



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHAPINGO

Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas

**EVALUACIÓN DE PRÁCTICAS DE MANEJO EN SUELOS
DEGRADADOS POR EROSIÓN HÍDRICA: SU IMPACTO EN LA
BIOPRODUCTIVIDAD**

TESIS

QUE COMO REQUISITO PARCIAL

PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO
AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS**

PRESENTA

Ernesto Herssain Pedroza Parga



**DIRECCION GENERAL ACADEMICA
DEPTO. DE SERVICIOS ESCOLARES
OFICINA DE EXAMENES PROFESIONALES**

Bermejillo, Dgo. México. Abril, 2019

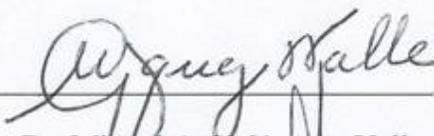


El presente trabajo de tesis titulado “EVALUACIÓN DE PRÁCTICAS DE MANEJO EN SUELOS DEGRADADOS POR EROSIÓN HÍDRICA: SU IMPACTO EN LA BIOPRODUCTIVIDAD”, fue realizado por el C. Ernesto Herssain Pedroza Parga bajo la Dirección del Dr. Miguel Agustín Velásquez Valle y asesorado por el Dr. Aurelio Pedroza Sandoval, el Dr. Ignacio Sánchez Cohen y Dr. Marco Andrés López Santiago. Ha sido revisado y aprobado por el Comité Revisor como requisito parcial para obtener el título de:

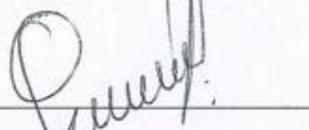
MAESTRO EN CIENCIAS EN RECURSOS NATURALES Y MEDIO AMBIENTE EN ZONAS ÁRIDAS

Comité Asesor:

DIRECTOR:


Dr. Miguel A. Velásquez Valle

CO-DIRECTOR:


Dr. Aurelio Pedroza Sandoval

ASESOR:


Dr. Ignacio Sánchez Cohen

ASESOR:


Dr. Marco Andrés López Santiago

Bermejillo, Dgo. Abril, 2019

DEDICATORIAS

A Dios

Por brindarme sabiduría, salud e inteligencia para sobreponerme a las adversidades de la vida, así como poner en mi camino a las personas correctas para llevar a cabo este compromiso tan importante que sin duda es un parte aguas en mi vida personal y profesional.

A mis padres

Hortensia y Aurelio, por darme la vida y un hogar donde aprendí los valores que me han forjado a ser una persona de bien, de ser siempre el apoyo incondicional ante los errores y contradicciones que la vida presenta, pero sobre todo, por enseñarme el amor infinito que un padre tiene a un hijo.

A mis hijos

Ana Lucía y León Aurelio, por ser el motor que me alienta cada día a superarme y poder ser un ejemplo de bien que les inculque esos valores que los hagan personas de bien, y por enseñarme la responsabilidad más grande que existe en la vida, que es la de ser padre.

A mis maestros

Que sin su apoyo, conocimientos y enseñanzas hubiera sido imposible completar este logro tan significativo en mi vida profesional.

Agradecimientos

Al querido Director de esta investigación, el Dr. Miguel Agustín Velázquez Valle, por su apoyo, paciencia y colaboración con sus conocimientos para la orientación adecuada en este trabajo.

A la Universidad Autónoma Chapingo, por ser la escuela que me abrió las puertas para lograr este objetivo tan anhelado en mi persona.

Al Posgrado de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas y su personal por ser el equipo de trabajo que dirigieron mis estudios de maestría y que me enseñaron cosas valiosas.

Al CONACYT, por ser el impulsor económico para realizar estos estudios, reconozco su labor para el apoyo en la educación de la juventud mexicana.

A mi padre, el Dr. Aurelio Pedroza Sandoval, catedrático de esta institución que como mi maestro de vida y de escuela, siempre me ha brindado su apoyo y amor para salir adelante en este camino.

“Un hombre no trata de verse en el agua que corre, sino en el agua tranquila, porque solamente lo que en sí es tranquilo, puede dar tranquilidad a otros”

Confucio

DATOS BIOGRÁFICOS

El C. Ernesto H. Pedroza Parga, es originario de la ciudad de Torreón, Coah. Estudió la Licenciatura en Ciencias Políticas y Administración Pública en la Universidad Autónoma de Coahuila, egresado en el año de 2014.

En el año de 2017, ingresó al programa de Maestría en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas y su línea de investigación se basa en el Manejo Integral del Agua y Bioproduktividad, con el estudio “Evaluación de prácticas de manejo en suelos degradados por erosión hídrica: Su impacto en la bioproduktividad”, el cual fue el resultado de su tesis, mediante el apoyo del Comité asesor antes citado y la supervisión Dr. Miguel A. Velázquez Valle, como Director de tesis.

Participó como ponente en los congresos nacionales de Recursos Bióticos de Zonas Áridas en 2017 y 2018, llevados a cabo en la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas (URUZA), en los cuales se expuso los avances de investigación de este trabajo de tesis, para su amplia discusión y enriquecimiento.

ÍNDICE

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN GENERAL.....	1
JUSTIFICACIÓN.....	2
OBJETIVO GENERAL.....	5
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
HIPÓTESIS.....	5
LITERATURA CITADA.....	6

CAPÍTULO II

RESUMEN.....	9
ABSTRACT.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
MATERIALES Y MÉTODOS.....	15
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	21
CONCLUSIONES.....	42
LITERATURA CITADA.....	43

CONTENIDO DE CUADROS

Cuadro 1. Variación de alturas de la sección hidráulica del sitio 1 (entrada al campo de pastizal) y cálculo de gasto en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	24
Cuadro 2. Variación de alturas de la sección hidráulica del sitio 2 (entrada al área experimental) y cálculo de gasto en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$	25
Cuadro 3. Cálculo de lámina de riego de acuerdo a los hidrogramas obtenidos.....	30
Cuadro 4. Promedio de erosión, deposición del suelo y contenido de humedad edáfica por efecto de cobertura vegetal en suelos degradados de zonas áridas. Mapimí, Dgo.....	32
Cuadro 5. Promedio de efecto de cobertura en diferentes características del crecimiento y desarrollo del pasto bufel (<i>Cenchrus ciliaris</i> L.). Mapimí, Dgo.....	37
Cuadro 6. Efecto de cobertura vegetal en la fisiología, eficiencia del agua y producción de materia seca en pasto buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i>) en suelos degradados de zonas áridas. Mapimí, Dgo.....	42

CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1. Representación esquemática de las áreas de erosión y deposición de suelo en un pastizal en zonas áridas.....	14
Figura 2. Acequia trapezoidal a la entrada al campo de pastizal (A) y entrada al área experimental (B).....	16
Figura 3. Perímetro de mojado (correspondiente a la línea punteada= $(h + h' + \text{Base})$	18
Figura 4. Estaca con placa de metal de 400 cm^2 insertada en el experimento en número de tres por cada tratamiento.....	20
Figura 5. Precipitación pluvial ocurrida durante el año de 2017 en el área de Roma-Texas del Municipio de Mapimí, Dgo.	22
Figura 6. Eventos de escorrentía medidos en altura de agua (cm) en la acequia.....	23
Figura 7. Curva carga-gasto con línea de tendencia de regresión ajustada a los datos de Q en la sección 1 (entrada al campo de pastizal).....	26
Figura 8. Curva carga-gasto con línea de tendencia de regresión ajustada a los datos de Q en el sitio 2 (entrada al área experimental).....	26

Figura 9. Hidrogramas elaborados para los eventos de lluvia-escorrentía en el área experimental del Ejido Roma-Texas, municipio de Mapimí, Dgo. Línea punteada= valores teóricos Línea sólida= valores observados.....	29
Figura 10. Comportamiento de la erosión y deposición promedio de suelo en área degradada de zonas áridas de Mapimí, Dgo.....	33
Figura 11. Relación entre la erosión y deposición del suelo por efecto hídrico.....	34
Figura 12. Comportamiento promedio del contenido de humedad en el suelo bajo condiciones de temporal e incremento de la cobertura vegetal del pasto (<i>Cenchrus ciliaris</i> L.) en diferentes fechas de muestreo.....	36
Figura 13. Tendencia de comportamiento promedio del índice de clorofila (nm) de todos los tratamientos (<i>Cenchrus ciliaris</i> L.) en diferentes fechas de muestreo.....	38
Figura 14. Altura de la planta promedio de pasto (<i>Cenchrus ciliaris</i> L.) en diferentes fechas de muestreo.....	39
Figura 15. Relación entre la deposición del suelo y la altura de la planta de pasto buffel (<i>Cenchrus ciliaris</i> L.).....	40
Figura 16. Relación entre la altura del pasto (<i>Cenchrus ciliaris</i> L.) con la cobertura vegetal	40

RESUMEN GENERAL

Evaluación de prácticas de manejo en suelos degradados por erosión hídrica: su impacto en la bioproductividad

La sequía degrada los recursos naturales a través de procesos de desertificación e impacta la bioproductividad con marcado énfasis en las zonas áridas. El objetivo de este estudio fue hacer una evaluación de impacto del rastrojo del maíz usado como cobertura vegetal para la conservación de la humedad, control de la erosión hídrica del suelo y el establecimiento de pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) y la bioproductividad. Se usó un diseño de bloques al azar con tres repeticiones, donde los tratamientos correspondieron a: siembra de pasto (5 Kg de semilla ha⁻¹) y sin siembra de pasto; aplicación de rastrojo de maíz (10 Ton ha⁻¹) y sin aplicar rastrojo; y las interacciones respectivas. Las variables medidas fueron la erosión (Ton ha⁻¹) y sedimentación (Ton ha⁻¹) del suelo, índice de germinación del pasto (%), altura del pasto (cm), cobertura vegetal (cm²), índice de clorofila, fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), uso eficiente del agua ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y producción de biomasa del pasto (Kg ha⁻¹). Al aplicar rastrojo de maíz y sembrar pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.), redujo e incrementó significativamente la erosión y deposición del suelo, respectivamente. La conservación del contenido de humedad del suelo en este tratamiento, repercutió en un mejor crecimiento y desarrollo del pasto buffel con mayor altura de planta, cobertura vegetal y contenido de clorofila, por efecto de una mayor actividad fotosintética, lo cual repercutió en una mayor producción de biomasa de pasto por unidad de superficie.

Palabras clave: degradación de suelos, humedad edáfica, pastos, zonas áridas.

GENERAL ABSTRACT

Evaluation of management practices in soils degraded by water erosion: its impact on bioproductivity

The drought degrades natural resources through desertification processes and impacts bioproductivity with strong emphasis on arid lands. The objective of this study was to evaluate the impact of maize stubble used as vegetable cover for moisture conservation, control of water erosion of the soil and the establishment of buffel grass (*Cenchrus ciliaris* L.) and bioproductivity. A randomized block design with three replications was used, where the treatments corresponded to: sowing of grass (5 Kg of seed ha⁻¹) and without sowing grass; corn stubble application (10 Ton ha⁻¹) and without application of corn stubble; and the respective interactions. The measured variables were soil erosion (Ton ha⁻¹) and sedimentation (Ton ha⁻¹) of the soil, index of grass germination (%), grass height (cm), vegetation cover (cm²), chlorophyll index, photosynthesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiration ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), efficient use of water ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) and biomass production of the grass (Kg ha⁻¹). By applying maize stubble and sowing buffel grass, the erosion and deposition of the soil were significantly reduced and increased, respectively. The conservation of soil moisture content in this treatment had an impact on a better growth and development of buffel grass, with a higher plant height, vegetation cover and chlorophyll content, due to a greater photosynthetic activity, which resulted in a higher production of grass biomass per unit area.

Key words: soil degradation, soil moisture, grasses, arid lands.

CAPÍTULO I

EVALUACIÓN DE PRÁCTICAS DE MANEJO EN LA PÉRDIDA DE PRODUCTIVIDAD DEL SUELO POR EROSIÓN HÍDRICA EN ÁREAS DE PASTIZAL EN ZONAS ÁRIDAS

INTRODUCCIÓN GENERAL

A nivel mundial, los sistemas agropecuarios de temporal deficiente aportan el 55 % de los productos agroalimentarios y en especial en Latinoamérica, cerca del 90 % de la superficie agropecuaria corresponde a zonas de temporal deficiente (Roco *et al.* 2012). El impacto de la sequía en las actividades productivas y los recursos naturales agua, suelo, flora y fauna, expresado en procesos de desertificación es un problema permanente con marcado énfasis en las zonas áridas (UACH, CONAZA, SEDESOL, & SAGARPA, 2004).

México presenta una extensión territorial de zonas áridas superior al 50 %, con altos grados de variabilidad ambiental (Pedroza, *et al.* 2016; Velásquez, *et al.* 2013); en estas regiones se asienta alrededor del 18 % de la población nacional (González, 2012). Se consideran zonas áridas, aquellas áreas que reciben una precipitación pluvial media anual menor a 350 mm, y semiáridas a las que reciben entre 350 y 600 mm anuales. En ambos casos, la precipitación promedio anual llega a ser hasta 10 veces menor que la evapotranspiración potencial máxima anual, lo cual evidencia un déficit hídrico en los ecosistemas y agro ecosistemas áridos (Tarango, 2011).

