



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO**

Facultad de Estudios Superiores Zaragoza

**Empleo de nopal (*Opuntia streptacantha*) para la
recuperación de cubierta vegetal y el control de
erosión en el Parque Ecológico Cubitos, Pachuca,
Hidalgo**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

BIÓLOGA

P R E S E N T A:

Nancy Viridiana Lázaro Lembrino



**DIRECTOR DE TESIS: DRA. ESTHER MATIANA GARCÍA
AMADOR.**

ÁREA ESPECÍFICA: CIENCIAS AMBIENTALES

2018

**INVESTIGACIÓN FINANCIADA A TRAVÉS DE PAPIIT,
UNAM CON EL PROYECTO: IN218317**



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

DEDICATORIA

A mis padres **Martha Lembrino Chimal** y **Fernando Lázaro Padilla** por acompañarme en el camino guiarme y apoyarme incondicionalmente, les estoy infinitamente agradecida; por darme la oportunidad de ser una profesionalista e impulsarme a cumplir mis sueños, los amo.

A Diego por ser una de las personas más importantes en mi vida y mi mejor hermano.

A mis amigos Gaby y Chucho por su amistad y apoyo, sin ustedes no lo hubiera logrado, somos el mejor equipo.

A Mat porque desde que llegó a mi vida solo me ha impulsado a ser mejor persona cada día

Con cariño agradezco a la Doctora Esther por ayudarme a que este trabajo saliera lo mejor posible por sus consejos y enseñanza que me brindó durante todo este proceso.

A mis sinodales Dr. Arcadio Monroy Ata. M. en C. Balbina Vázquez Benítez, Biól Leticia López Vicente y M. en C. María Beatriz Martínez Rosales por la revisión y comentarios acertados para la mejora de este trabajo

ÍNDICE

1. RESUMEN.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	2
3. MARCO TEÓRICO	3
3.1 Importancia de la cubierta vegetal para controlar la erosión.....	7
3.2 Técnicas de recuperación de la cubierta vegetal	8
3.3 Características generales de <i>Opuntia streptacantha</i>	10
4. JUSTIFICACIÓN.....	12
5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	13
6. OBJETIVO GENERAL	14
6.1 Objetivos Particulares	14
7. HIPÓTESIS	14
8. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	14
8.1 Localización	14
8.2 Clima.....	16
8.3 Geología y Suelo	16
8.4 Hidrología.....	17
8.5 Flora	17
8.6 Fauna	17
9. MATERIAL Y MÉTODOS.....	18
9.1 Método.....	18
9.2 Trabajo de campo.....	18
9.3 Trabajo de laboratorio.....	24
9.4 Análisis estadístico	24
10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	27

10.1. Propiedades físicas y químicas del suelo	27
10.1.1 Parámetros físicos	27
10.1.2 Parámetros químicos	32
10.2 Crecimiento	42
10.2.1 Cobertura.....	42
10.2.2 Altura.....	44
10.2.3 Diámetro	46
10.2.4 Tasa relativa de crecimiento.....	48
10.3 CONTROL DE EROSIÓN	51
10.3.1 Zanjas	51
10.3.2 Registro de erosión edáfica.....	54
10.3.3 Porcentaje de vegetación	55
11. CONCLUSIONES.....	57
12. RECOMENDACIONES	57
13. REFERENCIAS	59
14. ANEXOS	70
14.1 Anexo Relación entre DA y EP.....	70
14. 2 Anexo Análisis Estadístico Cobertura	70
14.2.1 Zona A Análisis Estadístico Cobertura.....	70
14.2.2 Zona B Análisis estadístico cobertura.....	70
14.3 Anexo Análisis Estadístico Altura.....	71
14.3.1 Zona A Análisis Estadístico Altura	71
14.3.2 Zona B Análisis Estadístico Altura	72
14.4 Anexo Análisis Estadístico Diámetro.....	72

14.4.1 Zona A Análisis Estadístico Diámetro	72
14.4.2 Zona B Análisis Estadístico Diámetro	73
14.5 Anexo Análisis estadístico TRC	74
14.5.1 Zona A Análisis estadístico TRC.....	74
14.5.2 Zona B Análisis estadístico TRC.....	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Promedio de los parámetros físicos del suelo al inicio y al final en el Parque Ecológico Cubitos PEC en Pachuca, Hidalgo	27
Tabla 2. Promedio de los parámetros químicos del suelo al inicio y al final en el Parque Ecológico Cubitos PEC en Pachuca, Hidalgo.	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Erosión eólica potencial en México, 2002. Fuente: Semarnat y Universidad Autónoma Chapingo. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana.....	6
Figura 2. Erosión hídrica potencial en México, 2002. Fuente: Semarnat y Universidad Autónoma Chapingo. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana.....	7
Figura 3. Clasificación de <i>Opuntia streptacantha</i> . Fuente: CONABIO, 2018.....	12
Figura 4. Localización del Parque Ecológico Cubitos, ubicado en el estado de Pachuca, Hidalgo.	15
Figura 5. Diseño Experimental	18
Figura 6. Zona de estudio seleccionada. Zona A.....	19

Figura 7. Evaluación del porcentaje de vegetación, por el método de Línea de Canfield.	20
Figura 8. Colocación de reglas graduadas para el registro de la erosión.....	21
Figura 9. Implementación de acolchados.....	22
Figura 10. Implementación de zanjas.....	23
Figura 11. Diagrama de flujo del método.....	26
Figura 12. Disponibilidad de nutrientes en función del pH del suelo. Fuente: Ibáñez, 2018.....	35
Figura 13. Cobertura Promedio de la Zona A durante los tratamientos con acolchados y sin acolchados, durante 660 días de experimentación. Las letras distintas representan las diferencias significativas entre las muestras ($p \leq .05$).	43
Figura 14. Cobertura Promedio de la Zona B durante los tratamientos con acolchados y sin acolchados, durante 660 días de experimentación. Las letras distintas representan las diferencias significativas entre las muestras ($p \leq .05$).	43
Figura 15. Altura promedio de los individuos, con acolchado (experimento) y sin acolchado (testigo), donde podemos observar su evolución durante los 660 días de experimentación en la zona A. Las letras distintas representan las diferencias significativas entre las muestras ($p \leq .05$).	45
Figura 16. Altura promedio de los individuos, con acolchado (experimento) y sin acolchado (testigo), donde podemos observar su evolución durante los 660 días de experimentación en la zona B. Las letras distintas representan las diferencias significativas entre las muestras ($p \leq .05$).	46
Figura 17. Diámetro promedio de los individuos, con acolchado (experimento) y sin acolchado (testigo), donde podemos observar su evolución durante los 660 días de	

experimentación en la zona A. Las letras distintas representan las diferencias significativas entre las muestras ($p \leq .05$).....	47
Figura 18. Diámetro promedio de los individuos, con acolchado (experimento) y sin acolchado (testigo), donde podemos observar su evolución durante 660 días en la zona B. Las letras distintas representan las diferencias significativas entre las muestras ($p \leq .05$).....	48
Figura 19. Tasa relativa de crecimiento promedio de los individuos, con acolchado (experimento) y sin acolchado (testigo), donde podemos observar su evolución durante 660 días del año en ambas zonas A y B. Las letras distintas representan las diferencias significativas entre las muestras ($p \leq .05$).....	50
Figura 20. Acumulación de materiales disgregados (clastos) en las zanjas de la Zona A de estudio.	51
Figura 21. Zanja 1 etapa inicial.....	53
Figura 22. Zanja 1 etapa final.....	53
Figura 23. Zanja 2 etapa inicial.....	53
Figura 24. Zanja 2 etapa final.....	53
Figura 25. Zanja 3 etapa inicial.....	53
Figura 26. Zanja 3 etapa final.....	53
Figura 27. Zanja 4 etapa inicial.....	53
Figura 28. Zanja 4 etapa final.....	53
Figura 29. Registro de la erosión en la zona A.....	54
Figura 30. Registro de la erosión en la zona B.	54
Figura 31. Zona A etapa inicial.....	56

Figura 32. Zona A etapa final.....	56
Figura 33. Zona B etapa inicial.....	56
Figura 34. Zona B etapa final.....	56

1. RESUMEN

Uno de los principales problemas que se presenta en el Parque Ecológico Cubitos PEC, en Pachuca, Hidalgo, es la erosión ocasionada por la falta de una cubierta vegetal que ayude a estabilizar el suelo. Es por eso que el objetivo de este trabajo, fue ayudar a recuperarla, a través del replante de *Opuntia streptacantha*, dichos ejemplares, fueron colectados dentro del PEC. La metodología consistió en el replante de ejemplares de *Opuntia streptacantha* en dos zonas (Zona A y Zona B) con problemas de erosión y con poca o nula presencia de vegetación, asimismo se colocaron zanjas en lugares con vegetación y sin vegetación y mediante el método de estacado; se colocaron reglas para medir la acumulación de suelo en las zonas. Mes con mes durante 17 meses (660 días), se tomó el registro de las medidas de cobertura, altura y diámetro para cuantificar el crecimiento de cada uno de los individuos. Al final del trabajo se obtuvo una supervivencia del 100% tanto en ejemplares con acolchado y sin acolchado. Así también se observó un aumento en el porcentaje de materia orgánica, magnesio, potasio y fósforo. Con respecto a las técnicas de bioingeniería, se notó que el acolchado con yute no contribuyó al mejor crecimiento de los ejemplares de *Opuntia streptacantha*, pues en general los individuos sin acolchado crecieron más que los que tenían acolchado. Así también la presencia de zanjas no fue un factor determinante para que los ejemplares crecieran más, sin embargo, fueron de gran utilidad para protegerlos, y ayudaron a retener las partículas de suelo que provenían de la parte alta de las laderas. En conclusión, el acolchado y las zanjas contribuyeron al control de la erosión; *Opuntia streptacantha* ayudó al aumento de la cubierta vegetal en ambas zonas, se observó un aumento de 18.11% en la Zona A y 11.65% en la Zona B. Sin embargo, se recomienda aumentar el número de ejemplares con acolchados/sin acolchados, reglas y zanjas, para que el trabajo sea más representativo e implementar otro tipo de acolchado como puede ser el acolchado plástico.

2. INTRODUCCIÓN

México posee 200 millones de hectáreas de suelo, de las cuales solo 22 millones son fértiles, sin embargo, éste se reduce considerablemente ante la falta de una gestión adecuada del suelo, pues "más del 45% de la superficie del país está deteriorada por erosión o por degradación química", destaca la Academia Mexicana de las Ciencias. Para que se forme un centímetro de capa fértil del suelo se requieren más de 200 años, y para que éste sea productivo se necesitan por lo menos 20 centímetros de espesor; es decir, se necesitan 4000 años o más para tener un suelo productivo; en contraste, en menos de 15 años se podría perder ese suelo por un inadecuado manejo (Méndez-Robles, 2015).

Uno de los factores más importantes para la conservación del suelo está directamente relacionado con la preservación de la vegetación; sin embargo, las causas que afectan la conservación edáfica han sido diversas, algunas de ellas de impacto directo y otras indirectas. Las principales causas son, el desmonte, el sobrepastoreo, la tala desmedida, los incendios y la explotación selectiva de algunas especies útiles. Asimismo, la modificación o eliminación del ambiente ecológico necesario para el desarrollo de una determinada comunidad biótica, que causan "su desaparición automática" y afectan directamente al suelo; genera modificaciones del régimen hídrico de la localidad y del microclima (Rzedowski, 2006).

La Restauración Ecológica o actualmente Recuperación del Capital Natural (Aronson, Blignaut, Millton y Clewell, 2006) es una forma de revertir el impacto ambiental. Jackson (1992), la define como el proceso de recuperar un ecosistema deteriorado, imitando la estructura, función, diversidad y dinámica del ecosistema original a recuperar, en términos ecológicos, a través del establecimiento de una cubierta vegetal protectora, compuesta de especies autóctonas y adaptadas al sitio, que faciliten el desarrollo de comunidades

sucesoras y el establecimiento de organismos del suelo y fauna local (Rondón y Vidal, 2005).

La revegetación controla la erosión al incrementar la infiltración y reducir la escorrentía, ya que ofrece protección física al suelo frente al impacto de la lluvia; también reduce la velocidad del agua al aumentar la resistencia hidráulica del terreno; por lo tanto, disminuye la capacidad erosiva del agua. Si la velocidad se ha reducido lo suficiente, se sedimenta una parte de los materiales arrastrados. A partir de este momento, se empieza a regenerar la vegetación natural (Hudson, 2006).

Dentro de las principales alternativas para la recuperación integral de un suelo se encuentra la bioingeniería. Ésta es una herramienta que consiste en la utilización de elementos, vivos, inertes y geotextiles, que sirven de refuerzo, como drenajes hidráulicos y barreras para contener el suelo y controlar la erosión; las cuales se utilizaron en este trabajo para mejorar las características del suelo y favorecer el establecimiento de la cubierta vegetal.

3. MARCO TEÓRICO

Como parte del Inventario Nacional Forestal y de Suelos 2015, se realizó un estudio para evaluar la degradación de los suelos causada por el ser humano. Según este trabajo, el 45.2% de la superficie del país presentaba degradación de origen antrópico. El nivel de degradación predominante era de ligero a moderado, mientras que los procesos más importantes de degradación fueron la química (principalmente por la pérdida de fertilidad), la erosión hídrica y la erosión eólica. Estos tres procesos fueron responsables del 87% de los suelos degradados en el país. Entre las principales causas de degradación se identificaron el cambio de uso del suelo para fines agrícolas y el sobrepastoreo (17.5% en ambos casos), la deforestación (7.4%) ocupa el tercer lugar, seguida de la urbanización (1.5%); todas estas causas tienen una importante relación

con la afectación de la cubierta vegetal, responsable de la conservación del suelo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales [SEMARNAT], 2018).

La erosión del suelo es definida como un proceso de desagregación, transporte y deposición de materiales del suelo por agentes erosivos; actúa de manera selectiva, arrastrando las partículas más finas y más reactivas del suelo (arcilla y materia orgánica) y dejando las partículas más gruesas, pesadas y menos reactivas; de esta manera la erosión provoca una disminución de la concentración de nutrientes en el suelo degradado remanente (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2017).

Como resultado de la evaluación de la pérdida de suelo en la República Mexicana, se identificaron los riesgos de erosión hídrica y eólica que, potencialmente, podrían ocurrir en el país, y se describen a continuación.

Erosión hídrica: La cual está relacionada con distintos procesos, entre los más comunes se encuentran:

- La erosión por salpicadura, que consiste en la degradación y el movimiento de partículas del suelo, causados por el impacto de las gotas de lluvia.
- La erosión laminar, es la eliminación de una capa delgada relativamente uniforme de suelo superficial, debido a la lluvia y a la escorrentía superficial.
- La erosión en surcos o regueros, es un proceso habitual en los terrenos con pendiente, especialmente los labrados recientemente, en los que se forman, aleatoriamente, pequeños, pero numerosos canales, de pocos centímetros de profundidad; tiene lugar principalmente en cultivos recientemente abandonados y taludes de carretera.
- La erosión en cárcavas, es un proceso en el cual el agua se acumula y crea canales estrechos, arrastrando en un corto periodo el suelo de estos canales hasta una profundidad considerable, haciendo imposible la labor

agrícola con maquinaria ordinaria.

- La erosión en túnel o subfusión, que se produce en los suelos propicios para la formación de conductos subterráneos. A menudo se trata de suelos que contienen capas arcillosas que se contraen o expanden en función de la humedad o capas que se dispersan espontáneamente con el agua durante las lluvias (Imeson y Curfs, 2018).

Erosión eólica: Es la remoción del suelo por acción del viento; es mayor a medida que disminuye la cubierta vegetal, por haber menor resistencia para que se inicie el movimiento; los factores que afectan a la erosión eólica son clima, suelo y vegetación; la topografía, en ocasiones, no es muy importante, aunque la longitud de la superficie erosionable tiene gran influencia en el movimiento del suelo (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación [SAGARPA], 2018).

Los riesgos de pérdida de suelo por erosión potencial eólica en la República Mexicana fueron del 89% (ligera 6.5%, moderada 30.6%, alta 33.6% y muy alta 18.2%) en el territorio nacional (Figura 1). Se presentó particularmente en la franja norte del país, desde Zacatecas hasta el Norte de Chihuahua. También cubriendo la porción costera y el Desierto Sonorense, la costa del Golfo de California y la costa del Pacífico en Baja California Sur. Con excepción de los estados de Chiapas y la Ciudad de México, en el resto de los estados se presenta riesgo de erosión eólica en más del 60% de su superficie. Los estados de Aguascalientes, Baja California, Baja California Sur, Coahuila y Sonora presentaron afectaciones de prácticamente el 100% (SEMARNAT, 2018).

