologías en la mejora de la calidad ambiental

Durante las últimas décadas la exploración global de soluciones sustentables de un gran número de problemas ambientales de rápido crecimiento ha sido el principal tema de investigación de la contaminación ambiental y de las soluciones potenciales (Selim, 2011). El papel de la fitotecnología no sólo se limita al concepto de fitorremediación sino también incluye más deliberadamente las actividades y usos más amplios basados en plantas (Evans y Furlong, 2010).

Selim (2011) señala que la estrategia del uso de plantas y de sus organismos asociados para excluir, acumular, inmovilizar, metabolizar, o degradar diversos contaminantes del ambiente, que colectivamente es llamada fitotecnología, está contribuyendo al destino de variados contaminantes del ambiente y a la descontaminación eficiente y sustentable de la biósfera de elementos peligrosos indeseables (Selim, 2011).

Sin embargo, las plantas de un tipo u otro pueden ser instrumentos en el tratamiento biológico de un amplio número de sustancias que presentan diferentes tipos de retos ambientales. De esta manera, los procesos de bioacumulación, fitoextracción, fitovolatización y rizofiltración son

colectivamente con frecuencia referidos como fitorremediación. Aunque, usualmente es útil considerarlos separadamente, en la mayoría aspectos funcionales, todos son aspectos de los mismos procesos fundamentales en plantas, y por tanto, hay mucho mérito en verlos como partes de un todo cohesivo, en lugar de tecnologías distintivamente diferentes (Evans y Furlong, 2010).

3.8.1 Importancia del uso de leguminosas arbóreas y microorganismos asociados como fitotecnologías.

Las leguminosas arbóreas pueden ser consideradas árboles multipropósito, ya que su follaje es fuente de alimento para el ganado. Además, tienen otros usos: leña, postes, sombra, cerca viva, medicina, consumo humano, artesanal y maderable (Olivares-Pérez *et al.*, 2011). En adición, éstos árboles poseen la capacidad de fijar nitrógeno del aire por medio de asociaciones simbióticas con bacterias nodulantes (Dias, 2005; Dias *et al.*, 2007), y mejoran la disponibilidad de elementos en el suelo al reducir problemas de fertilidad mediante la incorporación de hojarasca (Petit-Aldana *et al.*, 2009). Otras ventajas (ver cuadro 3.2) de la asociación de leguminosas arbóreas con microorganismos incluye la sustitución parcial o total de fertilizantes con fósforo en zonas semiáridas, fitorremediación de suelo, entre otras (Gardezi *et al.*, 2000).

3.8.2 Mezquite como árbol de usos múltiples

En México se estima una disminución de alrededor de 155 mil ha de bosques y selvas por año (UANL, 2009a). De seguir este ritmo, para el año 2050 se habrá eliminado la totalidad de las zonas forestales (Cortesi, 2002; Palacios, *et al.*, 2016). Desde el punto de vista ambiental, *Prosopis laevigata* (H.&B. ex Willd.) M.C. Johnst. es una especie muy útil pues previene los procesos de desertificación y erosión por su alta capacidad de retención del suelo, mejora la fertilidad y ayuda a estabilizar la salinidad (Rodríguez *et al.*., 2014; Palacios, *et al.*, 2016).

Cuadro 3.2 Ventajas del uso de leguminosas arbóreas y sus microorganismos asociados

Especie	Ventajas
<i>Acacia farnesiana</i>	<i>Glomus</i> spp. incrementa el crecimiento de árboles en suelos con bajos contenidos de fósforo.
<i>Acacia saligna</i>	La inoculación con <i>Glomus</i> puede ser un componente de aprovechamiento y fitorremediación de suelos contaminados con Cu, además de la capacidad de absorción de fósforo que éstos hongos confieren a los árboles.
<i>Leucaena leucocephala</i>	Las plantas con mejores características agronómicas disminuyeron su tendencia a la absorción de cobre (Cu) en presencia simultánea de <i>Glomus</i> spp. y <i>Rhizobium</i> . En adición, ésta especie extrae y acumula metales pesados.
<i>Prosopis</i> sp.	Existe un efecto positivo en el crecimiento de árboles con la inoculación con <i>Glomus intrarradices</i> debido al mejoramiento de absorción de nutrientes minerales.
<i>Erythrina americana</i> Miller	Hongos micorrizicos arbúsculares estimulan el crecimiento de los árboles aún más que la fertilización con fósforo.
<i>Pithecellobium dulce</i> , <i>Erythrina americana</i> y <i>Acacia saligna</i>	Los hongos endomicorrízicos arbúsculares estimulan el crecimiento de las plantas en niveles superiores a los alcanzados con la fertilización fosfatada.
<i>Caesalpinia cacalaco</i> y <i>Acacia saligna</i>	<i>Glomus</i> sp. presenta efectos positivos en el crecimiento de árboles en comparación a tratamientos con fertilización fosfatada.
Otras leguminosas: <i>Phaseolus vulgaris</i>	<i>Rhizobium</i> puede ser un componente de fitorremediación en suelos contaminados con Cu, además de la capacidad ya conocida de fijación biológica de nitrógeno (N) que éstas bacterias poseen.

Referencia: Gardezi *et al.*, (1988, 1989, 1990ab, 1991, 1992, 1995, 2006, 2007, 2008, 2009)

3.8.2.1 Distribución geográfica

De acuerdo con Simpson (1977), citado por Carrillo (2006), el mezquite es una planta dominante en los ecosistemas desérticos. Se distribuye en casi todas las zonas áridas y semiáridas del Mundo (ver figura 3.1 en anexo 14). Por su amplia distribución, *Prosopis* spp. Se encuentra prosperando bien desde 0 a 2500 msnm, con precipitaciones que van desde los 250 a 700 mm y con temperaturas que oscilan entre los 20 y 30°C en promedio anual y sin importar el tipo de suelo, pues este puede ser arenoso, pedregoso, delgado, profundo, ácido, neutro o alcalino (Contreras, 2014).

En México, el género *Prosopis*, se distribuye en la vertiente del pacífico, desde Michoacán hasta Oaxaca y en la del Golfo en Nuevo León, Tamaulipas y el norte de Veracruz, en la depresión central de Chiapas y en las regiones altas centrales del país (Rodríguez, *et al.*, 2014).

La especie *Prosopis laevigata* (Humb.y Bonppl.) M.C. Johnst es oriunda de regiones áridas y semiáridas del sur y sureste de los Estados Unidos y México. Es un árbol o arbusto que se

encuentra en forma natural formando parte del matorral espinoso o selva baja espinosa subcaducifolia, así como en laderas riolíticas o en terrenos aluviales con vegetación muy alterada. Se localiza en el centro y sur de México, en los estados de Aguascalientes, Durango, Guanajuato, Guerrero, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Nuevo León, Oaxaca, Puebla, San Luis Potosí, Veracruz y Zacatecas (Dávila, 1982; Terrones *et al.*, 2004; Torres, 2013). En la Figura 3.2 del anexo 14 se muestra la distribución de algunas variedades del mezquite dentro del territorio de la República Mexicana así como el uso que tiene dentro del país.

3.8.2.2 Clasificación taxonómica

La clasificación taxonómica de la especie es la siguiente (CONAZA e INE, 1994; Pennington y Sarukán, 1998; Hernández, 2011) (ver cuadro 3.3):

Cuadro 3.3. Clasificación taxonómica de mezquite (*Prosopis laevigata*)

Reino	Vegetal
Phylum	Phanerogama
Subphylum	Angiospermae
Clase	Dicotyledoneae
Familia	Leguminosae
Subfamilia	Mimosoideae
Género	<i>Prosopis</i>
Especie	<i>P. laevigata</i> (H.&B. ex Willd.) M.C. Johnst.

3.8.2.3 Descripción de la especie *Prosopis laevigata*

Ésta especie se localiza principalmente en los Altiplanos centrales del norte de México, en las tierras bajas de Tamaulipas meridional, y en parte de Oaxaca, Morelos, Puebla, Hidalgo y Chiapas. Crece sobre una variedad de sitios, sobre laderas de colinas, en depresiones, y a lo largo de llanos inundados (Felker, 1979; García, 2014).

3.8.2.4 Morfología y anatomía

De acuerdo a Calderón y Rzedowski (2001), la especie *P. laevigata* (H.&B. ex Willd.) M.C. Johnst presenta la siguiente morfología y anatomía:

Cuadro 3.4 Morfología y anatomía de *Prosopis laevigata*

Sección	Características
Forma biológica	Árbol o arbusto, a veces hasta de 12 m de altura, aunque generalmente menor; tronco hasta de 1 m de diámetro, por lo general de 30 a 60 cm.
Corteza	Gruesa, de color café negruzco, algo fisurada; copa más ancha que alta.
Ramas	Glabras o pilosas, armadas de espinas estipulares de 1 a 4 cm de largo
Hojas	Pecioladas, con 1 a 3 pares de pinnas, cada una con 10 a 20 pares de folíolos sésiles, oblongos o linear-oblongos, de 5 a 15 mm de largo por 1 a 2 mm de ancho, ápice obtuso, margen entero, base obtusa, glabros o ligeramente pubescentes.
Flores	Dispuestas en espigas densas de 5 a 10 cm de largo; flores blanco amarillentas, sésiles o casi sésiles; cáliz de 1 mm de largo, glabro o puberulento; corola de 2.5 a 3 mm de largo, pétalos agudos, tomentulosos en el margen y en el interior; estambres de 4 a 5 mm de largo.
Frutos	Legumbre linear de 7 a 20 cm de largo por 8 a 15 mm de ancho, comprimida, glabra, de color café-amarillento, a veces rojizo, algo constreñida entre las semillas; éstas oblongas, comprimidas, de 8 a 10 mm de largo, de color blanco amarillento.

3.8.2.5 Importancia económica

El mezquite se desarrolla en las regiones áridas y semiáridas de México, tiene múltiples usos, ya que su madera es usada como combustible, para construcción de cercas, sus vainas como forraje y como alimento para el hombre; produce resina que tiene uso en la fabricación de pegamentos, barnices, mientras sus flores son importantes en la producción de miel (Rodríguez, *et al*, 2014). Maldonado y De la Garza (2000) y Sánchez (2012) señalan que a partir de la madera de Mezquite *P. laevigata* (H.&B. ex Willd.) M.C. Johnst se fabrican muebles, puertas, carretas, artesanías y juguetes.

Es considerado también como un servicio ambiental, ya que ayuda a controlar la erosión, infiltra agua de lluvia, mejora los suelos con su hojarasca, fija nitrógeno a los suelos, alimento para la fauna silvestre, cortina rompe vientos, seto vivo, ornamental, estabiliza bancos de arena y rehabilita zonas mineras (Reséndiz, 2013). De hecho, Armienta *et al.* (2008) determinaron en *P. laevigata* elevados contenidos de As, 78.2 mg/kg, en un área minera de Zimapán, que catalogaron como especie con capacidades para captar contaminantes. En el cuadro 3.5 se muestran algunos usos y beneficios del mezquite.

Cuadro 3.5. Usos y aplicaciones del mezquite

Uso	Parte apreciable	Aplicación
Alimentación humana	Flor	Miel (generada por las abejas que chupan el néctar de la flor)
	Vaina	Fruta fresca, fruta en almíbar, pinole de mezquite, queso de mezquite (alimento básico de los chichimecas), piloncillo, atole y vino (bebida preferida por los chichimecas).
	Goma	Golosina de niños.
Medicina	Corteza	Antidisentérico y gastritis. Infusión de trozos de corteza con ramas más jóvenes.
	Goma	Remedio para la Laringitis. La goma disuelta como infusión.
	Hojas	Antiséptico. Lavado de los ojos con infusión a partir de hojas. Anti disentérico y gastritis. Emoliente.
	Ramas y troncos	Desinflamatorio. Pomada de ceniza de leña con manteca.
Forrajero	Vaina	Consumo de vainas y harinas
	Hojas	Ramoneo de follaje verde o seco para ganado bovino, caprino, ovino, caballar, mular, asnal y porcino.
Forestal	Corteza	Curtiduría
	Goma	Pólvora de escasa potencia y tintes para teñir lana.
	Hojas	Fertilizante orgánico. El follaje forma un grueso mantillo.
	Ramas y troncos	Aperos de labranza: arado, mangos de palas y picos. Carretas: en especial para las ruedas. Construcción de viviendas y muebles. Leña y carbón: para la cocción de alimentos, combustible para ladrilleras, panaderías y restaurantes. Postes para cercas. Otros: parquet, elaboración de artesanías, recreación humana y refugio de vida silvestre.

Fuente : Galindo, 1983; Cervantes 2002; Ruíz, 2011.

3.8.2.6 Importancia ecológica

El mezquite es importante por el papel que desempeña dentro del ecosistema de las zonas áridas, ya que es un excelente controlador de la erosión, fija el nitrógeno de la atmosfera al suelo mejorando su fertilidad, y proporciona alimento y refugio a la fauna silvestre (Carrillo *et al*, 2007). En México, es una planta que crece completamente silvestre en las zonas áridas y semiáridas, donde las condiciones para la agricultura son adversas, formando parte del matorral xerófilo (CONAZA e INE, 1994; Hernández, 2011).

El mezquite ha sido introducida en diversas zonas áridas del mundo con objetivos de rehabilitación (ver diferencias en sección 3.1, 3.2 y 3.3) de suelos degradados y frenar la desertificación (Abd Elbasit *et al*, 2012). Es un recurso que puede ser utilizado para la recuperación de tierras agrícolas con problemas de salinidad en suelo y agua; además se considera útil para estabilizar y mejorar el suelo al incrementar el contenido de materia orgánica, mejora la capacidad de almacenamiento de agua, la tasa de infiltración y posee una de las capacidades fotosintéticas más altas, esto por su buen aprovechamiento de agua y de nitrógeno

(Osuna y Meza, 2003; Ruiz, 2011).

El mezquite (*Prosopis sp.*), en muchas ocasiones el único elemento arbóreo, posee un enorme potencial para responder favorablemente a la rehabilitación (ver diferencias en sección 3.1, 3.2 y 3.3) de zonas áridas y semiáridas degradadas o tendentes a la desertificación. Mediante repoblaciones de mezquite se puede proveer de energía. Así mismo, incrementa la fertilidad del suelo a través de la fijación de N y proveer vainas para la alimentación del ganado o humanos (Gardezi *et al.*, 2008).

Las bacterias del género *Rhizobium* se asocian al mezquite y otras leguminosas formando nódulos que fijan el nitrógeno atmosférico y se estima que una hectárea de mezquite adiciona al suelo el equivalente a 300 kg de nitrógeno en forma de amonio en un año (Osuna y Meza, 2003; Torres, 2013). Debido a la resistencia y adaptabilidad del mezquite a la sequía y a las altas temperaturas, puede desarrollarse en zonas con precipitaciones menores a los 250 a 500 mm anuales según la región, y temperaturas máximas promedio en verano de más de 40°C (Granados, 1996; Torres, 2013).

3.8.3 Microorganismos promotores del crecimiento vegetal

Los microorganismos promotores del crecimiento vegetal son definidos por tres características intrínsecas: 1) deben ser capaces de colonizar la rizósfera, 2) ser capaces de sobrevivir y multiplicarse en micro hábitats asociados con la superficie de la raíz, en competencia con el resto de la microbiota, al menos por el tiempo requerido para expresar su actividad de promoción y protección, y 3) deben promover el crecimiento vegetal. Los microorganismos promotores del crecimiento vegetal son tanto bacterias como hongos que se encuentran viviendo en el suelo. Las bacterias son tanto de vida libre o poseen una asociación simbiótica con las raíces de las plantas (Kumar, 2016). El uso de microorganismos promotores del crecimiento vegetal como biofertilizantes fue reportado como una solución y alternativa para promover el crecimiento vegetal y nutrición (Vessey 2003; Jaiswal, 2016).

Hay un aumento del interés en el desarrollo de tecnología respetuosa con el ambiente centrado en el uso de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB, por sus siglas en inglés), que son conocidas por mejorar el crecimiento en cultivos agrícolas, para ayudar a aumentar el crecimiento de plantas de una manera ecológicamente sustentable en bosques degradados

(Egamberdieva, 2008; Karakurt *et al.*, 2011; Radhapriya *et al.*, 2015). Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal mejoran el crecimiento de las plantas mediante procesos microbianos tales como fijación de nitrógeno, solubilización de fosfato, movilización de potasa, solubilización de zinc, movilización de micronutrientes, y también secreción de fitohormonas (auxinas, citoquininas, y giberelinas), deseables para el crecimiento y desarrollo de cultivos de plantas (Akhtar y Siddiqui 2010; Akhtar *et al.* 2010; Kumar, 2016).

Entre éstos procesos, la fijación biológica del nitrógeno se encuentra ligada a organismos en vida libre como *Azotobacter*, *Beijerinckia*, *Clostridium*, *Bacillus*, *Klebsiella*, *Chromatium*, y *Rhodospirillum*; y aquellos que forman asociaciones simbióticas con otros organismos. En aplicaciones agrícolas, aproximadamente el 80 % de éste nitrógeno fijado biológicamente proviene de la simbiosis entre plantas leguminosas y α -proteobacteria, del orden Rhizobiales, de la familia Rhizobiaceae, incluyendo especies de *Rhizobium*, *Bradyrhizobium*, *Sinorhizobium*, *Azorhizobium* y *Mesorhizobium* (Willems y Collins, 1993; Farrand *et al.*, 2003; Garg y Geetanjali, 2009).

Otro proceso importante es la solubilización de fosfato, dado que éste es un nutriente importante requerido por las plantas. De hecho, muchos organismos solubilizan el fósforo de las rocas (Rashid, 2016). Estudios existentes en la solubilización mineral de fosfato por microorganismos de la rizósfera muestran que este importante grupo de solubilizadores de fosfato incluye géneros como *Bacillus* y *Pseudomonas* (Illmer y Schinner, 1992; Khan *et al.*, 2009), mientras que los géneros de hongos importantes se encuentran conformado por *Aspergillus* y *Penicillium* (Montsara *et al.*, 1995; Khan *et al.*, 2009).

3.8.3.1 Caracterización de *Pseudomonas* spp. fluorescentes y *Pseudomonas fluorescens*

De acuerdo a Latour (2009) *Pseudomonas* spp. fluorescentes constituye un grupo oxidasa-positivo, que incluye varias especies como *Pseudomonas fluorescens*, *P. putida*, y *P. chlororaphis* (Palleroni, 1984; Bossis *et al.*, 2000). Todas las bacterias correspondientes a este grupo comparten la habilidad de producir pigmentos amarillo verdoso solubles, pioverdinas, que actúan como sideróforos para éstas bacterias (Meyer y Abdallah, 1978; Latour, 2009).

P. fluorescens es una especie simbiótica en las plantas, que le permite obtener los elementos nutritivos indispensables para su crecimiento. Esta especie es conocida por su aptitud para

reducir la incidencia de enfermedades en las raíces de las plantas, así como en la inhibición de un gran número de agente fitopatógenos (Gao, *et al*, 2012; Mputu, 2014). Además, ésta especie tiene necesidades nutricionales simples y puede fácilmente desarrollarse en medios minerales compuestos por una variedad de fuentes de carbono, ciertas cepas pueden utilizar el ion nitrato (NO_3^-) como receptor de electrones para reemplazar el O_2 (Mputu, 2014).

3.8.3.2 Clasificación taxonómica

Canadá, MEC (2015) retoma la idea de Palleroni (1984) e indica que *P. fluorescens* es una bacteria Gram negativa, aerobia y se presenta en forma de bastón. Esta bacteria ha evolucionado a un pH neutro y su temperatura óptima de crecimiento es de 25 a 30 °C, pero también puede desarrollarse a una temperatura también baja de 4 °C. La bacteria *P. fluorescens* no forma esporas u otras estructuras de supervivencia y no se desarrolla en condiciones ácidas (<pH 4.5) (Holt, 1994; MEC, 2015).

El género *Pseudomonas* pertenece a la subclase γ proteobacteria e incluye la mayoría de las *Pseudomonas* fluorescentes, así como algunas especies no fluorescentes. El grupo de *Pseudomonas* fluorescentes representa: 1) especies fitopatógenicas con citocromo c oxidasa-positivo, tales como *P. cichorii*, *P. marginalis* y *P. tolaasii*; 2) no fitopatógenicas, cepas no necrógenas, tales como las especies *P. fluorescens*, *P. putida*, *P. chlororaphis*, *P. aureofaciens* y *P. aeruginosa*; 3) especies necrogénicas de *Pseudomonas* fluorescentes sin citocromo c oxidasa: *P. syringae* y *P. viridiflava*. El grupo de *Pseudomonas* no fluorescentes está constituido por *P. stutzeri*, *P. mendocina*, *P. alcaligenes* y *P. pseudoalcaligenes* (Palleroni, 1993 ; Holte *et al.*, 1994 ; Bossis *et al.*, 2000; Botelho, 2006).

3.8.3.3 Ecología

Las especies del género *Pseudomonas* tienen una capacidad elevada de colonizar la rizósfera así como las raíces de las plantas, además de ser capaces de formar asociaciones estrechas con sus huéspedes. Estas asociaciones pueden controlar a una enfermedad en las plantas sensibles (Höfte y de Vos, 2006; Viollet, 2010). De hecho, durante las tres últimas décadas, las bacterias pertenecientes al género *Pseudomonas* han sido identificadas como agentes potenciales de biocontrol en la lucha contra patógenos (Mezaache, 2012).

3.8.3.4 Interacciones *Rhizobium-Pseudomonas*

En la rizósfera el sinergismo entre varios géneros de bacteria tales como *Bacillum*, *Pseudomonas*, *Arthrobacter*, y *Rhizobium* ha mostrado promover el crecimiento de plantas de cacahuete, maíz, y soja (Dey *et al.* 2004 ; Ratti *et al.* 2001; Egamberdieva, *et al.*, 2013). En un estudio llevado a cabo por Dileep Kumar, *et al.*, (2001) se observó que la inoculación de semillas con cepas de *Pseudomonas* fluorescentes y *Rhizobium*, y sus combinaciones (co-inoculaciones) se correlacionaron positivamente respecto a variables como altura de tallos, longitud radicular y peso anhidro; sin embargo se correlacionaron negativamente con la germinación.

CAPÍTULO 4 - DESARROLLO EXPERIMENTAL

El desarrollo experimental consistió en la recolección del material biológico de *P. laevigata* en la microcuenca baja del Río Grande Tulancingo, y el muestreo de los suelos phaeozem y vertisol, tanto de la zona sujeta a agricultura de secano como aquella irrigada con aguas residuales, respectivamente. Éstos suelos, el uso de cepas bacterianas A7 y Sv de *P. fluorescens* en raíces de árboles de mezquite (*P. laevigata*) y la adicción de vermicomposta fueron parte de los factores analizados en condiciones de invernadero en el Colegio de Postgraduados.

4.1 Origen de los suelos

Los suelos utilizados provienen de la sección baja de la microcuenca Río Grande Tulancingo, sometidos a dos tipos de riego: riego de secano en la producción de maíz y agricultura de riego pesado con aguas residuales para producción de forraje, principalmente trébol (*Trifolium* spp.), el cual es empleado como forraje para ganado bovino en la producción de leche. La recolecta de muestras de suelo para análisis en laboratorio y uso para experimentación en invernadero se llevó a cabo en el mes de noviembre de 2016.

4.1.1 Ubicación del área de estudio

De acuerdo a INEGI (2010), el área de estudio se ubica dentro de la microcuenca baja del Río Grande Tulancingo en el estado de Hidalgo (ver cuadro 4.1, y figura 4.1 en anexo 15). Se localiza a 18.5 km de la ciudad de Tulancingo, con una altitud media de 2,095 msnm. Los sitios de muestreo y recolección de suelo pertenecen al municipio de Acatlán. Las coordenadas geográficas son 20 11'39.96"N, 98 26'38.62"W para el suelo vertisol irrigado con aguas residuales; y 20 12 '27.18"N, 98 27'21.50"W para el suelo phaeozem con agricultura de secano.

Cuadro 4.1. Clasificación hidrológica del sitio de estudio.

Clasificación	Nombre
Región hidrológica	Pánuco (RH26)
Cuenca	Río Moctezuma (RH26D)
Subcuenca	Río Metztlán (RH26Dv)
Microcuenca	Río Grande Tulancingo

El municipio se encuentra limitado al Sureste por Tulancingo de Bravo, al Suroeste por Singuilucan, al Norte por Huayacocotla, al Noreste por Metepec y Agua Blanca de Iturbide y al Oeste por Huasca de Ocampo. Las zonas de estudio comprendieron una superficie de 0.86 ha y

1.18, respectivamente, ubicadas a 2.5 km de la reserva de la biósfera Barranca de Metztitlán. Sánchez, *et al.* (2008) reportan un clima semiseco templado cubriendo un 79.04% de la superficie del municipio. La temperatura media anual oscila entre los 14 °C y la precipitación promedio es de 523-525.9 mm.

4.1.2 Muestreo de suelos

De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, mediante el muestreo la heterogeneidad de los parámetros del suelo a ser evaluados pueden ser estimados en su valor promedio a través de la recolección de un determinado número de muestras o submuestras compuestas derivadas de submuestras. El área de estudio fue ligada a sitios con dos tipos de suelo diferente y sujetos a riego con aguas residuales y agricultura de secano. De acuerdo al conjunto de datos vectoriales edafológicos del INEGI (2013), en el primer caso, suelo vertisol, hay un uso de aguas residuales para la obtención de forraje con leguminosas de rápido crecimiento en el distrito de riego (ver figura 4.2 en anexo 15).

En el segundo caso, suelo phaeozem INEGI (2013), se tienen unidades que corresponden a la agricultura de secano donde no hay riego con aguas residuales y se cultiva principalmente maíz de autoconsumo en suelos de baja profundidad (ver figura 4.3 en anexo 15). Las unidades para ambos casos son terrenos visualmente homogéneos y manejados de manera uniforme, con superficies de 0.86 ha para la sitio irrigado con aguas residuales y de 1.18 ha para aquel con riego de secano en verano. Las profundidades de muestreo fueron 0-5 cm, 5-10 cm y 10-40 cm (Gardezi *et al.*, 2009). El número de muestras individuales (submuestras) que conformaron la muestra compuesta fue de 40 para cada tipo de suelo.

El método de muestreo empleado fue mediante el uso de cuadrícula, con una selección de la distancia entre los puntos a muestrear en relación al número total de submuestras (ver figura 4.4 y 4.5 en anexo 15). La muestra compuesta fue preparada con las submuestras con el mismo volumen de suelo. Se evitó la contaminación con otros materiales. El mezclado se realizó en laboratorio mediante la división en cuatro secciones, y retiro de dos de ellas. Éste proceso se repitió hasta la obtención 1.5 kg de muestra compuesta. Se tuvieron 3 muestras compuestas para 0-5 cm, 5-10 cm y 10-40 cm, respectivamente para cada tipo de suelo (ver figura 4.6 y 4.7 en anexo 15).

4.1.3 Caracterización de suelos

4.1.3.1 Propiedades físico-químicas y elementos contaminantes del suelo

Negrin y Jiménez (2012) señalan que la definición del estado de la fertilidad de un suelo requiere información sobre disponibilidad de los nutrimentos, presencia de elementos tóxicos y propiedades químicas, físicas y biológicas. En éste sentido, se analizaron en laboratorio seis muestras compuestas para las profundidades propuestas por Gardezi, *et al.* (2009) de 0-5, 5-10 y 10-40 cm. Su análisis contempló la caracterización de las muestras de los tipos de suelo identificados en campo. Se determinaron los componentes de la fertilidad del suelo a través de sus propiedades físicas y químicas; además del análisis de los elementos contaminantes Plomo (Pb), Cromo (Cr), Cadmio (Cd), Níquel (Ni), y Cobalto (Co) (ver cuadro 4.2) mediante los procedimientos señalados por Fernández *et al* (2006) y NOM-021-SEMARNAT-2000 (ver anexos 1-13). En la interpretación, se usó información de Vazquez (2009). Los procedimientos de determinación se describen en el cuadro 4.3.

Cuadro 4.2. Propiedades físicas y químicas, y elementos contaminantes en el suelo.

Tipo	Propiedades	Variable	
Fertilidad del suelo	Físicas	Densidad aparente Materia orgánica	Textura Arena (%) Limo (%) Arcilla (%)
	Químicas	pH Conductibilidad eléctrica Macronutrientes: Nitrógeno total (N) Fósforo asimilable (P) Potasio intercambiable (K) Calcio intercambiable (Ca) Magnesio intercambiable (Mg)	Micronutrientes: Sodio (Na) Hierro (Fe) Cobre (Cu) Zinc (Zn) Manganeso (Mn) Boro (B) Molibdeno (Mo)
Elementos contaminantes		Plomo (Pb) Cromo (Cr) Cadmio (Cd)	Níquel (Ni) Cobalto (Co)

Cuadro 4.3. Metodología de determinación de propiedades físico-químicas y elementos contaminantes del suelo.