En este tipo de regiones, donde es común de déficit de precipitación pluvial, se hacen esfuerzos por mitigar sus impactos. Uno de estos esfuerzos es el desarrollo de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico para un mejor aprovechamiento de agua y

suelos en cuencas hidrológicas, éstas últimas como unidades territoriales de estudio. Una de las líneas de investigación actual es acerca de los sistemas de captación de agua de lluvia y la implementación de diversas técnicas para la retención del suelo y la humedad dentro de éste, lo cual implica el manejo integral de estos recursos –agua y suelo– conjuntamente con la vegetación en la perspectiva de proteger calidad y cantidad de agua y promover su conservación con el menor impacto ambiental, tomando en cuenta aspectos científicos, tecnológicos, económicos y sociales, principalmente cuando se trata de programas de transferencia de tecnología directa a usuarios (Barbosa, *et al.* 2011).

En particular, los sistemas ganaderos a base de agostaderos en zonas áridas, corresponden a sistemas productivos de alta vulnerabilidad, por la recurrencia de las sequías, presencia de suelos con baja cobertura vegetal, escaso contenido de materia orgánica y una frecuente sobrecarga animal. Producto de estas condiciones y malas prácticas, es común que los suelos presenten un alto grado de degradación, con un consecuente incremento en la desertificación (Kéfi, *et al.* 2007); el sobrepastoreo en este tipo de sistemas productivos, incrementa el riesgo de degradación de los recursos naturales (Velásquez, *et al.* 2012).

JUSTIFICACIÓN

La baja precipitación pluvial y la falta de prácticas de manejo adecuado para el mejoramiento en el uso de los recursos agua-suelo-planta-animal, son las principales causas del constante deterioro de los agostaderos en zonas áridas, con el consecuente impacto negativo en su capacidad productiva (Velásquez, *et al.* 2012). El establecimiento de pastizales en suelos con degradación física en zonas áridas, implica un compromiso de

mejorar la condición del terreno y a la vez, la posibilidad incrementar la productividad forrajera para la sobrevivencia y desarrollo de la ganadería en este tipo de sistemas agropecuarios. Para la rehabilitación de estas regiones, es importante considerar diferentes prácticas de manejo, entre los que destacan: sistemas de captación de agua de lluvia *in situ* a base de microcuencas; establecimiento de diferentes especies vegetales nativas e introducidas de potencial forrajero; uso de productos de cobertura vegetal como retenedores de humedad en el suelo que mitigue la alta tasa de evaporación, la cual llega a ser hasta 10 veces mayor que la precipitación potencial, entre otras prácticas (Cruz, *et al.*, 2016).

La degradación del suelo es el resultado de una relación particular entre este recurso y el agua, donde el factor antrópico desempeña un papel determinante. La erosión hídrica provoca daños a la estructura del suelo (Tiscareño *et al.*, 1999) y lo arrastra hacia las partes bajas del terreno, con fuerte impacto de contaminación. Las pérdidas de suelo en cuencas hidrológicas es un problema recurrente. Estas pérdidas tienen efectos *in situ* y *ex situ* en las cuencas impactadas. Los problemas *in situ* incluyen la pérdida de estructura del suelo, el decremento de la materia orgánica y de nutrientes y la reducción de la disponibilidad de los recursos hídricos (Vento, *et al.* 2010).

Del total del agua que llega al suelo bajo la forma de lluvias intensas, una parte se infiltra y el resto pasa a formar parte de la escorrentía, concentrándose en las depresiones naturales del terreno, escurriendo hasta encontrar áreas de deposición natural. Cuanto mayor es la escorrentía, mayor es el daño por erosión del suelo. La velocidad crítica de escurrimiento de la escorrentía en la cual comienza el arrastre de partículas desagregadas es de 5 m s^{-1} en suelos arenosos y de 8 m s^{-1} en los suelos arcillosos (Ramos, 2017). El control eficiente

de la acción erosiva de las lluvias es factible a través de un conjunto de prácticas de conservación de suelos. Esta tecnología implica: 1) La sistematización y la protección del área para controlar el escurrimiento superficial, que tienen como objetivo la implantación racional de obstáculos, drenajes o vías de acceso contra la acción de la escorrentía; 2) La preparación del suelo; 3) La plantación de cultivos; y 4) La cobertura del suelo; entre otras (FAO, 2000).

Prácticas de mitigación y adaptación

Las prácticas de mitigación en su generalidad están enfocadas a reducir la tasa y el grado del impacto del cambio climático a través del decremento de la emisión de los gases efecto invernadero (IPCC, 2007). Por otro lado, las prácticas de adaptación asumen un entendimiento de las vulnerabilidades de los sistemas desde un punto de vista socio-ecológico y del desarrollo de políticas y alternativas de prácticas de manejo para mejorar la capacidad de adaptación de estos sistemas para responder a vulnerabilidades conocidas y posibles sorpresas. En el caso de los pastizales se ha encontrado que las prácticas de mitigación pueden ser no viables económicamente; por el contrario, las prácticas de adaptación pueden estar diseñadas para manejar localmente los riesgos relacionados con el cambio climático (Joyce, *et al.*, 2013). En este contexto, es necesario que los manejadores de los pastizales consideren primero evaluar los riesgos y posteriormente determinar las estrategias ante el cambio climático y de esta manera definir su la capacidad de adaptación (Briske, *et al.*, 2015). Dentro de las prácticas de adaptación una de las estrategias sería adecuarse a las condiciones climatológicas adversas mediante el ajuste de la carga animal o el cambio de uso de suelo (Mu, *et al.* 2013).

De acuerdo al estado actual de deterioro de los recursos naturales en zonas áridas, es necesario que se apliquen técnicas de manejo sostenibles que involucren tecnología de bajos insumos externos que permita mitigar el impacto por fenómenos externos del cambio climático e incremente o por lo menos sostenga la bioproductividad para una mejor perspectiva de seguridad alimentaria en comunidades de alta vulnerabilidad (Roco, *et al.* 2012).

Objetivo General

Evaluar diferentes prácticas de manejo del suelo para la retención de humedad y mitigación de la erosión del suelo en zonas de agostadero bajo incertidumbre climática y realizar proyecciones de impacto ambiental.

Objetivo específico

Medir el impacto en la erosión del suelo y la bioproductividad mediante el establecimiento de pasto buffel (*Cenchrus ciliaris L.*) con y sin cobertura vegetal a base de rastrojo de maíz (*Zea mays L.*).

Hipótesis

H₁: El uso de cobertura vegetal, a base de rastrojo de maíz y la siembra de pasto buffel (*Cenchrus ciliaris L.*), tiene un efecto positivo en la conservación de la humedad del suelo, mediante una reducción significativa de la tasa de evaporación, con el consecuente impacto de mitigación en la erosión del suelo y el incremento de la bioproductividad.

LITERATURA CITADA

- Barbosa Moreno, F.; Gómez Cárdenas, M.; Sánchez Cohen, I.; Ariza Flores, R.; Díaz Padilla, G.; Orozco Cirilo, S.; Contreras Hinojosa, J.; Guajardo Panes, R. (2011). Principales obras de recarga de acuíferos. Folleto Técnico No. 23 INIFAP CIRPAS. Etlá Oaxaca. 93 p.
- Briske, D. D., L. A. Joyce, H. W. Polley, J. R. Brown, K. Wolter, J. A. Morgan, B. A. McCarl, and D. W. Bailey. 2015. Climate-change adaptation on rangelands: linking regional exposure with diverse adaptive capacity. *Front Ecol Environ*. 13(5): 249–256. doi:10.1890/140266.
- Cruz-Martínez, A., Pedroza-Sandoval, A., Trejo-Calzada, R., Sánchez-Cohen, I., Samaniego-Gaxiola, J. A. y Hernández-Salgado, R. (2016) Captación de agua de lluvia y retención de humedad edáfica en el establecimiento de buffel (*Cenchrus ciliaris* L). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 7(2): 159-172
- FAO. 2000. Manual de Captación y Aprovechamiento del Agua de Lluvia. Santiago de Chile. 224 pp. Consultado en: <http://www.rlc.fao.org/es/tierra/pdf/capta/micro1.pdf>
- González, M. G. (2012). Las zonas áridas y semiáridas de México y su vegetación. *SEMARNAT-INECC*, 194.
- Joyce, L., D. D. Briske, J. R. Brown, H. W. Polley, B. A. McCarl and D. W. Bailey. 2013. Climate Change and North American Rangelands: Assessment of Mitigation and Adaptation Strategies. *Rangeland Ecology & Management*. 66(5): 512 – 528.

- Kéfi, S., Rietkerk, M., Alados, C.L., Pueyo, Y., Papanastasis, V.P., Elaich, A., de Ruiter, P.C. (2007) Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems. *Nature*. 2007 Sep 13;449(7159):213-227.
- Mu, J. E., B. A. McCarl, and A. M. Wein. 2013. Adaptation to climate change: changes in farmland use and stocking rate in the U.S. *Mitigation and Adaptation of Strategies for Global Change* 18:713–730.
- Pedroza Sandoval, Aurelio; Cruz Martínez, Adriana;; Trejo Calzada, Ricardo; Sánchez Cohen, Ignacio; Samaniego Gaxiola, José Alfredo; Hernández Salgado, Ramón. (2016) Captación de agua de lluvia y retención de humedad edáfica en el establecimiento de buffel (*Cenchrus ciliaris* L.). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias*, vol. 7, núm. 2, abril-junio, 2016, pp. 159-172. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Morelos, México
- Ramos S. J. M. (2017) El terraceo como técnica de conservación de suelos en Bolivia: una propuesta para Hampaturi”, *Revista DELOS: Desarrollo Local Sostenible*, n. 28 (febrero 2017). En línea: <http://www.eumed.net/rev/delos/28/terraceo.html>
<http://hdl.handle.net/20.500.11763/delos28terraceo>
- Roco F., L., Engler P. A., & Jara-Rojas, R. (2012). Factores que influyen en la adopción de tecnologías de conservación de suelos en el secano interior de Chile Central. *Revista FCA UNCUYO*, 44(2), 31-45.
- Tarango A. L. A. (2011). Problemática y alternativas de desarrollo de las zonas áridas y semiáridas de México. *Centro Regional de Estudios de las Zonas Áridas y Semiáridas de México*, 1, 18-21.

Tiscareño, L.M., A.D. Báez y M.A. Velásquez V., K. N. Potter, J.J. Stone, M. Tapia V., and R. Claverán A. 1999. Agricultural research for watershed restoration in Central México. *J. Soil & Water Cons.* 54: 686 – 692.

Velásquez, M. A., Medina, G., Sánchez Cohen, I., Oleschko, K., Ruiz Corral, J. A., & Korvin, G. (2013). Spatial Variability of the Hurst Exponent for the daily Scale Rainfall Series in the state of Zacatecas Mexico. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, 2771-2780.

Velasquez. V.M.A., De Alba, A. A., Gutiérrez, L.R. y García, E.G. (2012). Prácticas de restauración de suelos para la conservación del agua. Centro Regional de Investigación Regional Norte Centro. Campo Experimental de Zacatecas. Folleto Técnico. Núm. 46. 97 pp.

Vento M., Caballero R., Pacheco O., Cabezas R., Corrales I., Martín O., Martínez, D. (2010). Conservación y mejoramiento de suelos de relieve llano a ondulado a partir de indicadores físicos y químicos. *Centro Agrícola*, 37(1), 29-34.

UACH, CONAZA, SEDESOL y SAGARPA. (2004). Escenarios climatológicos de la República Mexicana ante el Cambio Climático. *Editado por la Universidad Autónoma d Chapingo, Departamento de Suelos*, 169 pp.

CAPÍTULO II

EVALUACIÓN DE COBERTURA VEGETAL Y ESTABLECIMIENTO DE PASTO BUFFEL (*Cenchrus ciliaris* L.) EN EROSIÓN HÍDRICA DEL SUELO Y SU IMPACTO EN LA BIOPRODUCTIVIDAD

EVALUATION OF PLANT COVER AND ESTABLISHMENT OF BUFFEL GRASS (*Cenchrus ciliaris* L.) IN SOIL WATER EROSION AND ITS IMPACT ON BIOPRODUCTIVITY

Pedroza-Parga, E.H.¹, Velázquez-Valle, M.A.², Pedroza-Sandoval A.³, Sánchez-Cohen I.⁴, López-Santiago, M.A.³

¹Estudiante de la Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Medio Ambiente en Zonas Áridas de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo, ²Investigador en el Campo Experimental del INIFAP, Saltillo, Coah. ³Profesor-Investigador de la Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas de la Universidad Autónoma Chapingo, ⁴Investigador en el Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera, del INIFAP, Gómez Palacio, Dgo.

Resumen

La sequía degrada los recursos naturales a través de procesos de desertificación e impacta la bioproduktividad con marcado énfasis en las zonas áridas. El objetivo de este estudio fue hacer una evaluación de impacto del rastrojo del maíz usado como cobertura vegetal para la conservación de la humedad, control de la erosión hídrica del suelo y el establecimiento de pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) y la bioproduktividad. Se usó un diseño de bloques al azar con tres repeticiones, donde los tratamientos correspondieron a: siembra de pasto (5 Kg de semilla ha⁻¹) y sin siembra de pasto; aplicación de rastrojo de maíz (10 Ton ha⁻¹) y sin aplicar rastrojo; y las interacciones respectivas. Las variables medidas fueron la erosión (Ton ha⁻¹) y sedimentación (Ton ha⁻¹) del suelo, índice de germinación del pasto (%), altura del pasto (cm), cobertura vegetal (cm²), índice de clorofila, fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), uso eficiente del agua ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y producción de biomasa del pasto (Kg ha⁻¹). Al aplicar rastrojo de maíz y sembrar pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.), redujo e incrementó significativamente la erosión y deposición del suelo, respectivamente. La conservación del contenido de humedad del suelo en este tratamiento, repercutió en un

mejor crecimiento y desarrollo del pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) con mayores altura de planta, cobertura vegetal y contenido de clorofila, por efecto de una mayor actividad fotosintética, lo cual repercutió en una mayor producción de biomasa de pasto por unidad de superficie.