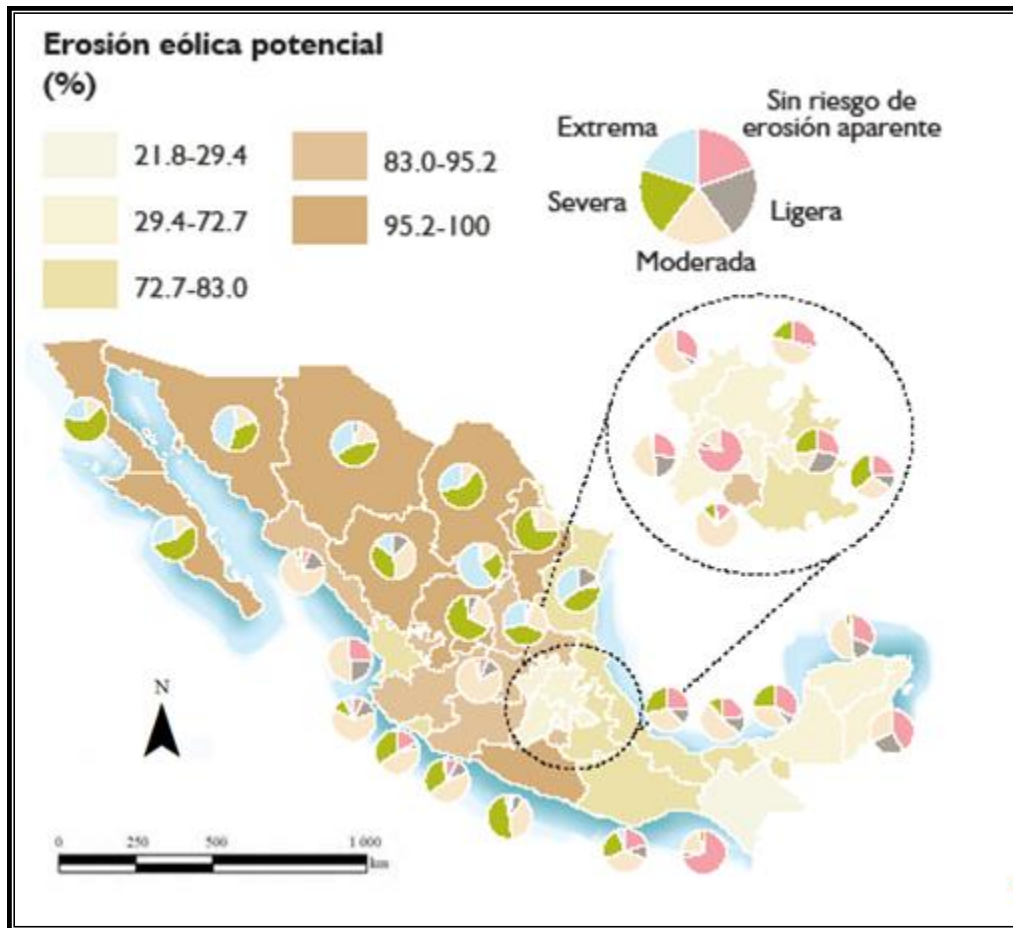


Figura 1. Erosión eólica potencial en México, 2002. Fuente: Semarnat y Universidad Autónoma Chapingo. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana.

A nivel nacional, la superficie con riesgos de pérdida de suelo ocasionada por el agua fue de 42% (ligera 10.9%, moderada 20.5%, alta 7.8% y muy alta 2.8%) (Figura 2). Yucatán, Quintana Roo, Campeche, Tabasco y Baja California Sur presentaron más del 50% de su superficie sin riesgo aparente de erosión hídrica, mientras que Guerrero, Puebla, Morelos, Oaxaca y el Estado de México lo presentaron en más del 50% de su superficie (SEMARNAT, 2018).

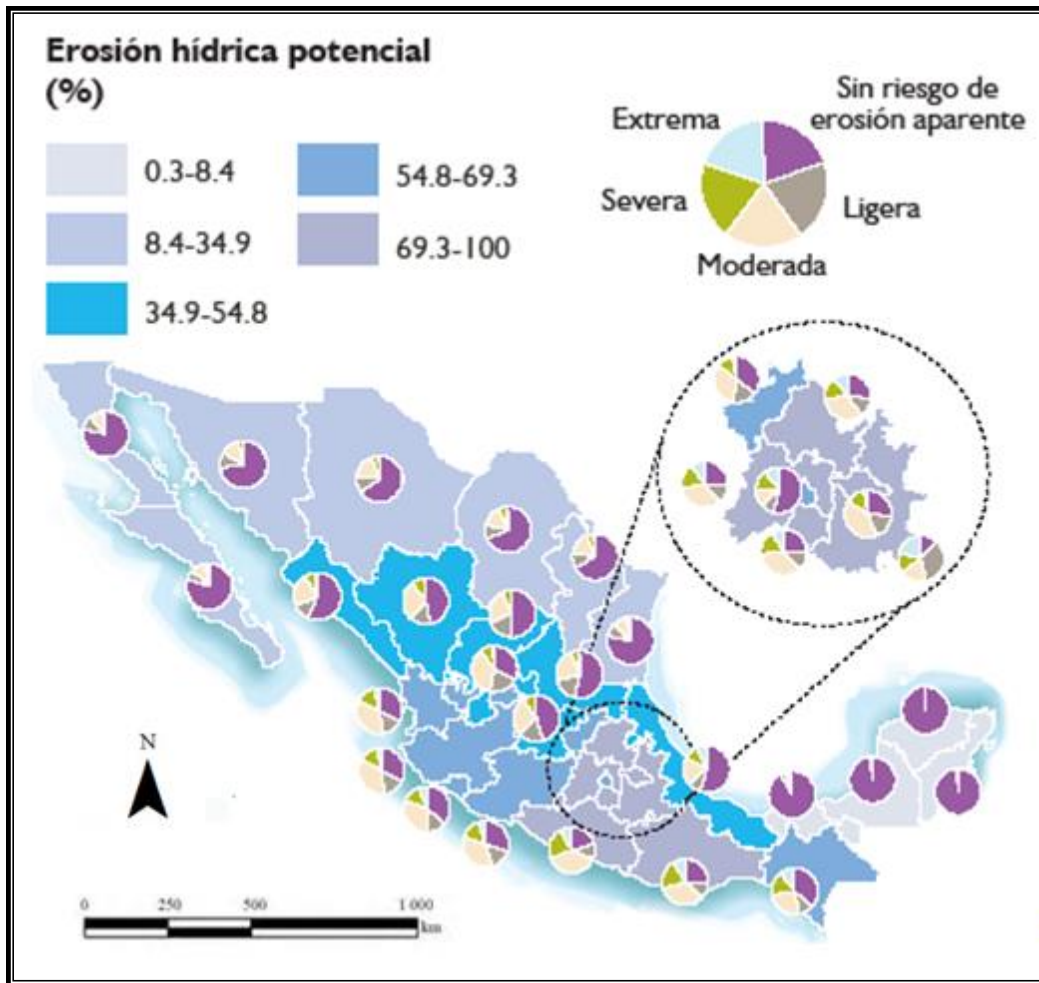


Figura 2. Erosión hídrica potencial en México, 2002. Fuente: Semarnat y Universidad Autónoma Chapingo. Evaluación de la pérdida de suelo por erosión hídrica y eólica en la República Mexicana.

3.1 Importancia de la cubierta vegetal para controlar la erosión

La vegetación juega un papel primordial en la conservación del suelo, algunas de las principales ventajas de la cubierta vegetal son, reducción de las pérdidas de suelo causada por la erosión, ya que actúa a través del sistema radical que contribuye a inmovilizar los materiales del suelo. Las raíces permiten a las plantas sujetarse al suelo y adquirir el agua y los nutrientes necesarios para realizar sus funciones vitales, al mismo tiempo, desempeñan una función ecológica importante porque su estructura forma una especie de malla que

protege la tierra, evitando que se desprenda ante los elementos que la golpean; adicionalmente, al adherirse a las partículas del suelo, lo mantienen unido como si tuviese una especie de pegamento y, por último, absorben el exceso de agua que al acumularse debilita el terreno haciendo que se desprenda, como en el caso de las pendientes inclinadas. Entre mayor es la cantidad de raíces a lo largo y a lo ancho, más protegido queda el suelo porque más grande es la malla que lo cubre. De ahí que se diga que las raíces son retenedoras de suelos. Su importancia es tal que, aun cuando se eliminen los vegetales que cubren un suelo, sus raíces enterradas pueden mantenerlo sujeto durante meses o incluso años, mientras permanezcan dentro de aquél sin desintegrarse (Valdés, 2010)

Por otra parte, la cubierta vegetal contribuye al incremento de la infiltración de agua en el suelo, especialmente en periodos intensos de lluvia, también, ayuda a reducir la evaporación del agua del suelo en la primavera y verano y como consecuencia de estas condiciones la biodiversidad aumenta.

3.2 Técnicas de recuperación de la cubierta vegetal

El control de la erosión se puede llevar a cabo mediante la Ingeniería Biológica o Bioingeniería, la cual comprende una serie de técnicas que utilizan material vegetal vivo como elemento de construcción, solo o combinado con materiales inertes, dentro del campo de la restauración ambiental. La ingeniería se utiliza también en todos los ámbitos de obra civil, especialmente en el ámbito de consolidación de taludes y riberas (Sangalli, 2008).

Las técnicas de bioingeniería se pueden dividir en cuatro grandes grupos:

Técnicas de recubrimiento: Son técnicas destinadas a evitar la erosión superficial. Dentro de este grupo se distinguen: siembras de diversos tipos, con o sin acolchados, así como traslado de fragmentos de plantas: rizomas y estolones, principalmente

Técnicas de estabilización: Estas técnicas permiten estabilizar el terreno hasta 2 m de profundidad y se basan en la disposición de plantas leñosas obtenidas por reproducción vegetativa y colocada en filas horizontales. Las plantas tienen la capacidad de emitir raíces adventicias de manera que formen un entramado que permita la sujeción del terreno. Dentro de estas técnicas se encuentran:

- Estaquillados de sauces.
- Lechos de ramaje.
- Sucesión de estacas y fajinas o ribalta viva.

3.- Técnicas mixtas: Estas técnicas, a diferencia de las comentadas anteriormente conjugan la utilización de elementos vegetales con los materiales inertes tales como: madera, acero galvanizado, piedra, hormigón, etc. En estas técnicas, el material inerte actúa como estabilizador hasta que las plantas sean capaces de realizar esta función

Dentro de estas técnicas se encuentran:

- Entramados de madera.
- Peldaños de leña.
- Enrejados vivos.
- Tierras reforzadas o muros verdes.
- Mallas tridimensionales, geoceldas, etc.
- Gaviones revegetados.

4.- Técnicas complementarias: Junto con las técnicas constructivas propiamente dichas, se deben utilizar otras técnicas que completan las anteriores, pero que no cumplen una finalidad de estabilización o protección frente a la erosión; son por ejemplo la plantación de especies leñosas con el fin de acelerar el desarrollo de la vegetación, la creación de barreras antirruído, los drenajes, las rampas para peces, etc.

La combinación de unas o más técnicas permite la obtención de resultados que unen los aspectos técnicos de estabilización del suelo con los paisajísticos y ecológicos (Sangalli, 2008).

3.3 Características generales de *Opuntia streptacantha*.

Opuntia streptacantha, pertenece a la subfamilia Opuntioideae, esta subfamilia se caracteriza porque los individuos son cactáceas arborescentes, arbustivas y hasta rastreras, presenta tallos cilíndricos, claviformes, casi globosos o en cladodios, más o menos ramificados. Hojas con limbo pequeño, cilíndrico-subulado y caduco; sólo en *Pereskioopsis* es laminar aunque carnosos; tubérculos más o menos prominentes. Aréolas circulares hasta elípticas, con fieltro, pelos, glóquidas y espinas. Espinas más o menos largas y delgadas, a veces con vaina papirácea. Flores diurnas o vespertinas, sésiles, una en cada areola, naciendo hacia la extremidad de los tallos; ovario infero, pericarpelo con podarios más o menos prominentes, con aréolas que llevan glóquidas y en ocasiones espinas: receptáculo corto; perianto rotáceo, regular. Fruto soco o carnosos, a veces prolífero. Semillas de color café o negras, discoides, con arilo muy duro, globoso y piloso, embrión curvo, cotiledones grandes, perisperma bien desarrollado (Bravo-Hollis, 1978).

Plantas simples arborescentes de hasta 5 m de altura. Tallos ovoideos, aerolas circulares, con lana café o negra y una o dos espinas pilosas delgadas y oscuras, en forma de pelos reflejos. Espinas de 3 a 6 cm de largo, blanquecinos o pardas. Gloquidas oscuros a amarillos, de 1 a 3 cm de largo. Flores amarillas que se tornan anaranjadas después de la antesis. Frutos ligeramente globosos (Herrera-Ruiz, Pacheco, García y Saavedra, 2015).

Aspectos ecológicos

El género *Opuntia* tiene gran afinidad por los suelos derivados de calizas, aunque también se desarrollan sobre los de origen ígneo. Es de gran

importancia que sean suelos francos, ya sea franco-areno-arcillosos o arenas francas; su pH debe oscilar entre 6.5 y 8.5, se adaptan a un amplio rango de humedad, ya que prosperan con precipitaciones medias anuales desde 150 hasta 800 mm. Por lo general, se desarrollan entre los 800 y 1800 m de altitud, aunque pueden crecer fuera de este rango (Cervantes, 2017). Dentro de los servicios ambientales que proporciona se encuentran los siguientes: retiene el suelo, capta gran cantidad de agua y es fuente de alimento para especies animales (Herrera-Ruiz, et al., 2015).

En México se encuentra en los estados de Aguascalientes, Baja California Norte y Sur, Chiapas, Chihuahua, Coahuila De Zaragoza, Colima, Ciudad de México, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Michoacán De Ocampo, Morelos, México, Nayarit, Oaxaca, Puebla, Querétaro De Arteaga, Quintana Roo, San Luis Potosí, Sonora, Tamaulipas, Veracruz De Ignacio De La Llave, Zacatecas (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad [CONABIO], 2018).

Opuntia streptacantha

Nopal de Cardón



División	Magnoliophyta
Clase	Magnoliopsida
Orden	Caryophyllales
Familia	Cactaceae
Subfamilia	Opuntioideae
Tribu	Opuntieae

Figura 3. Clasificación de *Opuntia streptacantha*. Fuente: CONABIO, 2018.

4. JUSTIFICACIÓN

Uno de los principales problemas que se presenta en el Parque Ecológico Cubitos PEC, es la erosión ocasionada por la falta de una cubierta vegetal que ayude a estabilizar el suelo, en gran medida a causa de los incendios que se han presentado a lo largo del tiempo; aunque en general los incendios forestales no causan erosión por sí mismos, otros factores como la presencia de laderas inclinadas y lluvias torrenciales, no permiten a la vegetación recuperarse rápidamente, esto ha provocado la presencia de cárcavas, es por esto que es de suma importancia la implementación de técnicas de bioingeniería, como los acolchados de yute y zanjas, las cuales ayudarán a mantener la humedad, retención y conservación del suelo del área deteriorada por los fenómenos

antes descritos, ayudando de esta manera a la aceleración del proceso de recuperación de la cubierta vegetal.

5. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los más graves problemas que impacta amplias extensiones de la superficie terrestre es la degradación de la tierra, que puede referirse a la reducción temporal o permanente de la capacidad productiva de ésta, como resultado de la acción humana (Bot, Nachtergaele y Young 2000). Este problema afecta a una sexta parte de la población mundial, al 70 % de las tierras áridas y a alrededor del 25 % de la superficie total del planeta, y de acuerdo con Shah (2010) y Aldamo (2003), las limitaciones medioambientales son consideradas como una de las principales causas del movimiento de poblaciones, especialmente en zonas secas, donde el agua y no la tierra es el principal factor limitante. De acuerdo con Gnacadja (2009), conservar la tierra y el agua es igual a seguridad en un futuro común.

En el presente trabajo se tiene como meta responder a las siguientes preguntas de investigación:

- A) ¿Cuál será el efecto del replante de individuos de *Opuntia streptacantha* en las zonas de estudio?
- B) ¿El uso de acolchados contribuirá al crecimiento de los ejemplares replantados, de *Opuntia strepacantha*?
- C) ¿Las zanjas serán de utilidad para el establecimiento de los ejemplares?

6. OBJETIVO GENERAL

Recuperar la cubierta vegetal del "Parque Ecológico Cubitos" a través del replante de *Opuntia streptacantha* y la implementación de acolchados y zanjas.

6.1 Objetivos Particulares

- Evaluar el crecimiento y la supervivencia de nopal con la técnica de acolchado y zanjas para la recuperación de una cubierta vegetal.
- Evaluar el porcentaje de cubierta vegetal antes y después de aplicar las técnicas en 2 zonas de 24 m² respectivamente.
- Evaluar la erosión del suelo por el método de estacado, realizando una comparación con la vegetación.

7. HIPÓTESIS

El uso de ejemplares *Opuntia streptacantha* ayudará al control de la erosión y aumentará la cubierta vegetal, por lo que se mejorarán las condiciones del suelo, pues se espera que los nopales funjan como retenedores de suelo y humedad en las zonas de estudio.

8. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

8.1 Localización

El Parque Ecológico Cubitos PEC, es un área natural protegida, ubicada en el Sur de la ciudad de Pachuca de Soto, Hidalgo, México. Fue decretado Parque Estatal el 30 de diciembre del 2002, en una superficie total de 90 hectáreas, las que corresponden a un matorral xerófilo (Turística Hidalgo, 2018).

El parque se localiza en la porción Noreste de la Cuenca del Valle de México en las siguientes coordenadas 20° 06' 33", 20° 07' 39" Latitud Norte y 98° 45' 00", 98° 44' 60" Longitud Oeste (Figura 4). Pertenece al sector de parteaguas de la

Región Sur de la Sierra de Pachuca y los lomeríos que lo conforman están en la provincia ecológica de los Lagos y Volcanes de Anáhuac (Secretaría de Desarrollo Social [SEDESOL], 1983). Está dividido en tres zonas: de recuperación, de uso restringido y de uso intensivo; las dos primeras corresponden a la reserva ecológica del Parque y la última está compuesta por una casa ecológica, un museo natural, un tuzuario, serpentario, acuario, un jardín botánico, un laberinto, un bosquete, 17 invernaderos, una tirolesa de 200 metros, un área de eco juegos, y por último el Centro de Información y Documentación del Medio Ambiente (Turística Hidalgo, 2018).