Determinación	Método
pH	Potenciométrico, relación suelo-agua 1:2
Conductividad eléctrica (CE)	Puente de conductividad eléctrica en suspensión de la muestra: agua, 1.5.
Densidad aparente	Método de la probeta
Materia orgánica (MO)	Walkley y Black, y Olsen
Nitrógeno total (N)	Extraído con cloruro de potasio 2N y determinado por arrastre de vapor
Fosforo asimilable (P)	Bray P1
Sodio (Na) y Potasio (K)	Extraído en acetato de amonio 1.0N, pH 7.0, relación 1:20 y determinado por espectrofotometría de emisión de flama
Calcio (Ca)	Extraído con acetato de amonio 1.0N, pH 7.0, relación 1:20 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica
Magnesio (Mg)	
Hierro (Fe)	Extraído con DTPA relación 1:4 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica
Cobre (Cu)	
Zinc (Zn)	
Mangnesio (Mg)	
Plomo (Pb)	Extracción con DTPA, relación 1:4 y determinado por espectrofotometría de absorción atómica
Cromo (Cr)	
Cadmio (Cd)	
Niquel (Ni)	
Cobalto (Co)	
Molibdeno (Mo)	
Boro (B)	Fotocolorimetría con azometina H.

4.2 Origen de vermicomposta, cepas bacterianas de *Pseudomonas fluorescens* y semillas de *Prosopis laevigata*

En primer lugar, la vermicomposta utilizada como materia orgánica fue elaborada con 60 kg de estiércol de bovino (*Bos taurus*), 25 kg de residuos de melón (*Cucumis melo*), y 15 kg de trigo (*Triticum sp.*), dejando interactuar con lombriz de tierra (*Eisenia fetida*) durante cuatro meses (Hernández-Torres et al., 2016). En segundo lugar, las cepas bacterianas de *Pseudomonas*

fluorescens, A7 y Sv, fueron donadas por el Laboratorio de Biología Molecular del Instituto de Genética del Colegio de Postgraduados. Finalmente, la recolecta de semillas de la especie arbórea de *P. laevigata* se llevó a cabo en la microcuenca baja del Río Tulancingo, estado de Hidalgo, a finales de verano, mes de septiembre, justo al momento de maduración de vainas. Posteriormente se extrajeron las semilla mediante la escarificación del exocarpo carnoso y el mesocarpio leñoso mecánicamente con la ayuda de pinzas (ver figuras 4.8-4.11 en anexo 15).

4.3 Germinación de semillas de *Prosopis laevigata*

Se realizaron dos pruebas de germinación de semillas de *P. laevigata*: la primera de ellas consintió en la utilización de 3 tratamientos diferentes tales como la inoculación con la cepa A7, Sv y testigo; y en la segunda se emplearon 7 tratamientos distintos desde concentraciones de 10^{-2} hasta 10^{-7} de sulfato de cobre penta hidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y testigo.

4.3.1 Diseño experimental completamente al azar

De acuerdo a Oehlert (2010), una forma de representar el diseño experimental completamente al azar en la variable de respuesta Y_{ij} es el modelo siguiente:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \quad (\text{ecuación 4.1})$$

En el cual $i = 1, 2, \dots, t; j = 1, 2, \dots, r; t$ es el número de tratamientos, r es el número de repeticiones, Y_{ij} equivale a la variable aleatoria (v.a) correspondiente al tratamiento i en su repetición j , μ es la media general, τ_i es el efecto del tratamiento i , y finalmente ε_{ij} corresponde al error experimental del tratamiento i en su repetición j . El modelo indica que la variable respuesta, Y_{ij} , es explicada por una media general, el efecto de un factor de estudio y el efecto de otros factores.

4.3.2 Germinación de semillas de *Prosopis laevigata* en asociación con cepas A7 y Sv de células bacterianas de *Pseudomonas fluorescens*

Las semillas de *P. laevigata* fueron inoculadas con las cepas bacterianas A7 y Sv de *P. fluorescens* en las instalaciones del laboratorio de biología molecular del Instituto de Genética del Colegio de Postgraduados y posteriormente fueron transferidas a invernadero para su germinación y crecimiento. Se empleó un diseño experimental completamente al azar con tres tratamientos y cuatro repeticiones: la inoculación de semillas de *P. laevigata* con las cepas bacterianas A7, Sv, y el tratamiento testigo. El crecimiento de *P. fluorescens* fue realizado en el

medio de cultivo B de King preparado en estado líquido (Carrillo-Castañeda, 2017). Éste medio fue incubado en un agitador a 100 rpm a una temperatura medio de 30 °C durante 72 horas. El crecimiento bacteriano, turbidez a 660 nm, fue de 1.8 para cepa Sv y de 1.2 para la cepa A7.

Después del periodo de incubación de las cepas bacterianas de *P. fluorescens*, las semillas de *P. laevigata* fueron esterilizadas con 120 ml de alcohol al 70% durante 1 minuto, posteriormente se lavaron con agua destilada caliente a una temperatura media de 60 °C durante 5 minutos de acuerdo a lo propuesto por Quiñones-Gutiérrez *et al.*, (2013) y se secaron a temperatura ambiente durante 4 horas. Así mismo, 12 frascos de 15 ml fueron preparados (4 frascos por tratamiento) para la inoculación de las semillas. Se emplearon 10 ml de cepas bacterianas por frasco (A7 o Sv) para los dos tratamientos con bacterias (8 frascos) y 10 ml por frasco de agua destilada (4 frascos). Setenta semillas se colocaron en cada frasco. Los doce frascos (cuatro con la cepa A7, cuatro con la cepa Sv y 4 sin bacterias) se dejaron en reposo durante 2 horas. Posteriormente, éstos fueron transferidos integralmente en cada caja de Petri pre identificada y provista de papel absorbente.

Las doce cajas de Petri preparadas en laboratorio fueron colocadas en cámara de germinación en invernadero (ver figura 4.13 en anexo 15) del Colegio de Postgraduados a una temperatura media de 18.9 °C y una humedad relativa de 57.3 %. Las semillas fueron hidratadas cada día con 3 ml de agua destilada. El porcentaje de germinación de las semillas de *P. laevigata* fue contabilizado cada 24 horas durante 20 días (ver figura 4.12 en anexo 15). En adición, se evaluó el porcentaje de sobrevivencia de plántulas 5 días después finalizada la germinación.

4.3.3 Germinación de semillas de *Prosopis laevigata* en sulfato de cobre penta hidratado

Las semillas de *P. laevigata*, recolectadas directamente de árboles en septiembre de 2016, fueron extraídas mecánicamente de las vainas de mezquite mediante la utilización de pinzas convencionales. En laboratorio, se sumergieron 315 semillas en ácido sulfúrico (H₂SO₄) durante 3 minutos (D'Aubeterre *et al.*, 2002; Madueño-Molina *et al.*, 2006). Posteriormente, éstas fueron lavadas con agua destilada por un periodo de 5 minutos. La germinación de las semillas se llevó a cabo en un medio de cultivo con diluciones de 10⁻², 10⁻³, 10⁻⁴, 10⁻⁵, 10⁻⁶ y 10⁻⁷ M de sulfato de cobre penta hidratado (CuSO₄·5H₂O). La solución inicial fue preparada en un frasco con capacidad de 20 ml con 13.5 ml de agua destilada y 1.5 ml de CuSO₄·5H₂O.

En 21 cajas de Petri se agregaron 15 semillas y 4 ml de las diluciones de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$. En adición un tratamiento testigo con agua destilada fue utilizado (ver figura 4.14 en anexo 15). Posteriormente, se dispusieron las cajas de Petri en una incubadora de germinación a una temperatura constante de 28 a 30 C durante 72 horas. Una vez finalizado el proceso de germinación, la determinación del peso anhidro de las semillas germinadas de *P. laevigata* se llevó a cabo en el laboratorio de Nutrición Animal del Colegio de Postgraduados. Se introdujeron las 21 unidades experimentales en estufa de secado durante 72 horas hasta la adquisición de peso constante. Desecadora con silica activa fue utilizada por un periodo de 15 minutos antes de pesar las semillas de *P. laevigata* en balanza analítica.

Se empleó un diseño experimental completamente al azar con 7 tratamientos y 3 repeticiones. Los datos fueron sometidos a las pruebas de homogeneidad de varianzas de Bartlett y normalidad de distribución de Shapiro-Wilk. Cuando los datos mostraron una distribución normal se emplearon ANOVA y comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) para comparar las medias de los tratamientos. Finalmente, los paquetes estadísticos R software (R Development Core Team, 2008) y Statistical Analysis System software (SAS, 2000) fueron empleados para analizar el porcentaje de germinación y peso anhidro de las semillas de *P. laevigata*.

4.4 Uso de factores suelo, vermicomposta y cepas bacterianas de *Pseudomonas fluorescens* en crecimiento de *Prosopis laevigata*

4.4.1 Diseño experimental factorial completamente al azar, factores y niveles

El crecimiento de plántulas de mezquite fue evaluado con un diseño experimental factorial completamente al azar (30-180 días) (ver figura 4.15-4.18 en anexo 15). Los datos de las variables del cuadro 4.7 se analizaron mediante la utilización de los paquetes estadísticos R software (R Development Core Team, 2008) y Statistical Analysis System software (SAS, 2000). Análisis de varianza (ANOVA) y comparación de medias de Tukey ($p \leq 0.05$) fueron utilizadas para comparar los tratamientos del diseño experimental factorial completamente al azar.

El diseño experimental factorial completamente al azar empleado se define de la siguiente manera: una interacción de tres factores, digamos en los niveles *ijk*-ésimo de los factores *A*, *B*, y *C*, se toma la respuesta media en las combinaciones *ijk* de los factores *A*, *B*, y *C*, y posteriormente se restan los términos del orden inferior: la media general; efectos medios de *A*,

B , y C ; y la interacción entre dos factores de A , B , y C (Oehlert, 2010). Por tanto, la ecuación del modelo general de la variable de respuesta para los factores A , B , y C es la siguiente:

$$y_{ijkl} = \mu + A_i + B_j + C_k + AB_{ij} + AC_{ik} + BC_{jk} + ABC_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (\text{ecuación 4.2})$$

En la cual: $i = 1, 2, \dots, a$ es el número de niveles del factor A ; $j = 1, 2, \dots, b$ es el número de niveles del factor B ; $k = 1, 2, \dots, c$ es el número de niveles del factor C ; $l = 1, 2, \dots, r$ equivale al número de repeticiones de cada combinación posible; y_{ijkl} es igual al valor de la variable de respuesta correspondiente a la repetición l del nivel i de A , nivel j de B y nivel k de C ; μ es la media general; A_i corresponde al efecto del nivel i de A ; B_j equivale al efecto del nivel j de B ; C_k es el efecto del nivel k de C ; AB_{ij} es la interacción $A*B$ correspondiente al nivel i de A y nivel j de B ; AC_{ik} representa la interacción $A*C$ correspondiente al nivel i de A y nivel k de C ; BC_{jk} es la interacción $B*C$ correspondiente al nivel j de B y nivel k de C ; ABC_{ijk} es igual a la interacción $A*B*C$ correspondiente al nivel i de A , nivel j de B y nivel k de C ; y finalmente ε_{ijkl} equivale al error experimental correspondiente a la repetición l del nivel i de A , nivel j de B y nivel k de C .

En la experimentación en invernadero se utilizó un diseño completamente al azar, en arreglo factorial $2 \times 3 \times 5$ para un total de 30 tratamientos, con 2 tipos de suelo diferentes (suelo phaeozem con agricultura de secano y suelo vertisol con irrigación con aguas residuales), 3 condiciones de inoculación con cepas bacterianas de *P. fluorescens* (cepa A7, Sv y testigo) y 5 concentraciones diferentes de vermicomposta (0, 25, 50, 75 y 100 ton/ha). En adición, 3 repeticiones fueron empleadas. Por tanto, la experimentación en invernadero constó de 90 unidades experimentales (ver cuadro 4.4).

Cuadro 4.4. Factores y niveles empleados en el diseño experimental factorial completamente al azar.

<i>P. laevigata</i>			
Factores	Bacteria : cepas de <i>P. fluorescens</i>	Vermicomposta (ton/ha)	Suelo
Nivel 1	No cepa	0	Vertisol e irrigado con aguas residuales
Nivel 2	Cepa A7	25	Phaeozem con agricultura de secano
Nivel 3	Cepa Sv	50	
Nivel 4		75	
Nivel 5		100	
Niveles	3	5	2
Unidades experimentales	3 x 5 x 2 x 3 = 90		

4.4.2 Organización

La aleatorización del diseño experimental factorial completamente al azar y ubicación de las unidades experimentales en invernadero se describen en el cuadro 4.5.

Cuadro 4.5. Aleatorización y ubicación de las unidades experimentales en invernadero.

1	11	21	31	41	51	61	71 T3	81
R1SC25	T2A7100	R1A725	T2A750	R2Sv0	R2SC0	T2Sv75	Sv100	T3A7100
2		22	32	42	52	62	72	82
T1Sv100	12 T1A750	R1SC0	T2A725	R3A7100	T3A750	R2SC100	R3SC25	R3Sv75
3	13	23	33	43	53		73	83
T1A70	R1A7100	R1A775	T2SC50	R2Sv100	T1SC75	63 T3SC0	R2A750	R2SC50
4		24	34	44	54	64	74	84
R1SC50	14 T1Sv0	T2SC100	T1Sv75	T3Sv0	R1Sv25	T2Sv100	R3Sv25	T3Sv50
5	15	25	35	45	55	65	75	85
T1SC50	R1Sv50	R2SC25	T1SC25	R1SC100	T2A775	T3A775	T2SC75	R3A775
6	16	26	36	46	56	66	76	86
T2A70	T2Sv0	R1Sv0	R2A725	T2Sv25	R3Sv0	T3Sv75	R1Sv75	R3SC50
7	17	27	37	47	57	67	77	87
T1A725	R2Sv50	T1Sv50	T3A725	T2SC25	R2SC75	R3Sv50	R3SC0	R3A750
8	18	28	38	48	58	68	78	88
R1SC75	R2A7100	T1Sv25	T2Sv50	T3Sv25	T3SC25	R1A750	R3SC100	R3SC75
9	19	29	39	49	59	69	79	89
T1A7100	T1SC0	R1A70	T3A70	R3Sv100	T3SC50	R2A70	R2Sv75	T3SC75
10	20	30	40	50	60	70	80	90
T1SC100	R1Sv100	T3SC100	T1A775	T2SC0	R2Sv25	R3A70	R2A775	R3A725

T_1^3 =suelo phaeozem con agricultura de secano y repeticiones, R_1^3 = suelo vertisol irrigado con aguas residuales y repeticiones, SC= Sin cepa bacteriana, A7= cepa A7 de *P. fluorescens*, Sv= cepa Sv de *P. fluorescens*, (0, 25, 50, 75, 100)= ton/ha de vermicomposta.

4.4.3 Tratamientos y variables de respuesta

Se emplearon 30 tratamientos diferentes que combinaron los factores suelo, bacteria y vermicomposta (ver cuadro 4.6). En adición, se evaluaron 27 variables en la especie de *P. laevigata*, donde 5 variables de respuesta fueron monitoreadas desde los 30 días hasta los 180 días y aquella correspondiente a Clorofila (SPAD) desde los 60 días hasta los 180 días (ver cuadro 4.7 y figura 4.19).

Cuadro 4.6. Tratamientos en el diseño experimental factorial completamente al azar.

Tratamiento	Cepa	Suelo	Vermicomposta (Ton/ha)	Tratamiento	Cepa	Suelo	Vermicomposta (Ton/ha)
1	SC	T	0	16	SC	R	50
2	A7	T	0	17	A7	R	50
3	Sv	T	0	18	Sv	R	50
4	SC	R	0	19	SC	T	75
5	A7	R	0	20	A7	T	75
6	Sv	R	0	21	Sv	T	75
7	SC	T	25	22	SC	R	75
8	A7	T	25	23	A7	R	75
9	Sv	T	25	24	Sv	R	75
10	SC	R	25	25	SC	T	100
11	A7	R	25	26	A7	T	100
12	Sv	R	25	27	Sv	T	100
13	SC	T	50	28	SC	R	100
14	A7	T	50	29	A7	R	100
15	Sv	T	50	30	Sv	R	100

SC: Sin cepa bacteriana, A7: cepa A7 de *P. fluorescens*, Sv: cepa Sv de *P. fluorescens*, T: suelo phaeozem con agricultura de secano, y R: suelo vertisol irrigado con aguas residuales.

4.4.3.1 Variables evaluadas desde los 30 días hasta los 180 días

Se evaluaron variables correspondientes a la sección aérea de las plántulas, monitoreadas con una frecuencia de 15 días. Las variables medidas se integraron por 1) altura de plántula: determinada con flexómetro (en centímetros), cuya medición se realizó desde la base del tallo principal hasta el brote de la yema apical de los árboles en crecimiento; 2) diámetro de tallo: determinada con vernier (en milímetros) y medida por encima del cuello de la raíz; 3) número de hojas: contabilizadas las hojas mayores a 2 cm de longitud en las plántulas. De acuerdo a Calderón y Rzedowski (2001), *Prosopis laevigata* (Willd.) M. C. Johnst presenta hojas con 1 a 3 pares de pinnas, cada una con 10 a 20 pares de folíolos sésiles de 5 a 15 cm de largo por 1 a 2 cm de ancho en árboles maduros; y 4) medición de clorofila: determinada bajo el principio de Yang,

et al., (2014), quienes mencionan que el contenido de nitrógeno se encuentra correlacionado con el contenido de clorofila, el cual puede ser inferido del color de la hoja, mediante el uso de un medidor de clorofila de análisis de suelo y planta (SPAD). Por tanto, se empleó el medidor Konica Minolta SPAD 502 PLUS, el cual determina la cantidad relativa de clorofila presente por espectroscopia expresada en unidades SPAD. La lectura de los valores SPAD se realizó en hojas maduras distribuidas en las plántulas.

Las variables calculadas se integraron por 5) Volumen aéreo y 6) el índice de esbeltez. La primera se calculó mediante las fórmulas de Smalian y coeficiente mórfico de acuerdo a Romahn y Ramírez (2010). Por un lado, la expresión de Smalian nos indica que el volumen de un fuste o de una troza es igual a producto de la semisuma de las áreas de las secciones transversales extremas de la troza por su longitud como se indica a continuación :

$$V_s = \left[\frac{A_b + A_s}{2} \right] L \quad (\text{ecuación 4.3})$$

En la cual: V_s es el volumen por Smalian (cm^3), A_b y A_s son las áreas de las secciones transversales extremas del fuste o troza y L equivale a la longitud del tronco del sólido con $L=L_2 - L_1$ (cm).

Por otro lado, el coeficiente mórfico es un indicador numérico de la forma de los fustes de los árboles, entendiéndose como tal a la relación existente entre el volumen real del fuste y el volumen de un cuerpo geométrico convencional que puede ser el cilindro, el paraboloide apolónico, el cono, etc., de la misma base que el área basal del árbol y de su misma altura. El cálculo de volumen se realizó mediante la utilización de coeficiente mórfico en arboles de 30 a 180 días con la fórmula siguiente Romahn y Ramírez (2010):

$$CM = \frac{VR}{VC} \quad (\text{ecuación 4.4})$$

En la cual: CM es el coeficiente mórfico, VR representa al volumen real del árbol y VC es el volumen del cilindro con área de la base igual al área basal del árbol e igual altura.

Cuadro 4.7. Clasificación de las variables de respuesta

Tipo	Monitoreo: 30-180 días	Cosecha:180 días	
	Sección aérea:	Sección aérea:	
Plántulas vivas	1. Altura de plántula(cm) 2. Diámetro de tallo (mm) 3. Volumen aéreo (cm ³) 4. Hojas (número) 5. Clorofila (SPAD)	1. Altura de la planta(cm) 2. Diámetro del tallo (mm) 3. Volumen aéreo (cm ³) 4. Hojas (número) 5. Clorofila (SPAD)	7. Fascículos (número) 8. Foliolos (número) 9. Longitud de foliolos (mm) 10. Ancho de foliolos (mm) 11. Área foliar (cm ²) 12.) Ramas (número)
	No aplica	Sección subterránea:	
Plántulas muertas		13. Longitud radicular (cm) 14. Nódulos blancos en raíz (número)	15. Nódulos rojos en raíz (número) 16. Volumen radicular (cm ³)
	No aplica	Biomasa aérea:	Biomasa subterránea:
		17. Peso anhidro de hojas (g) 18. Peso anhidro de hojarasca (Mg) 19. Peso anhidro de tallos (g) 20. Peso anhidro aéreo (g) 24. Peso anhidro total (g)	21. Peso anhidro radicular (g) 22. Peso anhidro de nódulos (Mg) 23. Peso anhidro subterráneo (g)
		Relación biomasa aérea entre biomasa subterránea	
Índices morfológicos	6. Índice de esbeltez (unidimensional)	25. Índice de Dickson (unidimensional)	26. Relación peso anhidro aéreo/subterráneo (unidimensional)
		6. Índice de esbeltez (unidimensional)	27. Relación volumen aéreo/subterráneo (unidimensional)

Finalmente, la segunda variable calculada, 6) el índice de esbeltez (índice morfológico), fue determinada al dividir la altura de la planta (en cm) entre el diámetro a nivel del cuello de la raíz (en mm). Tanto menor fue su valor, más bajo y grueso fue el arbolito, tendiendo a ser más apto para ambientes con limitaciones de humedad, y viceversa (Dante, 2007):

$$IE = \frac{H}{\emptyset} \quad (\text{ecuación 4.5})$$

En la cual: IE representa al índice de esbeltez, H es la altura del arbolito (cm), y \emptyset es el diámetro del arbolito a nivel del cuello de la raíz (mm).

4.4.3.2 Variables evaluadas a los 180 días

Se evaluaron variables correspondientes a la sección aérea y subterránea, biomasa, e indicadores e índices de calidad de planta (índices morfológicos). En la sección aérea las variables medidas fueron 1) número de fascículos y ramas: contabilizados como la producción total por unidad experimental de fascículos y ramas en los árboles de *P. laevigata*; 2) número, longitud y ancho de foliolos: cuantificados y medidos con vernier (en mm); y 3) área foliar: medida con un integrador de área foliar modelo LI-3100 (LI-COR, Inc., Lincoln, NE, USA). En sección subterránea fue medido 1) la longitud radicular: determinada considerando la longitud a partir del cuello de raíz hasta el extremo de la raíz principal; 2) número de nódulos: contabilizados como nódulos blancos y rojos presentes en la raíz; y 3) volumen radical: determinado mediante el método de volumen de agua desplazado por raíz en una probeta graduada (Ortiz *et al.*, 2016), cuyo procedimiento contempló sumergir la raíz en un volumen de agua conocido, donde el volumen aumentado correspondió al volumen radical.

Otras variables como la biomasa aérea y subterránea fueron determinadas tales como el peso anhidro de la sección aérea compuesta por tallo, hojas, y hojarasca; además del peso anhidro subterráneo de raíz y nódulos. Posteriormente se introdujeron las muestras a una estufa y se secaron a 60°C por 72 horas, determinando su peso seco hasta llegar a peso constante (Sadzawka *et al.*, 2007). En adición, las variables correspondientes a los índices morfológicos fueron el índice de esbeltez, el índice de Dickson *et al.* (1960), y la relación biomasa aérea entre biomasa subterránea. De acuerdo a Dante, (2007) éstos son relaciones numéricas que entre diferentes indicadores individuales también arrojan información sobre la condición de la planta. El primero hace referencia a la ecuación 4.5. El segundo, el índice de Dickson, combina cinco variables morfológicas. Su modelo (Dickson *et al.*, 1960; de Lima, *et al.*, 2017) se representa por la ecuación:

$$DQI = \frac{p}{\left(\frac{h}{d}\right) + \left(\frac{pa}{ps}\right)} \quad (\text{ecuación 4.6})$$

En la cual: QI representa el índice de calidad, p es el peso anhidro total de la planta (g), h es la altura (cm), d es el diámetro del tallo (mm), pa es el peso anhidro de la parte aérea (g), y ps es el peso anhidro de la parte subterránea (g).

Finalmente, el tercer índice morfológico, la relación aérea entre biomasa subterránea, representó la proporción entre el tejido evapotranspiracional o productor y tejido absorbedor de agua y nutrientes (raíces) (Dante, 2007). Su ecuación es la siguiente expresión:

$$R = \frac{BA}{BS} \quad (\text{ecuación 4.7})$$

En la cual: R es la relación biomasa aérea entre biomasa subterránea, BA representa la biomasa aérea (g o cm^3), y BS es la biomasa subterránea (g o cm^3). La interpretación de la relación se expresa en el cuadro 4.8. Las variables evaluadas fueron relación peso anhidro aéreo/subterráneo (BSA/BSR) y relación volumen aéreo/subterráneo (RVA/RVS).

Cuadro 4.8. Interpretación de la relación biomasa aérea y biomasa subterránea

Relación	Interpretación
1	La biomasa aérea es igual a la biomasa subterránea
<1	La biomasa subterránea es mayor que la biomasa aérea
>1	La biomasa aérea es mayor que la biomasa subterránea

A fin de obtener información básica sobre la calidad de árboles a los 180 días de crecimiento se evaluaron 3 índices morfológicos mediante los intervalos de calidad de planta de atributos morfológicos de Rueda *et al.* (2012), CONAFOR (2009), Sáenz *et al.* (2010) y Santiago *et al.* (2007) para coníferas y Latifoliadas de clima templado y tropical (ver cuadro 4.9).

Cuadro 4.9. Intervalos de calidad de planta de atributos morfológicos

Variable		Calidad		
		Baja	Media	Alta
Altura	Conífera no cespitosa	<10.0	10.0-11.9	≥12.0
	Conífera cespitosa	<4.0	4.0-4.9	≥ 5.0
	Latifoliadas	<12.0	12.0-14.9	≥15.0
Diámetro	Conífera no cespitosa	<2.5	2.5-3.9	≥ 4.0
	Conífera cespitosa	<4.5	4.5-5.9	≥ 6.0
	Latifoliadas	<2.5	2.5-4.9	≥ 5.0
Índice de esbeltez	Conífera no cespitosa	≥8.0	7.9-6.0	< 6.0
	Conífera cespitosa	≥6.0		< 6.0
	Latifoliadas	≥8.0	7.9-6.0	< 6.0
Relación BSA/BSR	Todas	≥2.5	2.4-2.0	< 2.0
Índice de Dickson	Todas	<0.2	0.2-0.4	≥ 0.5

BSA=Biomasa seca aérea, y BSR=Biomasa seca radicular. Modificado de Sáenz *et al.* (2010) con aportaciones de Santiago *et al.* (2007) y CONAFOR (2009).

4.4.3.3 Variables ambientales e incrementos morfológicos

Una variedad de adaptaciones han evolucionado en las plantas para hacer frente a los desafíos impuestos por la temperatura. Éstas adaptaciones pueden ser parte del desarrollo general de la planta, tales como la producción de capas de cera en las plantas del desierto y las espinas de cactus que funcionan en la recolección de agua de rocío y luz del sol (Van Zanten, *et al.*, 2014). Gil, *et al.* (2006) señalan que la humedad relativa es otro de los principales factores del ambiente que influye sobre los estomas, para que éstos lleven a cabo su objetivo principal, el de regular el intercambio de vapor de agua y CO₂ a través de las hojas de las plantas. En consecuencia, el experimento se llevó a cabo bajo condiciones de invernadero donde la temperatura y humedad relativa son factores diferentes al sitio de procedencia. Por tanto, se midieron éstas variables con el equipo Hobo data logger U12-012 a intervalos de 15 minutos. En adición, se determinaron la temperatura y humedad relativa promedio, máxima y mínima durante el desarrollo del experimento en invernadero.

4.4 Labores culturales en experimento de invernadero

Algunas labores culturales consistieron del secado de suelo, trasplante y riego de plántulas. La primera de éstas consistió del secado del suelo recolectado en los sitios de muestreo en invernadero durante 20 días. Posteriormente, se procedió con el llenado de 90 bolsas de

polietileno con capacidad de 9kg. En la segunda, fue necesario trasplantar plántulas homogéneas provenientes de la geminación de semillas inoculadas con las cepas A7 y Sv de *P. fluorescens* y tratamiento testigo del diseño experimental completamente al azar a través de la transferencia de una plántula por cada unidad experimental (ver figura 4.17 en anexo 15). En la última labor cultural, riego de plántulas, la irrigación fue programada cada tercer día mediante el uso de un recipiente graduado con la aplicación de 250 ml por cada unidad experimental (por maceta y árbol).

Otras labores culturales se agruparon sobre el control de malezas, plagas y enfermedades. De acuerdo a Cordo (2004), el control integrado de malezas es la herramienta moderna disponible que debería utilizarse cuando las circunstancias lo exijan, ya que armonizan en esta estrategia todos los métodos de control conocidos, manual, mecánico, cultural, químico y biológico. Por tanto, el control de malas hierbas se realizó durante los 180 días de desarrollo del experimento en invernadero mediante la eliminación de malezas manualmente y reincorporación de estas al suelo de cada unidad experimental. El control de plagas se llevó a cabo mediante el control biológico y manual. El uso de insecticidas y fungicidas fue completamente restringido, desarrollándose el crecimiento de las plántulas de *P. laevigata* en invernadero rodeado por especies herbáceas de conservación. Finalmente, los árboles se cosecharon a los 180 días (ver figura 4.18 en anexo 15). Una separación de la sección aérea y radicular de las plántulas de *P. laevigata* fue empleada.

4.5 Otras consideraciones

Finalmente, un par de consideraciones adicionales contemplaron el diagnóstico del estado nutricional de una planta y la valoración de los impactos económicos asociados al uso de *P. fluorescens* contra la producción en invernadero mediante el empleo de fertilizantes químicos. La primera de ellas, el estado de nutrientes en una planta, tiene la ventaja de mediar el contenido total del nutrimento, los cuales pueden variar entre los diferentes órganos de la planta (hojas, peciolo, tallo, raíces), con la edad del tejido, y la edad de la planta (Howeler, 1983). Para lograr esto, en laboratorio se determinaron los porcentajes de nitrógeno, fósforo y potasio en la sección de hojas y tallos de muestras compuestas relacionadas a la utilización de las cepas bacterianas A7 y Sv de *P. fluorescens* y el tratamiento testigo en el crecimiento de árboles de *P. laevigata* en condiciones de invernadero.