Palabras clave: degradación de suelos, humedad edáfica, pastos, zonas áridas

Abstract

The drought degrades natural resources through desertification processes and impacts bioproductivity with strong emphasis on arid lands. The objective of this study was to evaluate the impact of maize stubble used as vegetable cover for moisture conservation, control of water erosion of the soil and the establishment of buffel grass (*Cenchrus ciliaris* L.) and bioproductivity. A randomized block design with three replications where the treatments corresponded to: sowing of grass (5 Kg of seed ha⁻¹) and without sowing grass; corn stubble application (10 Ton ha⁻¹) and without application of corn stubble; and the respective interactions. The measured variables were soil erosion (Ton ha⁻¹) and sedimentation (Ton ha⁻¹) of the soil, index of grass germination (%), grass height (cm), vegetation cover (cm²), chlorophyll index, photosynthesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), transpiration ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), efficient use of water ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) and biomass production of the grass (Kg ha⁻¹). By applying maize stubble and sowing buffel grass, the erosion and deposition of the soil were significantly reduced and increased, respectively. The conservation of soil moisture content in this treatment had an impact on a better growth and development of buffel grass, with a higher plant height, vegetation cover and chlorophyll content, due to a greater photosynthetic activity, which resulted in a higher production of grass biomass per unit area.

Key words: soil degradation, soil moisture, grasses, arid lands

INTRODUCCIÓN

Uno de los principales factores que influyen en la degradación física de los ecosistemas terrestres es la erosión de los suelos. La erosión es un conjunto de procesos por los cuales las partículas del suelo son desprendidas, transportadas y depositadas en otro lugar por agentes como el agua, el viento o la acción biológica, y constituye una causa importante del deterioro ambiental y uno de los factores limitantes más serios a que se enfrenta la agricultura, además de influir en la pérdida de la biodiversidad. De acuerdo a David & Burgess (2013), cada año, se pierde la capacidad productiva de 10 millones de hectáreas de tierras de cultivo debido a la erosión del suelo, con la consecuente reducción de la capacidad productiva. En general, el suelo se está perdiendo en las áreas agrícolas 10 a 40 veces más rápido que la tasa de formación de este recurso, lo cual es un alto riesgo para la seguridad alimentaria (Loredo, *et al.* 2007).

La degradación del suelo es el resultado de una relación particular entre este recurso y el agua, donde el factor antrópico desempeña un papel determinante. La erosión hídrica provoca daños a la estructura del suelo y lo arrastra hacia las depresiones del terreno con fuerte impacto de contaminación (Vento, *et al.* 2010). Las pérdidas de suelo en cuencas hidrológicas es un problema recurrente. Estas pérdidas tienen efectos *in situ* y *ex situ* en las cuencas impactadas. Los problemas *in situ* incluyen la pérdida de estructura del suelo, el decremento de la materia orgánica y de nutrientes y la reducción de la disponibilidad de agua (Martínez, *et al.* 2011). En los problemas *ex situ* se pueden encontrar el azolve de canales y presas y la contaminación de lagunas, ríos y lagos; entre otros. Para la mitigación de la erosión del suelo, se han implementado diferentes prácticas de manejo, de acuerdo a las condiciones propias de cada región y el sistema de producción que se practique, donde

la toma de decisiones debe sustentarse en un sistema de captación, uso y manejo integral de suelos y aguas en zonas áridas (Pedroza-Sandoval, *et al.* 2016; Sánchez-Cohen, 2015a).

México se ha situado entre los países latinoamericanos con problemas de erosión más severos, ya que el 75 % de su superficie presenta evidencias de diferentes categorías de erosión desde leve hasta acelerada (Maass y García-Oliva, 1990). De acuerdo a la FAO (1993) el promedio anual de erosión se puede calcular de entre otras maneras con la Ecuación Universal de Pérdida de Suelos (USLE, por sus siglas en inglés), que tiene en cuenta los siguientes factores: la erosividad de la lluvia, erodabilidad del suelo, longitud y grado de la pendiente, manejo de la cubierta vegetal del cultivo y prácticas de conservación. De acuerdo a lo anterior, la disminución del perfil del suelo se relaciona a la pérdida de productividad ajustando las clases de aptitud a unos rangos críticos de profundidad del suelo. Tales cálculos pueden ser utilizados para estimar los límites de tolerancia de pérdida de suelo bajo determinadas opciones de prácticas de manejo, derivando especificaciones sobre medidas necesarias de conservación de este recurso.

Los sistemas de producción ganaderos a base de pastizales en zonas áridas, corresponden a sistemas productivos de alta vulnerabilidad, por la recurrencia de las sequías y la presencia de suelos con baja cobertura vegetal y escaso contenido de materia orgánica, lo cual hace que los suelos sean de alto impacto por la degradación de los mismos, y el consecuente incremento en la desertificación (Kéfi, *et al.* 2007); el sobrepastoreo en este tipo de sistemas productivos, incrementa el riesgo de degradación del suelo por efecto de la erosión (Velásquez, *et al.* 2012).

Conforme al contexto anterior, es necesario continuar con estudios que fortalezcan el buen uso y manejo sostenible de los recursos naturales con mayor énfasis en eco-regiones de alta vulnerabilidad como son las zonas áridas, de tal forma que la investigación y el desarrollo tecnológico tiendan a mitigar el impacto por fenómenos extremos y se mantenga la bioproductividad para una mejor perspectiva de seguridad alimentaria en comunidades marginadas (Roco, *et al.* 2012).

Es necesario seguir explorando tecnologías que permitan una mayor sustentabilidad agroalimentaria en regiones vulnerables como las zonas áridas. Una de las prácticas de manejo de pastizales para hacer sostenible un pastizal es la captación de agua de lluvia para el establecimiento y producción de especies forrajeras, ya que incluye no solo captar el agua, sino hacer uso de insumos naturales o sintéticos para la retención de la humedad y de esa manera tener un mejor establecimiento de pastos en áreas ganaderas degradadas. El pasto buffel se encuentra entre las especies de gramíneas introducidas en México que han mostrado adaptación en el pastizal semidesértico y alta producción de forraje en condiciones de estrés hídrico (Saucedo, 2003; Velásquez, *et al.* 2014) y con potencial de desarrollo en suelos degradados de zonas áridas (Cruz-Martínez, *et al.* 2015). De igual forma, el uso de retenedores de humedad en el suelo, ha mostrado ser una tecnología de perspectiva para mitigar la alta tasa de evaporación a que está sujeto el suelo en zonas áridas (Pedroza-Sandoval, *et al.* 2018; Pedroza-Sandoval, *et al.* 2017; Pedroza-Sandoval, *et al.* 2015).

Proceso de erosión – deposición

El concepto de erosión – deposición generalmente se ha utilizado para definir áreas y/o sitios en los cuales ha ocurrido movimiento de partículas de suelo (Figura 1); tomando en

cuenta que a erosión de refiere cuando en el sitio de muestreo ha disminuido el espesor de la capa original del suelo por el desprendimiento y transporte del mismo; por el contrario, en un sitio ocurre la deposición cuando el espesor de la capa de suelo se incrementa por la acumulación sobre de ella, de partículas o agregados de suelo. Este proceso ha sido modelado matemáticamente y resuelto de una manera analítica; considerando factores de suelo, pendiente del terreno, factores de cobertura y las tasas de precipitación y escurrimiento superficial (Rose, *et al.*, 1983).



Figura 1. Representación esquemática de las áreas de erosión y deposición de suelo en un pastizal en zonas áridas.

Utilizando este tipo de modelos se han logrado determinar en cuencas hidrológicas de uso agrícola, las áreas (nodos) en las cuales existe el riesgo de movimiento de suelo y aquellas donde puede ocurrir la sedimentación del suelo (Khanbilvardi and Rogowsky, 1986). El objetivo de este estudio fue hacer una evaluación del establecimiento del pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) como retenedor natural de humedad, en combinación con

cobertura a base de rastrojo de maíz y su impacto en la erosión del suelo y la bioproductividad del pasto en áreas degradadas de zonas áridas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación geográfica del área de estudio. El estudio se llevó a cabo en un área de agostadero de la comunidad de Roma-Texas del Municipio de Mapimí en el Estado de Durango, México, con una extensión territorial de aproximadamente 800 ha en lo que es la cuenca baja de la zona de estudio correspondiente a un área natural de pastizal en combinación con matorral micrófilo y rosetófilo. El área corresponde a suelos calizos de origen aluvial de poca profundidad en las partes altas y de mayor profundidad en las llanuras y valles; de color castaño, claro oscuro, textura arcillosa con grava y un pH de 7.4 y pendiente que va de 1 al 8 % (García y Martínez, 2004). La región se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas 25° 52' 26.6" LN y 103° 43' 29.7" LW, con una altitud de 1,168 msnm. La temperatura máxima es de 41° C, una mínima de 9° C y una media de 18° C. La precipitación pluvial media anual es de 263.1 mm. El municipio de Mapimí forma parte de la cuenca Nazas-Aguanaval se ubica entre las latitudes 22° 40' y 26° 35' Norte, y los Meridianos 101° 30' y 106° 20' Longitud Oeste (García, 1973).

Descripción del sitio de estudio. Según análisis físico-químico de suelos realizados en la fase previa al establecimiento del presente estudio, el sitio experimental corresponde a un suelo franco arenoso con un porcentaje de 56, 28 y 16 de arena, limo y arcilla respectivamente, con un punto de marchitez permanente (PMP) de 9.6 % y una Capacidad de Campo de (CC) de 19.7 %. Son suelos pobres en macro y micro elementos, aunque con buenos niveles de Potasio (68.4 mg Kg⁻¹) y Calcio (33.7 meq L⁻¹), esto último hace que los suelos sean alcalinos con un pH de 8.3.

Cálculo por el método de aproximación del volumen de agua escurrida. Para medir la esorrentía superficial, se usó el método de aproximación para calcular el volumen de agua del cauce en cada evento de lluvia. La medición de la velocidad en una corriente, se lleva a cabo con la información geométrica de la sección donde se mide y con el registro de los valores de nivel del agua. Esta información es la base para determinar el volumen que pasa por el cauce por unidad de tiempo; a este proceso de medición se le denomina aforo (Linsley, *et al.*, 1998). En el presente estudio la esorrentía registrada fue en una acequia formada de manera natural por los escurrimientos sucesivos registrados en años anteriores a 2017 y ambos de forma geométrica trapezoidal. El primer sitio de aforo se encuentra ubicado a la entrada del campo productivo del pastizal, mientras que el segundo sitio, sobre la misma acequia (a 300 m aproximadamente), se ubica en la entrada al experimento, la cual se ubicó en la parte baja del campo productivo en sentido Oeste-Este (Figuras 2A y 2B).

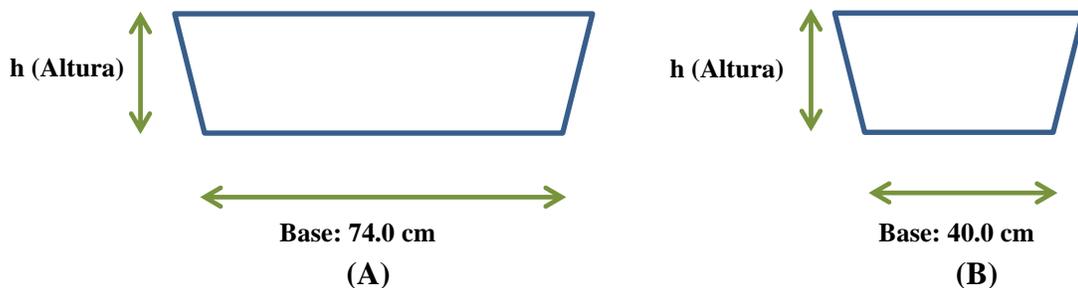


Figura 2. Acequia trapezoidal a la entrada al campo de pastizal (A) y entrada al área experimental (B).

La expresión del gasto o el volumen por unidad de tiempo, es definido por la siguiente ecuación (Chow, 1959; Breña y Jacobo, 2006):

$$Q = A * V \dots\dots\dots (1)$$

Donde **Q** es el gasto, en m³ s⁻¹; **V** es la velocidad representativa del flujo en m s⁻¹; y **A** es el área de la sección o canal, la cual es perpendicular a la dirección de la velocidad del flujo en m².

El valor de área de la sección de un río o canal se obtiene tanto de sus características geométricas, como del nivel del agua en diferentes tiempos, en este caso mediante la ecuación del área del trapecio:

$$A = \frac{(B+b) \times h}{2} \dots\dots\dots (2)$$

Dónde:

A= Área de la sección de la acequia; B= Base mayor; b= Base menor; y h= Altura (nivel del agua de escorrentía), todo el producto dividido entre dos.

Para determinar la velocidad de la corriente de agua varía tanto en perfil como en sección.