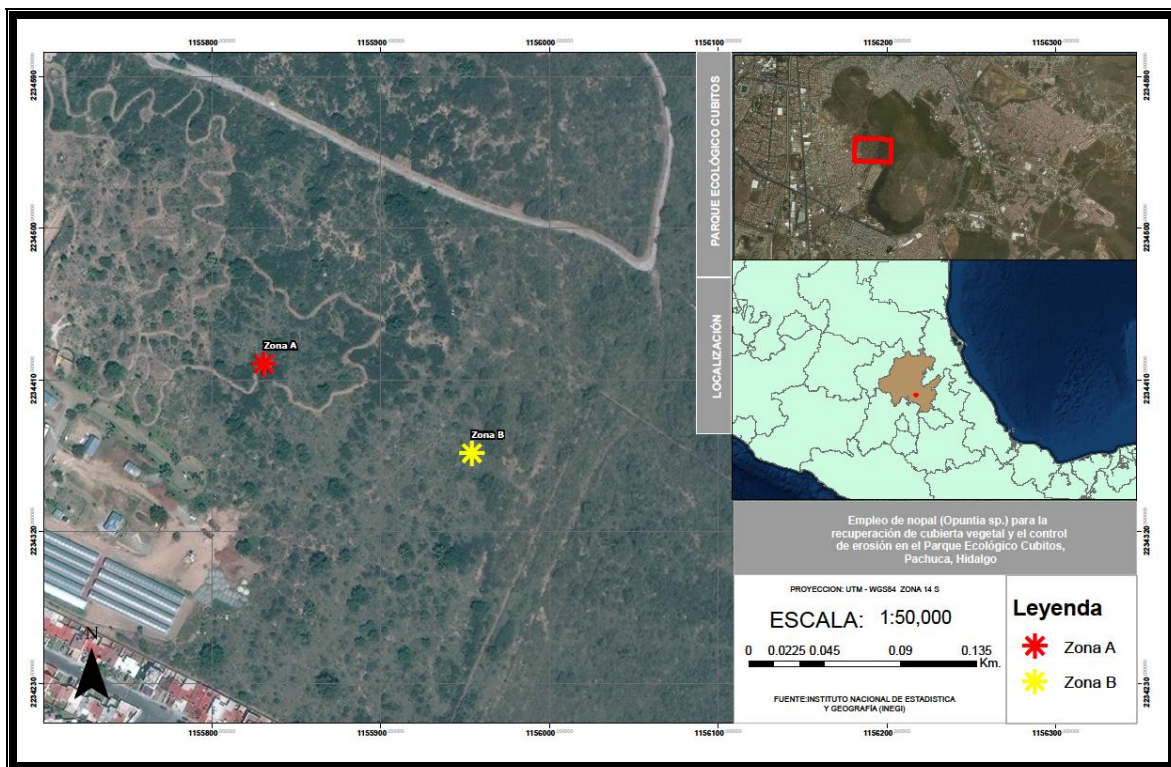


Figura 4. Localización del Parque Ecológico Cubitos, ubicado en el estado de Pachuca, Hidalgo.

8.2 Clima

De acuerdo al sistema de clasificación de Köppen modificado por García (1981), la región de estudio está comprendida entre los 2245 a los 2495 m de altitud, presenta clima de subtipo BS1 k w, caracterizado por ser semiseco, templado con verano cálido. El promedio de la temperatura es de 16.5 °C; la temperatura máxima extrema registrada en el mes de abril es 27.95 °C y la mínima extrema en febrero, 1.01 °C. El clima seco de esta región se debe principalmente a que las corrientes de viento cargado de humedad provenientes del Golfo de México chocan contra las montañas de la sierra de Pachuca, pasando al otro lado en forma de vientos secos, generando el clima semiárido que lo caracteriza. A este fenómeno se le denomina efecto de sombra de montaña o sombra orográfica (González-Medrano, 1998). Los meses más lluviosos son junio con intervalo de lluvias de 59.72 mm a 61.38 mm, cabe mencionar que el mes de diciembre registra los valores mínimos de precipitaciones. Las heladas se registran en enero, seguido de diciembre y febrero.

8.3 Geología y Suelo

Las condiciones geológicas-estructurales del Parque Ecológico Cubitos PEC están controladas principalmente por una estructura intrusiva de composición riolítica en forma de dique altamente silicificado (roca maciza), que se emplazó en una zona de falla preexistente en el paquete de rocas andesíticas. De acuerdo a la carta geológica (Dirección General de Geografía [DGG], 1993) el Parque presenta rocas ígneas y sedimentarias, estableciéndose tres tipos principales de rocas y sedimentos: derrames de lava riolítica, depósitos de flujos piroclásticos-andesíticos y depósitos fluviales de régimen torrencial consistentes en una alternancia de horizontes muy laminados, cortados por superficies de erosión con niveles conglomeráticos. Normalmente estos depósitos rellenan las depresiones existentes en los distintos cuerpos de lava riolítica.

De acuerdo a la clasificación de los suelos de la carta edafológica elaborada por la Dirección General de Geografía (DGG, 1983), prevalecen los suelos denominados Vertisol-Pélico y Feozem-Háplico.

8.4 Hidrología

El territorio del Parque se localiza en la Subcuenca del Río Avenidas, la cual pertenecen a la Región Hidrológica 26 Pánuco (Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI], 1990). La baja precipitación y el lento escurrimiento del agua no permiten la formación de cuerpos hídricos importantes. Los principales ríos de área y que drenan al seno de la Cuenca del Valle de México son el río de las Avenidas Calabazas.

En el parque se encuentran pocos reservorios que contengan agua durante todo el año, entre ellos destaca El Pirul, ubicado en la parte Suroeste, limitando la zona de uso intensivo y zona de uso de recuperación. También existen barrancas como: El Romerillo y La Liebre, las cuales reciben el agua que escurre de forma laminar de los cerros de Cubitos y El Zopilote (INEGI, 2004)

8.5 Flora

La vegetación dentro del Parque Ecológico Cubitos de Pachuca, Hidalgo, corresponde a la vegetación denominada como matorral xerófilo (Rzedowski, 2006), y las asociaciones presentes son matorral micrófilo, matorral rosetófilo y matorral crasicaule. Las familias mejor representadas son Asteraceae, Cactaceae, Poaceae y Leguminoseae (Pérez-Cruz y Rodríguez-González, 2010).

8.6 Fauna

Con respecto a la fauna silvestre la información es escasa, sin embargo se encuentra que el grupo de los anfibios está representado por 2 especies, los reptiles por 6 especies; las aves por 23 especies y los mamíferos presentan 20 especies (Pérez-Cruz y Rodríguez-González, 2010).

9. MATERIAL Y MÉTODOS

9.1 Método

El diseño experimental del trabajo de campo consistió en un análisis que se realizó en dos zonas de trabajo Zona A y Zona B de 24 m² respectivamente las cuales al inicio presentaron nula o poca vegetación. Dentro de éstas dos zonas se plantaron 12 ejemplares en total, pertenecientes a la especie *Opuntia streptacantha*, dentro de los cuales se implementaron 6 ejemplares con acolchados CA, y 6 ejemplares sin acolchado SA.

Al mismo tiempo se realizaron 4 zanjas y se pusieron 4 reglas que fueron usadas para medir la erosión, las cuales se colocaron en la zona A y B con vegetación (presencia de *Opuntia*) y sin vegetación (sin *Opuntia*).

Zonas \ Técnicas	Acolchados		Zanjas		Reglas	
	Con acolchado	Sin acolchado	Nº	Profundidad (cm)	con vegetación	sin vegetación
zona A	3	3	2	8	2	2
zona B	3	3	2	8	2	2

Figura 5. Diseño Experimental

9.2 Trabajo de campo

Selección del sitio

Se realizó un recorrido por el Parque Ecológico Cubitos PEC, seleccionando dos zonas de 24 m², zona A y zona B, respectivamente, las cuales presentaron escasa o nula cubierta vegetal y erosión del suelo (Figura 6).



Figura 6. Zona de estudio seleccionada. Zona A

Selección de especies: durante el recorrido se seleccionaron 12 ejemplares de la especie *Opuntia streptacantha*, que se encontraron dentro del Parque, los cuales presentaron una altura promedio de 20 cm, se consideró que esa especie está mejor adaptada a las condiciones de la zona y es más fácil su supervivencia; estas cactáceas son resistentes a la sequía edáfica y a condiciones climáticas extremas, con reproducción vegetativa por lo que se recomiendan para emplearlas en la recuperación de la cubierta vegetal (Pérez-Cruz y Rodríguez-González, 2010).

Evaluación del porcentaje de vegetación: Para evaluar el porcentaje de vegetación se hicieron líneas de intercepción, propuesto por Canfield. Este método se aplica para estudiar la vegetación densa dominada por arbustos y para caracterizar la vegetación graminoide (Canfield, 1941). El método de líneas de intercepción produce datos para cálculos de cobertura y frecuencia de especies (Smith, 1980). Se realizaron líneas de Canfield (Canfield, 1941) de 10 metros en cada zona de estudio (Figura 7), tomando en cuenta que dentro de la zona de estudio, la vegetación era nula o escasa, compuesta por herbáceas. En las líneas de muestreo, se procedió a contar todas las intercepciones o proyecciones de las plantas (ramas, tallos, hojas, flores) sobre la línea y se registró la información.



Figura 7. Evaluación del porcentaje de vegetación, por el método de Línea de Canfield.

Muestreo de suelo: se colectó suelo superficial de 0 a 20 cm de profundidad. Estas muestras se tomaron en los surcos donde fueron colocados los nopales al inicio y al final del experimento, en cada una de las áreas de trabajo; esto fue con la finalidad de formar una muestra compuesta de 1.2 kg, este suelo se almacenó en bolsas, y en el laboratorio se realizaron los análisis físicos y químicos de acuerdo a la NOM-021 RECNAT-2000. para evaluar la variación en la concentración de nutrientes, densidad aparente, densidad real, textura, pH, % de materia orgánica, conductividad eléctrica, capacidad de intercambio catiónico, espacio poroso, capacidad de campo, sodio, fósforo, potasio, calcio, magnesio y carbonatos totales. Cabe mencionar que estos análisis se realizaron con el suelo colectado, al inicio y al final del experimento para su posterior comparación.

Evaluación de la erosión: Se evaluó la erosión del suelo por el método de estacas (reglas graduadas). Que es la modificación del método de los clavos con rondanas (Colegio de Postgraduados, 1991). Es un método directo para la

evaluación de la erosión hídrica (Figura 8), éste método suelen proporcionar datos precisos, pero algunas de las desventajas son, que es laborioso, requieren mucho tiempo y es costoso (Pando-Moreno, Gutiérrez-Gutiérrez, Maldonado-Hernández, Palacio-Prieto y Estrada-Catillón, 2003). Se utilizaron reglas de fierro de 10 cm de largo, las cuales se introdujeron en el suelo hasta la marca de los 3 cm. Se colocaron tres repeticiones en distintos sitios, con y sin vegetación



Figura 8. Colocación de reglas graduadas para el registro de la erosión.

Implementación de las técnicas de bioingeniería

Acolchado: La técnica de los acolchados sirve para retener suelo y proporcionar humedad a las plantas. La implementación de la técnica consistió en remover un poco de suelo, hasta formar una cavidad de aproximadamente 20 cm de profundidad. En total se hicieron 12 cavidades, para cada uno de los ejemplares

de *Opuntia streptacantha*. Posteriormente se cubrió el sustrato con yute el cual se fijó al suelo con rocas, después de haber sido regada la planta, en la Figura 9 se puede observar un individuo con implementación de acolchado.



Figura 9. Implementación de acolchados.

Zanjas de coronación para control de la erosión: Se realizaron 4 canales o surcos (Figura 10), en la parte alta del terreno con 8 cm de profundidad 80 cm de longitud y 10 cm anchura, con el fin de proteger las zonas de estudio de las lluvias fuertes y retener el suelo con el propósito de desviar el agua proveniente de las partes altas sin causar daños de erosión en partes bajas (FAO, 2000). Al final se midió con una regla, la disminución de la profundidad de dicha zanjas para observar la cantidad de suelo retenido.



Figura 10. Implementación de zanjas.

Medición de ejemplares

Altura: Durante 17 meses (660 días) se tomaron registros mensuales de supervivencia y altura de los 12 ejemplares, para evaluar su crecimiento. El riego de las plantas se llevó a cabo cada mes en horario diurno, se regaba a manera de una fina lluvia tratando de que el agua no tocara a la planta.

Cobertura: La cobertura de *Opuntia streptacantha* se determinó mediante la medición del diámetro mayor y menor tomando como referencia el centro de la planta mediante la fórmula:

$$Co = \pi r^2$$

Co=Cobertura

r= radio de la planta, en donde r =

$$\frac{\text{diámetro mayor} + \text{diámetro menor}}{4}$$

Para obtener la cobertura total, se obtuvo el promedio de coberturas de *Opuntia streptacantha* con acolchado y *Opuntia streptacantha* sin acolchado por cada zona de estudio

Tasa de crecimiento relativo: Al final del experimento, después de 17 meses, se determinó la tasa de crecimiento relativo de las plantas, tanto de ejemplares de *Opuntia streptacantha* con acolchado y sin acolchado para tener una visión integral de su desarrollo, tomando en cuenta el incremento (exponencial) en tamaño, en un intervalo de tiempo dado. Por medio de la siguiente ecuación:

$$\text{TCR} = \frac{\ln(\text{altura final}) - \ln(\text{altura inicial})}{\text{número de días de cultivo}}$$

9.3 Trabajo de laboratorio

En el laboratorio se realizaron los análisis físicos y químicos de acuerdo a la NOM-021 RECNAT-2000. Para evaluar la variación experimental, estos análisis se realizaron una vez al inicio y una vez al final del estudio para los siguientes parámetros:

- concentración de nutrientes (P, K, Ca, M) en las diferentes áreas de trabajo (AS-12,13);
- pH(AS-02);
- conductividad eléctrica(AS-18);
- textura(AS-09);
- densidad aparente método de la probeta (Ríos, 1985);
- densidad real método del picnómetro (Ríos, 1985);
- materia orgánica (AS-07).

9.4 Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante un Análisis de Varianza (Anova) de un factor utilizando el programa de Statgraphics Centurión XVI. Los análisis se realizaron por separado para cada una de las zonas, comparando ejemplares con acolchado y sin acolchado de cada una.

A continuación en la Figura 11 se presenta el diagrama de flujo del método experimental utilizado para el presente proyecto:

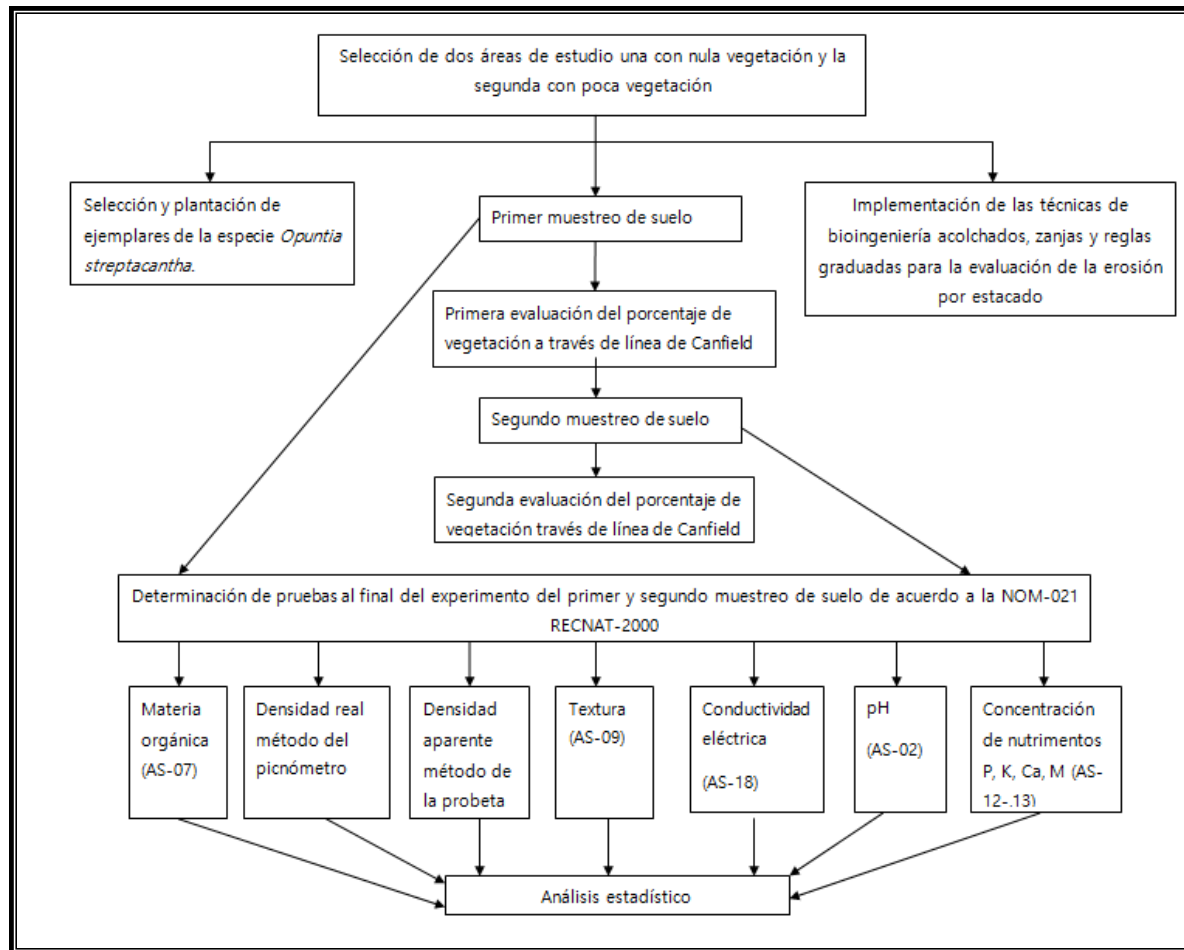


Figura 11. Diagrama de flujo del método

10. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

10.1. Propiedades físicas y químicas del suelo

10.1.1 Parámetros físicos

Tabla 1. Promedio de los parámetros físicos del suelo al inicio y al final en el Parque Ecológico Cubitos PEC en Pachuca, Hidalgo

	Suelo inicial	Suelo Final	
		<i>Opuntia streptacantha</i> Sin acolchado (SA)	<i>Opuntia streptacantha</i> Con acolchado (CA)
Clase textural	Franco	Franco	Franco
Capacidad de campo CC (%)	20.2 (mediano)	27.8 (alto)	29.2 (alto)
% Espacio poroso EP	61 (muy alto)	61 (muy alto)	56 (alto)
Densidad Aparente DA (g/cm³)	1.01	0.93	0.9
Densidad Real DR (g/cm³)	2.62	2.44	2.09

La **densidad aparente (DA)** (Tabla 1) es un índice de penetrabilidad radical (Hossne y Americo, 2007) por lo tanto entre más baja sea, hay mayor espacio poroso (ver anexo 13.1) Esto quiere decir que tener menor DA en *Opuntia*

streptacantha con acolchado (CA) (0.9 g/cm^3) en comparación con *Opuntia streptacantha* sin acolchado (SA) (0.93 g/cm^3) lo que indica que hay una ligera mejora del suelo por lo que el acolchado está beneficiándolo. También la disminución de la densidad aparente indica que existe mayor humedad del suelo, por la presencia de agua en los poros de éste, lo que conlleva a una disminución de la compactación (Hossne, 2004)

Por otra parte, se puede observar (Tabla 1) que el **espacio poroso (EP)** presente en *Opuntia streptacantha* con acolchado (CA) es más bajo que en *Opuntia streptacantha* con acolchado (SA) con 56% y 61% respectivamente. Tomando en cuenta que es conveniente que la porosidad se sitúe entre el 40 % y el 60 %, para no afectar el crecimiento radical, se deduce que tanto CA como SA se encuentran un rango adecuado de **EP**; esto podría beneficiar a las raíces y a la retención de agua en los poros (Navarro, 2005), porque la porosidad es la propiedad del suelo que relaciona el volumen de suelo que exploran las raíces con el volumen disponible para el agua y el aire que requieren en su desarrollo. El aire es importante porque aporta oxígeno para la respiración de las raíces. Además, es la fuente del nitrógeno que transforman las bacterias, haciéndolo aprovechable por las plantas (Cerisola, García y Filgueira, 2005), y permite a las raíces crecer a través de los espacios interpartículas y por lo tanto los suelos con un espacio poroso adecuado no presentan resistencia al crecimiento radical (Hossne, 2008). En este sentido es importante resaltar la importancia de beneficiar a las raíces pues estas van ayudar a la planta a fijarse a los suelos, haciendo que los mismos sean menos afectados por la erosión del viento, además que a medida que crece la planta, la raíz también lo hace hacia abajo, buscando más material inorgánico en beneficio del desarrollo de la planta.