La segunda consideración consistió en la identificación de impactos económicos y ambientales en la implementación de tres formas diferentes de fertilización (uso de fertilizantes químicos, no empleo de fertilizante, y el uso de *P. fluorescens* como biofertilizantes) mediante la asignación de valores de -3 a 3, seguido de una ponderación de impactos de los factores afectados en la producción de árboles de mezquite (*P. laevigata*) de acuerdo a la metodología modificada de CEDARENA *et al.*, (2005); y Rolas-Rodríguez y Ortuño (2007) (ver cuadro 4.10).

Cuadro 4.10. Ponderación de impactos económicos

Valoración	Caracterización	Ponderación
-3	Negativo crítico	[-39, -28)
-2	Negativo severo	[-28, -17)
-1	Negativo moderado	[-17, -6)
0	Negativo leve	[-6, 6)
1	Positivo leve	[6, 17)
2	Positivo moderado	[17, 28)
3	Positivo alto	[28, 39]

CAPÍTULO 5 - RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En éste capítulo se caracterizan las propiedades físicas y químicas (ver sección 3.7) de los suelos irrigados con aguas residuales y aquellos usados en agricultura de secano en dos sitios de muestreo de la microcuenca baja del Río Grande Tulancingo. Posteriormente, se analizan 4 variables relacionadas a germinación de semillas de mezquite (*P. laevigata*). En adición, se discuten 27 variables agronómicas (factores suelo, vermicomposta y cepas bacterianas de *P. fluorescens*) de biomasa aérea y subterránea e índices morfológicos, donde 5 variables de respuesta fueron monitoreadas desde los 30 días hasta los 180 días y aquella correspondiente a Clorofila (SPAD) desde los 60 días hasta los 180 días (ver sección 4.4.3.1. y 4.4.3.2.) En adición, se estudian dos variables ambientales correlacionadas con los incrementos morfológicos bajo condiciones de invernadero (ver sección 4.4.3.3.). Finalmente, se discuten los resultados observados en el diagnóstico del estado nutricional (hojas tallos) y aquellos del producto de la valoración de impactos económicos derivados del uso de sistemas de fertilización alternativos.

5.1 Caracterización del suelo

5.1.1 Propiedades físicas y químicas de los suelos

El suelo vertisol irrigado con aguas residuales presentó un pH neutro en comparación con el suelo phaeozem bajo agricultura de secano con pH ligeramente ácido. Los contenidos de macronutrientes y micronutrientes son superiores en los suelos vertisoles. Los elementos esenciales como fósforo triplica los niveles del suelo phaeozem, y el nitrógeno total disponible, potasio y calcio duplican su concentración en relación al suelo phaeozem. La adición de aguas residuales municipales e industria láctea y excremento de bovino proveniente de las explotaciones de producción lechera reflejan el aumento de nutrimentos.

5.1.1.1 Suelo phaeozem en agricultura de secano

El pH determinado se clasificó como moderadamente ácido. Rengel (2002, 2011) señala que, en suelos ácidos, no sólo se incrementa la disponibilidad de aluminio y hierro, sino también se tiene una baja disponibilidad de cationes esenciales básicos como calcio, magnesio y potasio que pueden causar problemas de crecimiento. De acuerdo a los criterio de clasificación e interpretación establecidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 y Vázquez (2009) éste suelo presentó efectos despreciables por salinidad en la producción de

cultivos básicos, con contenido medio de materia orgánica, y suelo franco arcilloso en los primeros 40 cm (ver cuadro 5.1).

En relación al contenido de macronutrientes el suelo phaeozem presentó un contenido bajo de fósforo, y niveles de nitrógeno de bajo a medio. En adición, se determinó un nivel muy rico de potasio, contenido pobre o muy pobre de calcio y un nivel muy pobre de magnesio (ver cuadro 5.1). Algunos autores señalan que una deficiencia en magnesio afecta el metabolismo del azúcar, que se produce antes de cualquier efecto notable en la actividad fotosintética (Hermans *et al.*, 2006; Cakmak y Kirkby, 2008, Ruan *et al.*, 2011).

Por otra parte, en relación al contenido de micronutrientes el suelo phaeozem se caracterizó por la presencia de niveles adecuados de hierro, cobre, manganeso, y boro. Sin embargo, se observaron limitaciones de zinc (ver cuadro 5.1). Das (2016) señala que su deficiencia retarda la fotosíntesis y el metabolismo del nitrógeno; reduce el desarrollo de flores y frutos; prolonga periodos de crecimiento, que resulta en el retraso de la maduración; y eficiencia subóptima del uso de nutrientes.

5.1.1.2 Suelo vertisol irrigado con aguas residuales

El suelo vertisol se caracterizó por la presencia de un pH neutro y efectos despreciables por salinidad en la producción de cultivos básicos. En adición, se encontró una cantidad alta de materia orgánica, que correspondió a la acumulación de materiales en el suelo, tanto por el uso de aguas residuales como por la fertilización con estiércol. La textura determinada correspondió a un suelo franco-arcilloso en la capa de 0-5 cm y franco en la sección 5-40cm.

Los macronutrientes se caracterizaron por contenido medio-alto de fósforo, y bajo-muy alto de nitrógeno. También, se presentaron niveles muy rico de potasio, contenido mediano de calcio y muy pobre de magnesio. Esto coincide con lo señalado por Andrade *et al.*, (2000), Sánchez (2012) y Gardezi *et al.*, (2009) que reportaron que en suelos regados con aguas residuales a medida que aumenta el tiempo de riego, es mayor el incremento en los contenidos de fósforo en el suelo. Así como con los resultados de David y Struchtemeyer (1990), Rodríguez *et al.*, (2006) y Sánchez (2012) que encontraron que el riego con aguas residuales incrementa los niveles de potasio.

En relación al contenido de micronutrientes, se determinaron niveles adecuados de hierro, cobre, zinc (sección 0-5 cm), manganeso y boro. Sin embargo, éste suelo presentó limitaciones de zinc en la sección que corresponde a 10-40 cm de profundidad. Esto indica, que tanto el suelo vertisol como el phaeozem se encuentran limitados por la deficiencia de zinc en su composición química.

Cuadro 5.1. Propiedades físicas y químicas del suelo

Diagnóstico de la fertilidad del suelo	Muestra de suelo					
	Suelo vertisol irrigado con aguas residuales			Suelo phaeozem con agricultura de secano		
	0-5	5-10	10-40	0-5	5-10	10-40
Propiedades físicas						
Materia orgánica %	5.51	3.03	3.63	3.36	3.16	3.23
Densidad aparente tm^{-3}	1.01	1.16	1.26	1.14	1.23	1.13
Arena %	29.6	37.6	37.6	31.6	29.6	29.6
Limo %	37.1	39.6	39.1	41.1	41.1	37.1
Arcilla %	33.2	23.2	23.2	27.2	29.2	33.2
Textura	Franco-arcilloso	Franco	Franco	Franco-arcilloso	Franco-arcilloso	Franco-arcilloso
Propiedades químicas						
pH	6.99	7.16	7.27	6.39	6.28	6.35
Conductividad eléctrica dSm^{-1}	0.14	0.12	0.12	0.05	0.06	0.05
Macronutrientes						
Nitrógeno total (N) %	0.27	0.06	0.13	0.11	0.06	0.07
Fósforo asimilable (P) mg kg^{-1}	39.77	28.85	26.36	11.95	8.79	8.55
Potasio intercambiable (K) mg kg^{-1}	5659	5394	5203	2714	2741	3323
Calcio intercambiable (Ca) mg kg^{-1}	1355	1278	1229	468	500	559
Magnesio intercambiable (Mg) mg kg^{-1}	6.99	7.16	7.27	6.39	6.28	6.35
Micronutrientes						
Hierro (Fe) mg kg^{-1}	64.64	56.11	45.09	25.26	22.86	22.12
Cobre (Cu) mg kg^{-1}	1.59	1.32	1.51	1.45	1.08	1.15
Zinc (Zn) mg kg^{-1}	1.78	1.24	0.98	0.44	0.38	0.37
Manganeso (Mn) mg kg^{-1}	18.38	14.06	15.86	23.66	17.51	16.88
Boro (B) mg kg^{-1}	1.01	1.16	1.26	1.14	1.23	1.13
Molibdeno (Mo) mg kg^{-1}	1.04	0.7	0.57	0.34	0.31	0.22

5.1.2 Elementos contaminantes del suelo

De acuerdo a las normas oficiales mexicanas NOM-021-SEMARNAT-2000, NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, y Vázquez (2009) los niveles de elementos contaminantes tales como plomo, níquel, y cobalto se encuentran en niveles normales y no peligrosos tanto en el suelo vertisol empleado en agricultura de temporal y el suelo irrigado con aguas residuales. Resultados

similares fueron reportados por Gardezi *et al.*, (2009), quienes determinaron el grado de contaminación en el distrito de riego 018 de Tulancingo, Hidalgo, México, para los metales pesados cobre, cromo, plomo y níquel. Además, en la microcuenca baja del Río Grande Tulancingo se determinaron valores cero o inexistente para los elementos traza cromo y cadmio, con excepción de la sección de 0-5 cm de los suelos irrigados con aguas residuales, vertisol, con un nivel normal de cadmio (ver cuadro 5.2).

Los niveles de elementos contaminantes del suelo (metales pesados) al no rebasar el límite permisible contemplado por las NOM-021-SEMARNAT-2000, NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004 indicó que estos no requieren técnicas de fitorremediación de acuerdo a los establecido por autores tales como Ike *et al*, (2012), Cunningham *et al.*, (1996), Rittman y McCarty, (2001), entre otros (ver sección 3.4). Sin embargo, debido a la presencia de niveles iniciales de cadmio en la sección 0-5 cm del suelo vertisol es conveniente el monitoreo constante a fin de evitar incrementos de este metal pesado.

Cuadro 5.2. Elementos contaminantes del suelo

Propiedades químicas	Muestra de suelo					
	Suelo vertisol irrigado con aguas residuales			Suelo phaeozem con agricultura de secano		
Elementos contaminantes	0-5 cm	5-10 cm	10-40 cm	0-5 cm	5-10 cm	10-40 cm
Plomo (Pb) mg kg ⁻¹	3.89	0.77	2.25	2.89	3.48	4.9
Cromo (Cr) mg kg ⁻¹	0	0	0	0	0	0
Cadmio (Cd) mg kg ⁻¹	0.26	0	0	0	0	0
Níquel (Ni) mg kg ⁻¹	0.49	0.56	0.43	0.9	1.26	0.8
Cobalto (Co) mg kg ⁻¹	0.14	0.11	0.12	0.14	0.08	0.09

5.2 Caracterización de vermicomposta

5.2.1 Propiedades físicas y químicas de la vermicomposta

De acuerdo a los criterios de interpretación y clasificación de la NOM-021-SEMARNAT-2000 y Vázquez (2009), la textura de la vermicomposta utilizada se clasificó como arenosa-franca, con pH neutro, un nivel elevado de materia orgánica, con efectos moderadamente salinos en cultivos de acuerdo a la conductibilidad eléctrica. En relación a macronutrientes, se tuvieron contenidos altos de fósforo y potasio, contenido medio u óptimo de nitrógeno, contenidos medianos de calcio y niveles muy pobres de magnesio (ver cuadro 5.3).

Los micronutrientes determinados en la vermicomposta mostraron niveles adecuados de hierro, cobre, zinc, y manganeso, con deficiencias de boro (ver cuadro 5.3). Respecto a este último elemento, en árboles forestales su deficiencia daña la pared celular primaria e interrumpe el desarrollo estructural de órganos y de la planta entera, lo que tiene impactos en la formación de árbol, la calidad de la madera y la tolerancia al frío (Lehto *et al.*, 2010; Wang *et al.*, 2015). A pesar de ésta deficiencia nutrimental, la vermicomposta empleada fue una excelente fuente de fósforo, nitrógeno y potasio, que mejoró la calidad de la fertilidad del suelo.

Cuadro 5.3. Propiedades físicas y químicas de la vermicomposta

Diagnóstico de calidad de la vermicomposta	
Propiedades físicas	
Materia orgánica %	7.93
Densidad aparente tm^{-3}	0.78
Arena %	79.6
Limo %	15.1
Arcilla %	5.2
Textura	Arenoso-franco
Propiedades químicas	
pH	7.08
Conductividad eléctrica dSm^{-1}	2.52
Macronutrientes	
Nitrógeno total (N) %	0.34
Fósforo asimilable (P) mg kg^{-1}	145.68
Potasio intercambiable (K) mg kg^{-1}	8543
Calcio intercambiable (Ca) mg kg^{-1}	1545
Magnesio intercambiable (Mg) mg kg^{-1}	7.08
Micronutrientes	
Hierro (Fe) mg kg^{-1}	25.18
Cobre (Cu) mg kg^{-1}	16.26
Zinc (Zn) mg kg^{-1}	12.58
Manganeso (Mn) mg kg^{-1}	11.29
Boro (B) mg kg^{-1}	0.78
Molibdeno (Mo) mg kg^{-1}	1.13

5.2.2 Elementos contaminantes de la vermicomposta

La aplicación de biosólidos (estiércol de ganado, compostas, lodo de alcantarillado municipal) a la tierra también conduce a la acumulación de arsénico, cadmio, cromo, cobre, plomo, mercurio, níquel, selenio, molibdeno y antimonio entre otros elementos en el suelo (Basta *et al.*, 2005;

Amanullah, 2016). Sin embargo, de acuerdo a las normas oficiales mexicanas NOM-021-SEMARNAT-2000, NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, y Vázquez (2009) los niveles de elementos contaminantes plomo, níquel, y cobalto, se encuentran en niveles normales y no peligrosos en la vermicomposta utilizada. En adición, se determinaron valores cero o inexistente para los elementos traza tales como cromo y cadmio (ver cuadro 5.4). Esto indica que puede usarse éste tipo de materia orgánica como fuente de suministro de nutrientes como alternativa de fertilización.

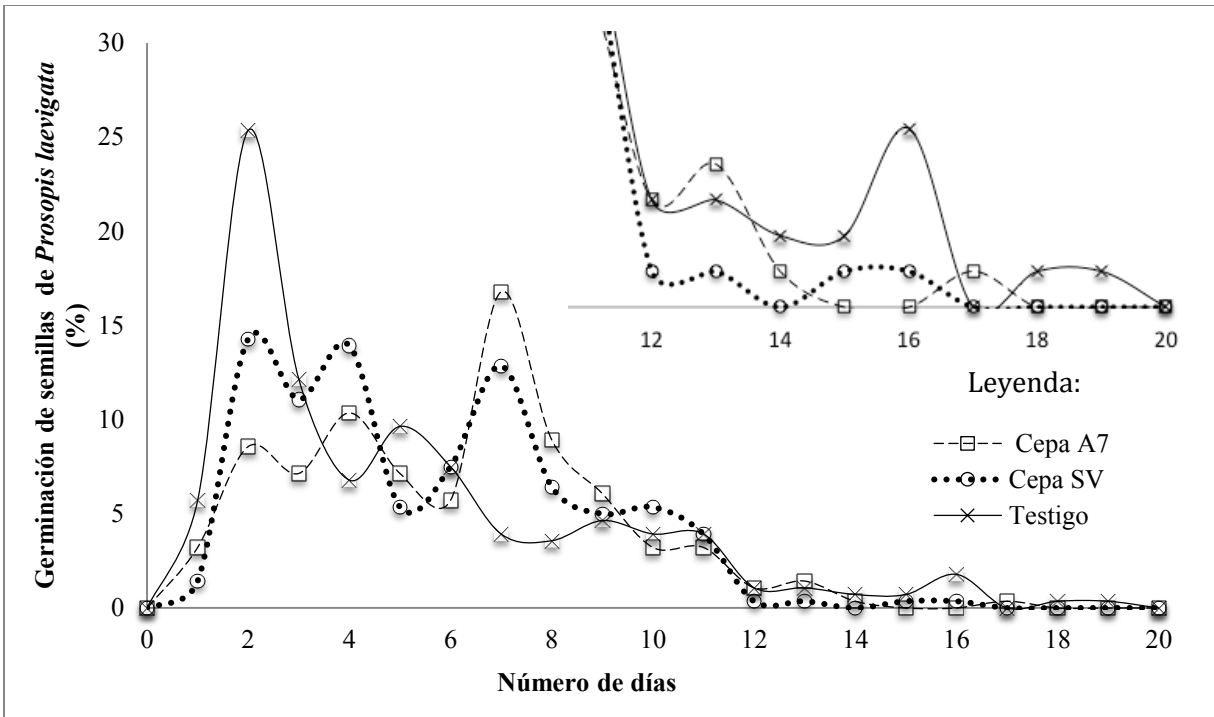
Cuadro 5.4. Elementos contaminantes de la vermicomposta

Análisis de vermicomposta	
Elementos contaminantes	Vermicomposta
Plomo (Pb) mg kg-1	2.55
Cromo (Cr) mg kg-1	0
Cadmio (Cd) mg kg-1	0
Níquel (Ni) mg kg-1	1.03
Cobalto (Co) mg kg-1	0.12

5.3 Germinación de semillas de *Prosopis laevigata* en asociación con cepas A7 y Sv de células bacterianas de *Pseudomonas fluorescens*

5.3.1 Porcentaje de germinación de semillas de *Prosopis laevigata*

López (2001) señala que las semillas escarificadas mecánicamente presentan valores de germinación del 100% después de 10 días, al ser germinadas en cajas Petri, aún siendo semillas de longevidad importante. En cambio, en suelos salinos observó un retraso y una disminución del nivel de germinación del 45 al 85%. En el caso de uso de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB) el porcentaje de germinación de semillas de mezquite (*P. laevigata*) mostró una disminución significativa con la inoculación de la cepa bacterianas A7 ($p \leq 0.05$) respecto al tratamiento sin inoculación después de 20 días (ver cuadro 5.5). Sin embargo, Elekhtyar (2015) encontró que *P. fluorescens* aumentó la germinación de plántulas de arroz (Kumar, 2016). En la figura 5.1 y 5.2, germinación diaria y acumulada, respectivamente, se observa una inhibición y aumento de la germinación durante 20 días; proceso llevado a cabo a una temperatura promedio de 18.9 °C y humedad relativa de 57.3 %.

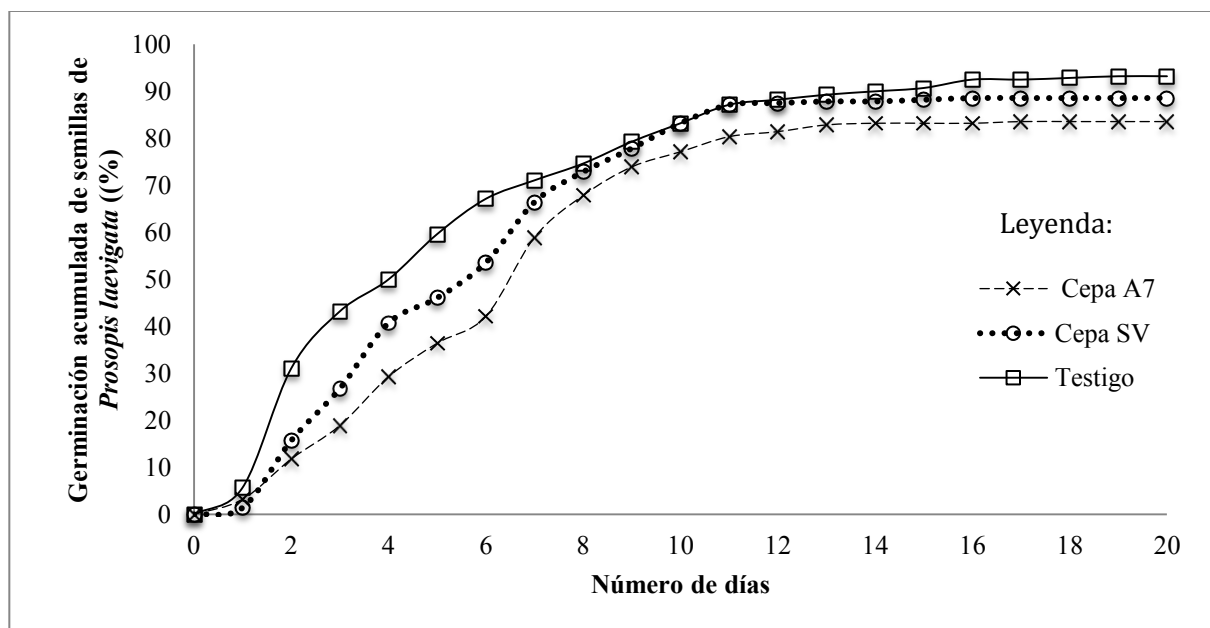


A7= cepa A7, Sv= cepa Sv.

Figura 5.1. Germinación diaria de semillas de *P. laevigata* inoculadas con cepas bacterianas de *Pseudomonas fluorescens*

5.3.2 Porcentaje de sobrevivencia de semillas de *Prosopis laevigata*

La variable de porcentaje de sobrevivencia evaluada a los 25 días después de iniciada la germinación y en árboles de mezquite (*P. laevigata*) mostró una disminución significativa ($p \leq 0.05$) del número plántulas vivas con la inoculación de la cepa bacteriana Sv de *P. fluorescens* respecto al tratamiento testigo (ver cuadro 5.5). Sin embargo, los resultados encontrados difieren a lo reportado por Bashan *et al.* (2012), citado por Radhagriya *et al.*, 2015, quienes encontraron resultados exitosos en la inoculación de especies como *Prosopis articulata*, *Parkinsonia microphylla*, *Parkinsonia florida* con bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB). Esto indica que la inoculación de semillas de mezquite con cepas bacterianas de *P. fluorescens* mostró una dinámica de efectos en el proceso de germinación y crecimiento posterior a corto plazo de las plántulas.



A7= cepa A7, Sv= cepa Sv.

Figura 5.2. Germinación acumulada de semillas de *Prosopis laevigata* inoculadas con cepas bacterianas de *Pseudomonas fluorescens*

5.4 Germinación de semillas de *Prosopis laevigata* en diluciones de sulfato de cobre penta hidratado

5.4.1 Porcentaje de germinación de semillas de *Prosopis laevigata*

El porcentaje de germinación de semillas de mezquite no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) en las diluciones desde 10^{-2} hasta 10^{-7} (T₂-T₇) de sulfato de cobre penta hidratado (CuSO₄·5H₂O) y el tratamiento testigo (T₁) después de 72 horas (ver cuadro 5.6). Sin embargo, estos resultados contrastan con el hecho de que el cobre afecta fuertemente el porcentaje de germinación de Fabaceae tales como *Prosopis pubescens* (Navarrete *et al.*, 2011) y *Medicago sativa* (Peralta *et al.*, 2001).

Cuadro 5.5. Porcentaje de germinación y sobrevivencia de semillas de *Prosopis laevigata*

Tratamiento	Germinación (%)	Sobrevivencia (%)
Sin cepa	93.22 a	71.75 a
Cepa A7	83.57 b	65.14 ab
Cepa Sv	88.57 ab	53.01 b

Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

Sin embargo, la variable porcentaje de germinación diaria a las 48 horas con la dilución 10^{-4} M (T_4) mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) con una germinación del 66.7 % en relación al 22.2 % correspondiente al tratamiento con dilución 10^{-2} M (T_2) de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ (ver figura 5.3). Resultados similares en el proceso de germinación fueron observados por Muccifona y Bellani, (2013) en *Vicia Sativa*. En adición, en la figura 5.4 se observa una estabilización de la germinación acumulada a las 48 horas de iniciado éste proceso. Esto indica que el mezquite muestra ser una especie que puede tolerar y adaptarse en la etapa de germinación a sitios con concentraciones de metales pesados.

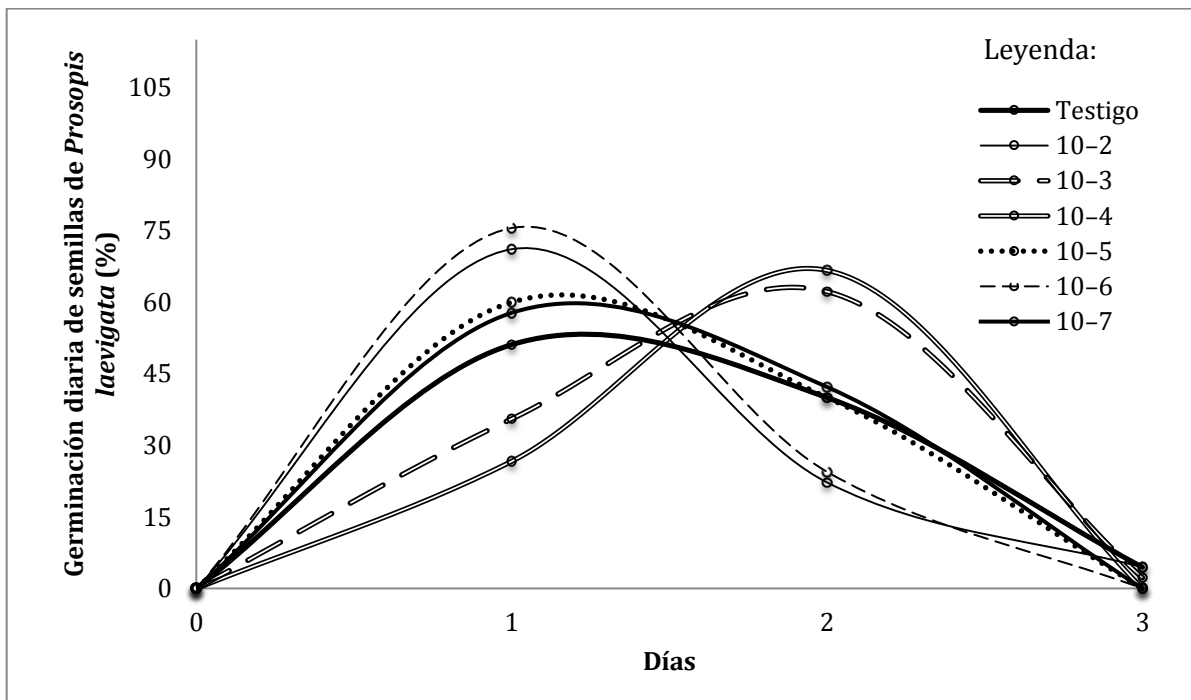


Figura 5.3. Germinación diaria de semillas de *Prosopis laevigata* en diluciones de sulfato de cobre penta hidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$).

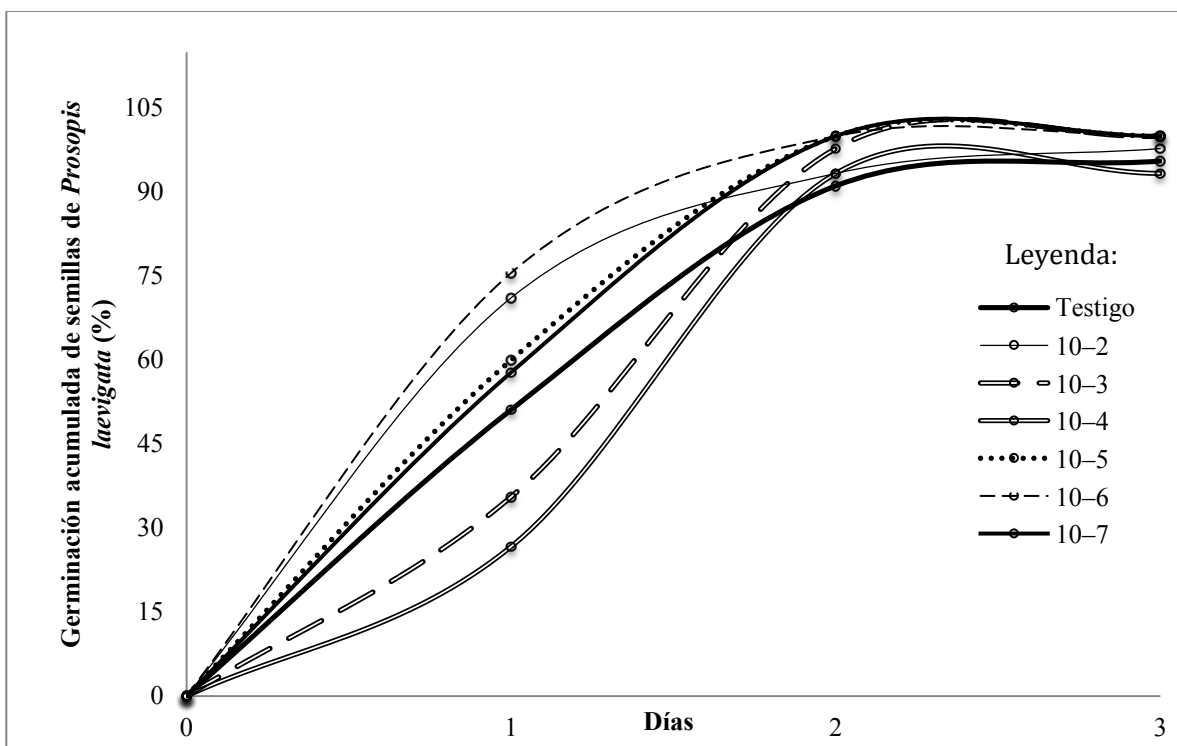


Figura 5.4. Germinación acumulada de semillas de *Prosopis laevigata* de las soluciones de sulfato de cobre penta hidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) (%).