La siguiente expresión de resistencia al flujo sugerida por Manning representa su cálculo (Bolinaga, 1979; Sánchez *et al.*, 2015b):

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} S^{1/2} \dots\dots\dots (3)$$

Donde:

V=Velocidad en m s⁻¹; **n**= Coeficiente de Rugosidad de Manning (dependerá de la disposición de la naturaleza de las paredes de la sección de aforo). Se identificó un canal natural abierto con fondo de piedra y secciones irregulares con vegetación aislada, correspondiente a un coeficiente de 0.050 (Bolinaga, 1979); **R**= Radio hidráulico, determinado a su vez con la siguiente ecuación:

$R = \frac{A}{P_m}$, donde A es el área de la sección y P_m es el valor del Perímetro de mojado (Figura 3); S = Pendiente del fondo del canal, el cual para este caso se estimó en 0.001.

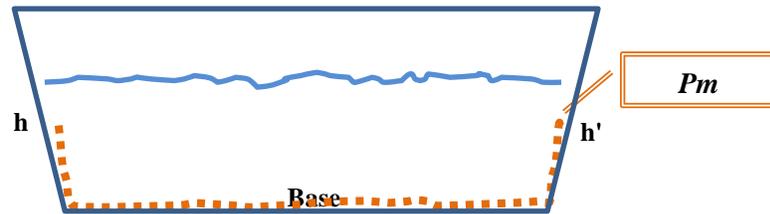


Figura 3. Perímetro de mojado (correspondiente a la línea punteada= $(h + h' + \text{Base})$).

Diseño experimental y de tratamientos. El sitio experimental corresponde a un área natural de pastizal, con una pendiente promedio de 0.07 en donde se realizó un levantamiento topográfico con curvas a nivel, previo al establecimiento del estudio. Para llevar a cabo el trabajo, se usó un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones, donde los tratamientos correspondieron a dos factores de variación: uso de pasto (con y sin pasto) y cobertura a base de rastrojo (sin y con rastrojo) y las interacciones respectivas, dando un total de cuatro tratamientos producto del factorial 2×2 por repetición y 12 tratamientos por las tres repeticiones. Cada unidad experimental (tratamiento), correspondió a una superficie de 25 m^2 , con un total de 400 m^2 en toda el área experimental.

Variables medidas. De Julio a Noviembre de 2017 se llevaron a cabo las mediciones de las variables incluidas en este estudio, las cuales correspondieron a las siguientes: número de plantas de pasto m^{-2} mediante uso de regleta transparente de 30 cm de largo por 5 cm de ancho (0.015 m^2) contabilizando el número de plantas interceptadas bajo la regleta en tres sitios al azar por tratamiento y después hacer la transformación a número de plantas

m^{-2} ; altura del pasto (cm), mediante uso de cinta métrica; cobertura vegetal ($\% m^{-2}$), con uso de cuadrante 40x 40 cm) y estimando el porcentaje de suelo cubierto por el pasto en una escala de 0 a 100 para posteriormente hacer la transportación a porcentaje de cobertura por m^{-2} ; índice de clorofila, con uso de determinador de clorofila marca Spectrum Technologies Inc. Fieldscout CM 1000. Adicionalmente, se obtuvieron mediciones para contenido de humedad del suelo (%), mediante uso de tensiómetro digital Soil Tester® Modelo HB-2 (Ontario, Canadá) que mide porcentaje de humedad en el suelo en tiempo real; escorrentía en cada evento de precipitación pluvial ($m^3 s^{-1}$);

Pérdida de suelo. Para estimar la pérdida de suelo, se utilizó un método similar al de los clavos con rondanas (Colegio de Postgraduados, 1991) el cual consiste en cuantificar el movimiento de las partículas de suelo como erosión (mm) y sedimentación (mm) sobre una placa de metal de 20 X 20 cm (Figura 4). Para medir la magnitud del movimiento del suelo en cada uno de los lados de la placa después de un evento de escurrimiento superficial, se midió el espesor de la lámina de suelo erosionada o depositada. Las placas fueron colocadas de manera aleatoria en número de tres por cada tratamiento.

La erosión se midió de la pequeña cárcava formada entre la placa de metal y suelo; en tanto que la deposición, se midió en altura del suelo acumulado sobre la placa de metal.

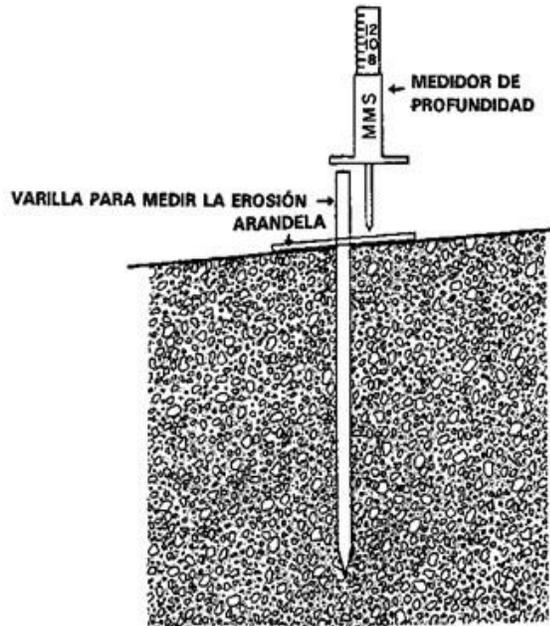


Figura 4. Estaca con placa de metal de 400 cm² insertada en el experimento en número de tres por cada tratamiento.

Ventajas del método:

- 1) Es un método sencillo y fácil de instalar
- 2) La toma de datos es según la disponibilidad de tiempo del investigador
- 3) Las varillas pueden instalarse en cualquier pendiente y terreno
- 4) Los materiales son reutilizables
- 5) El método puede combinarse con otros métodos con el mismo propósito

La conversión del espesor de la lámina erosionada o sedimentada del en mm a Ton ha⁻¹, se realizó mediante la ecuación:

$$Y = X * Da * 10, \dots\dots\dots (4)$$

Donde Y es el suelo erosionado o sedimentado en Ton ha⁻¹, X es la altura en mm del suelo erosionado o sedimentado, Da es la densidad aparente del suelo en Ton m⁻³ (1.52) y

diez es una constante de la ecuación en función del área de la placa (Pizarro, T.R. y Cutiño (2002).

Adicionalmente a las variables del suelo, se midieron en la planta de pasto la fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) y la transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), con uso del analizador de flujo de gases por rayos infrarrojos (IRGA, por sus siglas en inglés) marca LI-6400 (LI-COR®, Inc. Lincoln, Nebraska, USA), a partir de las cuales se calculó la variable denominada Uso eficiente del agua ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1} / \text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

Al final del experimento, se obtuvo la producción de biomasa, mediante el peso seco (g) por unidad de área, y posteriormente transformarlo a rendimiento de materia seca del pasto por hectárea. Con el propósito de relacionar los eventos de precipitación pluvial y la erosión y el propio contenido de humedad del suelo y su efecto en la planta de pasto, se llevó un registro de precipitación pluvial (mm) obtenidos de una estación microclimática marca La Crosse Technology®, Modelo Heavy Weather Pro WS 2800 (USA), establecida en el área de estudio; con dichos datos se generaron los hidrogramas respectivos para cada evento de lluvia.

Análisis de datos. Con la base de datos, se realizaron análisis de regresión, correlación y de varianza y prueba múltiple de medias de Tukey ($P \leq 0.05$). Se usó el paquete SAS versión 9.0.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Precipitación pluvial y escurrimiento superficial. El total de precipitación pluvial para el año 2017, fue de 274.4 mm de enero a diciembre, lo cual puede considerarse como un año regular de lluvia, ya que el promedio anual en la región es de 263 mm (García (1973).

La lluvia se mantuvo prácticamente durante todos los meses del año, a excepción del mes de noviembre que se reportó con 0 mm; en tanto que el período de máximas precipitaciones pluviales fue de julio a septiembre, con un promedio trimestral de 165.5 mm (Fig. 5). Lo anterior corrobora el carácter torrencial de la lluvia en la región, con los consecuentes riesgos de erosión hídrica de los suelos (Velásquez, *et al.*, 2017). En este contexto, es indispensable conocer el riesgo del éxito del establecimiento bajo estas condiciones de aridez y definir algunas estrategias o prácticas para minimizar el impacto de la escasa precipitación a fin de lograr hacer productivo el sitio (Briske, *et al.*, 2015).

Tomando en cuenta que cuando se pretende establecer los pastos es cuando existe una escasa precipitación y una mayor demanda evapotranspirativa es cuando se justifica la evaluación de prácticas de conservación de humedad en el suelo para asegurar el establecimiento de los zacates.

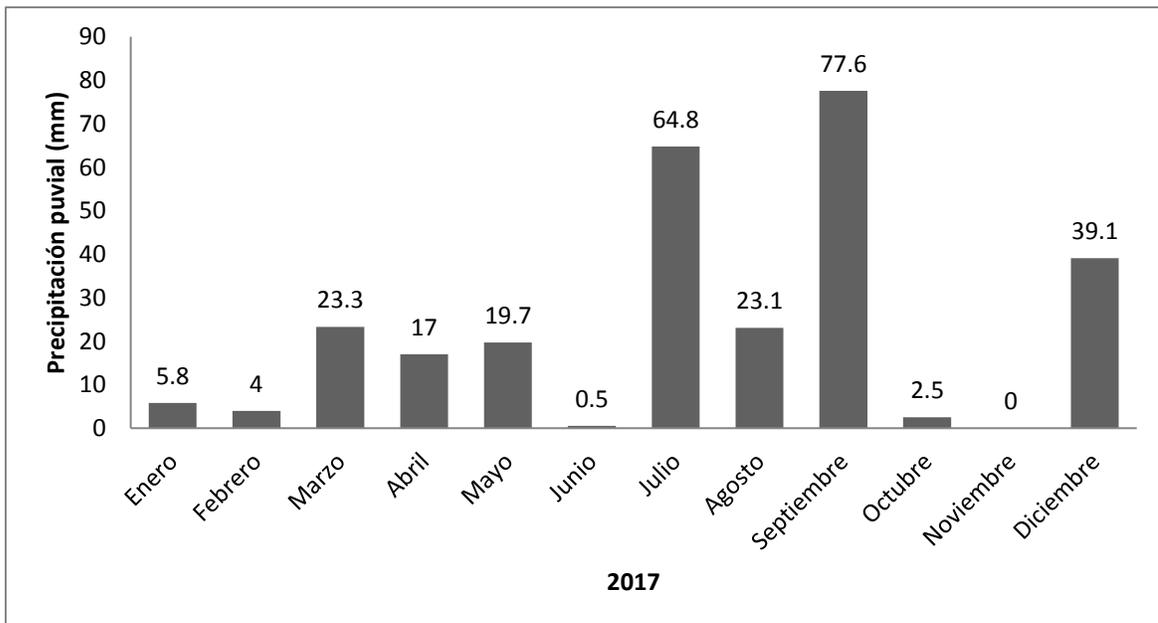


Figura 5. Comportamiento de la precipitación pluvial ocurrida durante el año de 2017 en el área de estudio, correspondiente al Ejido Roma-Texas del Municipio de Mapimí, Dgo.

De acuerdo a la figura 6, ocurrieron de 6 eventos de escorrentía identificables durante el período de julio a septiembre de 2017, midiendo la altura (cm) del nivel del agua en la acequia a diferentes tiempos desde el inicio del evento de escurrimiento, hasta el final del mismo. Se considera que la mayor escorrentía fue la detectada los días 28 y 29 de septiembre de 2017, con valores promedio de altura de agua de 20 y 44 cm. En los demás eventos la altura máxima del nivel del agua fluctuó entre los 7 a 10 cm; el resto de los eventos fueron menores a 10 cm (Fig. 6).

Con base en estos datos se procedió a construir las curvas carga-gasto, para luego proceder a obtener los hidrogramas correspondientes.

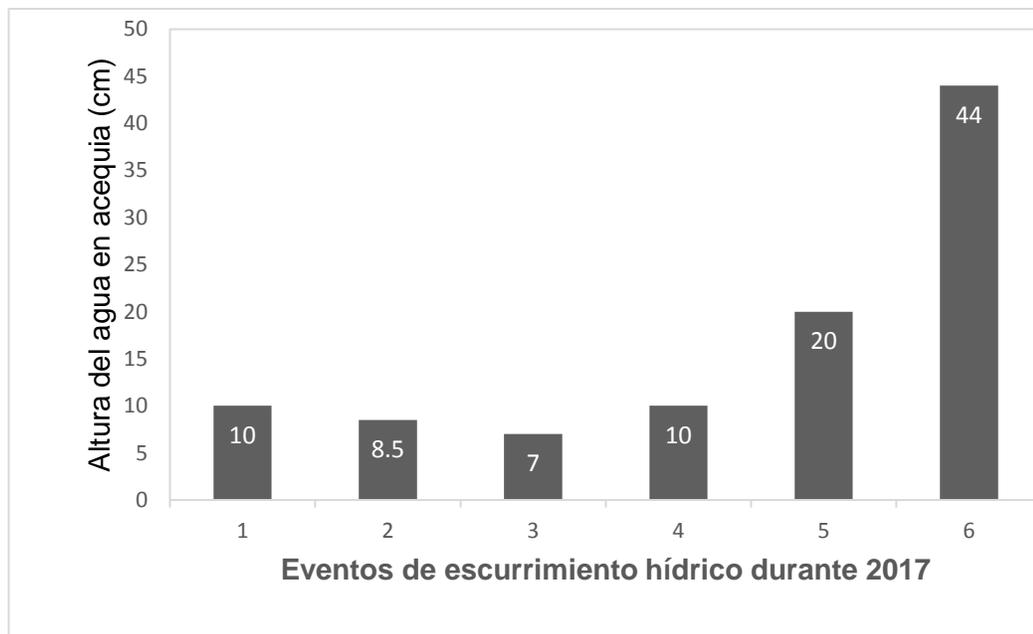


Figura 6. Eventos de escorrentía medidos en altura de agua (cm) en la acequia.