Por otro lado, la porosidad del suelo se ve favorecida por el aumento de materia orgánica, humedad y estructura del suelo (Ríos, 1985). Así mismo Jordán, Zavala y Gil (2010) encontraron un incremento significativo respecto al control del contenido de materia orgánica, de la porosidad y de la estabilidad

estructural del suelo después de 3 años de utilización de acolchados, tal como se reporta en el presente trabajo.

En **densidad real (DR)** se observa que al inicio el suelo se encuentra en el mismo rango que la mayoría de los suelos (2.62 g/cm^3 , Tabla 1) que van de 2.60 g/cm^3 a 2.75 g/cm^3 (Ríos, 1985) y después se presenta una disminución en *Opuntia streptacantha* con acolchado (CA) (2.09 g/cm^3) y *Opuntia streptacantha* sin acolchado (SA) (2.44 g/cm^3). Resultados similares obtuvo Jácome (2013), con las mismas variables que se presentan en este estudio, acolchados y zanjas. Esto se debe al aumento de materia orgánica que hubo en el suelo, porque la densidad real es la relación entre la unidad de peso y la unidad de volumen de la fase sólida del suelo, siendo más o menos constante, ya que está determinado por la composición química y mineralógica de la fase sólida. El peso específico de los componentes del suelo es variado, por ejemplo, menor de 2.5 g/cm^3 (humus y yeso), 2.5 g/cm^3 a 3.0 g/cm^3 (arcillas, cuarzo, feldespatos, calcitas, micas), de 3.0 g/cm^3 a 4.0 g/cm^3 (limonitas, piroxenos, olivinos) y mayor de 4.0 g/cm^3 (hematitas y magnetitas). No obstante, considerando que la mayor parte de los componentes del suelo (alinosilicatos, sílice) poseen una densidad de oscilante entre 2.6 y 2.7 g/cm^3 , se toma un valor medio de 2.65 g/cm^3 . El contenido de los distintos elementos constituyentes de los suelos es el que determina las variaciones de la densidad real, por lo que la determinación de este parámetro permite por ejemplo estimar su composición mineralógica.

Si la densidad real es menor a 2.65 g/cm^3 , se puede inferir que el suelo posee un alto contenido de yeso o materia orgánica, si es significativamente superior a 2.65 g/cm^3 se puede inferir que posee un elevado contenido de óxidos de Fe o minerales ferromagnésicos (Vega, Vigil, Bustamante y Pineda, 2017).

Es por eso, que se relaciona la composición del suelo con la densidad real. En este experimento es evidente que cambió la composición mineralógica del suelo, en parte se obtuvo este resultado gracias al aumento de la materia

orgánica, ya que si ésta aumenta en el perfil del suelo, al ser menos pesada, que otros minerales, el suelo disminuye su densidad real; como se puede apreciar en *Opuntia streptacantha* con acolchado (CA), donde al final se obtuvo una densidad real de 2.09 g/cm³ y en *Opuntia streptacantha* sin acolchado (SA) donde la densidad real disminuyó hasta 2.44 g/cm³, en comparación con el suelo inicial cuya densidad real era de 2.62 g/cm³. Esto se sustenta con los resultados del análisis de porcentaje de materia orgánica, que en un inicio reportaron un porcentaje de materia orgánica bajo, sin embargo, al final del experimento el porcentaje de vegetación cambió a medio.

En cuanto a la **capacidad de campo (CC)**, se observa que va en aumento de 20.2 % al inicio del experimento a 27.8 % en *Opuntia streptacantha*. Sin acolchado (SA) y 29.2 % en *Opuntia streptacantha* con acolchado (CA) (Tabla 1). Porcentajes que se refieren a la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje (FAO, 2005). Cabe mencionar que la economía del agua resulta decisiva en zonas semiáridas, donde las precipitaciones son escasas. Al respecto, Unger (2002), considera importante el almacenamiento de agua en el suelo para minimizar los efectos adversos de su escasez; ya que, al igual que todas las plantas la falta de agua en los cactus propicia la suspensión de su crecimiento, porque a pesar de su anatomía, y poseer un cuerpo carnosos, donde almacenan agua; en épocas de sequías prolongadas, se agotan estas reservas, ocasionando la disminución de su tamaño e incluso su muerte. En los resultados finales, existe el mayor porcentaje de agua retenida debido al uso de yute, como principal factor de retención de humedad, ya que el acolchado reduce la evaporación directa del agua desde la superficie del suelo. Se han realizado numerosos estudios para determinar la influencia del acolchado en la evaporación de agua desde el suelo, y en su contenido de humedad (Cook, Valdes y Lee, 2006; Ramakrishna, Tam, Wani y Long, 2006; Yang, Liu, Li y Li, 2006). Se ha encontrado que, el acolchado puede debilitar la intensidad del intercambio turbulento entre la atmósfera y el agua del suelo, lo que reduce su evaporación. Menge (1994)

concluye que el acolchado favorece la conservación de la humedad del suelo, disminuye la escorrentía superficial, la erosión del suelo y aumenta la permeabilidad y la capacidad de retención de agua del mismo.

En estudios realizados por Zhang et al. (2008), el acolchado aumenta significativamente la humedad del suelo en la capa superficial (0 - 5 cm) en comparación con el suelo desnudo. Otros estudios realizados por Chaudhry, Aziz y Sidhu (2004) indican que la tasa de infiltración de agua en el suelo cubierto con diferentes tipos de acolchados permeables aumentó un 30% en comparación con el suelo desnudo. Estos resultados son similares a los obtenidos en este estudio, pero en menor porcentaje.

Según Hossne (2008) la capacidad de campo se considera como un proceso de descompactación en el transcurso de expansión del suelo, lo que denota la importancia de mantener los suelos a CC; es por eso que el uso de acolchados se considera como un factor principal para la retención de humedad, la cual, beneficia al suelo y por ende al crecimiento radical.

Por otra parte, para Unger (2002), la cantidad de agua almacenada depende de la textura del suelo y su profundidad. En este caso, la **clase textural** franco que presenta el suelo en esta área, ayuda también al equilibrio textural adecuado para el crecimiento radical (Dorransoro, 2017); por lo que, debido a los cambios estructurales de estos suelos, que son producto del factor expansión/contracción del mismo, se originan variaciones en el volumen, alterando el volumen de agua y el volumen de aire, cambios que se ven reflejados en la porosidad. Por lo tanto, se puede causar compactación si hay disminución del volumen de aire y consolidación si se genera disminución de los poros de agua, lo cual se clasifica como porosidad textural. Esta también dependerá, de la constitución mineral y orgánica del material y de su contenido en agua.

La porosidad textural es muy estable, frente a las acciones compactadoras externas. Además, se tiene la ventaja de que la característica principal del tipo de textura Franco es su gran porosidad, cuyo efecto inmediato es la percolación, es decir, la filtración de las aguas de lluvia o riego hasta la capa freática (Cerisola, García, y Filgueira, 2005). Lo que beneficia al crecimiento de la planta, en primera instancia, porque permite la penetración radical y su crecimiento, lo que originará una mayor superficie de contacto con el agua y los nutrientes disponibles.

10.1.2 Parámetros químicos

Tabla 2. Promedio de los parámetros químicos del suelo al inicio y al final en el Parque Ecológico Cubitos PEC en Pachuca, Hidalgo.

	Suelo inicial	Suelo final	
		<i>Opuntia streptacantha</i> Sin acolchado (SA)	<i>Opuntia streptacantha</i> Con acolchado (CA)
pH (1:2)	8.86 (fuertemente alcalino)	8.37 (medianamente alcalino)	8.13 (medianamente alcalino)
C.E. (salinidad-ds/m)	1.64 (muy ligeramente salino)	0.70 (efectos despreciables de la salinidad)	0.53 (efectos despreciables de la salinidad)
Materia orgánica M.O. (%)	1.10 (bajo)	1.95 (medio)	1.64 (medio)

fosforo P (mg/kg)	26.4 (alto-Olsen)	31.30 (alto-Olsen)	55.70 (alto-Olsen)
Calcio Ca (cmol+)/kg)	13.24 (alta)	24.99 (alta)	14.59 (alta)
Sodio Na (cmol+)/kg)	50 (moderado bajo)	20.6 (moderado bajo)	13.0 (moderado bajo)
Magnesio Mg (cmol+)/kg)	3.226 (alta)	5.08 (alta)	3.75 (alta)
Potasio K (cmol+)/kg)	3.009 (alta)	2.57 (alta)	3.11 (alta)
Capacidad de Intercambio Catiónico CIC (meq/100g)	24.625 (media)	33.6 (alta)	22 (medio)
Carbonatos totales (%)	6.8 (mediano)	8.01 (mediano)	4.29 (mediano)

Al inicio del estudio, **el pH** de los suelos fue fuertemente alcalino. Después se torna medianamente alcalino, con una ligera disminución de éste en *Opuntia streptacantha* con acolchado (CA) (8.13) y *Opuntia streptacantha* sin acolchado (SA) (8.37)

Una de las razones por las que al inicio el suelo tenía un pH alcalino es debido a que en las zonas áridas es frecuente este tipo de pH porque en este tipo de climas existe una baja pluviometría y el complejo coloidal presenta un alto grado de saturación de bases, y lo que da un alto contenido de iones OH⁻ y como consecuencia el pH asciende (Flores, 2018). Los suelos alcalinos, presentan niveles de pH entre 8.5 a 10 o más; en ésta situación se favorece la dispersión de los coloides del suelo, provocando ruptura de agregados con la consecuente pérdida de estructura y obstrucción de los poros, por lo que las propiedades hidráulicas se deterioran: disminuye la infiltración y la conductividad hidráulica saturada¹ (Brady y Weil, 1999).

Por otra parte, es de suma importancia conocer la acidez del suelo expresada a través del valor del pH, porque, nos indica la solubilidad y por tanto la asimilabilidad o disponibilidad de los nutrientes minerales, así como de la capacidad del suelo para almacenarlos. Para que los minerales estén disponibles para las plantas deben ser solubles; de manera que si un elemento del suelo no es soluble en agua, por muy abundante que sea, no podrá ser utilizado por las plantas (Flores, 2018). La ligera disminución del pH con el acolchado y sin acolchado no impacta significativamente la disponibilidad de los nutrientes (Tabla 2).

En la Figura 12 se puede apreciar los diferentes nutrientes y su disponibilidad, según el nivel de pH en el que se encuentren.

¹ Conductividad hidráulica saturada.: Una vez que los poros capilares están llenos de agua, las fuerzas gravitatorias dan lugar a un movimiento descendente constante el cual es denominado conductividad hidráulica saturada.



Figura 12. Disponibilidad de nutrientes en función del pH del suelo. Fuente: Ibáñez, 2018.

La **Conductividad Eléctrica (CE)** está definida como la capacidad de conducir la corriente eléctrica, la cual depende de la cantidad de iones positivos y negativos que se encuentran en la solución del suelo, por eso la CE de la solución de suelo es un indicador del contenido de sales. Así también la CE del suelo es una medida afectada por la combinación de contenido de agua del suelo, contenido de sales disueltas, contenido de arcillas, mineralogía y temperatura del suelo (Tarr, Moore, Burras, Bullock y Dixon, 2005).

El contenido de humedad del suelo es uno de los factores principales que influyen en la CE, dado que la conducción de la electricidad se realiza en la fase líquida presente en el suelo (Friedman, 2005).

En el presente estudio se observó que al inicio (Tabla 2), la conductividad eléctrica era de 1.64 ds/m (muy ligeramente salino) y al final del experimento los valores para *Opuntia streptacantha* sin acolchado (SA) fueron de 0.70 ds/m; y en *Opuntia streptacantha* con acolchado (CA) de 0.53 dS/m, por lo que los últimos valores están dentro del rango de efectos despreciables de la salinidad, de acuerdo a la NOM-021- RECNAT-2000.

El control de la salinidad del suelo es fundamental para la producción óptima de las plantas. Ya que si hay abundancia de sales los suelos son más propensos a compactarse e impide que las plantas puedan absorber el agua y, por lo

tanto, los nutrientes que se encuentran disueltos en ella. Las prácticas que reducen la evaporación del agua (efecto evapoconcentración) y/o favorecen el flujo descendente de agua en el suelo (efecto lavado) son claves para el control de la salinidad, ya que al haber mayor humedad las sales son disueltas y disminuyen sus concentraciones en la zona radical de las plantas (Zribi, Faci y Aragüés, 2011).

El acolchado es una práctica eficaz que reduce la salinidad y conserva la humedad en la zona radicular (Rahma, Uddin, Bagum, Mondol, y Zaman, 2006), principalmente en los primeros centímetros de suelo (Stewart, 2005). (Zhang et al., 2008) indican que en suelos desnudos la mayor acumulación de sales se produce en el suelo superficial debido al efecto evapoconcentración.

Por otra parte, las sales solubles dañan a las plantas y esta afectación es más severa durante la emergencia y crecimiento inicial de ciertas plantas. Así, Dong, Li, Tang y Zhang, (2008) concluyeron que el acolchado de algodón mantiene un mayor contenido de humedad, reduce la evaporación y salinización del suelo y favorece una buena emergencia y establecimiento de las plantas.

Estudios realizados por Yang, Liu, Li y Li, C., (2006), observaron el efecto de cuatro sistemas de acolchado (suelo desnudo, planchas de hormigón, paja y plástico) sobre la salinidad del suelo. Estos acolchados produjeron efectos significativos en la reducción de la salinidad del suelo en comparación con el suelo desnudo, con un mayor efecto del acolchado con planchas de hormigón de 3 cm de espesor, seguido por la paja y el plástico. Estos autores concluyen, que el mayor efecto del acolchado con paja en la reducción de la salinidad del suelo, en comparación con el acolchado plástico puede atribuirse a que la paja permite el paso de la lluvia y favorece el lavado de sales. Resultados que se puede comparar con el uso de acolchados de yute debido a que tuvo la misma función que la paja en los ejemplares con acolchado anteriores.

El porcentaje de **materia orgánica (MO)** aumentó, en comparación con el porcentaje que se presentó al inicio del estudio (1.1%), que de acuerdo a la NOM -021- RECNAT-2000 está catalogado como bajo (Tabla 2). *Opuntia streptacantha* sin acolchado (SA) y *Opuntia streptacantha* con acolchado (CA) presentaron un aumento en la materia orgánica de 0.85% y 0.54% respectivamente, por lo que, pasaron a ser catalogados como clase medio con referencia en la NOM -021- RECNAT-2000. Los resultados anteriores se deben a las plantas trasplantadas al inicio del desarrollo del estudio, al igual que los restos de plantas y animales que recibe el suelo al ser transportados por el viento y el agua; lo que permite el aumento en la materia orgánica (Jácome, 2013). Al mejorarse esta propiedad del suelo se mejora su estructura, aumenta la capacidad de retener agua, por tanto ayuda a la disminución de la erosión, proporciona partículas de tamaño coloidal con carga negativa (humus), que tiene alta capacidad de retener e intercambiar cationes nutritivos, actúa como un agente amortiguador al disminuir la tendencia a un cambio brusco de pH del suelo cuando se aplican sustancias de reacción ácida o alcalina, hace posible la formación de complejos órgano-metálicos, estabilizando así micronutrientes del suelo que de otro modo no serían aprovechables y también ayuda a proveer de alimentos a los microorganismos que viven en el mismo, lo que permite que los nutrientes se encuentren disponibles para las plantas (Meléndez-Hustick, 2014).

Sin embargo, se aprecia mayor MO en *Opuntia streptacantha* sin acolchado (SA) debido a que la ausencia del yute permite mayor acumulación de materia orgánica, que está en contacto directo con el suelo, por lo que podremos observar resultados semejantes en *Opuntia streptacantha* con acolchado una vez que el yute comience a degradarse.

Los nutrientes como son **calcio (Ca), magnesio (Mg), potasio (K) y fósforo (P)** (Tabla 2), aumentan en la mayoría de los casos tanto en *Opuntia streptacantha* sin acolchado (SA) como en *Opuntia streptacantha* con acolchado (CA), en

comparación con los resultados de cada uno al inicio del experimento. El fósforo al inicio se tiene un valor de 26.4 mg/kg que aumenta para SA a 31.3 mg/kg y 55.7 mg/kg en CA, estos resultados se encuentran en clase alto-Olsen según la interpretación de resultados en la NOM-021- RECNAT-2000 para suelos alcalinos a neutros.

Ca al inicio tenía valores de 13.242 cmol(+)/kg; después de 660 días de experimentación SA presentó aumento a 24.99 cmol(+)/kg de calcio al final y CA aumentó a 14.59 cmol(+)/kg. Asimismo Mg experimento un incremento en sus valores de 3.226 cmol(+)/kg al inicio, paso a 5.08 cmol(+)/kg para OT y 3.75 cmol(+)/kg para CA. El K al inicio tenía un valor de 3.009 cmol(+)/kg. Sin embargo al final en SA se observó que hubo una muy ligera disminución del nutrimento (2.57 cmol(+)/kg) y un aumento también muy ligero para CA (3.11 cmol(+)/kg).