5.4.2 Peso anhidro de plántulas

El peso anhidro de plántulas (ver cuadro 5.6) de mezquite (*Prosopis laevigata*) no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) en las diluciones desde 10^{-2} hasta 10^{-7} M (T_2 - T_7) de sulfato de cobre penta hidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) y el tratamiento testigo (T_1), lo cual concuerda con lo establecido con Chaignon y Hinsinger (2003), quienes mencionan que la germinación es relativamente insensitiva a varias sustancias tóxicas, ya que en ésta etapa las plántulas emplean sus propias reservas (Zappala *et al.*, 2013).

Cuadro 5.6. Porcentaje de germinación y peso anhidro de semillas de *Prosopis laevigata* en diluciones de sulfato de cobre penta hidratado (CuSO₄.5H₂O).

Tratamiento	Diluciones	Germinación (%)	Peso anhidro (Mg)
T ₁ (Testigo)	Testigo	95.56 a	449.2 a
T ₂	10 ⁻²	97.78 a	467.4 a
T ₃	10 ⁻³	100 a	474.0 a
T ₄	10 ⁻⁴	93.33 a	409.4 a
T ₅	10 ⁻⁵	100 a	472.9 a
T ₆	10 ⁻⁶	100 a	485.7 a
T ₇	10 ⁻⁷	100 a	470.0 a

Testigo=tratamiento con agua destilada, y 10⁻²-10⁻⁷=diluciones de CuSO₄.5H₂O. Germinación (%): medias con letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes (prueba de Mann-Whitney, p≤0.05). Peso anhidro (Mg): medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, p≤0.05).

5.5 Variables agronómicas en invernadero

Algunas de las variables evaluadas en invernadero se comparan de acuerdo a los autores Prieto *et al.* (2014) y Rueda *et al.* (2012). Los primeros, determinaron el efecto de cinco combinaciones de sustrato sobre la calidad de *P. laevigata* producido en vivero, las cuales estuvieron conformadas por una mezcla base compuesta por peat moss, vermiculita, agrolita y mezcla compostada. Ellos encontraron que el uso de corteza compostada es una alternativa viable para el crecimiento de *P. laevigata* en vivero. Los segundos, evaluaron la calidad de plántulas de *P. juliflora* en 8 invernaderos diferentes en el estado de Jalisco (ver cuadro 5.7).

Cuadro 5.7. Variables evaluadas en árboles de *Prosopis laevigata* en condiciones de invernadero en Jalisco y Durango.

Autor	Edad (meses)	Altura (cm)	Diámetro (mm)	Variables			
				BST (g)	BSA/BSR	IE	ID
Prieto <i>et al.</i> (2014)	2	77.7-111.1	<1.0	0.07-0.12	ND	ND	ND
	3	9.2-17	1.24-1.74	0.13-0.29	ND	ND	0.01-0.02
	5	19.7-25.7	2.91-3.05	0.97-1.15	ND	ND	0.07-0.11
Rueda, <i>et al.</i> (2012)	4	31.6	4.1	ND	1.2	8	0.3

ND=No determinado, BST= Biomasa seca total, BSA= Biomasa seca aérea, BSR= biomasa seca radicular, IE= Índice de esbeltez, e ID= Índice de Dickson

5.5.1 Variables evaluadas desde los 30 días hasta los 180 días

5.5.1.1 Altura de plántula

De acuerdo a la evidencia estadística, desde los 75 días hasta los 180 días, el suelo vertisol irrigado con aguas residuales presentó aumentos significativos ($p \leq 0.05$) en altura de plántulas de mezquite (*P. laevigata*). Esto indica que la mayor disponibilidad de nutrientes (Ver cuadro 5.1) en éste suelo, en comparación con el suelo phaeozem, estimuló el crecimiento de ésta variable (ver cuadro 5.8 y 5.9). En el caso de utilización de materia orgánica, la adición de vermicomposta presentó aumentos significativos ($p \leq 0.05$) en altura de plántulas de *P. laevigata* para el tratamiento testigo (0 ton/ha) en comparación con la adición de 75 y 100 ton/ha a los 30 días de crecimiento, cuyo resultado fue invertido a los 120 y 135 días. Además, la evidencia estadística mostró también un aumento significativo ($p \leq 0.05$) en altura de plántulas con la adición de 75 ton/ha de vermicomposta respecto al tratamiento testigo (0 ton/ha) a los 105, 150 y 165 días (ver cuadro 5.8 y 5.9). Esto concuerda con lo establecido por Gardezi *et al.*, (2009), quienes encontraron una relación positiva entre el crecimiento en altura y concentración de materia orgánica.

Cuadro 5.8. Comparación de medias de Tukey: altura de plántula (30-90 días)

Factores y niveles	Sección aérea				
	Altura (cm)				
	30 días	45 días	60 días	75 días	90 días
Suelo					
Phaeozem (AT)	3.4 a	5.5 a	7.6 a	10.4 b	15.0 b
Vertisol (AR)	3.2 a	5.4 a	7.8 a	14.1 a	21.5 a
Vermicomposta					
0 ton/ha	3.8 a	5.4 a	7.3 a	10.6 a	15.1 a
25 ton/ha	3.4 ab	5.8 a	8.2 a	12.9 a	18.4 a
50 ton/ha	3.3 ab	5.5 a	7.6 a	11.9 a	17.7 a
75 ton/ha	3.1 b	5.3 a	7.8 a	12.9 a	19.8 a
100 ton/ha	2.9 b	5.2 a	7.7 a	12.8 a	20.2 a
Cepa bacteriana					
Sin cepa	3.2 a	5.1 b	7.1 b	11.3 b	16.3 b
Cepa A7	3.2 a	5.3 ab	7.4 b	11.7 ab	17.4 ab
Cepa Sv	3.6 a	6.0 a	8.6 a	13.7 a	21.0 a

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En cambio, en el caso de utilización de inoculación con la cepa bacteriana Sv de *P. fluorescens* se observaron aumentos significativos ($p \leq 0.05$) en la altura plántulas de *P. laevigata* respecto al tratamiento testigo a los 45, 75, y 90 días. También, ésta cepa bacteriana obtuvo el mejor desempeño significativo ($p \leq 0.05$) a los 60 días en relación a la cepa A7 y tratamiento testigo. Por tanto, el uso de la cepa bacteriana Sv mostró efectos positivos en crecimiento de altura en los primeros 3 meses de árboles de mezquite (*P. laevigata*) (ver cuadro 5.8 y 5.9). Esto puede ser comparado con los resultados obtenidos por Dileep Kumar, *et al.* (2001), quienes encontraron en un estudio sobre co-inoculación con *Pseudomonas* fluorescentes y *Rhizobium* que el uso de estos microorganismos mejoró el crecimiento en de plantas de *Pisum sativum* L. en términos de altura.

Cuadro 5.9. Comparación de medias de Tukey: altura de plántula (105-180 días)

Sección aérea	Altura (cm)					
	105 días	120 días	135 días	150 días	165 días	180 días
Suelo						
Phaeozem (AT)	28.8 b	38.6 b	49.8 b	57.4 b	61.6 b	73.3 b
Vertisol (AR)	40.0 a	53.6 a	70.5 a	82.9 a	88.7 a	99.5 a
Vermicomposta						
0 ton/ha	26.2 b	33.9 b	45.8 b	55.0 b	61.1 b	71.3 a
25 ton/ha	34.6 ab	45.9 ab	56.8 ab	70.0 ab	75.7 ab	86.3 a
50 ton/ha	34.7 ab	46.5 ab	61.3 ab	73.2 ab	77.5 ab	91.3 a
75 ton/ha	40.2 a	54.4 a	71.9 a	79.8 a	84.2 a	92.5 a
100 ton/ha	36.3 ab	49.7 a	64.9 a	72.9 ab	77.4 ab	90.6 a
Cepa bacteriana						
Sin cepa	32.7 a	44.9 a	59.1 a	68.1 a	72.9 a	83.4 a
Cepa A7	32.0 a	43.1 a	58.5 a	69.0 a	72.7 a	82.5 a
Cepa Sv	38.5 a	50.2 a	62.8 a	73.5 a	79.8 a	93.3 a

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

Finalmente, el crecimiento general en altura de plántulas de *P. laevigata* en los factores suelo, vermicomposta y cepas bacterianas de *P. fluorescens* en este experimento fue superior al reportando por Prieto *et al.* (2014) a los 150 días, quienes observaron un crecimiento en altura desde 2.79-3.22 veces inferior en invernaderos de Durango; y Rueda *et al.* (2012) con crecimiento 1.46 veces menor a los 120 días en invernaderos de Jalisco (ver cuadro 5.7). En adición, de acuerdo a Santiago *et al.* (2007), CONAFOR (2009) y Saénz (2010), la altura de los

árboles de mezquite (*P. laevigata*) producidos en condiciones de invernadero en éste trabajo de investigación se clasificaron con calidad alta.

5.5.1.2 Diámetro de tallos

El cultivo de árboles de *P. laevigata* con suelo vertisol irrigado con aguas residuales mostró incrementos significativos ($p \leq 0.05$) del diámetro de tallos desde los 90 hasta los 180 días de experimentación en invernadero. Esto indica, al igual que la variable altura, que el empleo de suelo con alto contenido de fósforo y nitrógeno disponible favoreció el crecimiento de plántulas (ver cuadro 5.1, 5.10 y 5.11). Erisman, (2011) menciona que el nitrógeno en el ambiente natural es un factor limitante para el crecimiento, mientras que Raghothama (1999), Hammond y White, (2008) establecen que el fósforo es uno de los nutrientes más indisponibles e inaccesibles presentes en el suelo para el crecimiento de plántulas.

Cuadro 5.10. Comparación de medias de Tukey: diámetro de tallos (30-90 días)

Sección aérea	Diámetro (mm)				
	30 días	45 días	60 días	75 días	90 días
Suelo					
Phaeozem (AT)	1.07 a	1.27 a	1.39 a	1.54 b	1.79 b
Vertisol (AR)	1.04 a	1.29 a	1.42 a	1.66 a	2.02 a
Vermicomposta					
0 ton/ha	1.10 a	1.27 a	1.36 a	1.50 a	1.76 a
25 ton/ha	1.06 a	1.28 a	1.45 a	1.65 a	1.91 a
50 ton/ha	1.06 a	1.30 a	1.42 a	1.59 a	1.91 a
75 ton/ha	1.02 a	1.29 a	1.39 a	1.61 a	2.0 a
100 ton/ha	1.04 a	1.28 a	1.40 a	1.64 a	1.96 a
Cepa bacteriana					
Sin cepa	1.00 b	1.25 a	1.37 b	1.57 a	1.77 b
Cepa A7	1.06 ab	1.29 a	1.38 b	1.57 a	1.87 b
Cepa Sv	1.1 a	1.32 a	1.46 a	1.66 a	2.07 a

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En el caso de utilización de materia orgánica, por un lado la adición de 75 y 100 ton/ha de vermicomposta presentó aumentos significativos ($p \leq 0.05$) en el diámetro del tallo de árboles en relación al tratamiento testigo con 0 ton/ha a los 105 y 180 días del crecimiento de las plántulas. Por otra lado, se observó una disminución significativa ($p \leq 0.05$) del diámetro de plántulas para el tratamiento testigo en relación a los tratamientos con 25-100 ton/ha desde los 120 días hasta los

165 días (ver cuadro 5.10 y 5.11). Esto permite concluir que es suficiente la adición de 25 ton/ha de vermicomposta con la finalidad de obtener aumento significativo en la variable diámetro (ver cuadro 5.10 y 5.11). Finalmente, de acuerdo a la evidencia estadística, la inoculación de las raíces de mezquite (*P. laevigata*) con la cepa bacteriana Sv de *P. fluorescens* mostró aumentos significativos ($p \leq 0.05$) en la variable diámetro a los 30 y 180 días en relación al tratamiento testigo, mientras que a los 60 y 90 días se observó que la misma cepa bacteriana incrementó el diámetro de los árboles respecto al tratamiento testigo y cepa A7 (ver cuadro 5.10 y 5.11).

Cuadro 5.11. Comparación de medias de Tukey: diámetro de tallos (105-180 días)

Sección aérea						
Factores y niveles	105 días	120 días	135 días	150 días	165 días	180 días
Suelo						
Phaeozem (AT)	2.24 b	2.51 b	3.25 b	3.75 b	4.21 b	5.33 b
Vertisol (AR)	2.69 a	3.01 a	3.98 a	4.76 a	5.21 a	6.21 a
Vermicomposta						
0 ton/ha	2.14 b	2.34 b	2.91 b	3.48 b	3.83 b	4.88 b
25 ton/ha	2.47 ab	2.79 a	3.55 a	4.17 a	4.59 a	5.46 ab
50 ton/ha	2.50 ab	2.80 a	3.75 a	4.31 a	4.83 a	5.91 ab
75 ton/ha	2.57 a	2.92 a	4.00 a	4.64 a	5.15 a	6.31 a
100 ton/ha	2.65 a	2.94 a	3.86 a	4.68 a	5.14 a	6.29 a
Cepa bacteriana						
Sin cepa	2.40 a	2.67 a	3.59 a	4.21 a	4.57 a	5.22 b
Cepa A7	2.42 a	2.72 a	3.59 a	4.27 a	4.70 a	5.74 ab
Cepa Sv	2.57 a	2.87 a	3.66 a	4.28 a	4.86 a	6.35 a

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En general, el crecimiento en diámetro de plántulas de *P. laevigata* para los factores suelo, vermicomposta y cepa bacteriana fue superior al reportando por Prieto *et al.* (2014) a los 150 días, quienes observaron un crecimiento del diámetro entre 1.20-1.56 veces inferior en viveros de Durango. Sin embargo, a los 120 días en invernaderos de Jalisco, Rueda *et al.* (2012) reporta un aumento de 1.48 veces respecto al experimento llevado a cabo en el Colegio de Postgraduados (ver cuadro 5.7, 5.10 y 5.11). En adición, de acuerdo a la propuesta de calidad de planta de Santiago *et al.* (2007), CONAFOR (2009), y Sáenz *et al.* (2010) la calidad de planta en relación al diámetro al cuello de la raíz se clasificó como alta, con excepción del tratamiento testigo de vermicomposta con calidad media.

5.5.1.3 Número de hojas

El empleo del suelo vertisol irrigado con aguas residuales favoreció el aumento significativo ($p \leq 0.05$) de hojas en relación al uso de suelo phaeozem con agricultura de secano desde los 75 días hasta los 105 días; en contraste, no se observan diferencias significativas ($p > 0.05$) en el resto de periodos evaluados para ambos suelo (ver cuadro 5.12 y 5.13). El uso de vermicomposta mostró tres grupos de diferencias significativas ($p \leq 0.05$) relacionadas al aumento del número de hojas: el primero grupo corresponde a la adición de más de 75 ton/ha en relación con el tratamiento testigo a los 90 días; el segundo se refiere al uso de 25, 75 y 100 ton/ha respecto al tratamiento testigo a los 105 días; y por último, el uso de 100 ton/ha de materia orgánica, la cual favorece el aumento significativo de follaje respecto a 0 y 50 ton/ha desde los 120 días hasta los 165 días. Por tanto, la adición de vermicomposta mejoró la producción de follaje en el periodo comprendido desde los 90 días hasta los 165 días del crecimiento de árboles de mezquite (*P. laevigata*) en invernadero (ver cuadro 5.12 y 5.13) en al menos un nivel de este factor.

Cuadro 5.12. Comparación de medias de Tukey: número de hojas (30-90 días)

Factores y niveles	Sección aérea				
	Hojas (número)				
	30 días	45 días	60 días	75 días	90 días
Suelo					
Phaeozem (AT)	3.2 a	4.1 a	5.2 a	6.8 b	9.6 b
Vertisol (AR)	3.1 a	4.2 a	5.4 a	8.6 a	11.9 a
Vermicomposta					
0 ton/ha	3.5 a	4.1 a	5.3 a	7.1 a	9.3 b
25 ton/ha	3.4 a	4.4 a	5.6 a	7.8 a	10.8 ab
50 ton/ha	2.9 a	4.1 a	5.0 a	7.3 a	10.3 ab
75 ton/ha	3.0 a	4.1 a	5.5 a	8.0 a	11.3 a
100 ton/ha	3.0 a	4.1 a	5.3 a	8.4 a	11.9 a
Cepa bacteriana					
Sin cepa	3.2 a	4.1 ab	5.2 a	7.7 ab	10.6 a
Cepa A7	2.6 b	4.0 b	5.1 a	7.2 b	10.2 a
Cepa Sv	3.7 a	4.4 a	5.7 a	8.2 a	11.3 a

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En cuanto al empleo de cepas bacterias de *P. fluorescens* como factor de estudio, se reportó un aumento significativo ($p \leq 0.05$) del número de hojas para la cepa Sv y el tratamiento testigo respecto a la cepa bacteriana A7 a los 30 días de experimentación en invernadero; mientras que a

los 45 y 75 días sólo se mostró un aumento significativo ($p \leq 0.05$) de ésta variable de respuesta con la adición de la cepa bacteriana Sv en relación a la cepa bacteriana A7. Finalmente, tanto la cepa bacteriana Sv y A7 produjeron un aumento significativo ($p \leq 0.05$) de hojas respecto al tratamiento testigo a los 180 días (ver cuadro 5.12 y 5.13). Esto indica que el uso de cepas bacterianas, tanto la cepa A7 como la cepa Sv, de *P. fluorescens* mostraron un periodo de mayor actividad en la fase inicial de crecimiento foliar, con un posterior restablecimiento a los 180 días.

Cuadro 5.13. Comparación de medias de Tukey: número de hojas (105-180 días)

Sección aérea						
Factores y niveles	105 días	120 días	135 días	150 días	165 días	180 días
Suelo						
Phaeozem (AT)	17.2 b	24.5 a	31.9 a	33.8 a	37.2 a	43.1 a
Vertisol (AR)	19.8 a	27.0 a	34.7 a	38.8 a	42.0 a	44.4 a
Vermicomposta						
0 ton/ha	14.8 b	19.8 b	25.9 b	28.8 b	31.7 b	38.1 a
25 ton/ha	19.1 a	25.9 ab	32.9 ab	36.1 ab	39.5 ab	43.0 a
50 ton/ha	17.8 ab	22.6 b	28.3 b	31.6 b	33.1 b	38.2 a
75 ton/ha	19.5 a	26.8 ab	33.1 ab	34.7 ab	38.6 ab	42.3 a
100 ton/ha	21.2 a	33.6 a	46.2 a	50.3 a	55.1 a	57.1 a
Cepa bacteriana						
Sin cepa	18.1 a	23.8 a	29.3 a	30.7 a	34.2 a	36.2 b
Cepa A7	18.3 a	26.6 a	35.4 a	40.3 a	44.8 a	50.0 a
Cepa Sv	19.1 a	26.9 a	35.1 a	38.0 a	39.8 a	45.0 a

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

5.5.1.4 Volumen aéreo

Esta variable calculada con las fórmulas propuestas por Romahn y Ramírez (2010) mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el aumento de volumen con la utilización del suelo vertisol en relación al suelo phaeozem desde los 75 días hasta los 180 días de experimentación. En el factor vermicomposta presentó un mayor dinamismo, ya que el tratamiento testigo presentó un aumento significativo ($p \leq 0.05$) en volumen respecto a la adición de 75-100 ton/ha a los 30 días, cuyo efecto fue invertido a los 105 y 150 días. En adición, se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el aumento de volumen de plántulas con la integración de 25-100 ton/ha en relación al tratamiento testigo a los 120, 135, y 165 días, y con la adición de 50-100 ton/ha a los 180 días respecto al tratamiento testigo (ver cuadro 5.14 y 5.15).

Cuadro 5.14. Comparación de medias de Tukey: volumen aéreo (30-90 días)

Sección aérea					
Factores y niveles	Volumen (cm ³)				
	30 días	45 días	60 días	75 días	90 días
Suelo					
Phaeozem (AT)	0.016 a	0.037 a	0.601 a	0.104 b	0.208 b
Vertisol (AR)	0.014 a	0.038 a	0.068 a	0.173 a	0.415 a
Vermicomposta					
0 ton/ha	0.019 a	0.036 a	0.057 a	0.101 a	0.207 a
25 ton/ha	0.016 ab	0.041 a	0.077 a	0.162 a	0.320 a
50 ton/ha	0.015 ab	0.038 a	0.063 a	0.133 a	0.302 a
75 ton/ha	0.014 b	0.038 a	0.065 a	0.146 a	0.366 a
100 ton/ha	0.013 b	0.035a	0.063 a	0.151 a	0.363 a
Cepa bacteriana					
Sin cepa	0.013 b	0.033 b	0.057 b	0.126 a	0.242 b
Cepa A7	0.014 b	0.037 ab	0.059 b	0.124 a	0.276 b
Cepa Sv	0.018 a	0.043a	0.078 a	0.166 a	0.417 a

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En cambio, con la inoculación de cepas bacterianas en raíces de mezquite (*P. laevigata*) sólo la cepa Sv mostró un aumento significativo ($p \leq 0.05$) de volumen aéreo a los 30, 60, y 90 días de crecimiento respecto al tratamiento testigo y cepa A7; así mismo, se observó la misma tendencia en relación al tratamiento testigo a los 45 y 180 días (ver cuadro 5.14 y 5.15). De acuerdo a la comparación de medias de Tukey, es importante la utilización de los siguientes niveles para los factores suelo, vermicomposta y cepas bacterianas: cepa bacteriana Sv de *P. fluorescens*, suelo vertisol irrigado con aguas residuales y la adición de no más de 50 ton/ha de vermicomposta en el crecimiento de árboles de mezquite (*P. laevigata*) en invernadero con la finalidad de aumento de volumen aéreo (ver cuadro 5.14 y 5.15).

Cuadro 5.15. Comparación de medias de Tukey: volumen aéreo (105-180 días)

Sección aérea						
Factores y niveles	105 días	120 días	135 días	150 días	165 días	180 días
Suelo						
Phaeozem (AT)	0.639 b	1.071 b	2.289 b	3.487 b	4.708 b	9.795 b
Vertisol (AR)	1.381 a	2.290 a	5.139 a	8.518 a	10.914 a	18.087 a
Vermicomposta						
0 ton/ha	0.564 b	0.888 b	1.876 b	3.534 b	4.505 b	8.222 b
25 ton/ha	1.042 ab	1.781 a	3.491 a	6.035 ab	7.824 a	13.084 ab
50 ton/ha	1.060 ab	1.739 a	4.048 a	6.218 ab	8.372 a	15.388 a
75 ton/ha	1.199 a	2.066 a	4.980 a	7.300 a	9.528 a	16.187 a
100 ton/ha	1.183 a	1.931 a	4.175 a	6.926 a	8.825 a	16.823 a
Cepa bacteriana						
Sin cepa	0.928 a	1.537 a	3.674 a	5.726 a	7.342 a	18.808 b
Cepa A7	0.877 a	1.495 a	3.499 a	5.796 a	7.300 a	13.067 ab
Cepa Sv	1.224 a	2.011 a	3.969 a	6.486 a	8.790 a	17.949 a

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

5.5.1.5 Medición de clorofila

La medición indirecta de clorofila con unidades SPAD no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) a los 60, 75 y 120 días de experimentación con árboles de mezquite (*P. laevigata*) en el factor suelo (vertisol y phaeozem). No obstante, se observó un aumento significativo ($p \leq 0.05$) de las unidades SPAD con el factor suelo vertisol irrigado con aguas residuales a los 90, 105, 135 y 165 días. De la misma forma, se observó la misma tendencia con el suelo phaeozem con agricultura de secano a los 180 días. Esto concuerda con el principio de Yang, *et al.*, (2014), quienes mencionan que el contenido de nitrógeno se encuentra correlacionado con el contenido de clorofila; y a lo señalado por Bibi (2016), quien menciona que la ganancia y pérdida de nitrógeno en el agroecosistema están asociadas con muchos procesos complejos e interrelacionados.

Además, la adición de vermicomposta sólo presentó efectos significativos ($p \leq 0.05$) en la incorporación de 75 ton/ha con relación al tratamiento testigo de 0 ton/ha a los 120 días desde el inicio de experimentación en invernadero. Finalmente, la inoculación con cepas bacterianas de *P. fluorescens* sólo presentó efectos significativos ($p \leq 0.05$) con la cepa Sv en comparación con la cepa A7 y el tratamiento testigo a los 120 días (ver cuadro 5.16). Resultados similares fueron

encontrado por Elekhtyar (2015), quien observó que *P. fluorescens* aumentó la concentración de clorofila en hojas y absorción de nutrientes en arroz (Kumar, 2016).

Cuadro 5.16. Comparación de medias de Tukey: clorofila SPAD (60-180 días)

Sección aérea									
Factores y niveles	Clorofila (unidades SPAD)								
	60 días	75 días	90 días	105 días	120 días	135 días	150 días	165 días	180 días
Suelo									
Phaeozem (AT)	8.4 a	9.4 a	9.0 b	8.4 b	11.4 a	9.0 b	9.8 b	10.7 b	10.4 a
Vertisol (AR)	8.8 a	8.3 a	11.3 a	10.4 a	12.0 a	12.1 a	13.2 a	15.0 a	13.1 b
Vermicomposta									
0 ton/ha	8.0 a	8.3 a	8.6 a	9.2 a	9.8 b	11.0 a	9.9 a	13.3 a	11.8 a
25 ton/ha	8.1 a	9.3 a	8.7 a	9.5 a	10.6 ab	11.8 a	12.4 a	12.3 a	12.2 a
50 ton/ha	7.7 a	7.2 a	9.6 a	9.3 a	12.3 ab	8.7 a	10.8 a	12.8 a	10.8 a
75 ton/ha	10.4 a	9.8 a	11.4 a	10.0 a	14.6 a	10.9 a	12.4 a	13.1 a	12.5 a
100 ton/ha	8.8 a	9.8 a	12.3 a	9.1 a	11.1 ab	10.4 a	12.0 a	12.6 a	11.7 a
Cepa bacteriana									
Sin cepa	7.9 a	9.6 a	9.3 a	8.3 a	10.6 b	10.9 a	11.9 a	12.8 a	12.1 a
Cepa A7	8.0 a	8.3 a	10.0 a	8.9 a	10.8 b	9.4 a	10.3 a	13.1 a	11.3 a
Cepa Sv	9.9 a	8.7 a	11.0 a	11.1 a	13.7 a	11.4 a	12.3 a	12.6 a	11.9 a

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

5.5.1.6 Índices morfológicos

5.5.1.6.1 Índice de esbeltez

De acuerdo a la definición de Dante (2007) sobre éste indicador de calidad de planta en vivero, el suelo phaeozem usado para agricultura de secano mostró efectos significativos ($p \leq 0.05$) en la disminución del índice de esbeltez desde los 75 días hasta los 180 días, lo que indicó una mejor calidad en los árboles producidos bajo esta condición. En el caso del factor vermicomposta, el índice de esbeltez fue significativamente ($p \leq 0.05$) menor sólo a los 105 y 120 días con la adición de 0 ton/ha en relación a 75 ton/ha, lo cuales fueron árboles con mejor calidad al ser más bajos y gruesos (ver cuadro 5.17 y 5.18).

Cuadro 5.17. Comparación de medias de Tukey: Índice de esbeltez (30-90 días)

Sección aérea		Índice de esbeltez (unidimensional)				
Factores y niveles	30 días	45 días	60 días	75 días	90 días	
Suelo						
Phaeozem (AT)	3.201 a	4.336 a	5.460 a	6.698 b	8.372 b	
Vertisol (AR)	3.133 a	4.144 a	5.480 a	8.361 a	10.349 a	
Vermicomposta						
0 ton/ha	3.472 a	4.240 a	5.342 a	6.992 a	8.438 a	
25 ton/ha	3.223 a	4.519 a	5.601 a	7.649 a	9.408 a	
50 ton/ha	3.223 a	4.271 a	5.349 a	7.394 a	9.067 a	
75 ton/ha	3.037 a	4.111 a	5.557 a	7.906 a	9.830 a	
100 ton/ha	2.871 a	4.061 a	5.500 a	7.706 a	10.059 a	
Cepa bacteriana						
Sin cepa	3.156 a	4.061 a	5.196 a	7.092 b	9.014 a	
Cepa A7	3.051 a	4.156 a	5.336 a	7.388 ab	9.177 a	
Cepa Sv	3.295 a	4.505 a	5.877 a	8.109 a	9.890 a	

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

En general, la inoculación de raíces de mezquite (*P. laevigata*) con cepas bacterianas, cepa A7 y Sv, de *P. fluorescens* respecto al tratamiento testigo no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) en el índice de esbeltez de los árboles producidos en invernadero, el cual aumentó gradualmente hasta los 165 días, con una posterior disminución a los 180 días. Sin embargo, sólo se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la disminución de ésta variable de respuesta en árboles de mezquite para el tratamiento testigo en relación al uso de la cepa bacteriana Sv de *P. fluorescens* a los 75 días, lo cual indicó una mejor calidad de planta en árboles sin inocular de acuerdo a éste índice morfológico (ver cuadro 5.17 y 5.18).

Finalmente, de acuerdo a los intervalos de calidad de planta de atributos morfológicos de Santiago *et al.* (2007), CONAFOR (2009) y Sáenz *et al.* (2010), los árboles producidos bajo condiciones de invernadero en la totalidad de factores y niveles se clasificaron con calidad baja respecto al índice de esbeltez. Al comparar éste indicador de calidad de planta obtenido en invernadero en el Colegio de Postgraduados a los 120 días, 16.37 en promedio, se observó que éste duplica el reportado por Rueda *et al.* (2012). Por tanto, los árboles de *P. laevigata* producidos en ésta investigación presentaron alturas mayores con diámetros inferiores en relación a los producidos en invernaderos de Jalisco para les especie *P. juliflora*.