Estimación de la curva carga-gasto. Con base en la ecuación 1, se procedió a aforar la sección hidráulica a diferentes alturas, haciéndolas variar cada 2 cm y de esa manera

obtener la curva carga-gasto con el objetivo de derivar la forma matemática y ecuación que mejor se ajuste al comportamiento de los datos de la curva (Cuadro 1).

Cuadro 1. Variación de alturas de la sección hidráulica del sitio 1 (entrada al campo de pastizal) y cálculo de gasto en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

Alturas (h), metros	$Q_i, \text{m}^3 \text{s}^{-1} *$
0.02	0.0028
0.04	0.0089
0.06	0.0172
0.08	0.0275
⋮	⋮
⋮	⋮
0.40	0.3412
0.42	0.3667
0.44	0.3928

*Calculado con la ecuación (1).

Cuadro 2. Variación de alturas de la sección hidráulica del sitio 2 (entrada al área experimental) y cálculo de gasto en $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$.

Alturas (h), metros	$Q_i, \text{m}^3 \text{s}^{-1} *$
0.02	0.0026
0.04	0.0081
0.06	0.0155
0.08	0.0246
⋮	⋮
⋮	⋮
0.36	0.2383
0.38	0.2571
0.40	0.2762

*Calculado con la ecuación (1).

Mediante la técnica de regresión lineal simple y con base en los datos del cuadro 2, se generó la ecuación 5 con un modelo potencial; en tanto que la ecuación 6 fue generada para el sitio 2; es decir, con la información a la entrada al área experimental. En ambos casos, el ajuste del modelo potencial a los datos fue excelente ($R^2= 0.99$); como se muestra gráficamente en las Figuras 7 y 8.

$$Q = 1.4994h^{1.589} \tag{5}$$

$$Q = 1.1955h^{1.548} \tag{6}$$

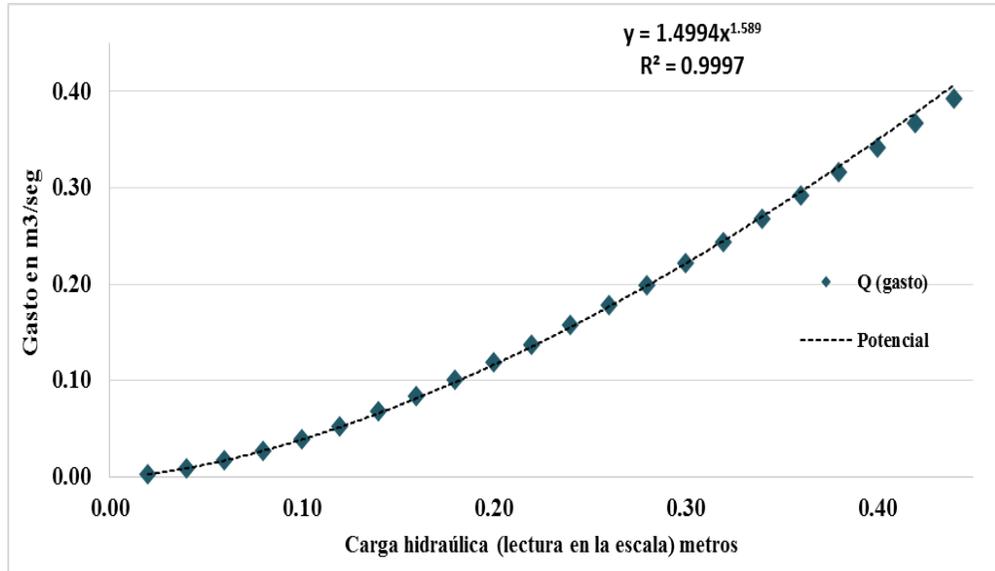


Figura 7. Curva carga-gasto con línea de tendencia de regresión ajustada a los datos de Q en la sección 1 (entrada al campo de pastizal).

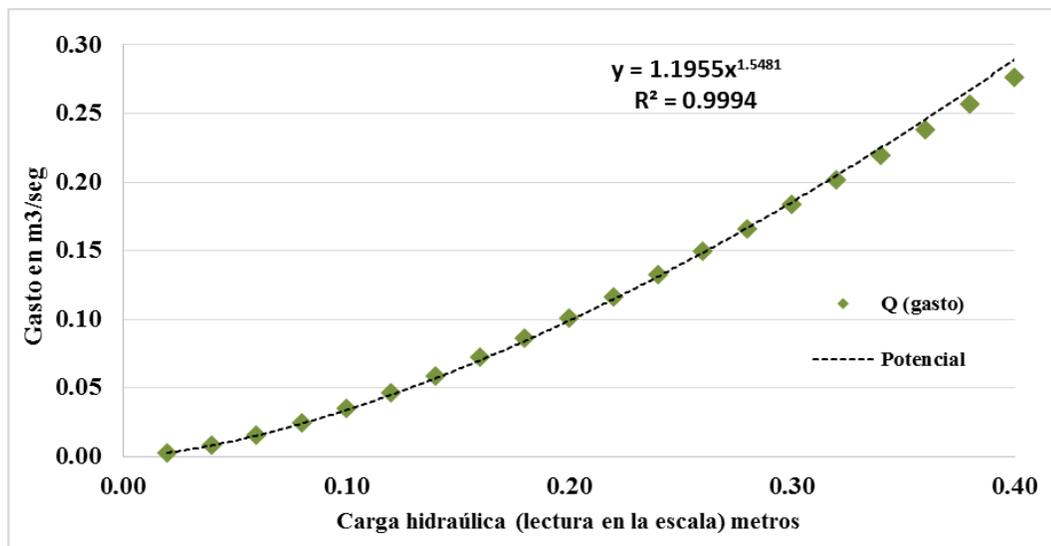


Figura 8. Curva carga-gasto con línea de tendencia de regresión ajustada a los datos de Q en el sitio 2 (entrada al área experimental).

Posteriormente, se obtuvieron los seis hidrogramas producto de las precipitaciones ocurridas en el sitio durante el periodo de estudio (Figura 9). Con esta base, se utilizó la aproximación analítica para conocer el volumen de cada hidrograma, lo cual consiste en la solución exacta que se obtiene al integrar la función matemática que lo describe. Esta función se obtuvo mediante el paquete computacional *CurveExpert 1.40* que permitió ajustar datos observados a diferentes funciones polinomiales (Sanchez, *et al.*, 2015).

En el modelo polinómico (ecuación 7) que describe al hidrograma (x), el volumen total sería:

$$V = \int_{x_0}^{x_n} f(x)dx = \int_{x_0}^{x_1} f(x)dx + \int_{x_1}^{x_2} f(x)dx + \dots + \int_{x_{n-1}}^{x_n} f(x)dx \quad (7)$$

Donde V es el volumen total, la integral del tiempo cero al tiempo máximo y la $f(x) dx$ que describe al hidrograma como una función de ajuste a los datos de flujo observados.

Cálculo de la lámina de riego

De acuerdo al volumen dado por cada hidrograma en la sección de aforo a la entrada de área experimental, la lámina de escurrida se calculó con la ecuación 5, de acuerdo a lo especificado por Bolaños-González *et al.* (2001). La lámina escurrida por hectárea aplicada en cada evento de lluvia, se identifica en el Cuadro 3.

$$LR = \frac{V}{A} \quad (8)$$

Dónde:

LR=Lámina escurrida; V=Volumen (m³); A=Área de la sección de la acequia (m²)

Se puede observar en la Figura 9| que a pesar de que la duracion de los eventos de escorrentia fue corta (\pm una hora) se detectó que en la mayoria de los eventos (con excepcion del ocurrido el 18 de agosto) un comportamiento hidrológico derivado de una variación espacial de la precipitación dentro de la cuenca. Este comportamiento se ve reflejado en cambios en el nivel de los escurrimientos en la seccion de aforo. Por ejemplo, en el evento del día 17 de julio se muestra claramente que al final del hidrogramase registró un incremento en el nivel del agua en la seccion de aforo; lo anterior producto de lluvia que generó escurrimientos en la parte mas lejana de la cuenca a la seccion de aforo.

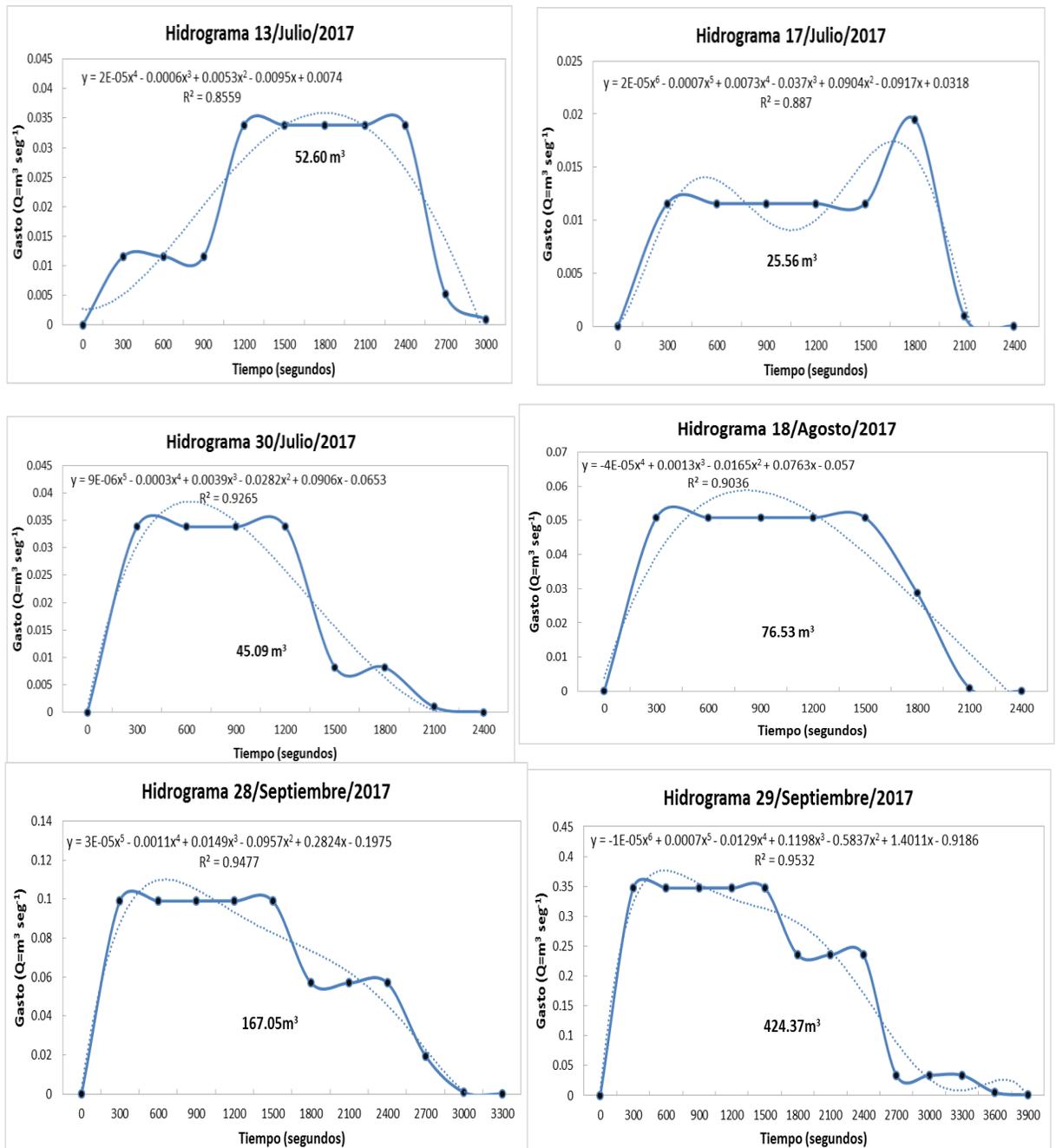


Figura 9. Hidrogramas elaborados para los eventos de lluvia-escorrentía en el área experimental del Ejido Roma-Texas, municipio de Mapimí, Dgo. Línea punteada= valores teóricos Línea sólida= valores observados.

Se puede señalar que el modelo polinómico que describe la respuesta hidrológica se ajusta adecuadamente al hidrograma generado con los valores observados; especialmente en lo que se refiere al gasto máximo de las avenidas.

Cuadro 3. Cálculo de lámina de agua escurrida de acuerdo a los hidrogramas obtenidos.

Avenida	Fecha del evento	Volumen (m³)	Lámina de agua escurrida calculada por hectárea (cm)
1	13/Julio/2017	52.60	0.52
2	17/Julio/2017	25.56	0.25
3	30/Julio/2017	45.09	0.45
4	18/Agosto/2017	75.53	0.75
5	28/Septiembre/2017	167.05	1.67
6	29/Septiembre/2017	424.37	4.24
Total			7.88

Erosión y deposición del suelo.

La técnica de muestreo del proceso de erosión y deposición de partículas de suelo en los puntos de interés fue aceptable; ya que se detectaron correctamente estas dos condiciones después de los eventos de escurrimiento superficial en cada uno de los tratamientos evaluados.