Los resultados anteriores en los que disminuyó la cantidad de nutrientes en el suelo, tienen que ver con el aumento de la temperatura y de la humedad del suelo que favorece su mineralización, que es el proceso de descomposición de la materia orgánica del suelo que permite que los nutrientes vuelvan al suelo en forma asimilable para las plantas. A mayor temperatura más mineralización. A más presencia de oxígeno más mineralización. Un alto contenido de materia orgánica en un suelo no significa que ese suelo sea fértil. La materia orgánica puede estar toda en forma de humus estable y las plantas no disponer de suficientes nutrientes.

La mayoría de los nutrientes que ocurren naturalmente en el suelo son mantenidos en formas no disponibles para las plantas. Por tanto, el crecimiento es restringido por la velocidad a la que dichos nutrientes pueden ser convertidos y disueltos en el agua del suelo, o mineralizados a formas solubles, disponibles para las plantas.

En el caso de los nutrientes que disminuyeron ocurre que los nutrientes solubles en agua desaparecen también de las zonas radicales de las plantas por el movimiento descendente del agua, o simplemente por la absorción de éstos por la misma planta. En el caso de que aumentaran, muchos de los nutrientes requeridos pueden estar presentes en el suelo, pero lo están de formas insolubles en agua y no pueden ser usados por las plantas. La fertilidad del suelo debe considerar por tanto las pérdidas por lixiviación y el aumentar la disponibilidad de dichos nutrientes desde la solución de agua en el suelo hasta las plantas (FAO, 1991).

El **sodio (Na)** de acuerdo con los valores de la NOM-021-RECNAT-2000, es moderadamente bajo en todas las fases del experimento, pero se haya una concentración considerablemente menor en *Opuntia streptacantha* con acolchado (CA). En *Opuntia streptacantha* sin acolchado (SA) se presentó una concentración de 20.6 Cmol Kg⁻¹; a diferencia de *Opuntia streptacantha* con acolchado (CA) con una concentración de 13.0 Cmol Kg⁻¹.

Uno de los principales motivos del aumento de la salinidad en los suelos es la evaporación del agua (efecto evapoconcentración) y el flujo descendente de agua en el suelo (efecto lavado), por lo tanto, las prácticas que reducen la evapoconcentración y/o el efecto lavado son claves para el control de la salinidad en la zona radical de las plantas y también ayudan a una distribución más homogénea de la salinidad en el perfil del suelo (Zrib, Faci y Aragüés, 2011)

El acolchado es una práctica eficaz que reduce los efectos de la salinidad a través de la conservación de la humedad en la zona radical (Rahman, Uddin, Bagum, Mondol, Zaman 2006). Otros trabajos donde analizan el efecto del acolchado sobre el contenido iónico en las hojas, realizados por (Dong, et al., 2008) concluyen que el acolchado redujo el contenido de Na⁺ en las hojas de algodón. Por otro lado, Stewart, 2005(citado por Zrib, et al., 2011) concluyen que en el tercer año de un ensayo, el contenido de cloruro y sodio en el

pecíolo de las hojas fue menor en plantas cultivadas en suelo acolchado con paja que en suelo desnudo.

Los **Carbonatos totales** según la NOM-021-RECNAT-2000 permanecen dentro del rango medio con un ligero aumento en *Opuntia streptacantha* sin acolchado (SA). (8.01%) a diferencia de *Opuntia streptacantha* (CA) (4.29%). Lo que indica que el acolchado está ayudando a la retención de humedad lo que conlleva a la disminución de carbonatos en el suelo, ya que se sabe que la formación de carbonato pedogenético está fuertemente influenciada por la disponibilidad de agua en el suelo y por el CO₂ proveniente de la respiración de las raíces y/o de la descomposición de la materia orgánica. Otro factor importante es la temperatura, que también influye, debido a que el CO₂ es menos soluble en agua templada disminuyendo por lo tanto la solubilidad del CaCO₃ (Birkeland, 1984). Sin embargo, la pérdida de agua a través de la evaporación es considerada el principal mecanismo de precipitación del carbonato pedogenético (Rabenhorst, Wilding y West, 1984), siendo su presencia restrictiva a regiones áridas y semiáridas.

La disminución de carbonatos en *Opuntia streptacantha* con acolchado (CA) beneficia el desarrollo de los ejemplares ya que su exceso pudiera ocasionar deficiencia de hierro, zinc, fósforo y nitrógeno, afectando directamente el crecimiento de la planta ya que, cuando se presentan acumulaciones de carbonato a cierta profundidad en el perfil edáfico, las plantas pueden sufrir la muerte de su yema apical, después de haber tenido un desarrollo inicial normal (Ibáñez, 2018).

Por otro lado el aumento excesivo de carbonatos a largo plazo no solo daña a la planta, si no, al mismo suelo ya que al aumentarse la acumulación de CaCO₃, aumenta la actividad iónica del Mg²⁺ en la solución del suelo favoreciendo la transformación con la cual se constituyen los dos argilo-minerales fibrosos ricos en Mg típicos de suelos áridos y aunque al igual que la acumulación progresiva del carbonato pedogenético, el proceso de transformación también es

altamente dependiente del tiempo, constituyendo un excelente indicador de aridez a largo plazo (Singer y Norrish, 1974). Por lo que los resultados obtenidos, en carbonatos totales son favorables para el desarrollo vegetal.

En los resultados de **capacidad de intercambio catiónico (CIC)** se observó un aumento en los valores de suelo inicial (24.625 meq/100g) categorizado como medio según la NOM-021-RECNAT-2000, a alta en *Opuntia streptacantha* sin acolchado (SA) (33.6 meq/100g). A diferencia de *Opuntia streptacantha* con acolchado (CA) donde los valores bajaron (22 meq/100 g) pero aún se cataloga como CIC media. La Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) de un suelo es fundamental, pues este valor nos indica el potencial de un suelo para retener e intercambiar nutrientes. La mayor influencia sobre la CIC viene de las arcillas del suelo y de la materia orgánica. La arcilla tiene una capacidad de 10-150 cmol(+)/kg, mientras que la materia orgánica tiene una capacidad de 200-400 cmol(+)/kg, es decir la materia orgánica tiene una CIC más alta. Los cmol(+)/kg equivalen a meq/100 g. Por lo que es lógico que en SA se hayan obtenido valores superiores de CIC en comparación con los resultados obtenidos en CA y suelo inicial ya que en resultados anteriores se observó que SA presentó mayor cantidad de MO, por lo tanto tiene mayor proporción de partículas de tamaño coloidal con carga negativa.

Los aportes de materia orgánica además de provocar un incremento en la CIC también mejoran las propiedades físicas del suelo, incrementa la infiltración de agua, mejora la estructura del suelo, provee de nutrientes a la planta y disminuye las pérdidas por erosión. Por otro lado, los aniones en el suelo tienen un comportamiento muy distinto a los cationes. El fosfato es retenido fuertemente debido a la formación rápida de compuestos insolubles. El sulfato es retenido débilmente. El nitrato y el cloruro no son retenidos en el suelo y se mueven libremente con el agua del suelo (Intagri, 2018).

10.2 Crecimiento

10.2.1 Cobertura

En las Figura 13 y Figura 144 se observa que la cobertura aumenta en las dos zonas al final del experimento, sin embargo, se puede ver que son los ejemplares de *Opuntia streptacantha* sin acolchado quienes presentan una cobertura mayor, diferencia que es más pronunciada durante la época de secas y en los meses de junio, agosto y septiembre. Según el análisis estadístico ($p \leq .05$) existe diferencia significativa entre *Opuntia streptacantha* sin acolchado y *Opuntia streptacantha* con acolchado (Anexo 14.2), siendo la cobertura de *Opuntia streptacantha* sin acolchado, estadísticamente mayor, a diferencia de lo reportado por Posada-Montoya (2015) en el empleo de dos tipos de acolchados, vegetal y de cartón sobre plantas en bosques secos. Es posible que los ejemplares juveniles trasplantados en este estudio, ya hayan estado aclimatados a las condiciones medioambientales dentro del Parque Ecológico Cubitos, por lo que, el acolchado al ser un factor ajeno a las características a las que la planta estaba acostumbrada no influyó de manera favorable.

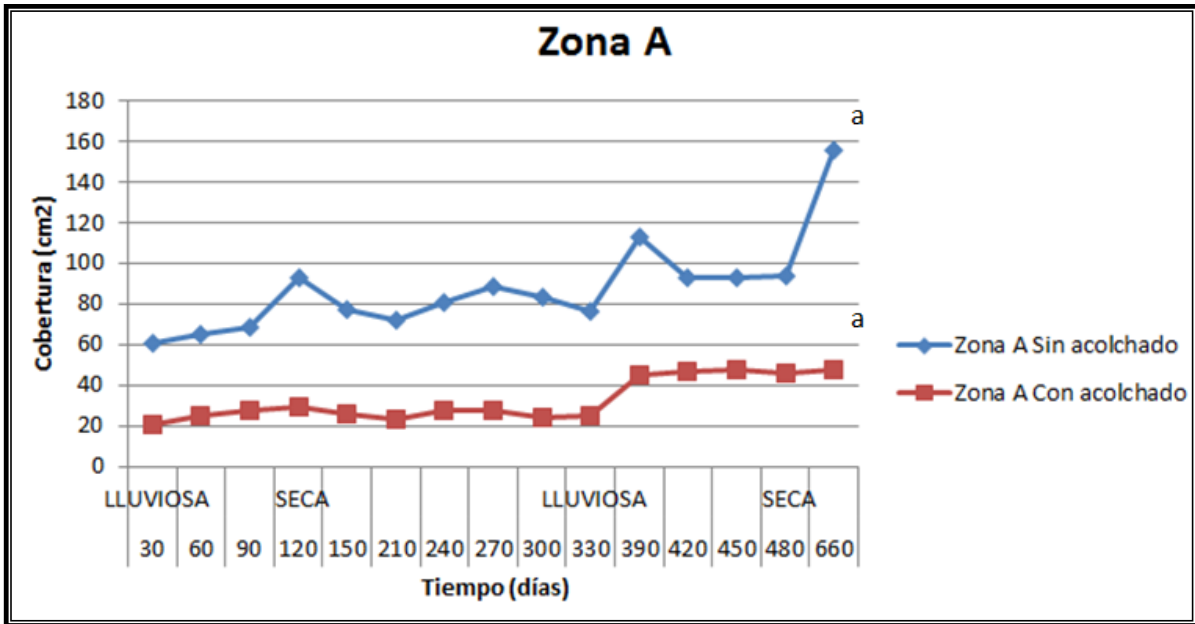


Figura 13. Cobertura Promedio de la Zona A durante los tratamientos con acolchados y sin acolchados, durante 660 días de experimentación. Las letras distintas representan las diferencias significativas entre las muestras ($p \leq .05$).

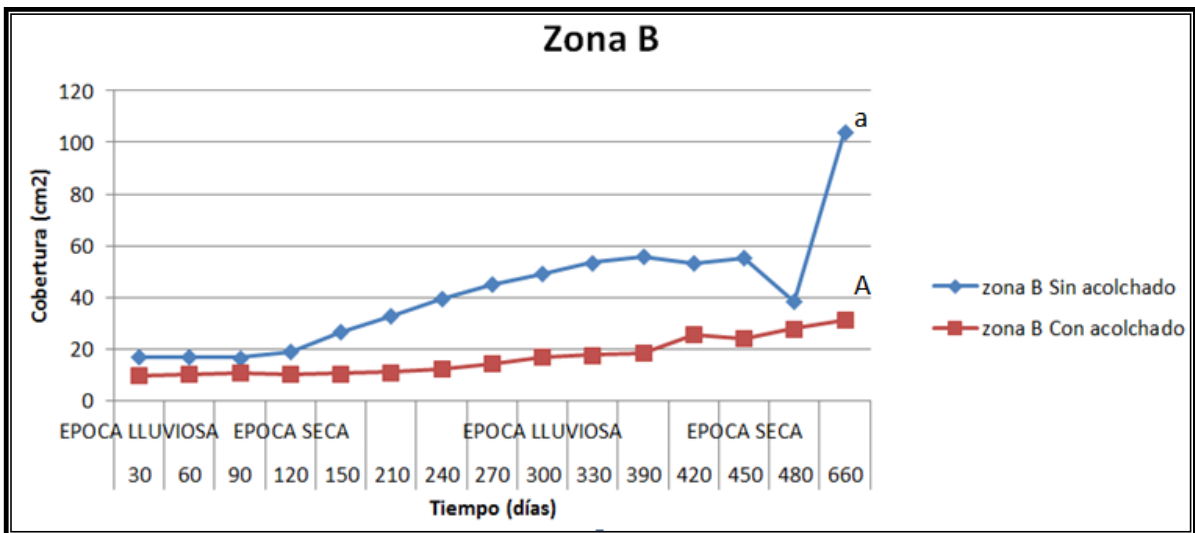


Figura 14. Cobertura Promedio de la Zona B durante los tratamientos con acolchados y sin acolchados, durante 660 días de experimentación. Las letras distintas representan las diferencias significativas entre las muestras ($p \leq .05$).

10.2.2 Altura

En la Figura 15 y Figura 166 se observa que hubo un aumento de alturas en los ejemplares de las dos zonas, sin embargo es evidente que el crecimiento fue mayor en los ejemplares sin acolchado que en los ejemplares con acolchado a pesar de que el análisis estadístico ($p \leq 0.05$), indica que no existen diferencias significativas (Anexo 14.3). Se observó una diferencia de crecimiento de 0.91 cm en la zona A entre el promedio de alturas de *Opuntia streptacantha* con acolchado y *Opuntia streptacantha* sin acolchados, siendo los *Opuntia streptacantha* sin acolchados los que presentaron dicha ventaja de crecimiento; en la zona B hubo una diferencia de 6.7 cm entre promedios de alturas de *Opuntia streptacantha* sin acolchados y con acolchados, siendo de igual manera los ejemplares sin acolchado los que presenta un aumento de alturas más pronunciado.

En la zona A, el mayor crecimiento de los ejemplares se lleva a cabo durante la época lluviosa, sin embargo, este crecimiento continúa siendo ligeramente mayor en *Opuntia streptacantha* sin acolchado. Rosete-Rodríguez (2011), realizó pruebas con acolchado plástico y observó que durante los meses de mayo, junio y julio, el acolchado plástico no permitió la penetración del agua en el suelo de forma inmediata por lo que las plantas que no lo tenían, recibieron primero ese aporte por lo que favoreció su crecimiento. Sin embargo en el acolchado con yute si se permitía la infiltración y aunque no era directa como en los ejemplares sin acolchado, el acolchado permitía la retención de humedad por más tiempo, es por eso que se aprecia que no hay diferencias significativas en las alturas entre *Opuntia streptacantha* con acolchado y sin acolchado. Aunado a este punto, cabe recalcar que los nopales al ser cactáceas, presentan cambios en su morfología que las adaptan a la aridez. Entre las adaptaciones más notables, se pueden mencionar aquellas que les permiten almacenar y conservar el agua en sus tejidos, como son, entre otras: el gran desarrollo de los parénquimas, responsables de la succulencia; (Bravo-Hollis, 1978), por lo tanto al carecer de humedad necesaria, éstas tienden a disminuir su tamaño en

respuesta a la sequía, disminución que se ve reflejada en parámetros de crecimiento como son la altura y cobertura.

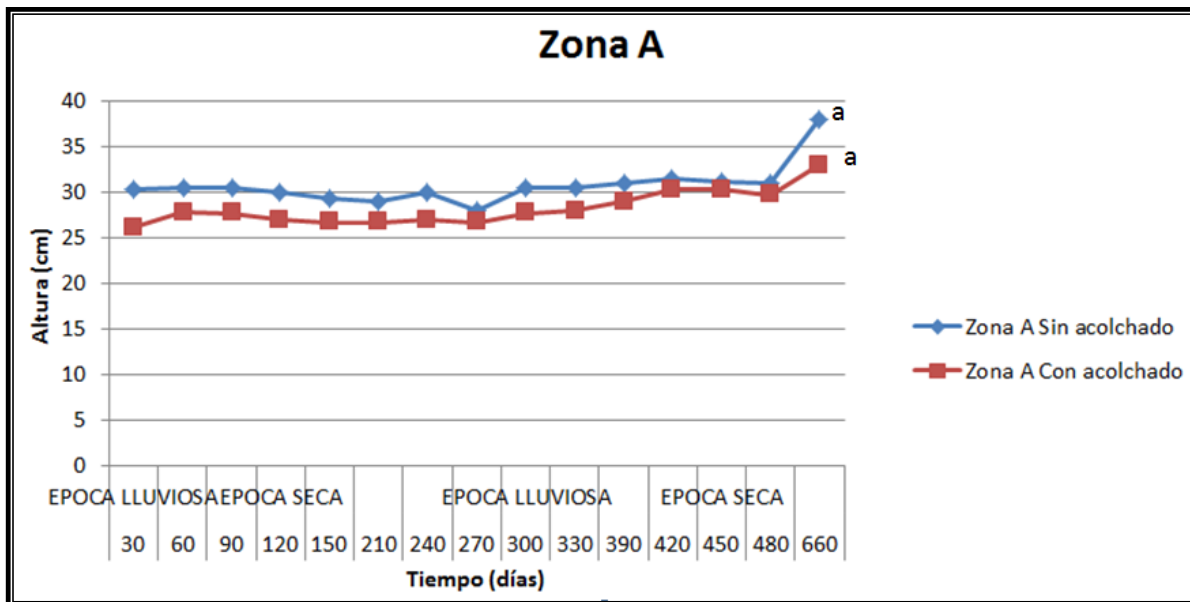


Figura 15. Altura promedio de los individuos, con acolchado (experimento) y sin acolchado (testigo), donde podemos observar su evolución durante los 660 días de experimentación en la zona A. Las letras distintas representan las diferencias significativas entre las muestras ($p \leq .05$).