Cuadro 5.18. Comparación de medias de Tukey: Índice de esbeltez (105-180 días)

Sección aérea						
Factores y niveles	105 días	120 días	135 días	150 días	165 días	180 días
Suelo						
Phaeozem (AT)	12.784 b	15.326 b	15.332 b	15.293 b	14.698 b	13.950 b
Vertisol (AR)	14.560 a	17.412 a	17.477 a	17.445 a	17.117 a	17.006 a
Vermicomposta						
0 ton/ha	12.039 b	14.143 b	15.318 a	15.329 a	15.482 a	14.713 a
25 ton/ha	13.651 ab	16.081 ab	15.718 a	16.499 a	16.463 a	17.707 a
50 ton/ha	13.547 ab	16.246 ab	16.018 a	16.840 a	15.854 a	15.493 a
75 ton/ha	15.478 a	18.469 a	16.926 a	17.368 a	16.508 a	14.699 a
100 ton/ha	13.648 ab	16.904 ab	18.044 a	15.807 a	15.229 a	14.778 a
Cepa bacteriana						
Sin cepa	13.381 a	16.558 a	16.281 a	15.999 a	15.970 a	16.125 a
Cepa A7	13.029 a	15.570 a	16.054 a	16.215 a	15.460 a	14.436 a
Cepa Sv	14.606 a	16.978 a	16.879 a	16.893 a	16.292 a	15.873 a

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

5.5.2 Variables evaluadas a los 180 días

5.5.2.1 Número de fascículos y ramas

Todos los niveles de los factores suelo y vermicomposta no presentaron efectos significativos ($p > 0.05$) en el desarrollo del número de ramas. En cambio, para ésta variable de respuesta sólo la inoculación con la cepa bacteria A7 mostró un aumento significativo ($p \leq 0.05$) en relación al tratamiento testigo, lo cual indicó que la ramificación fue afectada por la inoculación de al menos una cepa bacteriana de *P. fluorescens* (Ver cuadro 5.19). Resultados similares fueron encontrados por Bashan *et al.* (2012), citado por Radhapriya *et al.*, 2015, quienes reportaron que la inoculación de *Prosopis articulata*, *Parkinsonia microphylla*, *Parkinsonia florida* con diversas bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB) incrementaron el número de ramas en plántulas.

En el caso de la variable de respuesta número de fascículos. Éstos no mostraron diferencias significativas ($p > 0.05$) entre los suelos phaeozem y vertisol al ser contabilizados en los árboles de mezquite (*P. laevigata*). Por el contrario, en el factor vermicomposta se observaron aumentos significativos ($p \leq 0.05$) en la cantidad de fascículos con la adición de 100 ton/ha en relación al tratamiento testigo de 0 ton/ha y aquel con 50 ton/ha de materia orgánica. Finalmente, en

comparación con el tratamiento testigo, la inoculación de cepas bacterianas A7 y Sv estimuló el aumento significativo ($p \leq 0.05$) del número de fascículos (ver cuadro 5.19).

Cuadro 5.19. Comparación de medias de Tukey: número de fascículos y ramas

Sección aérea		
Factores y niveles	Cantidad	
	Ramas	Fascículos
Suelo		
Phaeozem (AT)	1.9 a	49.6 a
Vertisol (AR)	1.7 a	50.7 a
Vermicomposta		
0 ton/ha	1.9 a	44.5 b
25 ton/ha	1.8 a	50.6 ab
50 ton/ha	1.0 a	43.7 b
75 ton/ha	1.7 a	48.9 ab
100 ton/ha	2.6 a	63.1 a
Cepa bacteriana		
Sin cepa	1.0 b	42.5 b
Cepa A7	2.6 a	55.8 a
Cepa Sv	1.8 ab	52.1 a

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

5.5.2.2 Número, longitud y ancho de foliolos

La cantidad de foliolos presentó aumentos significativos ($p \leq 0.05$) para los factores suelo, vermicomposta e inoculación con cepas bacterianas de *P. fluorescens*: el suelo vertisol en relación al suelo phaeozem mostró un aumento significativo ($p \leq 0.05$) de la cantidad de foliolos; sólo 100 ton/ha de vermicomposta en relación con la ausencia de esta incrementó significativamente ($p \leq 0.05$) el número de estructuras que componen las hojas de los árboles de mezquite (*P. laevigata*); y, finalmente, la cepa bacteriana A7 en comparación con el tratamiento testigo favoreció el aumento significativo ($p \leq 0.05$) de foliolos de los árboles cultivados en invernadero (ver cuadro 5.20).

Los valores promedio de referencia para dimensiones en hojas de mezquite, especificados por Calderón y Rzedowski (2001), son un largo de foliolos de 5-15 cm, con un ancho de 1-2 cm en condiciones generales de crecimiento. La experimentación en invernadero mostró que la longitud de foliolos es significativamente mayor ($p \leq 0.05$) en suelos vertisol irrigados con aguas residuales en comparación a suelos phaeozem con agricultura de temporal, así como con la adición de 75 y

100 ton/ha en comparación con el tratamiento testigo de 0 ton/ha. En adición, en la variable ancho de foliolos, estos presentaron un aumento significativo ($p \leq 0.05$) en árboles de mezquite (*P. laevigata*) sólo en suelo vertisol irrigado con aguas residuales (ver cuadro 5.20). Esto indicó que el largo de foliolos fue inferior a las dimensiones promedio reportadas, mientras que el ancho de foliolos se ubicó en el rango de referencia de Calderón y Rzedowski (2001).

Cuadro 5.20. Comparación de medias de Tukey: número, longitud y ancho de foliolos

Sección aérea			
Factores y niveles	Número	Foliolos	
		Longitud (mm)	Ancho (mm)
Suelo			
Phaeozem (AT)	86.3 b	34.52 b	11.15 b
Vertisol (AR)	99.4 a	40.91 a	13.23 a
Vermicomposta			
0 ton/ha	75.5 b	33.16 b	11.48 a
25 ton/ha	88.9 ab	36.94 ab	11.91 a
50 ton/ha	85.4 ab	38.25 ab	12.50 a
75 ton/ha	90.7 ab	40.17 a	12.97 a
100 ton/ha	123.9 a	40.07 a	12.09 a
Cepa bacteriana			
Sin cepa	80.4 b	38.77 a	12.54 a
Cepa A7	103.2 a	35.68 a	11.57 a
Cepa Sv	95.1 ab	38.70 a	12.46 a

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

5.5.2.3 Longitud radicular

Ésta variable no presentó efectos significativos ($p > 0.05$) en su crecimiento para los factores y niveles de suelo, vermicomposta e inoculación con cepas bacterianas de *P. fluorescens* (ver cuadro 5.21); sin embargo, Dileep Kumar, *et al.* (2001) observaron que la co-inoculación con *Pseudomonas fluorescentes* y *Rhizobium* mejoran el crecimiento en de plantas de *Pisum sativum* L. en términos de longitud radicular. Por tanto, se requiere mayor investigación en el uso de cepas de *P. fluorescens* y microorganismos nativos de los suelos asociados con raíces de mezquite (*P. laevigata*) (ver cuadro 5.21).

5.5.2.4 Número de nódulos

La contabilización de nódulos blancos y rojos mostró un aumento significativo ($p \leq 0.05$) en el suelo phaeozem con agricultura de secano en comparación con el suelo vertisol irrigado con aguas residuales. Esto puede atribuirse ya sea a la existencia de microorganismos bacterianos nativos asociados a este suelo o ya sea a la necesidad de fijación de nitrógeno de los árboles de mezquite en suelos con deficiencia de nitrógeno (ver cuadro 5.1). En el caso de uso de materia orgánica, la presencia de dosis desde 0 ton/ha hasta 100 ton/ha de vermicomposta no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) en el aumento del número de nódulos blancos y rojos (ver cuadro 5.21). En adición y con la misma tendencia, el uso de la herramienta de inoculación de raíces de mezquite (*P. laevigata*) con cepas bacterianas, cepa A7 y Sv, de *P. fluorescens* no presentó aumentos significativos ($p > 0.05$) relacionados a la cuantificación de nódulos rojos. Sin embargo, se observaron aumentos significativos ($p \leq 0.05$) favorables en la producción de nódulos blancos con la utilización de la cepa bacteriana Sv en comparación con la cepa A7 (ver cuadro 5.21). Estudios realizados por Siddiqui *et al* (2001), citados por Egamberdieva, *et al.*, 2013, mostraron que una inoculación combinada de *Rhizobium* y *Pseudomonas* incrementó la nodulación, actividad nitrogenasa, crecimiento, y rendimiento de garbanzo bajo condiciones de invernadero.

5.5.2.5 Volumen radical

El mayor volumen radical significativo ($p \leq 0.05$) correspondió al suelo vertisol irrigado con aguas residuales en comparación con el suelo phaeozem en condiciones de agricultura de secano. En el caso de utilización de materia orgánica, sólo 25 y 75 ton/ha de vermicomposta en comparación con el tratamiento testigo mostraron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) relacionadas con la mayor producción de volumen radical. Finalmente, la inoculación con cepas bacterianas, cepa A7 y Sv, de *P. fluorescens* no presentaron diferencias significativas ($p > 0.05$) en la conformación de volumen de raíces de los árboles de mezquite (*P. laevigata*) (ver cuadro 5.21).

Cuadro 5.21. Comparación de medias de Tukey: sección radicular

Sección radicular				
Factores y niveles	Raíces		Nódulos (cantidad)	
	Longitud (cm)	Volumen (cm ³)	Blancos	Rojos
Suelo				
Phaeozem (AT)	60.9 a	10.0 b	40.0 a	3.9 a
Vertisol (AR)	55.2 a	15.2 a	13.0 b	0.9 b
Vermicomposta				
0 ton/ha	52.8 a	8.5 b	15.3 a	0.3 a
25 ton/ha	56.8 a	14.3 a	35.1 a	5.3 a
50 ton/ha	58.5 a	12.1 ab	28.5 a	2.0 a
75 ton/ha	58.9 a	15.3 a	26.0 a	2.2 a
100 ton/ha	63.3 a	12.9 ab	29.7 a	2.2 a
Cepa bacteriana				
Sin cepa	58.2 a	11.9 a	20.8 ab	2.6 a
Cepa A7	60.1 a	11.5 a	18.9 b	2.6 a
Cepa Sv	55.8 a	14.4 a	41.1 a	2.1 a

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

5.5.2.6 Biomasa aérea y subterránea

El suelo vertisol irrigado con aguas residuales mostró aumentos significativos ($p \leq 0.05$) en la producción de biomasa seca de hojas (BSF), tallos (BSTi), raíces (BSR), aérea (BSA), subterránea (BSRa) y total (BST) (ver cuadro 5.22), lo cual concuerda con lo señalado por Singh y Agrawal (2008) y Roig *et al.* (2012), quienes establecen que entre las ventajas y aspectos benéficos del uso de aguas residuales se encuentra la mejora de las propiedades físico-químicas y nutricionales. Sin embargo, la experimentación también mostró que la mayor producción de biomasa significativa ($p \leq 0.05$) en nódulos se llevó a cabo en el suelo phaeozem empleado para agricultura de temporal (ver cuadro 5.22), que se caracterizó por una conductividad eléctrica, pH, nitrógeno total, fósforo y potasio inferiores (ver cuadro 5.1).

En el caso de utilización de materia orgánica, el uso de vermicomposta mostró aumentos significativos ($p \leq 0.05$) de biomasa seca de las variables de respuesta hojas (BSF), tallos (BSTi), raíces (BSR), aérea (BSA), subterránea (BSRa) y total (BST), con la adición de más de 25 ton/ha en relación al tratamiento testigo. Sin embargo, la producción de biomasa seca de las variables hojarasca (BSL) y nódulos (BSN) no presentó aumentos significativos ($p \leq 0.05$) con la adición de 0-100 ton/ha (ver cuadro 5.22). Esto indica que es importante la utilización de no más

25 ton/ha en la producción en invernadero, lo cual en la práctica es el nivel de vermicomposta con menor costo. Resultados similares fueron obtenidos por Asgharipour y Rafiei, (2011), quienes encontraron que el uso de 40 ton/ha de vermicomposta mejoró el peso seco en plantas de *Ocimum basilicum* en relación al tratamiento testigo.

El uso de rizobacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) mostró que la inoculación con cepas bacterianas de *Pseudomonas fluorescens* en raíces de mezquite (*Prosopis laevigata*), cepa Sv, mejoró la producción de biomasa seca significativa ($p \leq 0.05$) para la totalidad, excepto biomasa seca de nódulos (BSN), de las variables evaluadas en relación al tratamiento testigo (ver cuadro 5.22). Afzal and Bano (2008), y Iqbal *et al.* (2012) señalan al respecto que estos microorganismos son una fuente natural potencial como fertilizante, cuya colonización de raíces de plantas estimula el crecimiento y la producción directa e indirecta. Éstos resultados también son consistentes con los encontrados por Gardezi *et al.*, (2008), quienes mostraron que existen efectos positivos en el crecimiento de árboles de *Prosopis* sp. con microorganismos como *Glomus intrarradices* debido al mejoramiento de absorción de nutrientes minerales.

Además, respecto a la variable de respuesta biomasa seca de nódulos (BSN) la cepa bacteriana Sv presentó un aumento de biomasa significativa ($p \leq 0.05$) en relación a la cepa bacteriana A7 (ver cuadro 5.22). Los resultados obtenidos respecto a la cepa bacteriana Sv de *P. fluorescens* son similares a los obtenidos en el estudio de Dileep Kumar, *et al.* (2001) sobre co-inoculación con *Pseudomonas* fluorescentes y *Rhizobium*, quienes mostraron que se mejoró el crecimiento de plantas de *Pisum sativum* L. en términos de peso anhidro. Así mismo, Bashan *et al.* (2012), citado por Radhapriya *et al.*, 2015, reportaron que la inoculación de *Prosopis articulata*, *Parkinsonia microphylla*, *Parkinsonia florida* con bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB) mejoró el desarrollo de la sección aérea y subterránea. Similarmente, Elekhtyar (2015) encontró que *P. fluorescens* aumentó atributos de crecimiento en plantas tal como el peso seco en el cultivo de arroz (Kumar, 2016). Por tanto, debido a su capacidad para incrementar la biomasa de plántulas se recomienda la utilización de la cepa bacteriana Sv como agente promotor del crecimiento vegetal.

Cuadro 5.22. Comparación de medias de Tukey: biomasa aérea y subterránea

Factores y niveles	Biomasa aérea y subterránea							
	Sección aérea			Sección subterránea		Sección y total		
	BSF (g)	BSL (Mg)	BSTi (g)	BSR (g)	BSN (Mg)	BSA (g)	BSRa (g)	BST (g)
Suelo								
Phaeozem (AT)	1.74 b	157.3 a	3.58 b	2.95 b	109.5 a	5.45 b	3.06 b	8.51 b
Vertisol (AR)	3.31 a	119.8 a	7.46 a	5.43 a	36.3 b	10.92 a	5.47 a	16.39 a
Vermicomposta								
0 ton/ha	1.72 b	127.3 a	3.54 b	2.52 b	41.9 a	5.39 b	2.56 b	7.95 b
25 ton/ha	2.44 a	149.7 a	5.44 a	4.35 a	89.8 a	8.03 a	4.44 a	12.47 a
50 ton/ha	2.50 a	93.2 a	5.60 a	4.08 a	79.12 a	8.19 a	4.16 a	12.35 a
75 ton/ha	2.91 a	144.9 a	6.48 a	4.91 a	80.0 a	9.53 a	4.99 a	14.52 a
100 ton/ha	3.07 a	177.7 a	6.54 a	5.09 a	79.12 a	9.79 a	5.17 a	14.95 a
Cepa bacteriana								
Sin cepa	2.25 b	101.6 b	4.89 b	3.61 b	85.7 ab	7.24 b	3.70 b	10.94 b
Cepa A7	2.47 ab	131.7 ab	5.27 ab	4.10 ab	45.5 b	7.87 ab	4.14 ab	12.01 ab
Cepa Sv	2.85 a	182.3 a	6.41 a	4.86 a	87.6 a	9.45 a	4.95 a	14.40 a

AT= suelo con agricultura de secano, AR= suelo irrigado con aguas residuales, BSF= biomasa seca de hojas, BSL= biomasa seca de hojarasca, BSTi= biomasa seca de tallos, BSR= biomasa seca de raíces, BSN= biomasa seca de nódulos, BSA= biomasa seca aérea, BSRa= biomasa seca subterránea, BST= biomasa seca total. Las medias con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

5.5.2.7 Índices morfológicos

5.5.2.7.1 Área Foliar (AF)

El suelo vertisol irrigado con aguas residuales en comparación con el suelo phaeozem mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en la mayor producción de área foliar de los árboles evaluados a los 180 días, lo cual se encontró relacionado con la mayor disponibilidad de nutrientes de este suelo (ver cuadro 5.1 y 5.23). En el factor vermicomposta, sólo el tratamiento testigo (0 ton/ha) en comparación con la adición de más de 25 ton/ha presentó una disminución significativa ($p \leq 0.05$) de área foliar. Por tanto, si se requiere aumentar el área foliar en árboles en vivero puede emplearse no más de 25 ton/ha (ver cuadro 5.23). En el caso del uso de cepas bacterianas de *P. fluorescens* como inoculo en las raíces de mezquite (*P. laevigata*) sólo la cepa Sv en relación al tratamiento testigo mostró diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el aumento del área foliar de plántulas en condiciones de invernadero (ver cuadro 5.23). Resultados similares con la utilización de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB) fueron observados por

Elekhtyar (2015), quien encontró que *P. fluorescens* aumentó atributos de crecimiento en plantas de arroz tal como el área foliar (Kumar, 2016).

5.5.2.7.2 Índice de calidad de Dickson

De acuerdo a Rueda (2012), el índice de calidad de Dickson (ID) presenta una calidad alta de planta cuando éste es ≥ 0.5 . En la experimentación llevada a cabo en invernadero del Colegio de Postgraduados en árboles de mezquite (*P. laevigata*) se determinaron valores desde 0.503 hasta 1.049 para éste indicador de calidad en todos los niveles de los factores suelo, vermicomposta y cepa bacteriana. Los resultados obtenidos con la comparación de medias de Tukey mostraron un aumento significativo ($p \leq 0.05$) del índice de calidad de Dickson (ID) en: 1) el suelo vertisol irrigado con aguas residuales; 2) sólo 75 y 100 ton/ha en relación al tratamiento testigo; y 3) la inoculación de raíces de mezquite (*P. laevigata*) con la cepa bacteriana Sv respecto al tratamiento testigo (ver cuadro 5.23). Finalmente, estos resultados difieren con aquellos obtenidos por Rueda (2012), quien evaluó 147 ejemplares de *P. laevigata* con un valor promedio de 0.3 para éste indicador de calidad de planta en vivero.

5.5.2.7.3 Relación biomasa aérea entre biomasa subterránea

La relación volumen aéreo entre volumen radical (V_a/V_r) (Dante, 2007), no mostró diferencias significativas ($p > 0.05$) en los factores suelo, vermicomposta e inoculación con cepas bacterianas de *P. fluorescens*. En esta relación de biomasa, la biomasa aérea fue mayor que la biomasa subterránea en todos los niveles de los tres factores analizados, lo cual indicó la existencia de un ligero desbalance de volúmenes de los árboles de mezquite (*P. laevigata*) cultivados en condición de invernadero. Por el contrario, se observaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el aumento de la relación biomasa seca aérea entre biomasa seca radicular (BSA/BSR) para el suelo vertisol irrigado con aguas residuales en comparación con el suelo phaeozem con agricultura de temporal. Sin embargo, los árboles producidos para la totalidad de niveles en los tres factores de análisis de ésta variable también presentaron un desbalance en la producción de tallos y hojas en relación al sistema radical al poseer un indicador superior a la unidad (ver cuadro 5.23). Esto difiere con los resultados de Elekhtyar (2015), quien encontró que *P. fluorescens* aumentó atributos de crecimiento en plantas y un balance positivo en la relación aérea y radical en el cultivo de arroz (Kumar, 2016).

Cuadro 5.23. Comparación de medias de Tukey: índices morfológicos

Indicadores e índices

Factores y niveles	Área de foliar (cm ²)	ID	BSA/BSR	Va/Vr
Suelo				
Phaeozem (AT)	216.01 b	0.599 b	1.84 b	1.17 a
Vertisol (AR)	384.76 a	0.994 a	2.21 a	1.30 a
Vermicomposta				
0 ton/ha	206.45 b	0.503 b	2.29 a	1.06 a
25 ton/ha	288.08 a	0.771 ab	1.97 a	1.15 a
50 ton/ha	301.48 a	0.736 ab	2.00 a	1.32 a
75 ton/ha	342.72 a	0.922 a	1.95 a	1.30 a
100 ton/ha	363.21 a	1.049 a	1.92 a	1.35 a
Cepa bacteriana				
Sin cepa	273.13 b	0.667 b	2.14 a	1.10 a
Cepa A7	293.61 ab	0.794 ab	1.94 a	1.24 a
Cepa Sv	334.42 a	0.927 a	2.00 a	1.36 a

AT= suelos con agricultura de secano, AR= suelos irrigados con aguas residuales, BSA=Biomasa seca aérea, y BSR=Biomasa seca radicular, y Va/Vr= relación volumen aéreo entre volumen radicular. Medias con igual letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$).

De acuerdo a la clasificación de calidad de planta los autores Santiago *et al.* (2007), CONAFOR (2009) y Sáenz *et al.* (2010), lo árboles de mezquite (*P. laevigata*) producidos en invernadero mostraron una calidad de planta alta en la relación volumen aéreo entre volumen radical (Va/Vr). Sin embargo, la calidad de planta se clasificó como media en la relación biomasa seca aérea entre biomasa seca radicular (BSA/BSR) en el suelo vertisol con la incorporación de 0 y 50 ton/ha de vermicomposta, y el uso de cepas bacterianas de *P. fluorescens*, específicamente con la cepa bacteriana Sv y el tratamiento testigo.

5.6 Variables ambientales e incrementos morfológicos

La germinación de semillas de mezquite (*P. laevigata*) con cepas bacterianas, cepa A7 y Sv, de *P. fluorescens* se llevó a cabo a una temperatura promedio de 18.869 °C y humedad relativa promedio de 57.287 %; mientras que la etapa de crecimiento con los factores suelo (vertisol y phaeozem), cepas bacterianas (A7 y Sv) y vermicomposta (0, 25, 50, 75, y 100 ton/ha) en invernadero presentó una temperatura promedio de 20.413 °C y una humedad relativa promedio de 60.097 % (ver cuadro 5.24, figura 5.5 y 5.6). De acuerdo a las condiciones normales de

temperatura promedio de los meses enero-julio (Lira, 2010), la germinación de semillas de mezquite se llevó a cabo 3.849 °C por arriba de la temperatura promedio del ambiente natural de origen del material biológico, mientras que el crecimiento de árboles se encontró 5.393 °C por encima de la media del sitio de origen (ver cuadro 5.24).

Cuadro 5.24. Variables ambientales: temperatura y humedad relativa en germinación y crecimiento de *Prosopis laevigata* durante 180 días.

Variable	Invernadero		Ambiente natural
	Germinación	Crecimiento	
Temperatura promedio (°C)	18.869	20.413	15.020
Temperatura máxima (°C)	41.913	46.963	32.000
Temperatura mínima (°C)	0.577	2.262	-0.800
Humedad relativa promedio (%)	57.287	60.097	SD
Humedad relativa máxima (%)	95.709	96.637	SD
Humedad relativa mínima (%)	19.710	7.891	SD

SD=sin datos.

Fuente: Estaciones meteorológicas 13059 y 13061, CONAGUA y SMN, Lira (2010).

5.6.1 Temperatura

En general, una mayor temperatura aumentó el incremento de altura y hojas (promedio cada 15 días) para los factores suelo, vermicomposta y cepas bacterianas de *P. fluorescens*. Esto excluyó los niveles de 50 y 75 ton/ha del factor vermicomposta para la variable hojas. En adición, el nivel del tratamiento testigo (sin cepa bacteriana) del factor cepas bacterianas tampoco mostró correlación significativa ($p > 0.05$). Sin embargo, éstos niveles presentaron coeficientes de correlación cercanos al valor crítico de Pearson ($p \leq 0.05$) (ver cuadro 5.25 y 5.26).

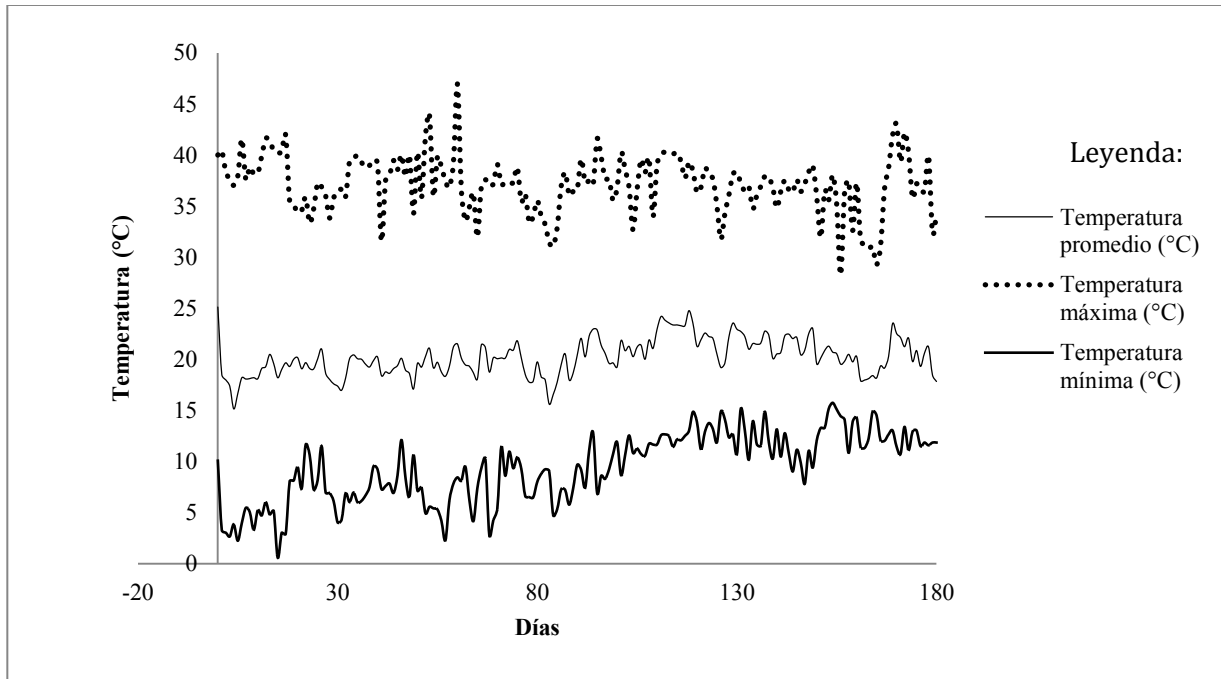


Figura 5.5. Temperatura promedio, máxima y mínima asociada a germinación y crecimiento de *Prosopis laevigata* durante 180 días.

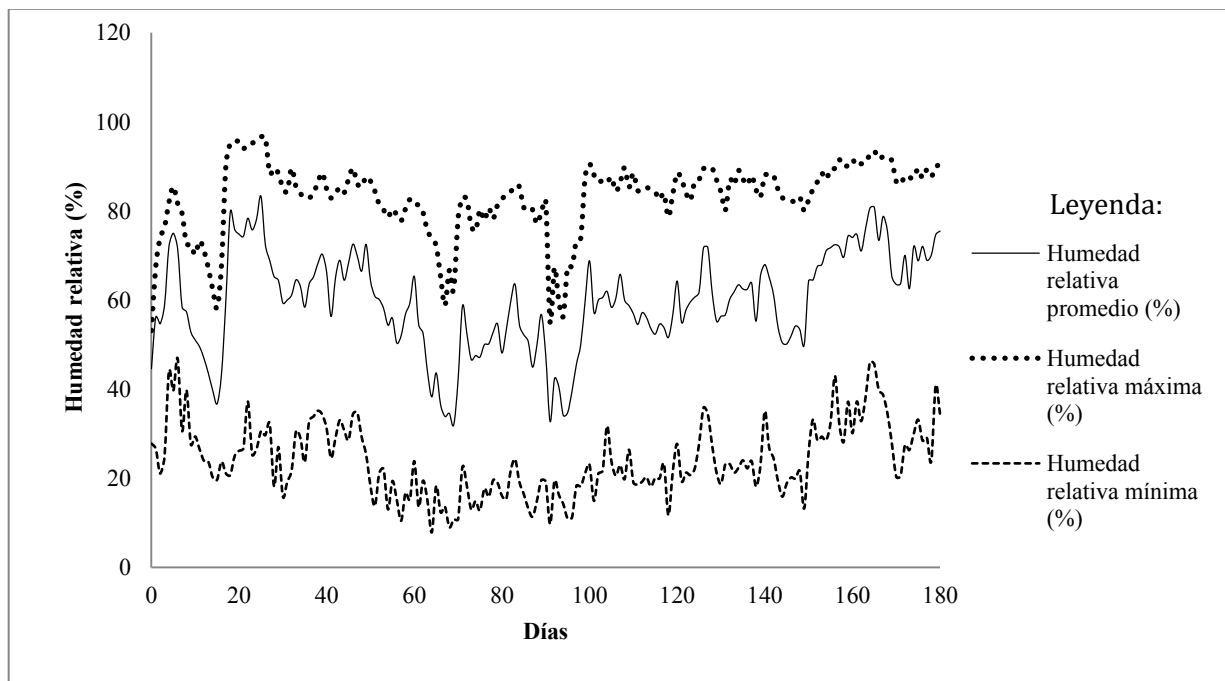


Figura 5.6. Humedad relativa promedio, máxima y mínima asociada a germinación y crecimiento de *Prosopis laevigata* durante 180 días.