La erosión del suelo fue mayor cuando la superficie del suelo no tuvo cobertura (testigo), con un valor de erosión de 68.5 Ton ha⁻¹, en tanto el tratamiento con cobertura vegetal y siembra de pasto fue el de menor impacto sobre la erosión, con un valor promedio de 30.8

Ton ha⁻¹ ($P \leq 0.05$); los tratamientos de siembra de pasto y cobertura de rastrojo de maíz por separado, manifestaron una tendencia de efecto, con valores intermedios a los antes citados. El impacto de la cobertura vegetal (mantillo) sobre los procesos de escurrimiento y erosión se ha documentado ampliamente, coincidiendo los resultados de este estudio con lo encontrado en otras investigaciones (Sánchez, 1984; Blackburn, et al., 1986; Le Bissonnais, *et al.*, 2004). En cambio los valores de deposición de suelo y contenido de humedad, se expresaron exactamente en sentido contrario, con valores significativamente menores en el testigo y de mayores en el tratamiento de siembra de pasto con rastrojo de maíz. En tanto que, en términos de erosión neta obtenida por la diferencia entre la erosión y la deposición por tratamiento, se tiene que solo en el testigo se identificó un movimiento erosivo neto de 38 Ton ha⁻¹ y un valor muy bajo cuando se aplicó rastrojo de maíz como cobertura (4.56 Ton ha⁻¹); en tanto que en los casos donde se sembró pasto y éste combinado con rastrojo de maíz, observaron una mayor deposición de suelo que erosión del mismo, con valores de -8.97 y 24.78 Ton ha⁻¹, respectivamente (Cuadro 4). Lo anterior sugiere que, por efecto del arrastre de suelo por erosión, se producen sitios de deposición hacia las partes bajas del área del propio tratamiento, incrementándose la capa de suelo y con ello se mantiene un mayor contenido de humedad del suelo. Lo anterior es congruente con lo reportado por Morgan (2005), quien identificó una coincidencia de la intensidad de la precipitación pluvial con el arrastre de suelo con efecto en la erosión, produciendo sitios de deposición con un mayor grosor de la capa de suelo. Las altas precipitaciones están relacionadas a un mayor impacto en la erosión del suelo, llegando a ser en algunos casos de carácter extremo (De Alba, *et al.* 2011).

Cuadro 4. Promedio de erosión, deposición del suelo y contenido de humedad edáfica por efecto de cobertura vegetal en suelos degradados de zonas áridas. Mapimí, Dgo.

Tratamiento	Suelo erosionado* (Ton ha⁻¹)	Suelo sedimentado* (Ton ha⁻¹)	Erosión Neta** (Ton ha⁻¹)	Contenido Hum. Suelo (%)
Sin cobertura (Testigo)	68.5a	30.5b	38	11.1b
Siembra de Pasto	51.5ab	60.4a	-8.9	12.2ab
Rastrojo de maíz	43.6ab	39.1ab	4.5	12.7ab
Siembra de Pasto Rastrojo de maíz	30.8b	55.6a	-24.7	12.8a
Media	48.1	46.6	2.2	12.2

Prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. **Obtenida por la diferencia entre la erosión y la sedimentación.

Respecto a la dinámica de la erosión y deposición del suelo en el tiempo, se identificó que el arrastre tuvo un comportamiento en promedio lineal entre 38.6 a 50.61 Ton ha⁻¹ durante el período de los 38 a los 127 días después de la siembra del pasto (DDSP) a una tasa de 0.118 de incremento por día; en tanto que la deposición del suelo, aunque inició con valores menores, terminó con valores más altos que la erosión, durante el mismo período, pasando de 8.81 a 82.23 Ton ha⁻¹, a una tasa de 0.849 de incremento por día (Figura 10).

Lo anterior, indica que el arrastre de suelo puede ser un tanto generalizado en sentido horizontal, con una tasa menor de arrastre, pero con sitios de deposición más específicos que incrementan el grosor de la capa de suelo. Esto coincide con lo reportado por De Alba, 2003, quien indicó que la formación de 5 cm de suelo puede requerir largos periodos de tiempo, en tanto que los procesos erosivos pueden actuar rápida y drásticamente; el

equivalente a esos 5 cm de espesor de la capa superficial de suelo puede ser eliminado durante una única tormenta.

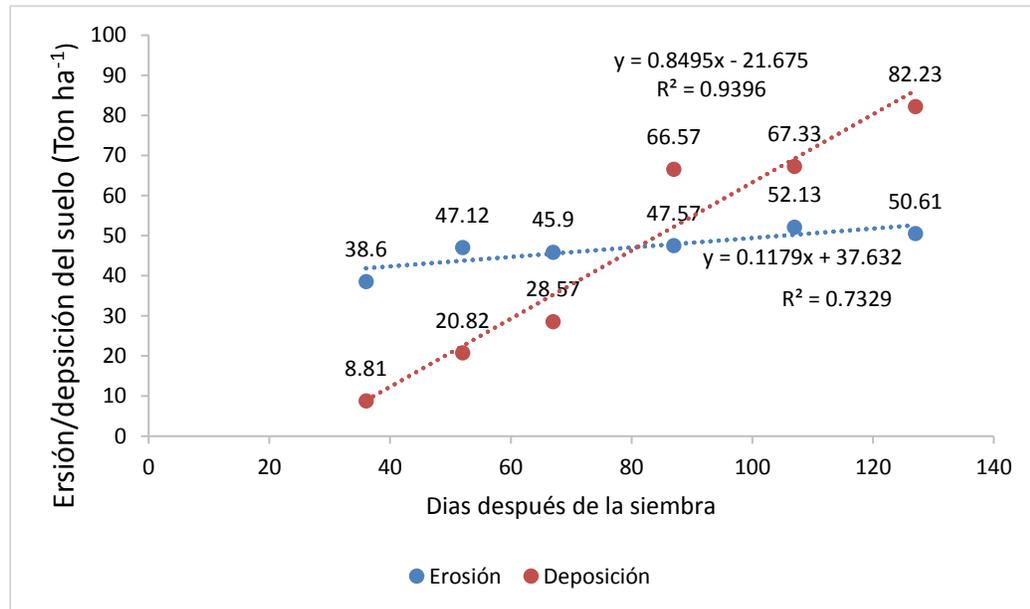


Figura 10. Comportamiento de la erosión y deposición promedio de suelo en área degradada de zonas áridas de Mapimí, Dgo.

La erosión y deposición de suelo también mostraron un comportamiento exponencial positivo de incremento de una variable con respecto de la otra, a razón de una tasa exponencial de 2.5, con un ajuste de $R^2 = 0.8$, lo cual denota un buen nivel de explicación del tipo de relación entre ambas variables (Fig. 11). Este comportamiento está altamente afectado por el microrelieve o micro topografía de la capa superficial del suelo (Ding and Huang, 2017)

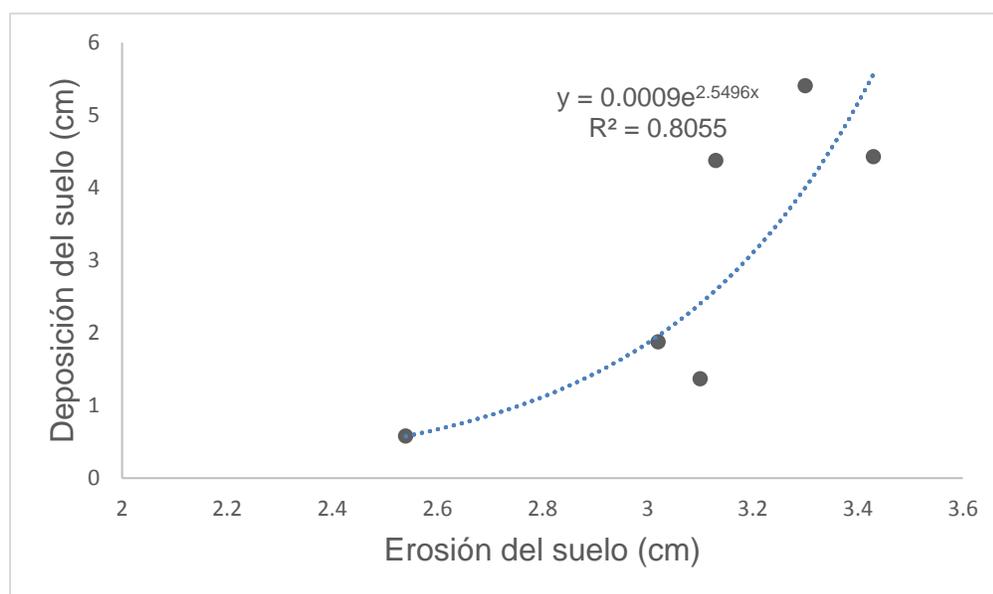


Figura 11. Relación entre la erosión y deposición del suelo por efecto hídrico.

Humedad del suelo. Respecto al contenido de humedad del suelo a través del tiempo con relación a la cobertura vegetal, se tiene que esta variable se mantuvo en promedio relativamente constante a través del tiempo, con una muy leve tasa de incremento durante el periodo de evaluación; en tanto que la cobertura del pasto en el suelo se mantuvo en constante incremento de manera exponencial hasta la fecha de la última evaluación, la cual fue a los 127 días después de la siembra del pasto (DPSP) (Fig. 12).

Es importante señalar que a pesar del incremento de la cobertura vegetal el contenido de humedad del suelo no presentó una respuesta positiva; por lo que se asume que bajo las condiciones en las que se realizó el trabajo, la humedad en el suelo depende más de otros factores como la evapotranspiración.

De acuerdo a la FAO (1983), los procesos responsables de la formación de los suelos y de su destrucción por erosión, alcanzan un equilibrio tal que asegura el mantenimiento de

una capa superficial de suelo capaz de soportar una cubierta vegetal estable, sin embargo, tal equilibrio puede ser roto por las actividades naturales y antropocéntricas, lo cual llega a limitar la actividad bioproductiva. Lo anterior es importante, ya que el contenido de humedad mayor, fue en virtud de una mayor capa de suelo ante una acelerada tasa de deposición por efecto de arrastre por erosión y ello permitió una constante tasa de incremento de la cobertura vegetal del pasto. Ello sugiere que, mediante estas prácticas de conservación de la humedad y control de la erosión, se generan expectativas de mediano plazo de la recuperación de suelos degradados en zonas expuestas a eventos extremos, como son las zonas áridas. Ante tal situación, es importante conocer las prácticas de manejo que puede ser aplicados en suelos áridos con el propósito de mitigar la degradación progresiva de este recurso, donde éste tipo de prácticas pueda disminuir la tasa de pérdida de suelo.

Se estima que una cantidad de 11.2 ton ha^{-1} es el límite máximo de tolerancia de erosión anual (Schmidt, *et al.* 1982), la cual corresponde a una capa de suelo de 1 mm de espesor que sea removida uniformemente de la superficie, tomando como valor medio de densidad aparente del suelo 1.12 g cm^{-3} . No obstante, dicho límite tolerable de pérdida de suelo varía de manera importante para los distintos tipos de suelos, en función de su estado de conservación, profundidad y propiedades físicas y químicas; también es reconocido que la erosión del suelo cambia las características físicas, químicas y biológicas del suelo, de manera que ambos procesos conlleva a un impacto negativo en la bioproductividad, en este caso del potencial forrajero de las zonas de agostadero y el deterioro propio de los suelos (FAO, 2015a y Graves, 2015).

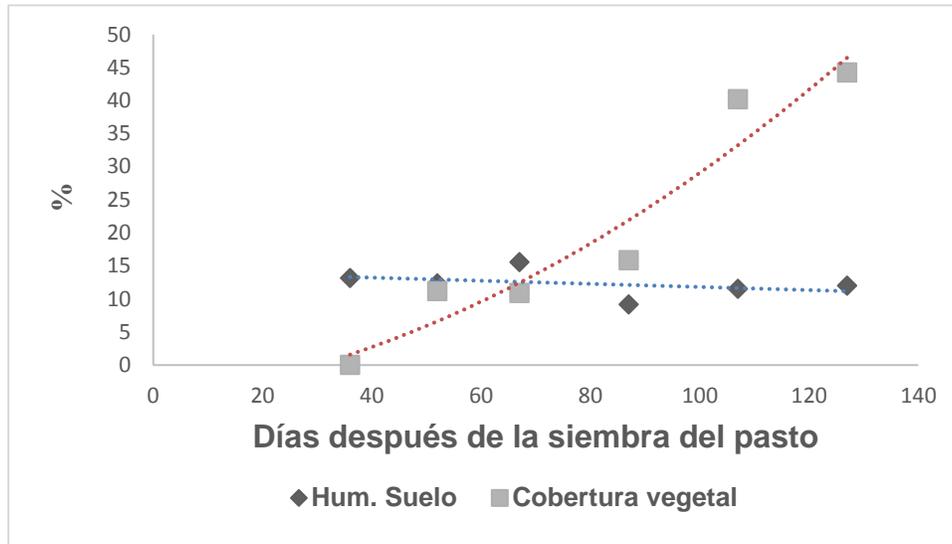


Figura 12. Comportamiento promedio del contenido de humedad en el suelo bajo condiciones de temporal e incremento de la cobertura vegetal del pasto (*Cenchrus ciliaris* L.) en diferentes fechas de muestreo.