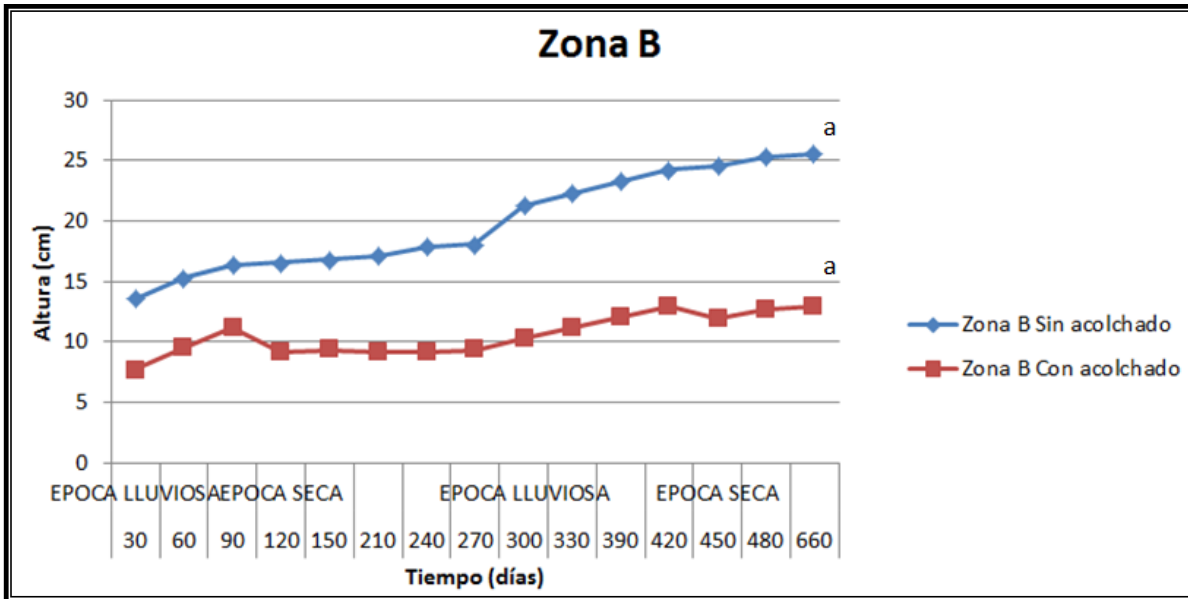


Figura 16. Altura promedio de los individuos, con acolchado (experimento) y sin acolchado (testigo), donde podemos observar su evolución durante los 660 días de experimentación en la zona B. Las letras distintas representan las diferencias significativas entre las muestras ($p \leq .05$).

10.2.3 Diámetro

Existe un comportamiento similar en las dos zonas entre *Opuntia streptacantha* sin acolchado (SA) y *Opuntia streptacantha* con acolchado (CA) en lo que se refiere al aumento del diámetro (Figura 17 y Figura 18), y aunque al final los diámetros tanto de SA como de CA dentro de la zona A y B aumentan; se sigue observando un mayor crecimiento de los ejemplares sin acolchado en ambas zonas, sin embargo, el análisis estadístico ($p \leq .05$), (Anexo 14.4) no muestra diferencias significativas entre el aumento de diámetro de *Opuntia streptacantha* sin acolchado y *Opuntia streptacantha* con acolchado. A pesar de eso, cuantitativamente se observa una diferencia de crecimiento de 6 cm más en SA que en CA y en la zona B SA crecieron 5.95 cm más.

Los resultados obtenidos son diferentes a lo que reporta Barajas-Guzmán (2015) en su trabajo con acolchados de paja de alfalfa, hojarasca, polietileno blanco y suelo desnudo, en los cuales dichos autores encontraron diferencias

significativas a favor de *Opuntia streptacantha* con acolchado en altura y diámetro al igual que Jácome (2013)

Se infiere que el diámetro de *Opuntia streptacantha* con acolchado de ambas zonas se ve favorecido en la época seca, debido a la presencia de acolchados, ya que éste los ayuda a retener agua, sin embargo, ocurre lo contrario durante la época lluviosa, porque el acolchado funciona como barrera física impidiendo el drenaje de forma inmediata y directa.

Por otra parte, los ejemplares sin acolchado se comportan de manera opuesta a los ejemplares con acolchado, aumentado su diámetro en época lluviosa como normalmente pasaría en la naturaleza, reafirmando el supuesto que se mencionó antes, el cual indica que los nopales ya estaban adecuados al entorno natural, por lo que las épocas de lluvia les favorecían más a *Opuntia streptacantha* sin acolchado.

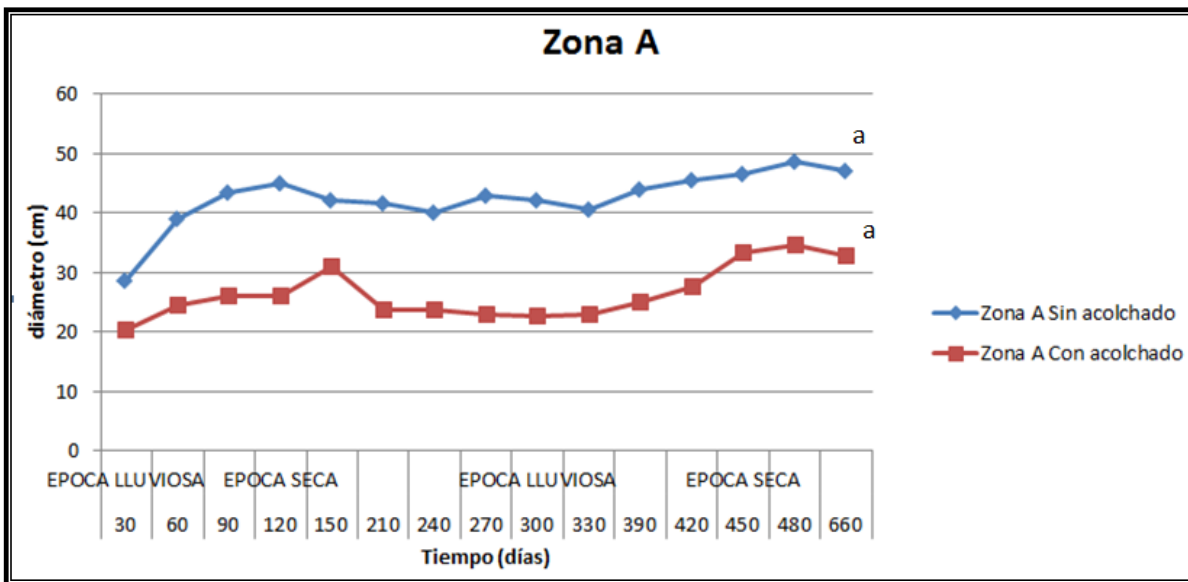


Figura 17. Diámetro promedio de los individuos, con acolchado y sin acolchado, donde podemos observar su evolución durante los 660 días de experimentación en la zona A. Las letras distintas representan las diferencias significativas entre las muestras ($p \leq .05$).

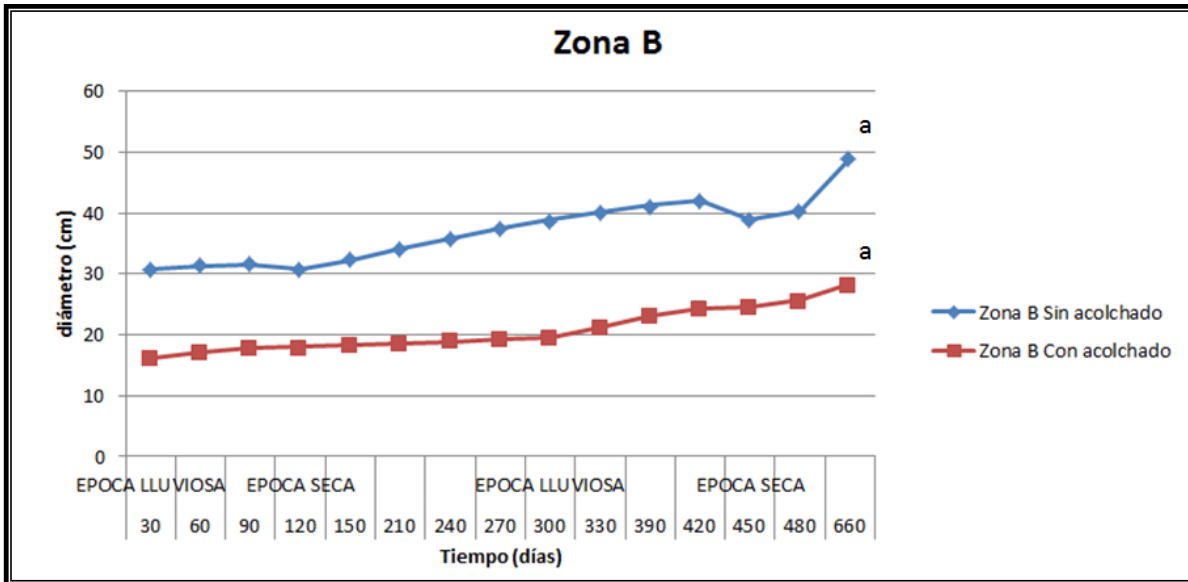


Figura 18. Diámetro promedio de los individuos, con acolchado y sin acolchado, donde podemos observar su evolución durante 660 días en la zona B. Las letras distintas representan las diferencias significativas entre las muestras ($p \leq .05$).

10.2.4 Tasa relativa de crecimiento

Se obtuvo mayor crecimiento relativo en la zona B, también (Figura 19) se observa un mayor crecimiento en *Opuntia streptacantha* sin acolchado, en ambas zonas, siendo más pronunciada esta diferencia en la zona A ($0.00017489 \text{ mg g}^{-1} \text{ día}^{-1}$). Por lo que, al ser este parámetro indicador de crecimiento de la planta en general, en el intervalo de tiempo de 660 días; es obvio que se hayan obtenido los mismos resultados antes discutidos (cobertura, altura y diámetro), pues la TRC solo es en conjunto un reflejo de todos los parámetros.

Por otro lado, tampoco se consideraron otras variables que no fueron controladas como por ejemplo, los nematodos, que son organismos que pertenecen al grupo de la mesofauna del suelo, aunque son prácticamente imposibles de ver a simple vista debido a su pequeño tamaño (longitud de 0,25 a 5,5 mm) y a su cuerpo transparente. Son el segundo grupo animal más numeroso del suelo, después de los protozoos, pudiendo haber más de un millón de nematodos en un metro cuadrado de suelo (Agrología, 2015). Es

posible que estos podrían disminuir el crecimiento de los ejemplares, también es posible que hubiera carencia de algún nutrimento como por ejemplo nitrógeno el cual es esencial para su crecimiento, ya que una de sus principales funciones es crear masa vegetal, además de intervenir en procesos enzimáticos (oxidadas, catalasas y peroxidadas, deshidrogenasas, hidrolasas, nucleoproteínas, transforforilasas y transaminasas carboxilasas) y producción de clorofila.

El análisis estadístico no arroja diferencias significativas (Anexo 13.5) ($p \leq .05$) tal como reporta Rosete-Rodríguez (2011) en su trabajo de acolchado plástico en el establecimiento de *Salvia mexicana*. En el cual indica que el acolchado no contribuyó al TRC de las plantas, e indica que el acolchado fungió como barrera en época lluviosa. Resultados contrarios a Jácome (2013), Araiza (2007) y Barajas-Guzmán (2006), donde *Opuntia streptacantha* con acolchado tienen mayor crecimiento relativo que *Opuntia streptacantha* sin acolchado.

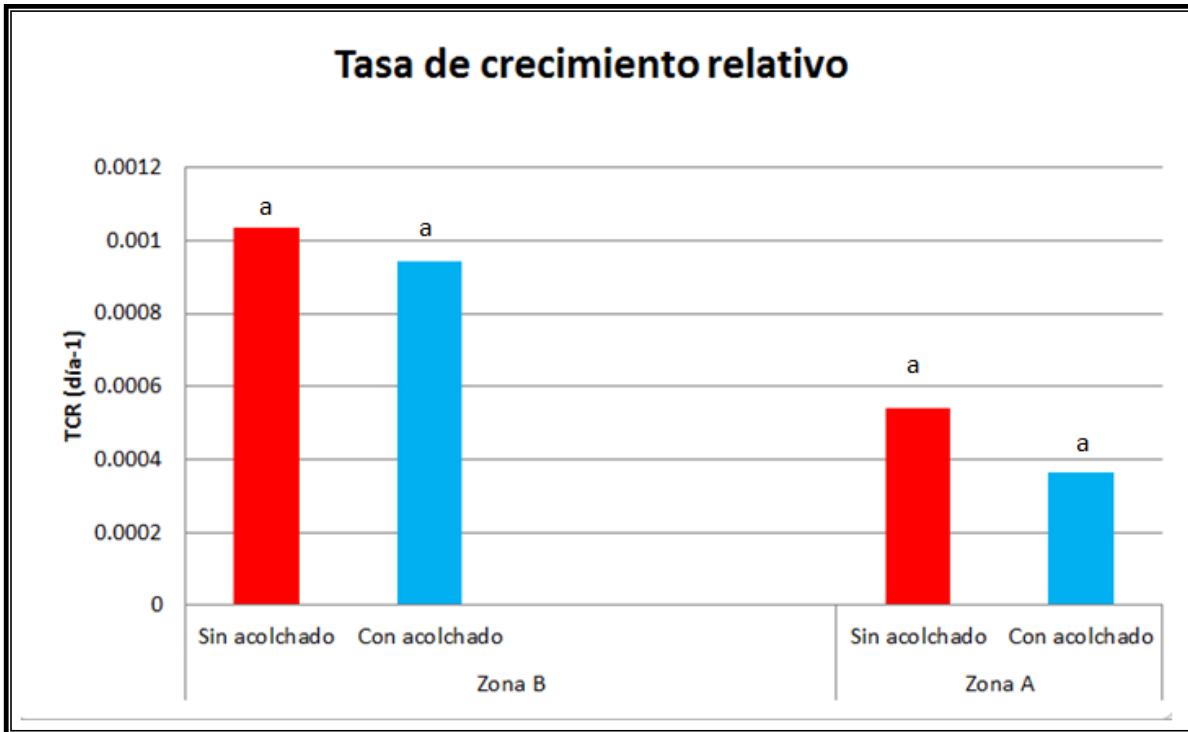


Figura 19. Tasa relativa de crecimiento promedio de los individuos, con acolchado y sin acolchado, donde podemos observar su evolución durante 660 días del año en ambas zonas A y B. Las letras distintas representan las diferencias significativas entre las muestras ($p \leq .05$).

10.3 CONTROL DE EROSIÓN

10.3.1 Zanjas

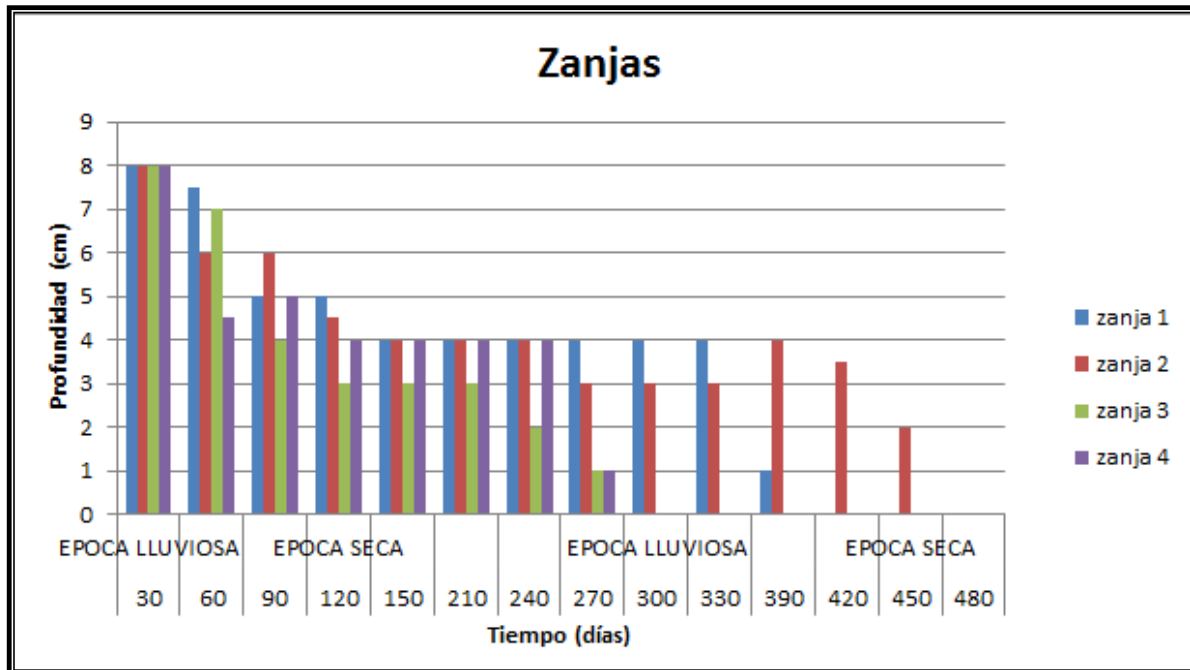


Figura 20. Acumulación de materiales disgregados (clastos) en las zanjas de la Zona A de estudio.

Se observó una disminución importante de las zanjas (figura 20) por la acumulación de clastos arrastrados de las zonas más altas a la parte más baja por el viento y la lluvia, hasta ser cubiertas por completo, obteniendo resultados similares a Jácome (2013).

Se obtuvo, que la zanja 1 (Figura 211 y Figura 222) fue cubierta por completo en el mes de julio, después de 1 año de experimentación, la zanja 2 (Figura 23 y Figura 244) y 3 (Figura 255 y Figura 266) desaparecieron por completo después de un año y dos meses, y después de 8 meses respectivamente. Teniendo ambas zanjas una desaparición gradual, la zanja 4 (Figura 277 y Figura 288) desapareció drásticamente en el mes de abril al mes 8. Al cubrirse por completo todas las zanjas quiere decir que el suelo fue retenido por estas con eficiencia durante el año transcurrido, porque a pesar de ser un ecosistema

seco, la zona tiene lluvias intensas durante un periodo del año. Por este motivo se observa que en la época lluviosa es cuando se cubren completamente la mayoría de las zanjas. Por esta razón requiere elementos que atenúen el impacto directo de las lluvias y reduzcan la energía cinética del avance de las aguas de escorrentía tal como afirman Rivera, Sinisterra y Calle (2018). Por lo tanto, las zanjas fueron de gran ayuda para retener el suelo y detener el agua que venía de las laderas altas, protegiendo a los ejemplares plantados y evitando de esta manera la erosión del suelo.