Cuadro 5.25. Coeficientes de correlación de Pearson: temperatura (°C) e incrementos morfológicos de los factores suelo y cepas bacterianas de *Prosopis fluorescens*

n=10 Incremento	Suelo			Cepa bacteriana	
	Phaeozem (AT)	Vertisol (AR)	SC	A7	Sv
	Temperatura (°C)				
Temperatura (°C)	1	1	1	1	1
Humedad relativa (%)	-0.091	-0.091	-0.091	-0.091	-0.091
Altura (cm)	0.696*	0.761*	0.768*	0.773*	0.667*
Hojas (número)	0.683*	0.755*	0.535	0.810*	0.753*
Diámetro (mm)	0.326	0.439	0.546	0.422	0.209
Volumen (cm ³)	0.178	0.297	0.382	0.268	0.176
Índice de esbeltez	0.152	0.110	0.150	0.160	0.086

* Significativo para el valor del coeficiente de correlación de Pearson ($r=0.632$ ($p\leq 0.05$)).

Cuadro 5.26. Coeficientes de correlación de Pearson: temperatura (°C) e incrementos morfológicos del factor vermicomposta

n=10 Incremento	Vermicomposta				
	0 ton/ha	25 ton/ha	50 ton/ha	75 ton/ha	100 ton/ha
	Temperatura (°C)				
Temperatura (°C)	1	1	1	1	1
Humedad relativa (%)	-0.091	-0.091	-0.091	-0.091	-0.091
Altura (cm)	0.694*	0.752*	0.741*	0.696*	0.707*
Hojas (número)	0.669*	0.708*	0.627	0.615	0.764*
Diámetro (mm)	0.282	0.475	0.369	0.384	0.422
Volumen (cm ³)	0.237	0.287	0.222	0.279	0.23
Índice de esbeltez	0.203	0.127	0.215	0.091	0.038

* Significativo para el valor del coeficiente de correlación de Pearson ($r=0.632$ ($p\leq 0.05$)).

5.6.2 Humedad relativa

De acuerdo a la evidencia estadística, el aumento de la humedad relativa expresada en porcentaje y medida en el interior del invernadero se correlacionó significativamente ($p\leq 0.05$) con la disminución del incremento del índice de esbeltez (promedio cada 15 días) de los árboles de mezquite (*P. laevigata*) para los factores suelo, vermicomposta y cepas bacterianas de *P. fluorescens*. En cambio, el incremento de las variables altura, hojas, diámetro y volumen no mostraron correlación significativa ($p>0.05$) con la variable humedad relativa (ver cuadro 5.27 y 5.28), lo cual implica que el incremento del indicador morfológico de índice de esbeltez de calidad de planta puede modificarse mediante el control de la humedad relativa.

Cuadro 5.27. Coeficientes de correlación de Pearson: humedad relativa (%) e incrementos morfológicos de los factores suelo y cepas bacterianas de *P. fluorescens*

Incremento	Suelo			Cepa bacteriana	
	Phaeozem (AT)	Vertisol (AR)	SC	A7	Sv
Humedad relativa (%)					
Humedad relativa (%)	1	1	1	1	1
Temperatura (°C)	-0.091	-0.091	-0.091	-0.091	-0.091
Altura (cm)	-0.015	-0.237	-0.142	-0.168	-0.112
Hojas (número)	0.005	-0.327	-0.29	-0.01	-0.192
Diámetro (mm)	0.492	0.28	0.185	0.372	0.5
Volumen (cm ³)	0.564	0.562	0.566	0.549	0.561
Índice de esbeltez	-0.674*	-0.798*	-0.645*	-0.808*	-0.752*

* Significativo para el valor del coeficiente de correlación de Pearson ($r=0.632$) ($p\leq 0.05$).

Cuadro 5.28. Coeficientes de correlación de Pearson: humedad relativa (%) e incrementos morfológicos del factor vermicomposta

Incremento	Vermicomposta				
	0 ton/ha	25 ton/ha	50 ton/ha	75 ton/ha	100 ton/ha
Humedad relativa (%)					
Humedad relativa (%)	1	1	1	1	1
Temperatura (°C)	-0.091	-0.091	-0.091	-0.091	-0.091
Altura (cm)	0.073	-0.16	-0.095	-0.296	-0.133
Hojas (número)	0.127	-0.204	-0.238	-0.185	-0.194
Diámetro (mm)	0.447	0.363	0.425	0.394	0.316
Volumen (cm ³)	0.541	0.562	0.584	0.584	0.544
Índice de esbeltez	-0.724*	-0.635*	-0.781*	-0.737*	-0.686*

* Significativo para el valor del coeficiente de correlación de Pearson ($r=0.632$) ($p\leq 0.05$).

5.7 Otras consideraciones

5.7.1. Análisis de tejido vegetal: hojas y tallos

Entre los macro nutrientes analizados (nitrógeno, fósforo y potasio), el porcentaje de potasio mostró un incremento significativo ($p\leq 0.05$) relacionado a la utilización de la cepa Sv de *P. fluorescens* en relación al tratamiento testigo y el uso de la cepa A7 en la sección de hojas de plántulas de *P. laevigata*; mientras que en la sección de tallos se observó una respuesta favorable relacionada al uso de la cepa A7 en relación a la cepa Sv. En el caso de los porcentajes concernientes a nitrógeno y fósforo, los resultados mostraron que en la sección de hojas el tratamiento testigo presentó aumentos significativos ($p\leq 0.05$) en relación al uso de cepas

bacterianas, y en el caso de la sección de tallos no se mostraron diferencias significativas entre los tres tratamientos analizados (ver cuadro 5.29). Por tanto, los resultados indican que el uso de las cepas A7 o Sv de *P. fluorescens* mejoran la captación de potasio en el tejido vegetal de plántulas de mezquite en condiciones de invernadero. Howelwe (1983) menciona que los contenidos de nutrimentos varían con las variedades, estado del tiempo (temperatura, lluvia, etc.), el suelo, y la interacción entre nutrientes. Otro factor que puede modificar la absorción de nutrientes es, por ejemplo, la presencia de microorganismos tales como las bacterias *Pseudomonas*. De acuerdo a Nava-Pérez *et al.* (2012) y Pérez-Álvarez *et al.* (2015), estas bacterias son importantes debido a que su actividad enzimática ayuda a la degradación aeróbica de muchos compuestos en diversos ecosistemas.

Cuadro 5.29. Análisis de nitrógeno, fósforo y potasio en tejido vegetal de hojas y tallos de *Prosopis laevigata*.

Hojas			
Tratamientos	N (%)	P (%)	K (%)
Testigo	3.1850a	0.15600a	0.84967b
Cepa A7 de <i>P. fluorescens</i>	2.6800b	0.10104ab	0.89956b
Cepa Sv de <i>P. fluorescens</i>	2.8100ab	0.07482b	1.34959a
Tallos			
Tratamientos	N (%)	P (%)*	K (%)*
Testigo	0.80200a	0.11492a	0.59958ab
Cepa A7 de <i>P. fluorescens</i>	0.87400a	0.11678a	0.64955a
Cepa Sv de <i>P. fluorescens</i>	0.75000a	0.10430a	0.52468b

Las medias con la misma letra en la misma columna son estadísticamente iguales (Tukey, $p \leq 0.05$)

*Medias con letras diferentes en la misma columna son estadísticamente diferentes (prueba de Mann-Whitney).

5.7.2 Análisis de impactos económicos

El uso extensivo de fertilizantes químicos y pesticidas en la agricultura se encuentra actualmente bajo debate debido a sus impactos ambientales y las preocupaciones relacionadas a la salud. El uso de rizobacterias que promueven el crecimiento son una alternativa en los sistemas de producción (Dileep Kumar *et al.*, 2001). De hecho, el uso de estos organismos conocidos como bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) en la mejora del rendimiento de cultivos tiene una larga historia, y existen numerosos reportes donde microbios benéficos pueden mejorar el crecimiento de las plantas, desarrollo, captación de nutrientes y rendimiento (Lugtenberg *et al.*, 2001; Arora *et al.*, 2008; Egamberdieva *et al.*, 2010 y 2013).

Cuadro 5.30. Matriz de identificación de impactos económicos y ambientales para el uso de tres formas distintas de fertilización.

Factores afectados	Tratamientos		
	Uso de fertilizantes	Testigo	Uso de <i>P. fluorescens</i>
CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS			
1. Suelo			
Acumulación de residuos tóxicos	-2	1	2
Microbiología del suelo	-2	1	3
Cambio de propiedades físicas	-1	1	1
Cambio de propiedades químicas	-2	1	1
2. Agua			
Superficiales (contaminación)	-2	1	1
Subterráneas	-1	1	2
3. Atmósfera			
Calidad del aire	-1	1	1
CONDICIONES BIOLÓGICAS			
1. Flora			
Desarrollo de la planta	3	0	3
Cosecha	3	1	3
2. Fauna			
Insectos benéficos	-1	2	2
FACTORES CULTURALES			
Salud y seguridad	0	1	3
RELACIONES ECOLÓGICAS			
Salinización del recurso agua	-1	1	3
Salinización del suelo	0	1	3
VALORACIÓN	-7	13	28

Modificado de CEDARENA *et al.*, (2005); y Rolas-Rodríguez y Ortuño (2007).

En este sentido, de acuerdo a la ponderación de los impactos económicos por sustitución de tecnologías de producción tenemos que el uso de *P. fluorescens* como alternativa y sustituto a fertilizantes químicos mostró un impacto económico alto en comparación con los efectos relacionados con el uso de fertilizantes (ver cuadro 5.20), de acuerdo a los criterios de clasificación. Nelson (2004) y Vessey (2003), citados por Trujillo *et al.*, (2007) señalan que el uso de bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPR) son una alternativa en la producción agrícola ya que permiten reducir la cantidad de fertilizantes y plaguicidas químicos que contaminan el medio ambiente y deterioran el suelo.

6-CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Globalmente, en ésta investigación los resultados son de uso potencial para mejorar la producción agrícola y el ambiente natural. Conforme al objetivo general y lo objetivos específicos, se corrobora detalladamente las conclusiones de las cuatro hipótesis planteadas de manera siguiente:

1. Caracterización de suelos

Hipótesis 1: el uso de aguas residuales en el suelo vertisol, en comparación con el suelo phaeozem con agricultura de secano, presenta concentraciones peligrosas de los elementos contaminantes plomo, níquel, cobalto, cromo y cadmio.

2. Germinación

Hipótesis 2: la germinación de semillas de *P. laevigata* difiere con el medio de germinación empleado:

- 1) El sulfato de cobre penta hidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) inhibe la germinación de semillas de *P. laevigata* en dilución 10^{-2} M.
- 2) *P. fluorescens* favorece la germinación de semillas y sobrevivencia de plántulas en cama semillero de *P. laevigata*.

3. Uso de factores suelo, vermicomposta y cepas bacterianas de *Pseudomonas fluorescens* en crecimiento de *Prosopis laevigata*

Hipótesis 3: los niveles de los factores cepas bacterianas (A7 y Sv) de *P. fluorescens*, suelos (phaeozem y vertisol), y vermicomposta (0, 25, 50, 75, y 100 ton/ha) producen efectos diferentes en variables agronómicas, fisiológicas e indicadores morfológicos de calidad de planta de *P. laevigata*.

4. Variables ambientales e incrementos morfológicos en *Prosopis laevigata*

Hipótesis 4: el aumento de la temperatura y la humedad relativa en invernadero se correlacionan con los incrementos de altura, diámetro, volumen, hojas e índice de esbeltez.

6.1 Caracterización de suelos

El riego con aguas residuales ha aumentado los niveles de materia orgánica, fósforo, nitrógeno, y calcio en el suelo vertisol. Por tanto, el uso de árboles de mezquite puede contrarrestar la pérdida de estos elementos a cuerpos de agua y posibles efectos negativos asociados. Edición, ambos suelos, vertisol y phaeozem, presentan contenidos muy ricos de potasio. En relación a micronutrientes se clasificaron como muy pobres de magnesio, con limitaciones de zinc para el desarrollo de cultivos.

En caso de uso de vermicomposta, ésta es una excelente fuente de fósforo, nitrógeno y potasio, se observó que la adición de ésta fuente de materia orgánica mejora la calidad de la fertilidad del suelo phaeozem. Este sustrato fue caracterizado por presentar contenidos bajos en éstos macronutrientes. Sin embargo, se encontraron niveles de micronutrientes muy pobres de magnesio y deficiencias de boro en la vermicomposta.

De acuerdo a la NOM-021-SEMARNAT-2000, NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004, y Vázquez (2009), los niveles de elementos contaminantes plomo, níquel, y cobalto se encuentran en niveles no peligrosos en suelos vertisoles irrigado con aguas residuales y suelos phaeozem con agricultura de secano. Por tanto, al no rebasarse el límite permisible de estos elementos no se requieren técnicas de fitorremediación contempladas en la literatura.

Finalmente, la calidad de la vermicomposta empleada presentó niveles no peligroso en relación a elementos contaminantes. Se determinaron valores cero o inexistentes para los elementos traza cromo y cadmio, con excepción de la sección de 0-5 cm de los suelos irrigados con aguas residuales, vertisol, con un nivel normal de cadmio.

6.2 Germinación

La inoculación de semillas de mezquite (*P. laevigata*) con cepas de bacterianas de *P. fluorescens* mostró una inhibición en la germinación con la cepa A7. Posteriormente, a los 25 días el porcentaje de sobrevivencia en plántulas presentó una disminución significativa ($p \leq 0.05$) con la cepa bacteriana Sv. Esto indica la existencia de una dinámica en los efectos de la inoculación de cepas de *P. fluorescens* en la etapa de germinación y crecimiento de árboles de mezquite (*P. laevigata*).

El uso de diluciones de 10^{-4} de sulfato de cobre penta hidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) mostraron

inhibición en la germinación de semillas de mezquite (*P. laevigata*) a las 48 horas. Sin embargo, no existen diferencias significativas ($p \leq 0.05$) en el porcentaje de germinación y peso anhidro finalizada la experimentación a las 72 horas. Esto indica que *P. laevigata* puede desarrollarse en concentraciones elevadas de cobre sin presentar problemas en su germinación.

6.3 Uso de factores suelo, vermicomposta y cepas bacterianas de *Pseudomonas fluorescens* en crecimiento de *Prosopis laevigata*

6.3.1 Factor suelo

El suelo vertisol irrigado con aguas residuales presentó un aumento significativo ($p \leq 0.05$) en la mayor cantidad de variables agronómicas evaluadas a los 180 días: 1) sección aérea; altura, diámetro, volumen, foliolos (cantidad, longitud y ancho), 2) sección subterránea; volumen de raíces, 3) biomasa aérea y subterránea; peso anhidro aéreo de hojas, tallos, raíces, subterráneo y total, y 4) índices morfológicos; área foliar, índice de esbeltez, índice de Dickson y relación peso anhidro aéreo entre peso anhidro radicular. Mientras que el suelo phaeozem sujeto a agricultura de secano con limitaciones nutricionales en relación al suelo vertisol mostró aumentos significativos ($p \leq 0.05$) en clorofila (SPAD), así como en la sección subterránea: peso anhidro de nódulos, y cantidad de nódulos rojos y blancos. Una disminución significativa ($p \leq 0.05$) en el índice de esbeltez muestra que mientras más bajo y grueso es el arbolito, este tiende a ser más apto para ambientes con limitaciones de humedad, y viceversa (Dante, 2007).

6.3.2 Factor materia orgánica: vermicomposta

En relación al tratamiento testigo, después de 180 días de crecimiento en invernadero, se requieren al menos 25 ton/ha de vermicomposta para aumentar significativamente ($p \leq 0.05$) el peso anhidro de sección aérea (hojas y tallos), peso anhidro de la sección subterránea (raíces), peso anhidro de la sección aérea, subterránea y total, volumen de raíces y área foliar en los árboles de mezquite (*P. laevigata*); 50 ton/ha para el incremento significativo ($p \leq 0.05$) en volumen; 75 ton/ha para las variables diámetro, longitud de foliolos, e índice de Dickson; y 100 ton/ha en el incremento significativo ($p \leq 0.05$) de la cantidad de foliolos y fascículos.

A nivel de producción en invernadero puede usarse no más de 25 ton/ha de vermicomposta en el crecimiento de árboles de mezquite (*P. laevigata*) para favorecer el desarrollo y aumento de la mayor cantidad de variables agronómicas evaluadas; mientras que a nivel de campo en el caso de

verter 100 ton/ha de materia orgánica se requiere del uso combinado de diversas especies que solubilicen y capturen nutrientes en sus procesos metabólico.

6.3.3 Factor cepas bacterianas de *Pseudomonas fluorescens*

La inoculación con la cepa bacteriana Sv de *P. fluorescens* favoreció el crecimiento significativo ($p \leq 0.05$) de árboles de mezquite (*P. laevigata*) en los primeros 90 días en las variables agronómicas altura, diámetro, volumen y producción de follaje. También, su uso aumenta significativamente ($p \leq 0.05$) el peso anhidro en la sección aérea y subterránea, área foliar e índice de Dickson a los 180 días respecto al tratamiento testigo. En la sección radicular la producción de nódulos y peso anhidro se favorece con la inoculación de raíces con la cepa bacteriana Sv respecto a la cepa A7 en el aumento significativo ($p \leq 0.05$) en estas variables. El uso de la cepa bacteriana A7 muestra ser de utilidad en el aumento significativo ($p \leq 0.05$) del número de ramas y foliolos respecto al tratamiento testigo; mientras que tanto la cepa A7 como Sv aumentan significativamente la cantidad de fascículos en los árboles.

6.4 Variables ambientales e incrementos morfológicos en *Prosopis laevigata*

En general, el aumento de la temperatura se correlacionó significativamente ($p \leq 0.05$) con el incremento de altura y número hojas de los árboles en todos los niveles de los factores suelo, cepas bacterianas y vermicomposta. En cambio, el aumento de la humedad relativa (%) en el interior del invernadero disminuyó el incremento del índice de esbeltez de los árboles cultivados. Esto indica que el crecimiento de los árboles mostraron adaptaciones a los factores suelo, asociación de rizósfera con cepas bacterianas de *P. fluorescens* y uso de vermicomposta de acuerdo a disposiciones ambientales.

6.5 Recomendaciones

Considerando los resultados y la facilidad de aplicación que supone la utilización de los insumos empleados en ésta investigación se recomienda compartir las experiencias obtenidas con los productores de la microcuenca baja del Río Tulancingo. En adición, las siguientes sugerencias pueden tomarse en cuenta:

- La utilización futura de cepas bacterianas de *P. fluorescens*, en especial la cepa Sv, en aplicaciones a nivel de invernadero y uso en campo, ya que muestra ser promotora del crecimiento vegetal de árboles de mezquite (*P. laevigata*).

- A nivel de producción en invernadero puede usarse no más de 25 ton/ha de vermicomposta.
- En suelos sujetos a agricultura de secano con problemas de erosión eólica e hídrica se sugiere el uso de mezquite como fuente de nitrógeno asociado con cultivos resistentes como maíz, frijol, y maguey que muestran ser ideales en la producción agrícola.
- Experimentación en campo con árboles de mezquite (*P. laevigata*) previamente inoculados con cepas de *P. fluorescens* en invernadero a fin de evaluar su crecimiento y dinámica en el ambiente natural.
- Futura investigación sobre el uso de consorcios bacterianos con cepas nativas que favorezcan el desarrollo y crecimiento de especies de leguminosas de usos múltiples.
- Debido a la presencia de las primeras evidencias de Cd en suelos irrigados con aguas residuales, es preferible un monitoreo de este metal pesado en el futuro.

7- LITERATURA CITADA

- Abd Elbasit, M.A.M., H. Yasuda, K. Yoda, A.M. Eldoma, H. Nawata, B. Hoshino, and M.K. Magzoub. 2012. Mesquite (*Prosopis spp.*) Water Uptake under Different Simulated Drought Conditions. *Journal of Arid Land Studies*, 22(1), 5-8.
- Afzal, A., and A. Bano. 2008. *Rhizobium* and phosphate solubilizing bacteria improve the yield and phosphorus uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.). *International Journal of Agriculture and Biology*, 10: 85-88.
- Aggarwal, A., I. Sharma, B.N. Tripathi, A.K. Munjal, M. Baunthiyal, and V. Sharma. 2012. Metal toxicity and photosynthesis. In: Itoh, S., P. Mohanty, and K.N. Guruprasad (Eds.), *Photosynthesis: Overviews on Recent Progress and Future Perspectives*. International Publishing House Limited, India.
- Akhtar, M.S., U. Shakeel, and Z.A. Siddiqui. 2010. Biocontrol of *Fusarium* wilt by *Bacillus pumilus*, *Pseudomonas alcaligenes* and *Rhizobium* sp. on lentil. *Turkish Journal of Biology*, 34: 1–7.
- Akhtar, M.S., and Z.A. Siddiqui. 2010. Role of plant growth promoting rhizobacteria in biocontrol of plant diseases and sustainable agriculture. In: Maheshwari, D.K. (Ed.), *Plant growth and health promoting bacteria*. Microbiology monographs 18. Springer, Berlin. Pp. 157–196.
- Amanullah, M., A. Ali, W. Ping, W. Quan, S. Feng, A.L. Hussain, L. Ronghua, A.M. Kumar, Z. Zengqiang, and M. Öztürk. 2016. Soil Amendments for Heavy Metal Immobilization Using Different Crops. In: Hakeem, K., J. Akhtar, and M. Sabir (Eds.), *Soil Science: Agricultural and Environmental Prospectives*. Springer, Cham. Pp. 371-399.
- Andrade, M.L., P. Marcet, M.L. Reyzábal y M.J. Montero. 2000. Contenido, evolución de nutrientes y productividad en un suelo tratado con lodos residuales urbanos. *Edafología* 7(3):21-29.
- Anjum, N.A., M.E. Pereira, I. Ahmad, A.C. Duarte, S. Umar, and N.A. Khan. 2013. *Phytotechnologies: Remediation of Environmental Contaminants*. CRC Press, first edition, Boca Raton, Florida. 571 p.
- Anza, M., P. Riga, and C. Garbisu. 2005. Time course of antioxidant responses of *Capsicum annuum* subjected to a progressive magnesium deficiency. *Annals of Applied Biology* 146: 123–134.
- Armienta, M.A., L.K. Ongley, R. Rodríguez, O. Cruz, H. Mango, and G. Villaseñor. 2008. Arsenic distribution in mesquite (*Prosopis laevigata*) and huizache (*Acacia farnesiana*) in the Zimapan mining area, Mexico. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, 8: 1–7.
- Arora, N.K., E. Khare, J.H. Oh, S.C Kang, D.K. Maheshwari. 2008. Diverse mechanisms adopted by fluorescent *Pseudomonas* PGC2 during the inhibition of *Rhizoctonia solani* and *Phytophthora capsici*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 24: 581–585.
- Asgharipour, M., and M. Rafiei. 2011. Effect of different organic amendments and drought on the growth and yield of basil in the greenhouse. *Advances in Environmental Biology*, 5(6): 1233-1239.

- Aziz, H., M. Sabir, H.R. Ahmad, T. Aziz, M. Zia-ur-Rehman, K.R. Hakeem, and M. Ozturk. 2015. Alleviating effect of calcium on nickel toxicity in rice. *CLEAN-Soil Air Water* 43(6): 901–909.
- Bakkause, E., B. Gougeta, J.P. Gallien, H. Khodja, F. Carrota, J.L. Morel, and R. Collins. 2005. Concentration and distribution of cobalt in higher plants: The use of micro-PIXE spectroscopy. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 231: 350-356.
- Bashan, Y., B.G. Salazar, M. Moreno, B.R. Lopez, and R.G. Linderman. 2012. Restoration of eroded soil in the Sonoran desert with native leguminous trees using plant growth—promoting microorganisms and limited amounts of compost and water. *Journal of Environmental Manage*, 102: 26–36.
- Basta, N.T., J.A. Ryan, and R.L. Chaney. 2005. Trace element chemistry in residual-treated soil: key concepts and metal bioavailability. *Journal of Environmental Quality*, 34(1): 49–63.
- Bergmann, W. 1992. *Nutritional Disorders of Plants. Visual and Analytical Diagnosis*. Gustav Fischer, Jena, Germany. 741 p.
- Bibi S., Saifullah, A. Naeem, and S. Dahlawi. 2016. Environmental Impacts of Nitrogen Use in Agriculture, Nitrate Leaching and Mitigation Strategies. In: Hakeem, K., J. Akhtar, and M. Sabir (Eds.), *Soil Science: Agricultural and Environmental Prospectives*. Springer, Cham. 131-157 pp.
- Bossis, E., P. Lemanceau, X. Latour, and L. Gardan. 2000. The taxonomy of *Pseudomonas fluorescens* and *Pseudomonas putida*: current status and need for revision. *Agronomie*, 20: 51-63.
- Botelho, R.G., and L. C. Mendonça-Hagler. 2006. Fluorescent Pseudomonads associated with the rhizosphere of crops: an overview. *Brazilian Journal of Microbiology*, 37(4): 401-416.
- Bould, C., E.J. Hewitt, and P. Needham. 1983. *Diagnosis of Mineral Disorders in Plants. Volume 1: Principles*. HMSO, London. 174 p.
- Bradl, H.A. 2005. *Heavy metals in the environment. Vol. 6*, University of Applied Sciences TrierNeubrucke, Germany. 269 p.
- Bradshaw, A.D. 2002. Introduction and Philosophy. In: Perrow, M.R., and A.J. Davy (Eds.) *Handbook of Ecological Restoration Vol. 1, Principles of Restoration*. Cambridge University Press. Pp. 3-9.
- Cakmak, I., and E.A. Kirkby. 2008. Role of magnesium in carbon partitioning and alleviating photooxidative damage. *Physiologia Plantarum*, 133: 692–704.
- Calderón, de R.G. y J. Rzedowski. 2001. *Flora fanerogámica del Valle de México*. Instituto de Ecología, A.C. Xalapa, Veracruz. Pp. 258-259.
- Carrillo-Castañeda, G. 2017. La germinación de semilla de *Hibiscus subdariffa* L. es inhibida específica y contundentemente por una cepa de *Pseudomonas fluorescens* (PGPR). En: Pérez, F., E. Figueroa, R. García, y L. Godínez (Eds.), *Ciencias de la Biología, Agronomía y Economía. Handbook T-I. ECORFAN, Texcoco de Mora, México*. 19-40 pp.
- Carrillo, F. R. 2006. Efecto de la poda sobre el potencial productivo de mezquites nativos (*Prosopis glandulosa* Torr. var. *glandulosa*) en la Comarca Lagunera. Tesis de licenciatura, Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas, Universidad Autónoma Chapingo. 97 p.
- Carrillo, F.R., F. Gómez L., y J.G. Arreola A. 2007. Efecto de la poda sobre potencial

- productivo de mezquites nativos en la Comarca Lagunera, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*, 6: 47-54.
- Castillo, V.M. 2004. La estrategia temática para la protección del suelo: un instrumento para el uso sostenible de los suelos en Europa. *Ecosistemas* 13(1): 59-61.
- CEDARENA (Centro de derecho ambiental y recursos naturales). 2006. Evaluación del Impacto Ambiental y de Capacidad Institucional de la Región Centroamericana Frente a la Liberalización Comercial: Estudios de caso de Costa Rica y Guatemala. En colaboración con CINPE (Centro Internacional de política económica para el desarrollo sostenible), Universidad de Miami, UDSMA (Unidad de desarrollo sostenible y medio ambiente de la OEA).
- Cervantes, M. 2002. Plantas de importancia económica en las zonas áridas y semiáridas de México. Primera edición. Ediciones UNAM. México, D.F. 155 p.
- Chaignon V., and P. Hinsinger. 2003. Heavy metals in the environment: a biotest for evaluating copper bioavailability to seedlings in a contaminated soil. *Journal of Environmental Quality*, 32: 824–833.
- Chapman, N., and T. Miller. 2011. Nitrate Transporters and Root Architecture. In: Geisler, M., and K. Venema (Eds.), *Transporters and Pumps in Plant Signaling. Signaling and Communication in Plants*, vol 7. Springer, Berlin, Heidelberg. 165-190 pp.
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CNANP). 2003. Programa de manejo; Reserva de la Biósfera Barranca de Metztitlán. Tlalpan, Ciudad de México. 187 p.
- Comisión Nacional Forestal (CONAFOR). 2009. Criterios técnicos para la producción de especies forestales de ciclo corto (rápido crecimiento), con fines de restauración. Documento técnico. CONAFOR. Guadalajara, Jal. México. 9 p.
- CONAZA e INE. 1994. Mezquite, *Prosopis* spp.: cultivo alternativo en zonas áridas y semiáridas de México. INE, México, 31p.
- Conklin, A. R. 2014a. Soil Basics Part I, in *Introduction to Soil Chemistry: Analysis and Instrumentation*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. 19-43 pp.
- Conklin, A. R. 2014b. Electrical Measurements, in *Introduction to Soil Chemistry: Analysis and Instrumentation*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. 175-192 pp.
- Conklin, A. R. 2014c. Soil Basics Part II, in *Introduction to Soil Chemistry: Analysis and Instrumentation*, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. 44-67 pp.
- Contreras, J.M. 2014. Contribución al conocimiento del género *Prosopis* spp. (Mezquite) en México. Tesis de Licenciatura, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. 140 p.
- Cordo, H.A. 2004. El control biológico de malezas, una alternativa factible para la lucha contra las plantas invasoras exóticas en Áreas Protegidas de la Argentina. *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 63(1-2):1-9.
- Cortesi, A. 2002. La pérdida de biodiversidad en nuestro mundo. In: *Conferencia Anual de la The World Future Society*. Philadelphia, PA, USA. 8 p.