Crecimiento y desarrollo del pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.). El número de plantas de pasto fue significativamente mayor cuando se aplicó rastrojo de maíz y se sembró pasto, respecto del testigo, con valores de 518.5 y 172.8 plantas m⁻², respectivamente, con una tendencia de efecto intermedio entre los tratamientos de siembra de pasto y aplicación de rastrojo de maíz por separado. En tanto, la cobertura del pasto, el índice de clorofila y la altura de la planta, fueron significativamente mayores cuando se aplicó también el rastrojo de maíz con siembra de pasto, con valores de 51.23 % m⁻², 162 y 31.8 cm, respectivamente, con respecto del testigo (sin cobertura de rastrojo ni siembra de pasto). El mejor tratamiento del índice de clorofila fue sin diferencia estadística con el tratamiento de aplicación de rastrojo de maíz (Cuadro 5). Lo anterior confirma que, la aplicación de rastrojo de maíz combinado con la siembra de pasto, permitió un mayor crecimiento y desarrollo de la planta, relacionado a conservar un mayor contenido de humedad en el suelo, lo cual está en correspondencia a lo reportado por Cruz-Martínez, *et al.* (2016),

respecto a que este tipo de pastos (macollo) tiene un mejor crecimiento, mayor índice de clorofila y una mayor cobertura en suelos donde se aplican prácticas de conservación de humedad edáfica, con uso de diferentes retenedores de humedad en el suelo. Alcalá (1995), indica que el desarrollo del pasto buffel, depende en buena medida de la cantidad de agua retenida en el suelo. Todo lo anterior, relacionado a que al aplicar prácticas de conservación de agua y suelo en sitios de agostadero, se incrementa la infiltración y por lo tanto la productividad (Beltrán, *et al.* 2008). En cambio, la degradación física del suelo tiene como consecuencia una afectación en el crecimiento y rendimiento de los cultivos al disminuir la profundidad de la raíz y las reservas de agua y nutrientes disponibles, donde la erosión del suelo puede llevar a la pérdida de rendimiento al afectar el contenido de carbono orgánico, nitrógeno, fósforo y potasio del suelo y el pH del suelo (Lal & Singh, 2008).

Cuadro 5. Promedio de efecto de cobertura en diferentes características del crecimiento y desarrollo del pasto bufel (*Cenchrus ciliaris* L.). Mapimí, Dgo.

Tratamiento	Número de plantas m⁻²	Cobertura de pasto (% m⁻²)	Índice de clorofila	Altura de planta Pasto Buffel (cm)
Sin cobertura ni siembra de pasto (Testigo)*	172.8b	12.65c	105.7b	17.1bc
Siembra de Pasto	358.06ab	7.11c	75.1c	6.5c
Rastrojo de maíz	481.5ab	25.68b	146.4a	22.3ab
Siembra de Pasto + Rastrojo de maíz	518.5a	51.23a	162.0a	31.8a
Media	382.71	25.04	123.49	19.83

Prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. *Solo con el pasto natural que nació y creció dentro del tratamiento.

Análisis temporal. El índice de clorofila aunque con cierta variabilidad a través del tiempo, con una tendencia de incremento a una tasa logarítmica de 80.9 el índice de clorofila día⁻¹ ($R^2=0.43$) durante la fase de desarrollo y crecimiento del pasto, lo cual pudo haber influido para que la tasa de fotosintética se mantuviera constante para un crecimiento adecuado a través del tiempo (Pedroza *et al.*, 2017) (Fig. 13).

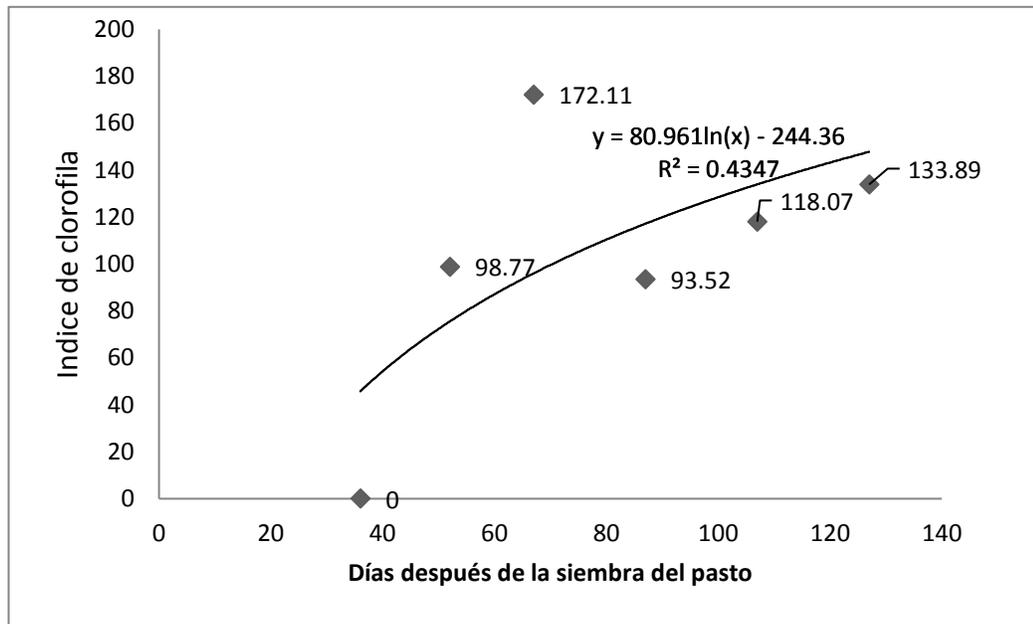


Figura 13. Tendencia de comportamiento promedio del índice de clorofila de todos los tratamientos (*Cenchrus ciliaris* L.) en diferentes fechas de muestreo.

En cambio, la altura de planta registró un comportamiento más sostenido de tipo exponencial, con tasas combinadas de crecimiento de tipo cuadrático positivo (0.006) y lineal negativo (-0.44) ($R^2=0.97$), durante el período de muestreo, comprendido de los 38 a los 127 DDSP (Fig. 14). Al final del período de evaluación, la planta aún no identificó un comportamiento asintótico, lo cual significa que la planta para esa fecha, aún tenía potencial de crecimiento hasta más de un metro, según lo reportado por Velázquez *et al.*, (2014).

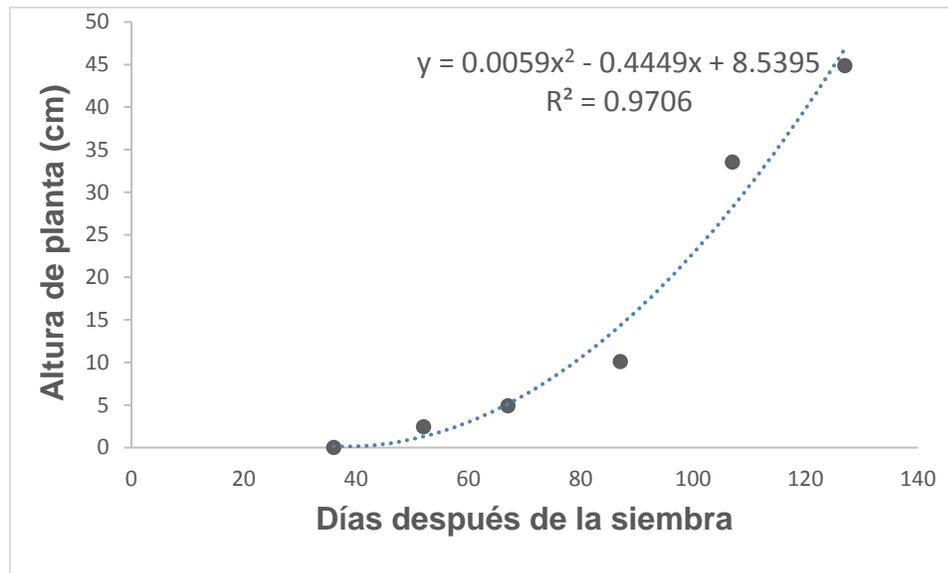


Figura 14. Altura de la planta promedio de pasto (*Cenchrus ciliaris* L.) en diferentes fechas de muestreo.

En tanto que altura de planta de pasto fue mayor conforme se incrementó la deposición de suelo por efecto de arrastre hídrico producto de la erosión, con un comportamiento de tasa logarítmica de 1.27 y un nivel de ajuste de los datos al modelo de $R^2=0.91$ (Fig. 15). Lo anterior, sugiere que a una mayor profundidad de suelo, existe un mayor almacenamiento de humedad disponible para la planta y ello permite un mayor crecimiento de la planta de pasto, el cual fue sostenido produciendo una mayor cobertura vegetal en el suelo producto de un crecimiento del pasto, el cual se mantuvo constante a través del tiempo (Fig. 16).

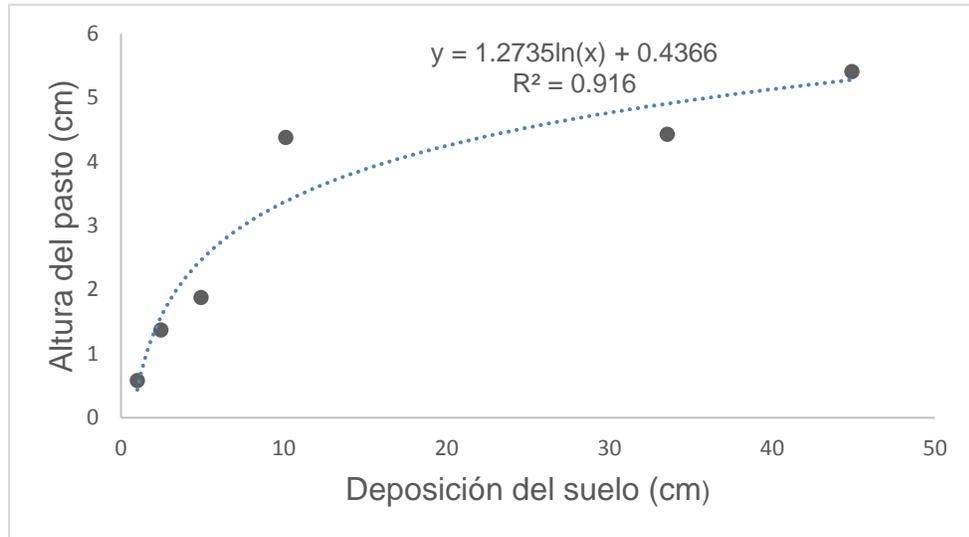


Figura 15. Relación entre la deposición del suelo y la altura de la planta de pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.).

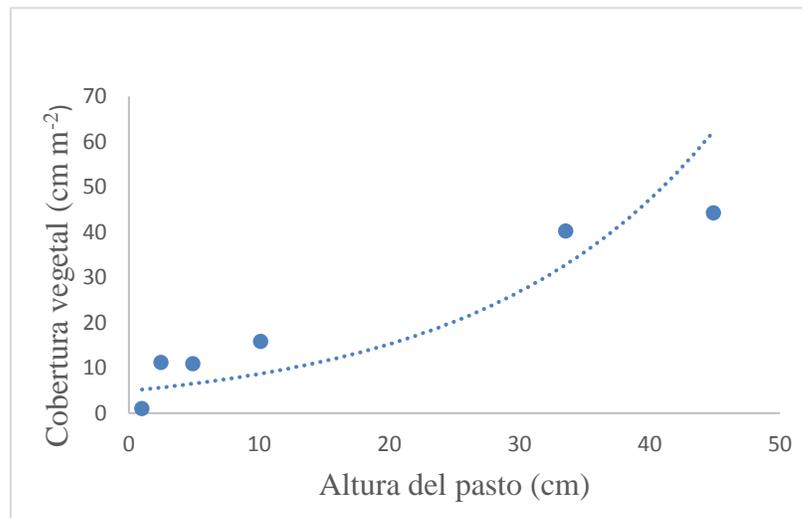


Figura 16. Relación entre la altura del pasto (*Cenchrus ciliaris* L.) con la cobertura vegetal.

Fotosíntesis y bioproductividad. La cobertura vegetal en el tratamiento de siembra de pasto buffel más la incorporación de rastrojo de maíz como retenedor de humedad natural, fue el tratamiento de mejor efecto, respecto a una mayor tasa de fotosíntesis ($P \leq 0.05$) con un valor de $21.1 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; cuando se aplicó solamente rastrojo de maíz al suelo mostró

sólo una tendencia de efecto sobre la misma variable ($20.1 \text{ mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), sin diferencia estadística con el testigo y cuando se estableció solo pasto. En concordancia con estos efectos, el producto obtenido de materia seca fue significativamente mayor cuando se estableció la combinación pasto con rastrojo, con un valor de 167.8 g m^{-2} , siguiéndole en importancia cuando se aplicó la combinación de rastrojo de maíz con un valor de 102.7 g m^{-2} de materia seca; por lo tanto si hubo diferencia estadística entre los tratamientos de pasto + rastrojo y rastrojo con el tratamiento de sembrar sólo el pasto y el testigo; entre estos dos últimos tratamientos Sí hubo diferencia estadística entre los tratamientos de pasto + rastrojo y rastrojo con el tratamiento de sembrar sólo el pasto y el testigo; entre estos dos últimos tratamientos no hubo diferencia significativa entre ellos. Esto es muy importante ya que una resiembra no debe de hacerse sólo con la siembra del pasto; sino que debe de acompañarse con otras prácticas que permitan el éxito del establecimiento (Cuadro 6).

Respecto al resto de las variables fisiológicas, no hubo diferencia significativa entre tratamientos, lo cual indica que la producción de biomasa es producto solo de una mayor actividad fotosintética ($R^2 = 0.55$), y mayor eficiencia en el uso del agua ($R^2=0.81$), sin que tener una relación al menos directa con la conductancia estomatal ($R^2 = 0.20$), la transpiración ($R^2 = 0.27$), o la eficiencia en el uso del agua ($R^2 = 0.81$). Los anteriores resultados están en correspondencia a lo reportado por Tazara, *et al.*, (1999), respecto a que la presencia de humedad en el suelo favorece la actividad fotosintética de la planta, en tanto que el déficit hídrico la disminuye. La actividad fisiológica como la fotosíntesis, conductancia y transpiración, así como el estado biológico de las plantas del pasto buffel,

dependen además de la luz y de otras condiciones ambientales, en particular la condición hídrica del suelo y de alguna manera de la temperatura (Cabrera, 2002).