Figura 21. Zanja 1 etapa inicial.



Figura 22. Zanja 1 etapa final.



Figura 23. Zanja 2 etapa inicial.

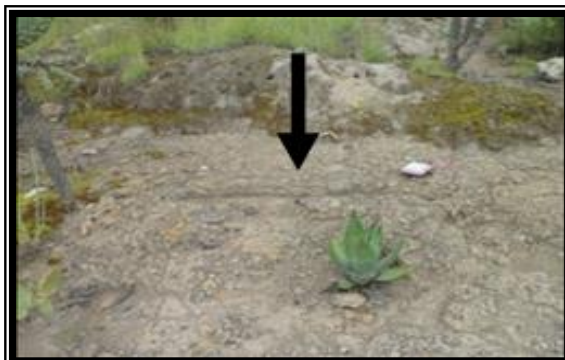


Figura 24. Zanja 2 etapa final.



Figura 25. Zanja 3 etapa inicial.

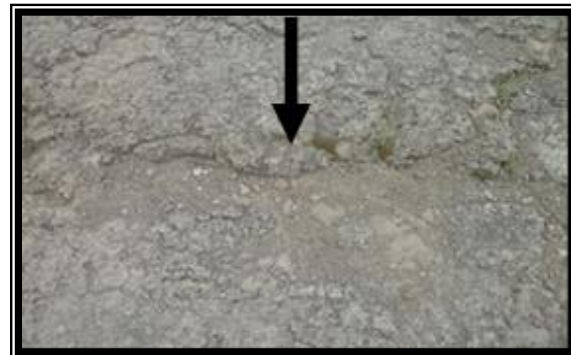


Figura 26. Zanja 3 etapa final.



Figura 27. Zanja 4 etapa inicial.



Figura 28. Zanja 4 etapa final.

10.3.2 Registro de erosión edáfica

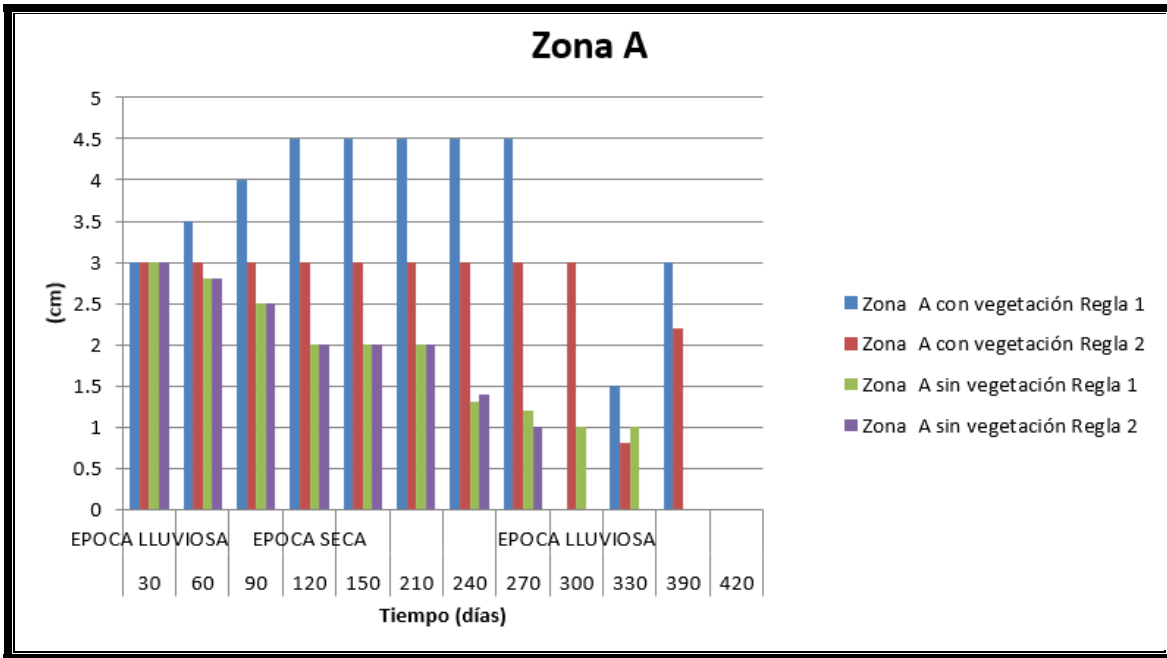


Figura 29. Registro de la erosión en la zona A.

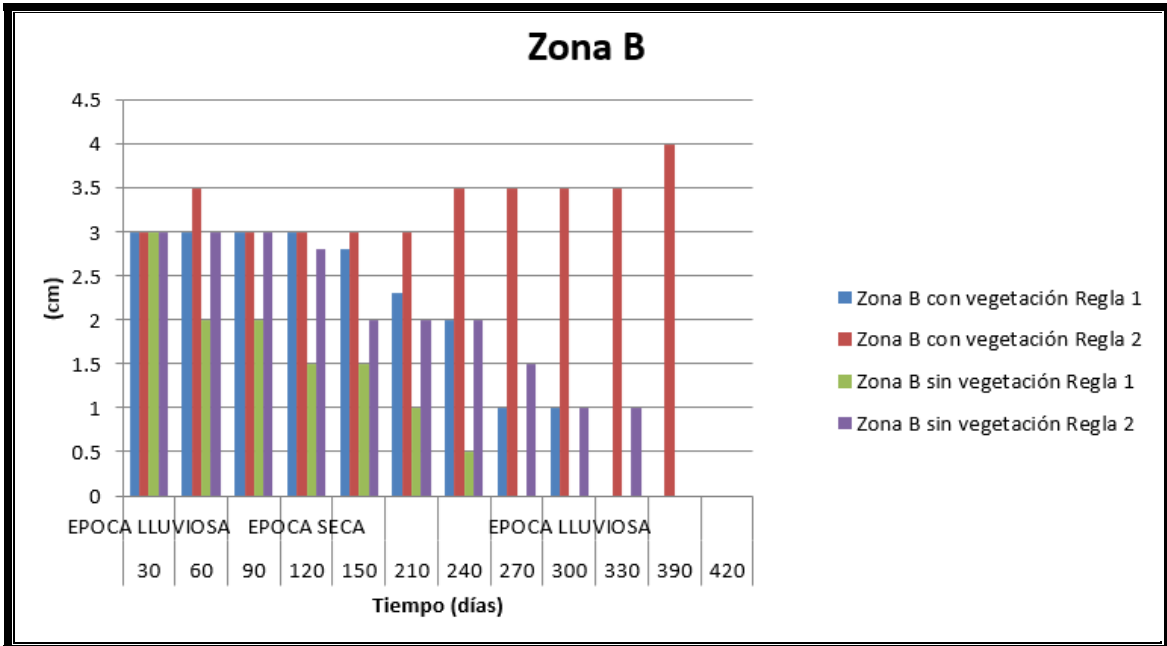


Figura 30. Registro de la erosión en la zona B.

Respecto al registro de erosión edáfica, las reglas sin vegetación indican una pérdida de suelo constante durante todo el año (Figura 29 y Figura 30). Por otra parte el suelo se acumuló especialmente en aquellas zonas que presentaban vegetación tanto en la zona A como en la B principalmente en la época seca, pues al final de la época lluviosa todas las reglas se cayeron, lo que hace alusión a que la erosión hídrica, ocasionada por las lluvias es un factor importante, que provoca la pérdida de suelo en esas zonas. Es evidente que los sitios continúan presentando erosión sin embargo, ésta disminuyó notablemente en aquellos áreas que presentan vegetación, ya que las raíces de los nopales ayudan a estabilizar el sustrato evitando su pérdida.

10.3.3 Porcentaje de vegetación

La cobertura vegetal inicial en la zona A era de 0% (Figura 31) y la final de 18.11% (Figura 32) por lo que hubo un aumento de la cubierta vegetal de 18.11%. En cuanto a la zona B la cubierta vegetal al inicio era de 18.85% (Figura 33) y la final de 30.50% (Figura 34). Lo cual indica que hubo un aumento de la cobertura vegetal del 11.65%. Este incremento de la cobertura vegetal dentro de ambas zonas fue debido a que se plantaron individuos de *Opuntia streptacantha*. Rey (2003) y Martínez-Casasnovas, Ramos, García-Hernández (2009) señalan que cuando el lecho de las cárcavas tienen una cubierta de vegetación superior al 30% éstas resultan casi inactivas o explican bajas tasas de erosión en este proyecto se llegó a obtener una cobertura vegetal de 18.85% para la zona A y 30.50% para la Zona B, lo que quiere decir que los efectos de erosión seguirán afectando a la Zona A en cierto grado el cual será menor para la Zona B

Se debe considerar que las técnicas de bioingeniería se han empleado principalmente en el control de las riberas de ríos y laderas de zonas boscosas. De zonas templadas, subtropicales y tropicales, donde las plantas empleadas crecen más rápido; existen muy pocos trabajos de su empleo en zonas semiáridas, en donde la erosión es mayor debido a que es muy difícil y

paulatina la recuperación de la vegetación, aunque al utilizar especies nativas, no sólo se mitiga y/o reduce el deterioro, sino además se contribuye a la sustentabilidad de diversas cadenas productivas (Melgoza et al., 2007; Sánchez, Márquez, Gloria y Azuara, 2005)



Figura 31. Zona A etapa inicial.

Figura 32. Zona A etapa final.



Figura 33. Zona B etapa inicial.

Figura 34. Zona B etapa final.

11. CONCLUSIONES

En conclusión, la hipótesis se cumplió ya que el uso de *Opuntia streptacantha* contribuyó al aumento de la cubierta vegetal en ambas zonas, 18.11% en la Zona A y 11.65% en la Zona B con supervivencia de los ejemplares del 100%. Lo que propició el control de la erosión principalmente la erosión hídrica. Al mismo tiempo se observaron mejoras en las características físicas y químicas del suelo

La presencia de zanjas no fue un factor determinante para que los ejemplares obtuvieran mayor crecimiento, sin embargo, fueron de gran utilidad para protegerlos, y ayudaron a retener las partículas de suelo que provenían de las laderas más altas, con lo que se logró cumplir con el objetivo establecido en el proyecto

El uso de acolchados de yute no resultó favorable para el crecimiento de *Opuntia streptacantha*, por lo que no es muy recomendable su uso en esta especie y en zonas semiáridas degradadas.

12. RECOMENDACIONES

Se recomienda que al inicio del experimento se elijan individuos más jóvenes, o en su defecto que se germinen las semillas, para poder observar si el yute ayuda a su establecimiento

Se debe aumentar el número de *Opuntia streptacantha* con acolchado, reglas y zanjas, para que el trabajo sea más representativo.

Probar con otro tipo de acolchados como plásticos, pues en otros trabajos se han tenido mejores resultados.

Se deben incluir barreras en las partes bajas de las laderas, para que funcionen como retenedores de suelo como ayuda para las zanjas, por ejemplo, pueden ser barreras de rocas o lechos de ramas.

13. REFERENCIAS

Aldamo, S. B. (2003). *Vulnerable people in fragile lands: Migration and desertification in the drylands of Argentina*. The case of the department of Jachal. PhD thesis. The University of Texas, Austin.

Agrología. (08 de 08 de 2015). *Los Nematodos*. Recuperada de : <https://wp.me/p4rM78-4z>.

Araiza, R. (2007). *Efecto del endurecimiento natural, preacondicionamiento hídrico y acolchados en la supervivencia y establecimiento de *Dononea viscosa*. en el aju*. México: Instituto de Ecología. UNAM.

Aronson, J., Blignaut, J., Millton, S., y Clewell, A. (2006). Natural Capital: The limiting factor. *Ecology*, 28:1-15.

Barajas-Guzmán, M. C. (2006). Soil Water, nutrient availability and sampling survival under organic and polyethylene mulch in a seasonally dry tropical forest. *Plant and soil*, 287:347-357.

Barajas-Guzmán, V. B. (2015). *Costs and benefits of mulches application in the reforestation of tropical deciduous forests*. México: Instituto de Ecología. UNAM.

Birkeland, P. (1984). *Soil and Geomorphology*. New York.: Oxford University Press.

Bot, A. J.; Nachtergaele, F.; Young, A. (2000). *Land resource potential and constraints at regional and country levels*. FAO. Rome, Italy.

Brady, N.C. y Weil. R.R.(1999). *The Nature and Properties of Soils*. London: Prentice Hall Publishers.

- Bravo-Hollis, H. (1978). *Las cactáceas e México*. México: UNAM.
- Canfield, R. (1941). Application of the line interception method in sampling grange vegetation. *J. Forest. Washington*, 39:388-394.
- Cerisola, C., Garcia, M., y Filgueira, R. (2005). Distribución de la porosidad de un suelo franco arcilloso (alfisol) en condiciones semiáridas después de 15 años bajo siembra directa. *SCIELO*, 23:1850-2067.
- Cervantes, R. (2017). *Los nopales Opuntia spp. como recurso*. México: UNAM. Recuperada de: http://fenix.cichcu.unam.mx/libroe_2006/0965822/09_c05.pdf.
- Chaudhry, M., Aziz, A., y Sidhu, M. (2004). Mulching impact on moisture conservation. *soil propeties and plant growth.Pakistan J. Water., Res.*, (82): 1-8.
- Colegio de Postgraduados. (1991). *Manual de conservación del suelo y del agua*. Chapingo, México: UACH.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (26 de 04 de 2018). *Enciclovida*. Obtenido de Nopal cardón (*Opuntia streptacantha*): <http://www.enciclovida.mx/especies/6009318>
- Cook, H., Valdes, S., y Lee, H. (2006). Mulch effects on rainfall interception, soil,physical characteristics and temperature under Zea mays L. . *Soil Till*, 91:227-235.
- Dirección General de Geografía. (DGG). (1983). *Carta edafológica, Pachuca*. Pachuca, Hidalgo: INEGI.
- Dirección General de Geografía. (DGG). (1993). *Carta edafológica, Pachuca*. Pachuca, Hidalgo: INEGI.

- Dong, H., Li, W., Tang, W., y Zhang, D. (2008). Furrow seeding with plastic mulching increases stand establishment and lint yield of cotton in a saline field. *Agron. J*, 100: 1640-1646.
- Dorronsoró, C. F. (2017). *Erosión de Suelos*. Granada, España: Recuperado de: <http://www.edafologia.net/index.htm> el 22/10/2017.
- Flores, J. (4 de 04 de 2018). *Fundación para el Desarrollo Socioeconómico y Restauración Ambiental*. Obtenido de Influencia del Ph en la absorción de nutrientes: <http://www.fundesyram.info/biblioteca.php?id=3706>
- Friedman, S. (2005). Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture*, 46: 45-70.
- García, E. (1981). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México: Instituto de Geografía.UNAM.
- Gnacadjá, L. (2009). *Conserving land and water for a secure future*. *Environmental Policy and Law* 39(3): 328-330.
- González-Medrano, F. (1998). La vegetación de México y su historia. *Ciencias* 52, 58-65.
- Herrera-Ruiz, G., Pacheco-Torres, I., Aguilar-Ortiz, M., García-Gasca, M., y Saavedra-Chávez, R. (2015). *Plantas nativas y naturalizadas en Querétaro*. México: Universidad Autónoma de Querétaro.
- Hossne G., A. (2004). doi.org/10.1016/j.crte.2011.02.001. *UDO Agrícola* 4, 1:42-52.
- Hossne G., A. J. (2008). La Densidad Aparente y Sus Implicaciones Agrícolas En El Proceso. *Tierra Latinoamericana*, 26:195-202.

Hossne, G., y Américo, J. (2007). *Efecto del endurecimiento natural, preacondicionamiento hídrico y acolchados en la supervivencia y establecimiento de Dodonea viscosa. (L.)Jacq. en el Ajusco con fines de restauración ecológica. Tesis de Maestría en ciencias Biológicas.* Estado Monangas, Venezuela: Universidad de Oriente. Recuperado de <http://www.scielo.org.mx>.

Hudson, N. (2006). *Conservación del suelo.* Barcelona, España: Reverté.

Ibañez, J. (2018). *pH del Suelo y Nutrición Vegetal.* Obtenido de Madrid Blogs: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/04/10/63196el23/04/2018>

[1]Ibañez, J. J. (2018). *Biodisponibilidad de los Nutrientes por las Plantas, pH del Suelo y el Complejo de Cambio o Absorbente.* Obtenido de Madrid Blogs: <http://www.madrimasd.org/blogs/universo/2007/05/09/65262>.

Imeson, A., y Curfs, M. (24 de 04 de 2018). *Lucinda.Land care in desertification affected areas from science towards application.* Obtenido de La eroión del Suelo: http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/Leaflets/B1_Leaflet_ES.pdf

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1990). *Anuario Estadístico del Estado de Hidalgo.* Hidalgo, México.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2004). *Anuario Estadístico del Estado de Hidalgo.* Hidalgo, México.

Intagri. (26 de 04 de 2018). *Disponibilidad de Nutrientes y el pH del Suelo.* Obtenido de Serie Nutrición Vegetal: <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/disponibilidad-de-nutrientes-y-el-ph-del-suelo>

- Jackson, L. (1992). *The Role of Ecological Restoration in Conservation Biology* Fiedler P.L., Jain S.K. (eds) *Conservation Biology*. Springer, Boston, MA.
- Jácome. (2013). *Control de la Erosión del Suelo por medio de Técnicas de Bioingeniería en el Parque Ecológico Cubitos, en el Estado de Hidalgo. Tesis de licenciatura en Biología* . México: Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM.
- Jordán, A., Zavala, L., y Gil, J. (2010). Effects of mulching on soil physical properties and runoff under semi-arid conditions in southern Spain. *Catena*, 81: 77-85.
- Martínez-Casasnovas, J. A., Ramos, M. C., y García-Hernández, D. (2009). Effect of land-use changes in vegetation cover and sidewall erosion in a gully head of the Penedés region. *Earth Surf. Process. Landforms*, 34:1927-1937.
- Meléndez-Hustick, L. (2 de 06 de 2014). *Hortalizas*. Obtenido de La fertilidad de suelo no sólo nutre, sino que también protege al cultivo: <http://www.hortalizas.com/cultivos/la-fertilidad-de-suelo-no-solo-nutre-sino-que-tambien-protege-al-cultivo/>
- Melgoza, A., Ortega, C., Morales, C. R., Jurado, P., Vélez , C., Royo, M. H., . . . Pinedo , C. (2007). *Propagación de Plantas Nativas para la recuperación de áreas degradadas. Opción para mejorar ecosistemas*. Chihuahua: Tecnociencia.
- Méndez-Robles, R. (24 de Diciembre de 2015). *El 45% del suelo en México presenta erosión o degradación: UNAM*. Obtenido de MVS Noticias: <http://www.mvsnoticias.com/#!/noticias/el-45-del-suelo-en-mexico-presenta-erosion-o-degradacion-unam-118>

Menge, D. B. (1994). *Fundamentals of Soil Cation Exchange Capacity (CEC)*. Lafayette, Estados Unidos: Department of Agronomy, Purdue University. Recuperado de <https://web.archive.org/web/20110411133928/http://www.ces.purdue.edu/extmedia/ay/ay-238.html>.