- Cotler, H., E. Sotelo, J. Dominguez, M. Zorrilla, S. Cortina, y L. Quiñones. 2007. La conservación de suelos: un asunto de interés público. *Gaceta Ecológica*, 83: 5-71.
- Cunningham, S.D., T.A. Anderson, A.P. Schwab, and F.C. Hsu. 1996. *Phytoremediation of Soils Contaminated with Organic Pollutants*. Advances in Agronomy, Academic Press, New York, USA. 55-114 p.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2008. Regiones Hidrológicas, escala 1:250000 de la República Mexicana. México.
- Dalal, R.C., D.E Allen, K.Y. Chan, and B.P. Singh. 2011. Soil Organic Matter, Soil Health and Climate Change. In: Singh, B., A. Cowie, K. Chan (Eds.), *Soil Health and Climate Change*. Soil Biology, vol 29. Springer, Berlin, Heidelberg. 87-106 pp.
- Dante, A.R. 2007. Indicadores de calidad de planta forestal. Editorial Mundi Prensa México. 109-156 pp.
- Das, S., and A. Green. 2016. Zinc in Crops and Human Health. In: Singh, U., C. Praharaj, S. Singh, and N. Singh (Eds.), *Biofortification of Food Crops*. Springer, New Delhi. 31-40 pp.
- D'Aubeterre, R., J. Principal y J. García. 2002. Efecto de diferentes métodos de escarificación sobre la germinación de tres especies del género *Prosopis*. *Revista Científica*, 12: 575-577.
- David, M., y R. Struchtemeyer. 1990. Effects of spraying sewage effluent unforested land at Sugarloaf Mountain, Maine. *Bulletin 773*, University of Maine at Orono. USA. 86 p.
- Dávila, A.H. 1982. La distribución del mezquite en México. In: Segunda reunión Sobre ecología, manejo y domesticación de las plantas útiles del desierto. Memorias 28 – 30 de julio. SARH. Gómez Palacio, Durango.
- De Lima, R.A.S., C. Mesak, M.L. Gomes S., G. Souza S., W. Mozena L., y G. Malafaia. 2017. Organic waste vermicomposting through the addition of rock dust inoculated with domestic sewage wastewater. *Journal of Environmental Management*, 196: 651-658.
- Dey, R., K.K. Pal, D.M. Bhatt, and S.M. Chauhan. 2004. Growth promotion and yield enhancement of peanut (*Arachis hypogaea* L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria. *Microbiological Research*, 159: 371–394.
- Dias, P.F. 2005. Importância da arborização de pastagens com leguminosas fixadoras de nitrogênio. Tese (Doutorado), Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica. 128 p.
- Dias, P.F., S.M. Souto, y A.A. Franco. 2007. Leguminosas arbóreas introduzidas em pastagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 42(1): 119-126.
- Dickson, A., A.L. Leaf, and J.F. Hosner, 1960. Quality appraisal of white spruce and white pine seedling stock in nurseries. *Forestry Chronicle*, 36 (1) : 10-13.
- Dileep Kumar, B.S, I. Berggren, and A.M. Mårtensson, 2001. Potencial for improving pea production by co-inoculation with fluorescent *Pseudomonas* and *Rhizobium*. *Plant and Soil*, 229(1): 25-34.
- Duffus, J.H. 2002. "Heavy metals" a meaningless term? *Pure and Applied Chemistry*, 74(5): 793-807.
- Eaton, F.M. 1944. Deficiency, toxicity and accumulation of boron in plants. *Journal of Agricultural Research*, 69: 237–277.
- Egamberdieva, D., Z. Kucharova, K. Davranov, G. Berg, N. Makarova, T. Azarova, V. Chebotar, I. Tikhonovich, F. Kamilova, S. Validov, B. Lugtenberg. 2010. Bacteria able

- to control foot and root rot and to promote growth of cucumber in salinated soils. *Biology and Fertility of Soils*, 47: 197–205.
- Egamberdieva, D. 2008. Plant growth promoting properties of rhizobacteria isolated from wheat and pea growth in loamy sand soil. *Turkish Journal of Biology*, 32: 9–15.
- Egamberdieva, D., D. Jabborova, and S. Wirth. 2013. Alleviation of salt stress in legumes by co-inoculation with *Pseudomonas* and *Rhizobium*. In: Arora N. (Eds.), *Plant Symbiosis: Fundamentals and Advances*. Springer, New Delhi. Pp. 291-303.
- Elekhtyar, N.M. 2015. Efficiency of *Pseudomonas fluorescence* as plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) for the enhancement of seedling vigor, nitrogen uptake, yield and its attributes of rice (*Oryza sativa* L.). *International Journal of Scientific Research in Agricultural Science*, 2: 57–67.
- Erisman, J.W. 2011. The New Global Nitrogen Cycle, in *Ecological Aspects of Nitrogen Metabolism in Plants* (Eds. J. C. Polacco and C. D. Todd), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA. 5-15 pp.
- Evans, G.M. and J.C. Furlong. 2010. *Phytotechnology and Photosynthesis*, in *Environmental Biotechnology: Theory and Application*, Second Edition, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. 145-174 pp.
- Farrand, S.K., P.B. van Berkum, and P. Oger. 2003. *Agrobacterium* is a definable genus of the family *Rhizobiaceae*. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 53: 1681–1687.
- Felker, P. 1979. Mesquite, an all-purpose leguminous arid land tree. In: Rithie, G.A. (Ed.), *New Agricultural Crops*, American Association for the Advancement of Science, Selected Symposium 38. Westview Press. Boulder, Colorado: 98 –132.
- Fernández, L.L.C, N.G. Rojas A, T.G. Roldán C., M.E. Ramírez I., H.G. Zegara M., R. Uribe H., R.J. Reyes A., D. Flores H., y J.M. Arce O. 2006. Manual de técnicas de análisis de suelos aplicadas a la remediación de suelos de sitios contaminados. Instituto Mexicano del Petróleo, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, e Instituto Nacional de Ecología, México, D.F. 279 p.
- Fisher, R.F. and D. Binkley (Eds.). 2012a. Soil Organic Matter, in *Ecology and Management of Forest Soils*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. 39-57 pp.
- Fisher, R.F. and D. Binkley. 2012b. Chemistry of Soil Surfaces and Solutions, in *Ecology and Management of Forest Soils*, Fourth Edition, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. 138-156 pp.
- Galindo, S. 1983. Caracterización de la variación en el mezquite (*Prosopis* L.) y sus usos en el altiplano potosino. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma de Nuevo León, N.L., México. 87 p.
- Gao, G., D. Yin, S. Chen, F. Xia, J. Yang, Q. Li, and W. Wang. 2012. Effect of biocontrol agent *Pseudomonas fluorescens* 2P24 on soil fungal community in cucumber rhizosphere using T-RFLP and DGGE. *PlosOne*, 7: 1-9.
- García, H.D. 2014. Diagnóstico de la situación actual del mezquite (*Prosopis laevigata*) en la Sierra Baja del Estado de Hidalgo. Tesis de Licenciatura, División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. 99 p.
- Gardezi, A.K, A. Exebio-Garcia, E. Mejia-Saenz, E. Ojeda-Trejo, L. Tijerina-Chavez, Habibsha-Gardezi and M. Delgadillo-Pinon. 2009. Sewage Water Irrigation and Growth Response of *Leucaena leucocephala* Inoculated With *Glomus intrarradices* and Application of Organic Matter. *Journal of Applied Sciences*, 9: 1373-1377.

- Gardezi, A.K. 2007. Cu and Cr absorption by *Leucaena leucocephala* by arbuscular endomycorrhiza and Rhizobium in a contaminated soil. Doctoral Thesis (Ph.D.). In Environmental Engineering Sciences. Technological Institute of Toluca, Mexico, 108 p.
- Gardezi, A.K. y R. Ferrera-Cerrato. 1989. The effect of four levels of phosphorus on mycorrhizal colonization, dry root weight, and nitrogen and phosphorus content of *Acacia saligna* inoculated with *Rhizobium* sp. and endomycorrhiza in a Mexican andosol. Nitrogen Fixing Tree Research Reports, 7: 43-45.
- Gardezi, A. K., H.S. Gardezi, E. Ojeda-Trejo, y S.R. Márquez-Berber. 2008. Respuesta a la inoculación de *Glomus intraradix*, materia orgánica y dosis de fertilización fosfatada en el crecimiento de mezquite (*Prosopis* sp.). Agroproductividad, 1(1): 24-28.
- Gardezi, A. K., R. Ferrera-Cerrato, J. Kohashi-Shibata, E. M. Engleman y M. Larqué-Saavedra. 1990b. Potencial de diferentes variedades de *Phaseolus vulgaris* de alta eficiencia en la fijación de nitrógeno en asociación con *Rhizobium leguminosarum* Biovar Phaseoli. Agrociencia, 1(4): 25-39.
- Gardezi, A.K. y R. Ferrera-Cerrato. 1992. Mycorrhizal inoculation of *Caesalpinea cacalaco*. Nitrogen Fixing Tree Research Reports, 10: 116-118.
- Gardezi, A.K., I. D. Barceló-Quintal, V.M. Cetina-Alcalá, A.L. Bussy, J. Pérez-Nieto, y M.A. Borja-Salin. 2006. Absorción de cobre y características de *Leucaena leucocephala* asociada con *Glomus* spp. y *Rhizobium* en suelo contaminado del Río Lerma, México. Terra Latinoamericana, 24(3): 347-354.
- Gardezi, A.K., R. Ferrera-Cerrato, and V. Lara-Fernández. 1988. Effect of the double inoculation of *Rhizobium* sp. and V-A endomycorrhizae on *Acacia cyanophylla* in an andosol in Mexico. Nitrogen Fixing Tree Research Reports, 6: 31-33.
- Gardezi, A.K., R.A. Guzmán-Plazola and R. Ferrera-Cerrato. 1991. Growth response of *Pithecelobium dulce* to mycorrhizal inoculation. Nitrogen Fixing Tree Research Reports, 9: 111-113.
- Gardezi, A.K., J.D. Contreras, R.A. Guzman-Plazola, and R. Ferrera-Cerrato. 1990a. Growth of *Acacia farnesiana* associated with mycorrhizal fungi in three types of Mexican soils. Nitrogen Fixing Tree Research Reports, 8: 99-102.
- Gardezi, A.K, E.R. Garcia, R. Ferrera-Cerrato and C.A. Perez. 1995. Endomycorrhiza, rock phosphate and organic matter effects on growth of *Erythrina Americana*. Nitrogen Fixing Tree Research Reports, 13: 48-50.
- Gardezi, A.K., V.M. Cetina-Alcalá, D. Talavera-Magaña, R. Ferrera-Cerrato, F. Rodríguez-Neave, y M. Larqué-Saavedra. 2000. Efecto de la inoculación con endomicorriza arbúscular y dosis creciente de fertilización fosfatada en el crecimiento de chapulixtle (*Dodonea viscosa*). Terra, 18(2): 153-159.
- Garg N., Geetanjali. 2009. Symbiotic Nitrogen Fixation in Legume Nodules: Process and Signaling: A Review. In: Lichtfouse, E., M. Navarrete, P. Debaeke, S. Véronique, and C. Alberola. (Eds.), Sustainable Agriculture. Springer, Dordrecht. 519-531 pp.
- Gil-Marín, J.A., R. Rodríguez, D. Jasso-Cantú, y A. Zermeño. 2006. Resistencia estomática, transpiración y potencial hídrico en sábila con diferentes condiciones ambientales. Terra Latinoamericana, 24: 355-365.
- Google earth. 2016. Mapa de microcuenca baja del Río Tulancingo [consultado el 15 de septiembre de 2016].
- Granados, S. 1996. Los agaves en México. Universidad Autónoma Chapingo. México. 252 p.

- Guzel, S., and R. Terzi. 2013. Exogenous hydrogen peroxide increases dry matter production, mineral content and level of osmotic solutes in young maize leaves and alleviates deleterious effects of copper stress. *Botanical Studies*, 54 (26): 1-10.
- Gyaneshwar, P., G.N. Kumar, L.J. Parekh, and P.S. Poole. 2002. Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and Soil*. 245: 83–93.
- Hernández-Torres, O.E., A.K. Gardezi, G. Carrillo-Castañeda, S.R. Márquez-Berber y H. Flores-Magdaleno. 2016. Evaluación del desarrollo de Jamaica (*Hibiscus subdariffa* L.) en dos tipos de suelo con interacción de cepas bacterianas y vermicomposta. Tesis de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados. 67 p.
- Hamilton, E.I. 1994. The geobiochemistry of cobalt. *The Science of the Total Environment*, 150: 7-39.
- Hammond, J.P., P.J. White. 2008. Diagnosing phosphorus deficiency in crop plants. In: White, P.J., and J.P. Hammond (Eds.), *The Ecophysiology of Plant-Phosphorus Interactions. Plant Ecophysiology*, vol 7. Springer, Dordrecht. Pp. 225-246.
- Hermans, C., J.P. Hammond, P.J. White, and N. Verbruggen. 2006. How do plants respond to nutrient shortage by biomass allocation? *Trends in Plant Science*, 11: 610–617.
- Hernández, A. J.F. 2011. Uso integral de recursos agroforestales: Suplementación de harina de vaina de mezquite (*Prosopis laevigata*) en la producción de hongos seta (*Pleurotus ostreatus*). Tesis de Maestría, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 98 p.
- Höfte, M., and P. de Vos. 2006. Plant pathogenic *Pseudomonas* species. In *Plant-associated bacteria*, part. 3, Gnanamanickam, S.S. (Eds.). Springer, Netherlands. Pp. 507-533.
- Holt, J.G. 1994. *Bergey's Manual of Determinate Bacteriology*. Baltimore, Maryland, United States of America. 74 p.
- Holt, J.G., N.R. Krieg, P.H.A. Sneath, J.T. Staley, and S.T. Williams. 1994. Genus *Pseudomonas*. In: Holt, J.G.; N.R. Krieg, P.H.A. Sneath, J.T. Staley, S.T. Williams (Eds.), *Bergey's manual of determinative bacteriology*, Williams & Wilkins. 93-94 pp.
- Howeler, R.H. 1983. Análisis del tejido vegetal en el diagnóstico de problemas nutricionales: Algunos cultivos tropicales. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia, 28 p.
- Ike, M., M. Yamashita, and S. Soda. 2012. *Handbook of Metal Biotechnology: Applications for Environmental Conservation and Sustainability*. Pan Publishing Pte. Ltd. Massachusetts, USA. 231 p.
- Illmer, P., and F. Schinner. 1992. Solubilization of inorganic phosphates by microorganisms isolated from forest soil, *Soil Biology Biochemistry*, 24: 389–395.
- INEGI. 2010. Red hidrográfica, escala 1 :50 000. Edición: 2.0, subcuenca hidrográfica RH26Dv Río Metztlán/ cuenca Río Moctezuma/ Región hidrológica Pánuco. Aguascalientes, Ags. México.
- INEGI. 2013. Conjunto de datos vectorial edafológico, escala 1 :250 000, serie II (Conjunto nacional). Aguascalientes, Ags. México.
- Iqbal, A.M., M. Khalid, S.M. Shahzad, M. Ahmad, N. Soleman, and N. Akhtar. 2012. Integrated use of *Rhizobium leguminosarum*, plant growth promoting rhizobacteria and enriched compost for improving growth, nodulation and yield of lentil (*Lens culinaris* Medik). *Chilean Journal of Agricultural Research*, 72(1): 104-110.

- Íñiguez-Covarrubias, M., W. Ojeda-Bustamante, C. Díaz-Delgado, y E. Sifuentes-Ibarra. 2014. Análisis de cuatro variables del período de lluvias asociadas al cultivo maíz de temporal. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 5(1), 101-114.
- Pittman, J.K. 2005. Managing the manganese: molecular mechanisms of manganese transport and homeostasis. *New Phytologist*, 167: 733-742.
- Jaiswal D.K., J.P. Verma, S. Prakash, V.S. Meena, R.S. and Meena. 2016. Potassium as an Important Plant Nutrient in Sustainable Agriculture: A State of the Art. In: Meena, V., B. Maurya, J. Verma, and R. Meena (Eds.), *Potassium Solubilizing Microorganisms for Sustainable Agriculture*. Springer, New Delhi. 21-29 pp.
- Kaiser, B.N., K.L. Gridley, J. Ngaire Brady, T. Phillips, and S.D. Tyerman. 2005. The Role of Molybdenum in Agricultural Plant Production. *Annals of Botany*, 96 (5): 745–754.
- Karakurt, H., R. Kotan, F. Dadasoglu, R. Aslantas, and F. Sahin. 2011. Effects of plant growth promoting rhizobacteria on fruit set, morphological and chemical characteristics, color values, and vegetative growth of sour cherry (*Prunus cerasus* cv. Kütahya). *Turkish Journal of Biology*, 35: 283–291.
- Khabaz-Saberi, H., Z. Rengel, R. Wilson, and T.L. Setter. 2010a. Variation for tolerance to high concentration of ferrous iron (Fe²⁺) in Australian hexaploid wheat. *Euphytica*, 172: 275–283.
- Khabaz-Saberi, H., Z. Rengel, R. Wilson, and T.L. Setter. 2010b. Variation of tolerance to manganese toxicity in Australian hexaploid wheat. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 173: 103–112.
- Khan M.S., A. Zaidi, and P.A. Wani. 2009. Role of Phosphate Solubilizing Microorganisms in Sustainable Agriculture: A Review. In: Lichtfouse, E., M. Navarrete, P. Debaeke, S. Véronique, and C. Alberola (Eds.), *Sustainable Agriculture*. Springer, Dordrecht. 551-570 pp.
- Kumar A., A.K. Choudhary, V. Pooniya, V.K. Suri, and U. Singh. 2016. Soil Factors Associated with Micronutrient Acquisition in Crops- Biofortification Perspective. In: Singh, U., C. Praharaj, S. Singh, and N. Singh (Eds.), *Biofortification of Food Crops*. Springer, New Delhi. 159-176 pp.
- Kumar, V.V. 2016. Plant Growth-Promoting Microorganisms: Interaction with Plants and Soil. In: Hakeem, K., M. Akhtar, and S. Abdullah (Eds.), *Plant, Soil and Microbes*. Springer, Cham. 1-16 pp.
- Kumpiene, J., A. Lagerkvist, and C. Maurice. 2008. Stabilization of As, Cr, Cu, Pb and Zn in soil using amendments – A review. *Waste Management*, 28: 215–225.
- Laing, W., D. Greer, O. Sun, P. Beets, A. Lowe, and T. Payn. 2000. Physiological impacts of Mg deficiency in *Pinus radiata*: growth and photosynthesis. *New Phytologist*, 146: 47–57.
- Latour X., S. Delorme, P. Mirleau, and P. Lemanceau. 2009. Identification of Traits Implicated in the Rhizosphere Competence of Fluorescent Pseudomonads: Description of a Strategy Based on Population and Model Strain Studies. In: Lichtfouse, E., M. Navarrete, P. Debaeke, S. Véronique, and C. Alberola (Eds.), *Sustainable Agriculture*. Springer, Dordrecht. 285-296 pp.
- Lehto, T., T. Ruuhola, and B. Dell. 2010. Boron in forest trees and forest ecosystems. *Forest Ecology and Management*, 260: 2053–2069.
- Lira, C.R. 2010. Estaciones climatológicas en Google earth. Comisión Nacional del Agua y Servicio Meteorológico Nacional, México.

- López, S.A. 2016. Neutralizar la degradación de las tierras, una aspiración global. ¿Es posible lograrlo en México?. *Terra Latinoamericana*, 34(2): 239-249.
- López, R.O.A. 2001. Desarrollo de plantas de mezquite, *Prosopis laevigata* (Humb. & Bonpl. Ex Wild) M.C. Johnst., en suelos salinos del ex-lago de Texcoco. Tesis de licenciatura, Departamento de Agroecología, Universidad Autónoma Chapingo. 62 p.
- Lugo-Morín, D.R., y J.C. Rey. 2009. Evaluación de la vulnerabilidad a la degradación agroambiental a través del uso del sistema microLEIS en los suelos de los llanos centrales de Venezuela. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 25(1), 43-60.
- Lugtenberg B.J.J., L. Dekkers, G.V. Bloemberg. 2001. Molecular determinants of rhizosphere colonization by *Pseudomonas*. *Annual Review of Phytopathology*, 39: 461–490.
- Lyubenova, L., and P. Schröder. 2010. Uptake and effect of heavy metal on the plant detoxification cascade in the presence and absence of organic pollutants. In Sherameti, I., and A. Varma (Eds.), *Soil heavy metals, Soil biology*, 9: 65-85.
- Madueño-Molina A., D. García-Paredes, J. Martínez-Hernández, C. Rubio-Torres, A. Navarrete-Valencia y J. Bojórquez-Serrano. 2006. Germinación de semilla de frijolillo, *Rhynchosia minima* (L.) DC., luego de someterla a tratamientos pregerminativos. *Bioagro*, 18(2): 101-105.
- Maldonado-Aguirre, L.J., y F.E. de la Garza P. 2000. El Mezquite en México: Rasgos de Importancia Productiva y Necesidades de Desarrollo. En: Frías-Hernández, J. T., V. Olalde-Portugal y E. J. Vernon-Carter (Eds), *El Mezquite: Árbol de Usos Múltiples. Estado actual del conocimiento en México*. Universidad de Guanajuato, México. 37-50 pp.
- Mansourian, S. 2005. Overview of Forest Restoration Strategies and Terms. In: *Forest Restoration in Landscapes*. Springer, New York, NY. 8-17 pp.
- Mansourian, S., D. Vallauri, and N. Dudley (Eds.), in cooperation with WWF International. 2005. *Forest Restoration in Landscapes: Beyond Planting Trees*, Springer, New York. 8-17 pp.
- Marschner H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants* (2nd edition). Academic, London. 889 pp.
- Marschner, H. 2011. *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, London, 672 p.
- Mendel, R.R., and R. Haensch. 2002. Molybdoenzymes and molybdenum cofactor in plants. *Journal of Experimental Botany*, 53: 1689–1698.
- Mengel, K., and E.A. Kirkby. 2001. *Principles of Plant Nutrition* (5th edition). Kluwer, Dordrecht, The Netherlands. 849 p.
- Meyer, J.M., and M.A. Abdallah. 1978. The fluorescent pigment of *Pseudomonas fluorescens*: biosynthesis, purification and physico-chemical properties. *Journal of General Microbiology*, 107: 319–328.
- Meyer, D. 1984. Processing, utilization and economics of mesquite pods as a raw material for the industry. Diss. Nr 7688, ETH, Zurich, Switzerland. 159 p.
- Mezaache, S. 2012. Localisation des déterminants de la suppression de quelques souches de *Pseudomonas* isolées de la rhizosphère de la pomme de terre. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de la Nature et de la Vie, Université Ferhat ABBAS Sérif, Algérie. 141 pages.

- Ministère de l'environnement de Canada (MEC). 2015. Évaluation préalable finale pour la souche de *Pseudomonas fluorescens* ATCC 13525. Environnement Canada, Santé Canada. 62 pages.
- Montoya, R.F. 2010. Características físicas y químicas de suelos regados con aguas residuales del distrito de riego 028 y metales pesados en *Medicago sativa*. Tesis de licenciatura, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 91 p.
- Montoya, R.F. 2010. Características físicas y químicas de suelos regados con aguas residuales del distrito de riego 028 y metales pesados en *Medicago sativa*. Tesis de licenciatura, Departamento de Suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 91 p.
- Motsara, M.R., P.B. Bhattacharyya, and B. Srivastava. 1995. Biofertilizers their description and characteristics, In: Biofertilizer Technology, Marketing and Usage. A Sourcebook- cum- Glossary, Fertilizer Development and Consultation Organisation, New Delhi, India. 9–18 pp.
- Mputu, K.J.N., C. Pierart, J. Destain, P. Noki, et P. Thonart. 2014. Impact du séchage sur la viabilité de *Pseudomonas fluorescens* (synthèse bibliographique). Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, 18 (1): 134-141.
- Muccifona, S., and L.M. Bellani. 2013. Effects of copper on germination and reserve mobilization in *Vicia sativa* L. seeds. Environmental Pollution, 179: 68-74.
- Mulligan, C.N., R.N. Yong, and B.F. Gibbs. 2001. Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. Engineering Geology, 60: 193–207.
- Nava-Pérez, E., C. García-Gutiérrez, J.R. Camacho-Báez, E.L. Vázquez-Montoya. 2012. Bioplaguicidas: una opción para el control biológico de plagas. Ra Ximhai, 8(3): 17-29.
- Navarrete, J.U., M. Viveros, J.T. Ellzey, and D.M. Borrok. 2011. Copper isotope fractionation by desert shrubs. Applied Geochemistry, 26: S319-S321.
- Naz T., J. Akhtar, M.M. Iqbal, M.A. ul Haq, and M. Saqib. 2016. Boron Toxicity in Salt-Affected Soils and Effects on Plants. In: Hakeem, K., J. Akhtar, M. Sabir (Eds.), Soil Science: Agricultural and Environmental Perspectives. Springer, Cham. 259-286 pp.
- Negrin, B.A. y P.Y. Jiménez. 2012. Evaluación del efecto agronómico del biosólido procedente de una planta de tratamiento por digestión anaerobia de residuales pecuarios en el cultivo de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). Cultivos Tropicales 33(2), 13-19.
- Nelson, L.M. 2004. Plant growth promoting rhizobacteria (PGPR): Prospects for new inoculants. Online. Crop Management, Plant Management Network, 3(1): 301-305.
- Nieves-Cordones M., F. Alemán, M. Fon, V. Martínez, and F. Rubio. 2012. K⁺ Nutrition, Uptake, and Its Role in Environmental Stress in Plants. In: Ahmad, P., and M. Prasad (Eds.), Environmental Adaptations and Stress Tolerance of Plants in the Era of Climate Change. Springer, New York, NY. Pp. 85-112.
- Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. 2000. Especificaciones de Fertilidad, Salinidad y Clasificación de Suelos: Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación México, D.F. 78 p.
- Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización. 71 p.
- NORMA Oficial Mexicana NOM-147-SEMARNAT/SSA1-2004. 2004. Criterios para determinar las concentraciones de remediación de suelos contaminados por arsénico, bario, berilio, cadmio, cromo hexavalente, mercurio, níquel, plata, plomo, selenio, talio y/o vanadio. Diario Oficial de la Federación México, D.F. 86 p.

- Oehlert, G.W. 2010. A first Course in Design Analysis of Experiments. University of Minnesota. 647 p.
- Olivares-Pérez, J., F. Avilés-Nova, B. Albarrán-Portillo., S. Rojas-Henández, y O.A. Castelán-Ortega. 2011. Identificación, usos y medición de leguminosas arbóreas forrajeras en ranchos ganaderos del sur del Estado de México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14: 739-748.
- Oldeman, L.R. 1988. Guidelines for general assessment of the status of human-induced soil degradation. Working paper 88/4. International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Wageningen. 151 p.
- Ortiz, T., J. Delgadillo, M.N. Rodríguez, y G. Calderón. 2016. Inoculación bacteriana en el crecimiento y calidad del fruto de cinco variedades de fresa en suelos con pH contrastante. *Terra Latinoamericana*, 34: 177-185.
- Osuna, L.E. y R. Meza, S. 2003. Alternativas para la explotación sostenible del mezquital de Baja California Sur. Folleto técnico número 8 INIFAP-CIRNO-Campo Experimental Todos Santos. La Paz, Baja California Sur. México. 55 p.
- Palacios, R.A., R. Rodríguez L., M. de la L. Hernández F., E. Jiménez M., and D. Tirado T. 2016. Distribución potencial de *Prosopis laevigata* (Humb. et Bonpl. ex Willd) M. C. Johnston basada en un modelo de nicho ecológico. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 7(34), 35-46.
- Palleroni, N.J. 1948. Gram-negative aerobic rods and cocci: Family I *Pseudomonadaceae*, in: Krieg, N.R., J.G., and Holt (Eds.), *Bergey's manual of bacteriology*. William & Wilkins, Baltimore, MD. 141–168 pp.
- Palleroni, N.J. 1984. Genus I. *Pseudomonas* Migula 1984, 237AL. In: Krieg, N.R., and J.G. Holt (Eds.), *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. Williams & Wilkins, Baltimore, MD. 141-199 pp.
- Palleroni, N.J. 1993. *Pseudomonas* classification: a new case history in the taxonomy of gram-negative bacteria. *Antonie Van Leeuwenhoek*, 64: 231-251.
- Papadakis, I.E., A. Giannakoula, I.N. Therios, A.M. Bosabalidis, M. Moustakas, and A. Nastou. 2007. Mn-induced changes in leaf structure and chloroplast ultrastructure of *Citrus volkameriana* (L.) plants. *Journal of Plant Physiology*, 164: 100–103.
- Pennington, T. y J. Sarukhán. 1998. Árboles tropicales de México (2da edición). UNAM -Fondo de Cultura Económica. México. 554 p.
- Peralta, J., J. Gardea-Torresdey, K. Tiemann, E. Gomez, S. Arteaga, E. Rascon, and G. Parsons. 2001. Uptake and effects of five heavy metals on seed germination and plant growth in alfalfa (*Medicago sativa* L.). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 66: 727-734.
- Pérez-Álvarez, S., O. Coto-Arbelo, M. Echemendía-Pérez, y G. Ávila-Quezada. 2015. *Pseudomonas fluorescens* Migula, ¿Control biológico o patógeno?. *Revista de Protección Vegetal*, 30(3): 225-234.
- Petit-Aldana, J., F. Casanova-Lugo, y F.J. Solorio-Sánchez. 2009. Asociación de especies arbóreas forrajeras para mejorar la productividad y el reciclaje de nutrientes. *Agricultura Técnica en México*, 35(1): 113-122.
- Pineda-Martínez, L.F., F.G. Echavarría-Chairez, J.G. Bustamante-Wilson, y L.J. Badillo-Almaraz. 2013. Análisis de la producción agrícola del DDR189 de la región semiárida en Zacatecas, México. *Agrociencia*, 47(2), 181-193.