Navarro, G. A. (2005). *Edafología. Ciencias Ambientales*. Extremadura, España: Departamento de Biología y Producción de los vegetales. Universidad de Extremadura. Recuperado de <https://www.eweb.unex.es/eweb/edafo/ECAP/ECAL5PFPorosidad.htm>.

Norma Oficial Mexicana (NOM-021-RECNAT-2000). (2000). *Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de los suelos. Estudio, Muestreo y Análisis*. Norlex Internacional. Edición Electrónica de leyes.

Norma Oficial Mexicana (NOM-059-SEMARNAT). (2010). *Protección ambiental. Especies nativas de México de flora y fauna silvestres. Categorías de riesgo y especificaciones para su inclusión, exclusión o cambio. Lista de especies en riesgo*.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2005). *Boletín de suelos de la FAO 79*. Obtenido de Glosario de términos sobre humedad del suelo: <http://www.fao.org/docrep/008/y4690s/y4690s02.htm>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017). El Suelo. En E. F. 131, *Ecología y Enseñanza Rural*. Ciudad de México: FAO. Recuperado de http://www.fao.org/docrep/006/W1309S/w1309s04.htm#P5_56.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2017). *Erosión de Suelos en América Latina. La erosión y el rendimiento de los*

cultivos. Oficina Regional para América Latina y el Caribe: Recuperada de <http://www.fao.org/docrep/t2351s/T2351S07.htm#>

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (1991). *Manejo del suelo: producción y uso del composte en ambientes tropicales y subtropicales*. Roma: FAO.

Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2000). *Manual de prácticas integradas y manejo de conservación del suelo*. Food and Agriculture Org. Forest. Washington, 39:388-394.

Pando Moreno, M., Gutiérrez Gutiérrez, M., Maldonado Hernández, A., Palacio Prieto, J., y Estrada Castellón, A. E. (2003). Comparación de métodos en la estimación de erosión. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM*, 51:23-36.

Pérez Cruz, J., y Rodríguez González, R. (2010). *Caracterización del hábitat y de atributos ecológicos de especies herbáceas y leñosas nativas de material xerófilo*. Tesis. México: Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM.

Posada Motoya, J. (2015). Uso de acolchados (mulching) en la restauración de bosques secos en el Valle del Cauca. *Revista de Ciencias*, 2:43-15.

Rabenhorst, M., Wilding, L., y West, L. (1984). Identification of pedogenic carbonates using stable carbon isotope. *Soil Science Society of American Journal*, 48: 125-132.

Rahman, M., Uddin, M., Bagum, S., Mondol, A., y Zaman, M. (2006). Effect of mulches on the growth and yield of tomato in the coastal area of Bangladesh under rainfed condition. *Int. J. Sustain. Crop. Prod.*, 1: 06-10.

- Ramakrishna, A., Tam , H., Wani, S., y Long, T. (2006). Effects of mulch on soil temperature, moisture, weed infestation and yield of groundnut in northern Vietnam. *Field Crops*, 95: 115-125.
- Rey, M. (2003). *Revegetación de zonas degradadas de la Rioja*. España: Informacion Ambiental.
- Ríos, G. (1985). *Prácticas del módulo de edafología*. México: Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM.
- Rivera, P, J. H., Sinisterra R, J. A., y Calle D., Z. (29 de 04 de 2018). *Restauración Ecológica de Suelos Degradados por Erosión en Carcavas en el Enclave Xerofítico de Dagua, Valle del Cauca Colombia*. Obtenido de <http://cipav.org.co/pdf/noticias/RESTAURACION-CARCAVA-Dagua.pdf>
- Rondón, J., y Vidal, R. (2005). Establecimiento de la cubierta vegetal en áreas degradadas. Principios y Métodos. *Revista Forestal Latinoamericana*, 38:63-82.
- Rosete-Rodríguez, A. (2011). *Efecto del colchado plástico y sombra de vegetación en el establecimiento de Salvia mexicana en el Parque Ecológico de la Ciudad de México*. Ciudad de México: Facultad de Estudios Superiores Zaragoza. UNAM. Tesis para obtener el Título de Biólogo.
- Rzedowski, J. (2006). *Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la biodiversidad*. México: 1ra. Edición digital de Méxicio.
- Rzedowski, J. (2006). *Vegetación de México*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad .
- Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación (SAGARPA). (6 de 04 de 2018). *Erosión Eólica*. Obtenido de Erosión Eólica:

<http://www.sagarpa.gob.mx/desarrolloRural/Publicaciones/Lists/CursoTaller%20Desarrollo%20de%20capacidades%20orientadas%20a/Attachments/34/09.pdf>

Sánchez, O., Márquez, R., Gloria, P., y Azuara, D. (2005). *Temas sobre restauración ecológica*. México: Instituto Nacional de ecología. INE-SEMARNAT.

Sangalli. (2008). *Introducción a la Bioingeniería o Ingeniería Biológica*. España: Recuperado de: <http://www.caminoseuskadi.com/Actividades/bioingenieria/introduccionbioingenieria>.

Secretaría de Desarrollo Social (SEDESOL). (1983). *Secretaria de Desarrollo Social Hidalgo*. México: Recuperado de www.gob.mx/sedesol.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (26 de 04 de 2018). *Los suelos de México*. Obtenido de http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_resumen/03_suelos/cap3.html

Shah, A. (2010). *Land degradation and migration in a dry land region in India: extent, nature and determinants*. Environment and Development Economics 15(2): 173-196.

Singer, A., y Norrish, A. (1974). Pedogenic palygorskite occurrences in Australia. *American Mineralogist*, 59: 508-517.

Smith, R. (1980). *Ecology and field biology*. Harper and Row. Nueva York: Publishers.

Stewart, D. (2005). *The effect of soil and irrigation management on grapevine performance*. PhD Thesis, University of Adelaide. Australia.

- Tarr, A., Moore, K., Burras, C., Bulloc, D., y Dixon, P. (2005). mproving Map Accuracy of Soil Variables Using Soil Electrical Conductivity as a Covariate. *Precision Agriculture*, 6: 255-270.
- Turística Hidalgo*. (16 de 04 de 2018). Obtenido de Parque Ecológico Cubitos: <http://www.turistichidalgo.com/item/35-parque-de-diversion-en-pachuca.html>
- Unger. (2002). Conservation tillage for improving dryland crop yields. *Ciencia del Suelo*, 20:1-8.
- Valdés, A. (05 de 2010). *Revista De Divulgación Científica Y Tecnológica De La Universidad Veracruzana*. Obtenido de Cómo controlan la erosión las raíces de las plantas: <https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol23num2/articulos/erosion/>
- Vega, J., Vigil, C., Bustmante, R., y Pineda, I. (26 de 06 de 2017). *ISSUU*. Obtenido de Determinación de la densidad real: https://issuu.com/edafologia27/docs/densidad_real_de_suelo
- Villar, R., Ruiz-Robledo, J., Quero, J. L., Poorter, H., Valladares, F., y Marañón, T. (2008). *Ecología del bosque mediterráneo en un*. Madrid, España: Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S.A.
- Yang, Y., Liu, X., Li, W., y Li, C. (2006). Effect of different mulch materials on winter wheat production in desalinized soil in Heilonggang region of North China. *J. Zhejiang Univ-Sc*, 7(11): 858-867.
- Zhang, Q., Inoue, M., Inosako , K., Irshad , M., Kondo, K., Qui, G., y Wang, S. (2008). Ameliorative effect of mulching on water use efficiency of swiss chard salt accumulation under saline irrigation. *J. Food. Agric. Environ*, 3-4: 480-485.

Zribi, W., Faci, J., y Aragüés, R. (2011). Efectos del acolchado sobre la humedad, temperatura, estructura y salinidad de suelos agrícolas. *Información Técnica Económica Agraria*, 2 (148-162).

14. ANEXOS

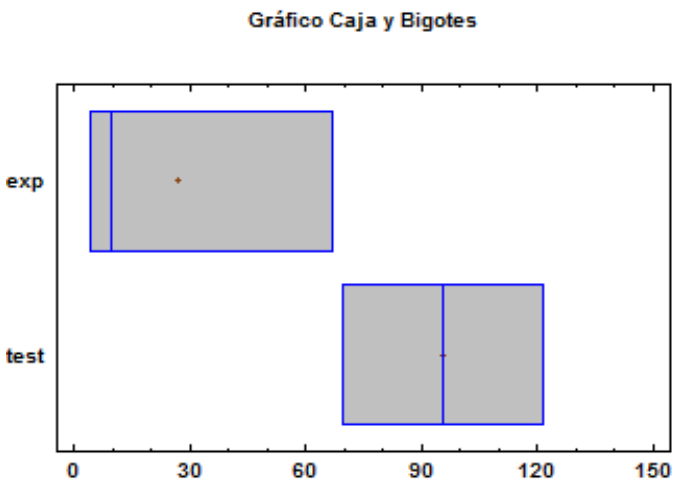
14.1 Anexo Relación entre DA y EP

TABLA I. Relaciones entre la DA y el porcentaje de EP

Densidad aparente (g/cc)	Porosidad total (%)
1.0 - 1.2	55 - 62
1.2 - 1.4	45 - 54
1.4 - 1.6	40 - 46
1.6 - 1.8	menor de 46

14. 2 Anexo Análisis Estadístico Cobertura

14.2.1 Zona A Análisis Estadístico Cobertura



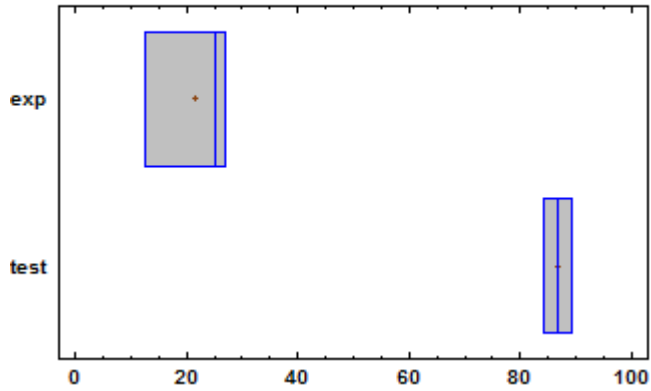
Pruebas de Múltiple Rangos:

Método: 95.0 porcentaje LSD

Col_1	Casos	Media	Grupos Homogéneos
exp	3	26.8167	X
test	3	95.5033	X

14.2.2 Zona B Análisis estadístico cobertura

Gráfico Caja y Bigotes



Pruebas de Múltiple Rangos

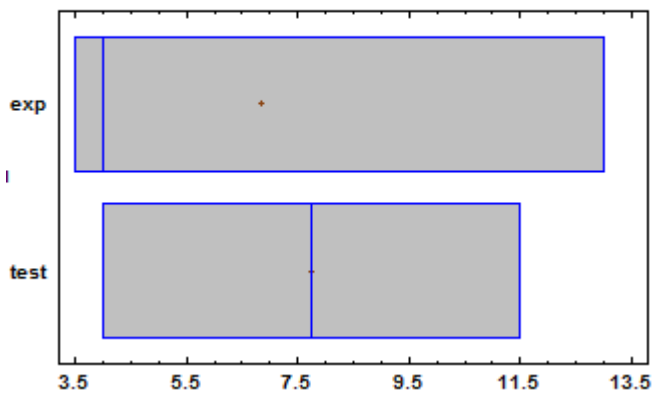
Método: 95.0 porcentaje LSD

Col_1	Casos	Media	Grupos Homogéneos
exp	3	21.6367	X
test	3	86.79	X

14.3 Anexo Análisis Estadístico Altura

14.3.1 Zona A Análisis Estadístico Altura

Gráfico Caja y Bigotes



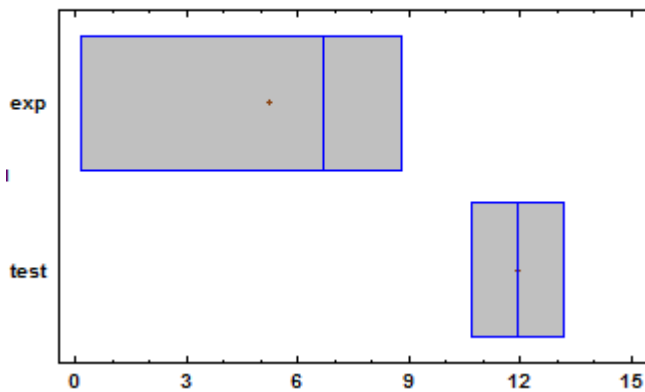
Pruebas de Múltiple Rangos para

Método: 95.0 porcentaje LSD

Col_1	Casos	Media	Grupos Homogéneos
exp	3	6.83333	X
test	3	7.75	X

14.3.2 Zona B Análisis Estadístico Altura

Gráfico Caja y Bigotes



Pruebas de Múltiple Rangos para

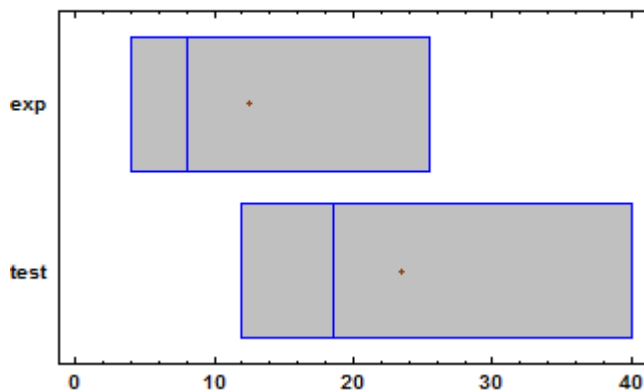
Método: 95.0 porcentaje LSD

Col_1	Casos	Media	Grupos Homogéneos
exp	3	5.21333	X
test	3	11.94	X

14.4 Anexo Análisis Estadístico Diámetro

14.4.1 Zona A Análisis Estadístico Diámetro

Gráfico Caja y Bigotes



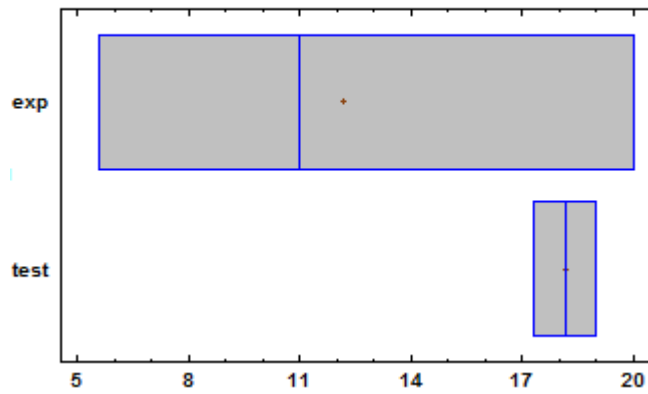
Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje LSD

Col_1	Casos	Media	Grupos Homogéneos
exp	3	12.5	X
test	3	23.5	X

14.4.2 Zona B Análisis Estadístico Diámetro

Gráfico Caja y Bigotes



Pruebas de Múltiple Rangos

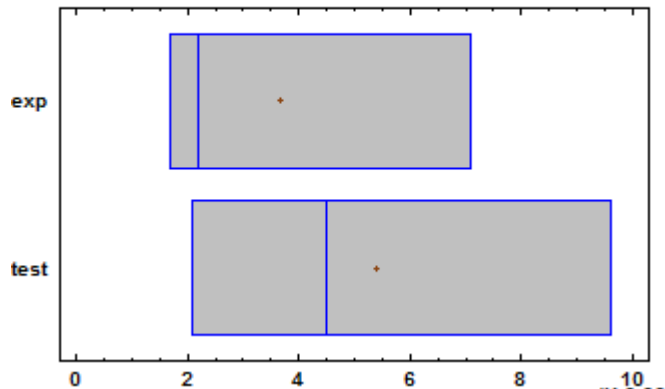
Método: 95.0 porcentaje LSD

Col_1	Casos	Media	Grupos Homogéneos
exp	3	12.2	X
test	3	18.15	X

14.5 Anexo Análisis estadístico TRC

14.5.1 Zona A Análisis estadístico TRC

Gráfico Caja y Bigotes



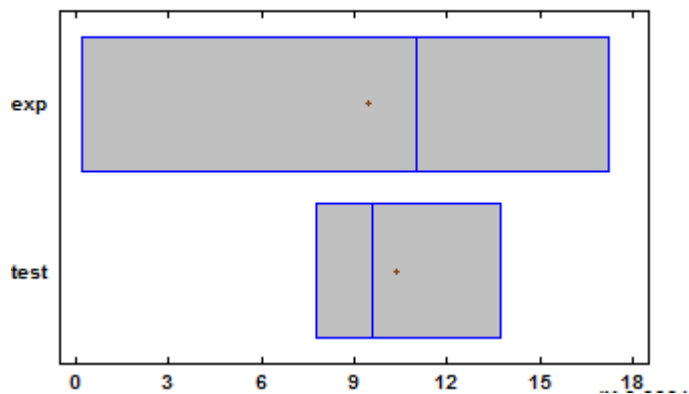
Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje LSD

Col_1	Casos	Media	Grupos Homogéneos
exp	3	0.000366667	X
test	3	0.00054	X

14.5.2 Zona B Análisis estadístico TRC

Gráfico Caja y Bigotes



Pruebas de Múltiple Rangos

Método: 95.0 porcentaje LSD

Col_1	Casos	Media	Grupos Homogéneos
exp	3	0.000946667	X
test	3	0.00103667	X