- Pittman, J.K., M.C. Bonza, and M.I. De Michelis. 2011. Ca²⁺ Pumps and Ca²⁺ Antiporters in Plant Development. In: Geisler, M., and K. Venema. (Eds.) Transporters and Pumps in Plant Signaling. Signaling and Communication in Plants, vol 7. Springer, Berlin, Heidelberg. 133-161 pp.
- H.A.A. 2012. Plan Municipal de desarrollo 2012-2016. Honorable Ayuntamiento de Acatlán, Gobierno del Estado de Hidalgo. 78 p.
- Prieto, R.J., S. Rosales M., J. Sigala R., R. Madrid A., y J. Mejía B. 2014. Producción de *Prosopis laevigata* M.C. Johnst. con diferentes mezclas de sustrato. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 4(20), 50-57.
- Quiñones-Gutiérrez, A., V. González-Ontiveros, J.R. Chávez-Pérez, A. Vargas-Martínez, y F. Barrientos-Díaz. 2013. Evaluación de inoculantes promotores de crecimiento en la producción de plantas de mezquite [*Prosopis laevigata* (Humb. Et Bonpl. Ex Willd.) M.C. Johnst.] in Durango. Revista Mexicana de Ciencias Forestales, 4(20): 72-80.
- Radhapriya, P., A. Ramachandran, R. Anandham, and S. Mahalingam. 2015. *Pseudomonas aeruginosa* RRALC3 Enhances the Biomass, Nutrient and Carbon Contents of *Pongamia pinnata* Seedlings in Degraded Forest Soil. *PLoS ONE*, 10(10): 1-19.
- Raghothama, K.G. 1999. Phosphate acquisition. Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology, 50: 665–693.
- Rashid, A., M.R. Mir, and K.R. Hakeem. 2016. Biofertilizer Use for Sustainable Agricultural Production. In: Hakeem, K., M. Akhtar, and S. Abdullah. (Eds.), Plant, Soil and Microbes. Springer, Cham. 163-180 pp.
- Ratti N., S. Kumar, H.N. Verma, and S.P. Gautams. 2001. Improvement in bioavailability of tricalcium phosphate to *Cymbopogon martini* var. motia by rhizobacteria, AMF and *Azospirillum* inoculation. Microbiological Research, 156: 145–149.
- R Development Core Team. 2008. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Rengel, Z. (Ed.). 2003. Handbook of soil acidity. Marcel Dekker, New York. 473 pp.
- Rengel, Z. 2002. Role of pH in availability of ions in soil. In: Rengel, Z. (Ed.) Handbook of plant growth. pH as a master variable in plant growth. Marcel Dekker, New York. 323–350 pp.
- Rengel, Z. 2011. Soil pH, Soil Health and Climate Change. In: Singh, B., A. Cowie, and K. Chan. (Eds.) Soil Health and Climate Change. Soil Biology, vol. 29. Springer, Berlin, Heidelberg. 69-85 pp.
- Reséndiz, F.N.S. 2013. Goma de mezquite y huizache como alternativa de aprovechamiento en sistemas agroforestales. Tesis de Maestría, Departamento de suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 89 p.
- Rittman, B.E., and P.L. McCarty. 2001. Environmental Biotechnology: Principles and Applications. McGraw-Hill International Editions, Biological Sciences Series, New York, USA. 754 p.
- Rodríguez, S.E.N., G.E. Rojo M., B. Ramírez V., R. Martínez R., M. de la C. Conga H., S.M. Medina T., y H.H. Piña R. 2014. Análisis técnico del árbol del mezquite (*Prosopis laevigata* Humb. & Bonpl. ex Willd.) en México. Ra Ximhai 10 (3): 173–193.
- Rodríguez T., S. Arruda, F. Cleidson, F. Machado y L. Arnaldo. 2006. Produtividade de milho e de Feijoo consorciados adubados con diferentes formas de lodo de esgoto. Revista de la Ciencia del Solo y Nutrición Vegetal, 6(1): 52-63.

- Roig, N., J. Sierra, E. Martí, M. Nadal, M. Schuhmacher, and J.L. Domingo. 2012. Long-term amendment of Spanish soils with sewage sludge: effects on soil functioning. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 158: 41-48.
- Romahn, de la V.C.F y H.R. Ramires. 2010. *Dendrometría*. División de Ciencias Forestales, Universidad Autónoma Chapingo. 292 p.
- Rojas-Rodríguez, K., y N. Ortuño. 2007. Evaluación de micorrizas arbúsculares en interacción con abonos orgánicos como coadyuvantes del crecimiento de la producción hortícola del Valle Alto de Cochabamba, Bolivia. *Acta Nova*, 3(4): 697-719.
- Ruan, J., L. Ma, and Y. Yang. 2012. Magnesium nutrition on accumulation and transport of amino acids in tea plants. *Journal of Science of Food and Agriculture*, 92: 1375–1383.
- Rueda, S.A., J de D. Benavides S., J.A Prieto-Ruiz, J.T. Sáenz R., G. Orozco-Gutiérrez, y A. Molina C. 2012. Calidad de planta producida en los viveros forestales de Jalisco. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3(14): 69-82.
- Ruíz, T.D. 2011. Uso potencial de la vaina de mezquite para la alimentación de animales domésticos del altiplano potosino. Tesis de título facultad de maestría en ciencias ambientales. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. 60 p.
- Rzedowski, J. 1988. Análisis de la Distribución geográfica del complejo *Prosopis* (Leguminoseae, Mimosoideae) en Norteamérica. *Acta Botánica mexicana*, 3: 7.19
- Sabir, M., E.A. Waraich, K.R. Hakeem, M. Ozturk, H.R. Ahmad, and M. Shahid. 2015. Phytoremediation: mechanisms and adaptations. Chapter 4. In: Hakeem *et al* (Eds.), *Soil remediation and plants: prospects and challenges*. Academic Press, Elsevier, New York-USA. 85–105 pp.
- Sadzawka, R.A., Ma. A. Carrasco R., R. Demanet F., H. Flores P., R. Grez Z., Ma de L. Mora G., y A. Neaman. 2007. *Métodos de análisis de tejidos vegetales* (2da edición). Santiago de Chile. 139 p.
- Sáenz, R. J. T., H. J. Muñoz F., F. Villaseñor R., J. A. Prieto R. y A. Rueda S. 2010. Calidad de planta en viveros forestales de clima templado en Michoacán. Folleto Técnico Núm. 12. SAGARPA-INIFAP-CIRPAC-Campo Experimental Uruapan. Uruapan, Michoacán, México. 50 p.
- Sağlam, A., F. Yetişsin, M. Demiralay, and R. Terzi. 2016. Copper Stress and Responses in Plants in Plant Metal Interaction: emerging remediation techniques. In Parvaiz, A. Elsevier, Amsterdam, Netherlands. 21-40 pp.
- Sánchez, C.M., A. Ávila O., y P. Salinas T. 2008. Evaluación fisicoquímica de aguas superficiales de la región de Acatlán, Hidalgo. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. 12 p.
- Sánchez, H.M.A. 2012. Sistema agroforestal coquia-mezquite establecido en suelos del distrito de riego 028 Tulancingo, Hidalgo. Tesis de maestría en ciencias, Universidad Autónoma Chapingo. 99 p.
- Santiago, O.T., V. Sánchez M., R. Monroy C. y G. García S. 2007. Manual de producción de especies forestales tropicales en contenedor. INFAP-CIRGOC. Campo Experimental El Palmar. Folleto Técnico Núm. 44. Tezonapa, Ver., México. 73 p.
- Schmidt, S.B., P. Pedas, K.H. Laursen, J.K. Schjoerring, and S. Husted. 2013. Latent manganese deficiency in barley can be diagnosed and remediated on the basis of chlorophyll a fluorescence measurements. *Plant and Soil*, 372: 417-429.
- Selim, H.M. 2011. *Dynamics and bioavailability of heavy metals in the rootzone* (1st edition), CRC Press, Boca Raton, Florida. 299 p.

- Selim, H.M. 2013. Competitive sorption and transport of heavy metals in soils and geological media. CRC Press, Boca Raton, Florida. 412 p.
- Siddiqui, Z.A., A. Iqbal, and I. Mahmood. 2001. Effects of *Pseudomonas fluorescens* and fertilizers on the reproduction of *Meloidogyne incognita* and growth of tomato. *Applied Soil Ecology*, 16: 179–185.
- Simpson, D.J., and S.P. Robinson. 1984. Freeze-fracture ultrastructure of thylakoid membranes in chloroplasts from manganese-deficient plants. *Plant Physiology*, 74: 735–741.
- Simpson, B.B. 1977. Mesquite: its biology in two desert ecosystems. Dowden, Hutchinson & Ross Inc., Stroudsburg, Pennsylvania, USA. 250 p.
- Singh, R.P., and M. Agrawal. 2008. Potential benefits and risks of land application of sewage sludge. *Waste Management*, 28: 347-358.
- Society for Ecological Restoration International. Science and Policy Working Group. 2002. The SER Primer on Ecological Restoration, www.ser.org/.
- Statistical Analysis System (SAS) Institute. 2000. SASuser'sguide. SAS guide for personal computers. Versión 9.00 Edition. Cary, NC. USA. 1028 p.
- Taiz, L., and E. Zeiger. 1991. Plant physiology. Benjamin/Cummings Publishing Company Inc., Redwood City, CA. 100-119 pp.
- Terrones, R.T. del R.L., C. González S., y S.A. Ríos R. 2004. Arbustivas Nativas de Usos Múltiples en Guanajuato. Libro técnico No 2. INIFAP, Campo Experimental Bajío, Guanajuato, México. 216 p.
- Tilman, D. 1998. The greening of the green revolution. *Nature*, 396: 211–212.
- Torres, C.F. 2013. Producción y calidad de biomasa de cuatro árboles de forraje nativos del semiárido mexicano en dos sistemas de manejo. Tesis de Maestría, Departamento de suelos, Universidad Autónoma Chapingo. 104 p.
- Trujillo, I, A. Díaz, A. Hernández, y M. Heydrich. 2007. Antagonismo de cepas de *Pseudomonas fluorescens* y *Burkholderia cepacia* contra hongos fitopatógenos del arroz y el maíz. *Revista de Protección Vegetal*, 22(1): 41-46.
- US-EPA. 2003. Code of Federal Regulations, Title 40. Protection of Environment, Chapter I: Environmental Protection Agency, Subchapter O: Sewage Sludge, Part 503: Standards For The Use Or Disposal Of Sewage Sludge, 503.13 Pollutant Limits. 820-852 pp.
- Van Zanten, M., R. Bours, T.L. Pons, and C.G. Proveniers. 2014. Plant acclimatation and adaptation to warm environments (first edition). Edited by Franklin, K.A., and A. Philip. Widge. John Wiley & Sons, Inc. Iowa, USA. 19 p.
- Vargas, O. 2007. Guía metodológica para la restauración ecológica del bosque altoandino. Grupo de restauración ecológica, Departamento de Biología, Universidad Nacional de Colombia. 189 p.
- Vasudevan, N. 2006. Essentials of Environmental Science. Alpha Science International Ltd., Oxford, U. K. 152-159 pp.
- Vázquez, A.A. 2009. Guía para interpretar el análisis químico de suelo y agua. Universidad Autónoma Chapingo. 38 p.
- Vessey, J.K. 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant Soil*, 255(2): 571–586.
- Viollet, A. 2010. Influence du système de sécrétion de type III bactérien dans les interactions plante-*Pseudomonas spp.* fluorescents non pathogènes. Thèse de doctorat, École doctorale environnemental-Sante-Stic, Université de Bourgogne, France. 171 pages.

- Wakeel, A., M. Gul, and C. Zörb. 2016. Potassium for Sustainable Agriculture. In: Hakeem, K., J. Akhtar, and M. Sabir (Eds.), *Soil Science: Agricultural and Environmental Prospectives*. Springer, Cham. 159-182 pp.
- Walker, L.R. 2005. Restoring Soil and Ecosystem Processes. In: *Forest Restoration in Landscapes*. Springer, New York, NY. 192-196 pp.
- Walker, L.R., and R. del Moral. 2003. *Primary Succession and Ecosystem Rehabilitation*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 334 p.
- Wang, N., C. Yang, Z. Pan, Y. Liu, and S. Peng. 2015. Boron deficiency in woody plants: various responses and tolerance mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 6: 1-14.
- White, P. J., and P.H. Brown. 2010. Plant nutrition for sustainable development and global health. *Annals of Botany*, 105(7): 1073-1080.
- White, P.J, and M.R. Broadley. 2003. Calcium in plants. *Annals of Botany*, 92: 487–511.
- Willems, A., and M.D. Collins. 1993. Phylogenetic analysis of rhizobia and agrobacteria based on 16S rRNA gene sequences. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 43(2): 305–313.
- Williams, R.J.P., J.J.R. Frausto da Silva. 2002. The involvement of molybdenum in life. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 292(2): 293–299.
- Yang, H., J. Li, J. Yang, H. Wang, Z. Juliang, and J. He. 2014. Effects of Nitrogen Application Rate and Leaf Age on the Distribution Pattern of Leaf SPAD Readings in the Rice Canopy. *PLoS ONE*, 9(2), : 1-11.
- Yasuor, H., M. Firer, and E. Beit-Yannaib. 2015. Protective structures and manganese amendments effects on antioxidant activity in pepper fruit. *Scientia Horticulturae*, 185: 211-218.
- Yli-Halla, M. 2016. Fate of Fertilizer P in Soils: Inorganic Pathway. In: Schnug, E., and L. De Kok (Eds.), *Phosphorus in Agriculture: 100 % Zero*. Springer, Dordrecht. 27-40 pp.
- Zamora, F., N. Rodríguez, D. Torres y H. Yendis. 2008. Efecto del riego con aguas residuales sobre propiedades químicas de suelos de la planicie de Coro, Estado Falcón. *Bioagro*, 20(3): 193-199.
- Zappala, M.N., J.T. Ellzey, J. Bader, J.R. Peralta-Videa, and J. Gardea-Torresdey. 2013. *Prosopis pubescens* (Screw Bean Mesquite) seedlings are hyperaccumulators of copper. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 65: 212-223.

8- ANEXOS

Anexo 1. Clasificación del suelo en cuanto a su nivel de pH de acuerdo a la NOM-021

Clasificación	pH
Fuertemente ácido	<5.0
Moderadamente ácido	5.1-6.5
Neutro	6.6-7.3
Medianamente alcalino	7.4-8.5
Fuertemente alcalino	>8.5

Fuente: NOM-RECNAT-2000

Anexo 2. Interpretación de conductividad eléctrica

CE ds-1 a 25 °C	Efectos
<1.0	Efectos despreciables de la salinidad
1.1-2.0	Muy ligeramente salino
2.1-4.0	Moderadamente salino
4.1-8.0	Suelo salino
8.1-16.0	Fuertemente salino
>16.0	Muy fuertemente salino

Fuente: NOM-RECNAT-2000

Anexo 3. Valores de referencia para clasificar la concentración de la materia orgánica en los suelos

Clase	Materia orgánica (%)
Muy bajo	<0.5
Bajo	0.6-1.5
Medio	1.6-3.5
Alto	3.6-6.0
Muy alto	>6.0

Fuente: NOM-RECNAT-2000

Anexo 4. Interpretación de densidad aparente

Tipos de suelos	g/cm³
Orgánicos y volcánicos	<1.0
Minerales	
Arcillosos	1.0-1.19
Francosos	1.20-1.32
Arenosos	>1.32

Fuente: NOM-RECNAT-2000

Anexo 5. Interpretación de resultados de nitrógeno total

Clase	Nitrógeno total (%)
Muy bajo	<0.05
Bajo	0.05-0.10
Medio	0.10-0.15
Alto	0.15-0.25
Muy alto	>0.25

Fuente: NOM-RECNAT-2000

Anexo 6. Interpretación de fósforo por el procedimiento de Bray y Kurtz 1

Clase	P mg/Kg
Bajo	<15.0
Medio	15-30
Alto	>30

Fuente: NOM-RECNAT-2000

Anexo 7. Interpretación del contenido de potasio en el suelo

Clase	Mg/Kg		
	K	Ca	Mg
muy pobre	<40	<500	<15
Pobre	40-80	500-1000	15-30
Mediano	81-200	1000-2500	31-60
Rico	201-320	2500-5000	61-120
Muy rico	>320	>5000	>120

Fuente: Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo de Vázquez (2009)

Anexo 8. Valores que permiten clasificar los micronutrientes extraíbles con DTPA

Clase	Fe	Cu	Zn	Mn
Deficiente	<2.5	<0.2	<0.5	<1.0
Marginal	2.5-4.5		0.5-1.0	
Adecuado	>4.5	>0.2	>1.0	>1.0

Fuente: NOM-RECNAT-2000

Anexo 9. Interpretación de contenido de boro en el suelo

Rango	ppm
Muy bajo	<0.39
Bajo	0.39-0.79
Medio	0.80-1.29
Alto	1.30-2.10
Muy alto	>2.10

Fuente: NOM-RECNAT-2000

Anexo 10. Valores sugeridos de elementos tóxicos en el suelo de acuerdo a la tolerancia de los cultivos

Clase	mg/Kg		
	Cd	Pb	Ni
Normal	0.35	35	50
Peligroso	3-5	100-300	100

Fuente: NOM-RECNAT-2000

Anexo 11. Valores críticos a partir de los cuales se consideran suelos contaminados

Elemento	Cd	Ni	Pb	Mn	Cu	Zn
Valor crítico	39	420	300	-	1500	2800

Fuente: US-EPA (2003)

Anexo 12. Contenidos totales de elementos menores en suelos

Elemento	Mg/kg	
	Media aproximada	Intervalo usual
Boro (B)	20	2-270
Cadmio (Cd)	0.35	0.01-2
Cobalto (Co)	8	0.05-65
Cromo (Cr)	70	5-1500
Cobre (Cu)	30	2-250
Manganeso (Mn)	1000	20-10000
Molibdeno (Mo)	1.2	0.1-40
Níquel (Ni)	50	2-750
Plomo (Pb)	35	2-300
Zinc (Zn)	90	1-900

Fuente: Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo de Vázquez (2009)

Anexo 13. Estándares para la toma de acción en suelos contaminados

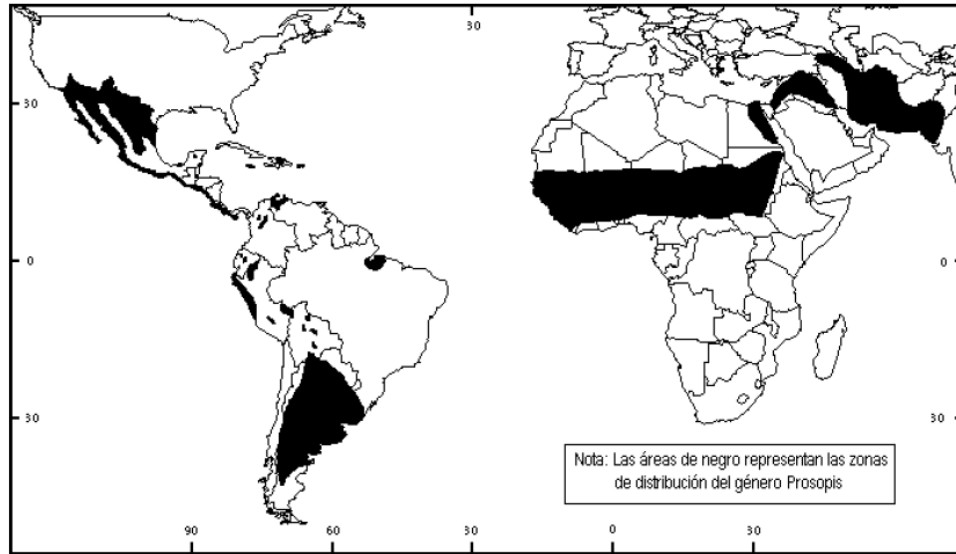
Concentración en suelo mg/kg

Metales pesados			
Elemento	A	B	C
Cromo (Cr)	100	250	800
Cobalto (Co)	20	50	300
Níquel (Ni)	50	100	500
Cobre (Cu)	50	100	500
Zinc (Zn)	200	500	3000
Molibdeno (Mo)	10	40	200
Cadmio (Cd)	1	5	20
Plomo (Pb)	50	150	600

Fuente: Guía para interpretar el análisis químico del agua y suelo de Vázquez (2009)

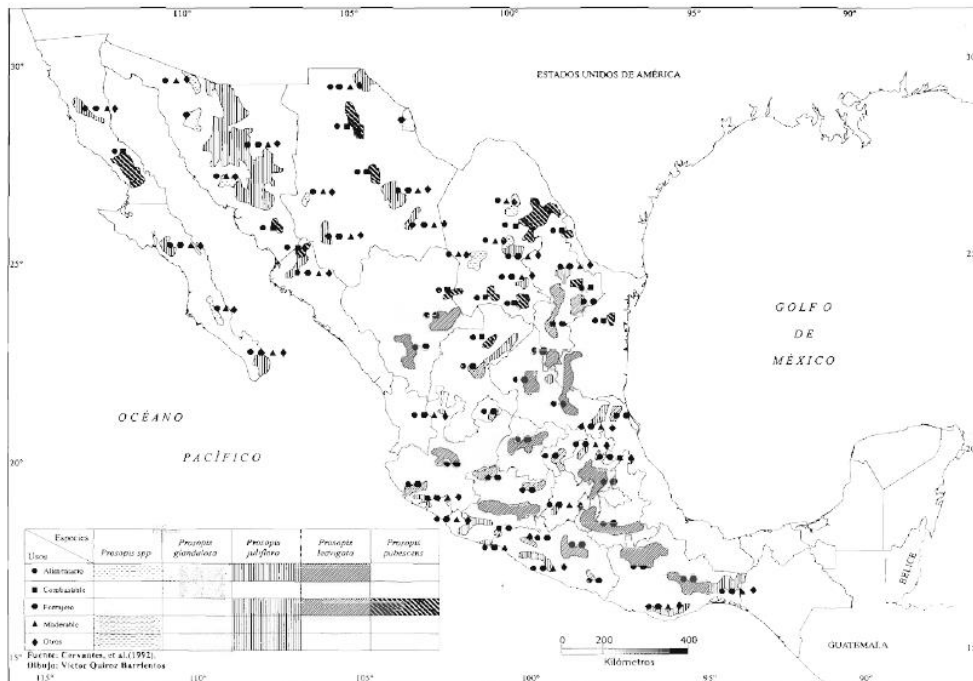
- A) Valor de referencia (no contaminado)
- B) Valor de duda
- C) Valor arriba del cual se deben realizar acciones de remediación

Anexo 14. Capítulo 3



Fuente: Simpson, 1977; Meyer, 1984, Rzedowski, 1988; Carrillo, 2006.

Figura 3.1. Distribución Mundial del género *Prosopis*



Fuente: Cervantes *et al.* 1992; García, 2014.

Figura 3.2. Distribución y usos del mezquite en la República Mexicana

Anexo 15. Capítulo 4

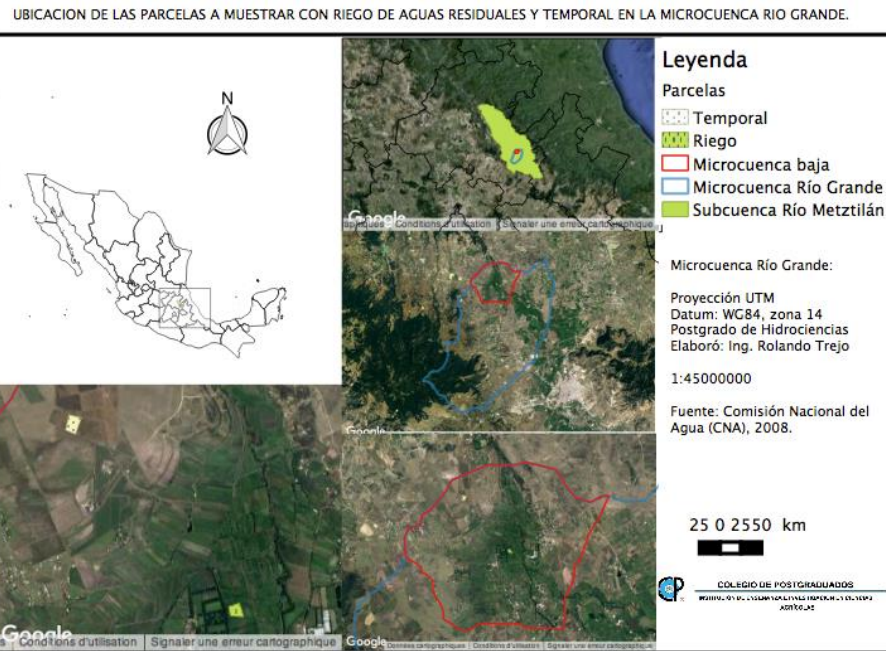


Figura 4.1. Ubicación de las parcelas a muestrear con riego de aguas residuales y secano de la microcuenca baja de Río Grande.



Figura 4.2. Ubicación de la parcela con riego de aguas residuales en la microcuenca baja del Río Grande Tulancingo.



Figura 4.3. Ubicación de la parcela a muestrear correspondiente a agricultura de secano.



Figura 4.4. Distribución de puntos de muestreo en suelo phaeozem irrigado con aguas residuales



Figura 4.5. Distribución de puntos de muestreo en suelo vertisol con agricultura de secano



Figura 4.6. Muestras de suelo de 0-5, 0-10 y 10-40 cm en suelo phaeozem irrigado con aguas residuales



Figura 4.7. Muestras de suelo de 0-5, 0-10 y 10-40 cm en suelo vertisol con agricultura de secano



Figura 4.8. Árbol de *P. laevigata* ubicado en la microcuenca baja del Río Grande Tulancingo



Figura 4.9. Dimensiones de hojas y vainas de *Prosopis laevigata*.



Figura 4.10. Vainas de *Prosopis laevigata*: exocarpo carnoso, leñoso y semillas



Figura 4.11. Semillas de *Prosopis laevigata*



Figura 4.12a. A la izquierda células bacterianas de la cepa Sv; a la derecha cepa A7 de *Pseudomonas fluorescens*.

Figura 4.12b. Semillas inoculadas con la cepa Sv de *Pseudomonas fluorescens*.

A



B



C



Figura 4.12c. A) Tratamiento testigo, B) inoculación con cepa A7, y C) inoculación con cepa Sv de *Pseudomonas fluorescens*.

Figura 4.12d. Tratamiento testigo a las 96 horas de inicio de germinación.



Figura 4.12e. Cepa A7 a las 96 horas de inicio de germinación

Figura 4.12f. Cepa Sv a las 96 horas de inicio de germinación

Figura 4.12. Inoculación de semillas de *Prosopis laevigata* con cepas bacterianas de *Pseudomonas fluorescens*.



Figura 4.13a. Vista exterior de cámara de germinación.

Figura 4.13b. Vista interior de cámara de germinación.

Figura 4.13. Germinación de semillas de *Prosopis laevigata* inoculadas con *Pseudomonas fluorescens*.



Figura 4.14a. Tratamiento testigo



Figura 4.14b. Dilución 10^{-2}



Figura 4.14c. Dilución 10^{-3}



Figura 4.14d. Dilución 10^{-4}



Figura 4.14e. Dilución 10^{-5}



Figura 4.14f. Dilución 10^{-6}



Figura 4.14g. Dilución 10^{-7}

Figura 4.14. Germinación de semillas de *Prosopis laevigata* en diluciones de sulfato de cobre penta hidratado ($\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) desde 10^{-2} hasta 10^{-7} M y tratamiento testigo.



Figura 4.15. Sitio de experimentación.



Figura 4.16. Adición de vermicompost (0-100 ton/ha) a suelos vertizol y phaeozem.



Figura 4.17. Plántulas de *Prosopis laevigata* en camas semillero.



Figura 4.18. Árboles de *Prosopis laevigata* después de 180 días de crecimiento.



Figura 4.19a. Medición de altura.



Figura 4.19b. Medición de diámetro.



Figura 4.19c. Medición de ancho y largo de foliolos.



Figura 4.19d. Determinación de peso anhidro de sección aérea y subterránea.

Figura 4.19. Variables de respuesta evaluadas en árboles de *Prosopis laevigata*