Cuadro 6. Efecto de cobertura vegetal en la fisiología, eficiencia del agua y producción de materia seca en pasto buffel (*Cenchrus ciliaris*) en suelos degradados de zonas áridas. Mapimí, Dgo.

TRAT	FOTO $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	COND $\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	TRANS $\text{mmol H}_2\text{O}_2$ $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$	EUA (Foto/Trans)	MS g m^{-2}
Sin cobertura (Testigo)	18.9ab ± 2.02	0.156a ± 0.024	2.75a ± 0.452	6.9a ± 3.53	54.4c ± 14.12
Pasto	14.1b ± 1.69	0.111a ± 0.012	2.16a ± 0.174	7.1a 0.497	53.3c ± 8.78
Rastrojo de maíz	20.1ab ± 1.72	0.176a ± 0.015	2.95a ± 0.212	7.0a ± 0.637	102.7b ± 15.16
Pasto + Rastrojo de maíz	21.2a ± 1.56	0.138 ^a ± 0.019	2.53a ± 0.286	8.4a ± 0.297	167.8a ± 9.5
Media	18.5	0.148	2.62	7.31	89.5

Prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son estadísticamente iguales. TRAT= Tratamiento; FOTO= Fotosíntesis; COND= Conductancia estomática; EUA= Eficiencia en el uso del agua; MS= Materia seca. Los valores inferiores en cada valor de la variable de cada tratamiento, corresponde al Error Estándar.

CONCLUSIONES

El método hidrológico de aproximación del volumen de agua escurrida, es una buena opción en el caso de estaciones climáticas semi-instrumentadas, lo cual permite relacionar la intensidad de la precipitación pluvial con la erosión/deposición del suelo y su impacto en la bioproductividad.

El uso de cobertura vegetal con rastrojo de maíz y siembra de pasto, fue la práctica de mejor respuesta al reducir significativamente la erosión del suelo de 68.5 a 30.8 Ton ha⁻¹. Por otro lado, la siembra de pasto influyo significativamente en la deposición de partículas de suelo al incrementar en 90% la cantidad de suelo depositado en las partes bajas de la superficie del terreno; esto último permitió mantener una humedad edáfica más alta a través del tiempo. La conservación del contenido de humedad del suelo repercutió en un mejor crecimiento y desarrollo del pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) con una mejor altura de planta, mayor cobertura vegetal y un mayor contenido de clorofila. El mejor crecimiento y desarrollo de la planta de pasto, fue producto de una mayor actividad fotosintética, aunque sin un efecto definido sobre el uso eficiente del agua por la planta, pero al final con una mayor producción de biomasa en términos de materia seca.

LITERATURA CITADA

- Alcalá G. C. (1995). Guía práctica para el establecimiento, manejo y utilización del zacate buffel. Patronato del Centro de Investigaciones Pecuarias del Estado de Sonora, A. C.
- Beltrán L. S, Loredo O. C, Núñez T, González E. L. A. (2008). Buffel titán y buffel regio nuevas variedades de pasto para el altiplano de San Luis Potosí. Folleto técnico N° 35. INIFAP.
- Blackburn, W. H., T.L. Thurow, and C. A. Taylor Jr. 1986. Soil erosion on rangeland. In: Use of cover, soil, and weather data in rangeland monitoring. P 31 – 39. Symp. Proc. Soc. Range Manage. Denver, CO. USA.

- Bolaños-González, M., Palacios-Vélez, E., Scott, C., & Exebio-García, A. (2001). Estimación del volumen de agua usado en una zona de riego mediante una imagen de satélite e información complementaria. *Agrociencia*, 35(6).
- Bolinaga, J.J. 1979. Valores del Coeficiente de Rugosidad de Manning (n). Drenaje Urbano. Instituto Nacional de Obras Sanitarias (INOS).
- Breña P., A.F. y Jacobo V. M.A. 2006. Principios y fundamentos de la hidrología superficial. Coordinación General de Vinculación y Desarrollo Institucional. Universidad Autónoma Metropolitana. México, D.F.
- Cabrera H. M. (2002). Respuestas ecofisiológicas de plantas en ecosistemas de zonas con clima mediterráneo y ambientes de alta montaña. *Rev Chilena de Historia Natural*. 75:625-637.
- Chow, V. T . 1959. Open – Channel Hydraulics. New York, N.Y. McGraw-Hill Book Co.
- Colegio de Postgraduados. 1991. Manual de conservación del suelo y del agua, UACH, Chapingo, México.
- Cruz-Martínez, A., Pedroza-Sandoval, A., Trejo-Calzada, R., Sánchez-Cohen, I., Samaniego-Gaxiola, J. A. y Hernández-Salgado, R. (2016). Captación de agua de lluvia y retención de humedad edáfica en el establecimiento de buffel (*Cenchrus ciliaris*). *Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias* 7(2): 159-172.
- David P. and Burgess M. (2013). Soil Erosion Threatens Food Production. *Agriculture* 3(3): 443-463. doi:10.3390/agriculture3030443

- De Alba A. S, Alcázar T. M., Cermeño M. F., Barbero A. F. (2011). Soil erosion and soil management. Importance of tillage in the natural and anthropogenic processes of soil erosion. *Revista Agroecológica*.
- De Alba, S., Benito, G., Lacasta, C., Pérez-González, A. (2003). Erosión hídrica en campos de agricultura extensiva de clima mediterráneo. Influencia del manejo del suelo en Castilla-La Mancha. *Edafología, Soc. Española de la Ciencia del Suelo (SECS)*, 10-3: 103-113.
- Ding W. and Huang Ch. 2017. Effects of soil surface roughness on interrill erosion processes and sediment particle size distribution. *Geomorphology*. 295: 801 – 810.
- FAO (2015). Status of the World's Soil Resources (SWSR)—Main report. Natural Resources and Environment Department, Food and Agriculture Organization (FAO) of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils (ITPS), Rome, Italy. Disponible en: <http://www.fao.org/3/a-i5199e.pdf>
- FAO (1993) Agro-ecological assessment for national planning: the example of Kenya. *FAO Soils Bulletin N° 67*. Rome, Italy. Also nine technical annexes issued as *World Soil Resources Reports 71/1 -71/9*. Consultado en: <http://www.fao.org/docrep/W2962S/w2962s0h.html>
- García, M. E (1973). *Apuntes de climatología*. Universidad Autónoma de México. México. 71 p.
- García I., J. G. Martínez J. (2004) Caracterización de la Reserva de la Biosfera Mapimí Mediante el uso de sistemas de información geográfica. *In: Memorias del IV*

Simposio Internacional sobre la Flora Silvestre en Zonas Áridas. Universidad Autónoma de Chihuahua-Universidad de Sonora.Pp: 369-377.

Graves, A. R., Morris, J., Deeks, L. K., Rickson, R. J., Kibblewhite, M. G., Harris, J. A.,Truckle, I. (2015). The total costs of soil degradation in England and Wales. *Ecological Economics*, 119: 399–413.

IPCC, INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. 2007. *Climate Change 2007: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. B. Metz, O. R. Davidson, P. R. Bosch, R. Dave, and L. A. Meyer [EDS.]. Cambridge, UK: Cambridge University Press. 851 p.

Kéfi, S., Rietkerk, M, Alados, C.L, Pueyo, Y., Papanastasis, V.P, Elaich, A., de Ruiter, P.C. (2007) Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems. *Nature*. 2007 Sep 13;449(7159):213-227.

Lal, R. and B. R. Singh (2008). Effects of Soil Degradation on Crop Productivity in East Africa. *Journal of Sustainable Agriculture* 13 (1): 15 - 36. doi: 10.1300/J064v13n01_04.

Le Bissonnais, Y., V. Lecomte and O. Cerdan. 2004. Grass strip effects on runoff and soil loss. *Agronomie* 24: 129–136.

Linsley, R.K.; Kohler, M.A. y Paulhus, J. L.H. 1988. *Hidrología para ingenieros*. Segunda edición. McGraw-Hill. México, D.F.

- Loredo, O .C., Beltrán, L. S., Moreno, S. F., y Casiano, D. M. 2007. Riesgo a la erosión hídrica y proyección de acciones de manejo y conservación de suelos en 32 microcuencas de San Luis Potosí, SLP. INIFAP-CIRNE. Campo Experimental de San Luis Potosí, SLP, 209 p.
- Maass, J. M, y F. García-Oliva (1990). Investigación sobre la erosión de los suelos en México. Un análisis de la literatura existente”, *Ciencia*, (41), 1990, pp. 209-228.
- Martínez-Prado, A., Pérez-López, Ma. E., Pinto-Espinoza, J., Gurrola-Nevárez, B. A., & Osorio-Rodríguez, A. L. (2011). Biorremediación de suelo contaminado con hidrocarburos empleando lodos residuales como fuente alterna de nutrientes. *Revista internacional de contaminación ambiental*, 27(3), 241-252.
- Morgan, R. 2005. Soil erosion and conservation. National Soil Resources Institute. Cranfield University. Blackwell Science Ltd. Oxford, UK. 304 p.
- Pedroza-Sandoval, Luis G. Yáñez-Chávez, Ignacio Sánchez-Cohen y José A. Samaniego-Gaxiola (2015). Efecto del hidrogel y vermicomposta en la producción de maíz. *Revista Fitotecnia Mexicana* 38 (4): 375 – 381.
- Pedroza-Sandoval, A., Trejo-Calzada, R., Sánchez-Cohen, I. Yáñez-Chávez, J.A., Cruz-Martínez, A. y Figueroa-Viramontes, U. (2018). Water harvesting and soil water retention for forage production in degraded areas in arid lands of Mexico. p. 3-23. In: *New Perspectives in Forage Crops*. Edited by Ricardo Loiola Edvan and Leilson Rocha Bezerra, Editorial Intechopen, USA. 210 p. doi: 10.5772/66549.

Pedroza-Sandoval, A., Chávez-Rivero, J.A., Trejo Calzada, R., Sánchez Cohen I. y Ruiz Torres, J. (2016). Captación y aprovechamiento integral del agua de lluvia y manejo de aguas residuales en zonas áridas. **En:** Tópicos selectos de sustentabilidad: Un reto permanente Volumen IV (Alejandro Moreno Reséndez José Luis Reyes Carrillo, Editores). Editorial CLAVE. México, D.F.

Pedroza-Sandoval, A., Yáñez-Chávez, L.G., Sánchez-Cohen, I., Samaniego-Gaxiola, J.A. and Trejo-Calzada, R. (2017). Hydrogel, biocompost and its effect on photosynthetic activity and production of forage maize (*Zea mays* L.) plants. *Acta Agronómica* 66 (1): 63-68. DOI: <http://dx.doi.org/10.15446/acag.v66n1.50868>

Pizarro, T.R. y Cutiño, M.H. (2002). Método de evaluación de la erosión hídrica superficial en suelos desnudos en Chile. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* 13:165-170.

Roco F., L., Engler P. A., & Jara-Rojas, R. (2012). Factores que influyen en la adopción de tecnologías de conservación de suelos en el secano interior de Chile Central. *Revista FCA UNCUYO*, 44(2), 31-45.

Rose, C. W., J. R. Williams, G. C. Sander, and D. A. Barry. 1983. A Mathematical Model of Soil Erosion and Deposition Processes: I. Theory for a Plane Land Element1. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47:991-995. doi:10.2136/sssaj1983.03615995004700050030x.

Schmidt, R.A., 1982. Motor control and learning: a behavioral emphasis. Champaign, IL: Human Kinetics Press.

- Sánchez, B., C. 1984. Effects of livestock grazing and exclusión on infiltration and sediments yields for different range sites on El Plateado Watershed. Zacatecas, México. Ph. D. Dissertation. New Mexico State University. Las Cruces, NM.
- Sánchez-Cohen, I., Díaz-Padilla, G., Velásquez-Valle M., Slack, D.C., Heilman, P. y Pedroza-Sandoval, A. (2015a). A decision support system for rainfed agricultural areas of Mexico. *Computers and Electronic in Agriculture* 114:178-188.
- Sánchez-Cohen I., Velásquez-Valle M. A., Esquivel-Arriaga G., Bueno-Hurtado P., Pedroza-Sandoval, A. (2015b). Minimum hydrologic characterization for research in experimental watersheds with limited availability of information in arid lands. *Revista Chapingo Serie Zonas Áridas*. 15 (2): 185-208.
- Saucedo, T., R.A. (2003) Guía técnica para el establecimiento y utilización de plantaciones de chamizo. Folleto Núm. 10. INIFAP-Campo Experimental. 17p.
- Tezara W. M, Driscoll S. D, Lawlor D. W. (1999). Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. *Nature*.1401:914-917.
- Velásquez-Valle, M.A., Sánchez-Cohen, I., Hawkins, R.H., Serna-Pérez, A., Guitérrez-Luna, R. y Pedroza-Sandoval, A. (2017). Rainfall-runoff relationships in a semiarid watershed in central Mexico based on the CN-NRCS approach. *Model. Earth Syst. Environ.* 3: 1263-1272.
- Velásquez, V., M. A., J. A. Muñoz V., H. Macías R., G. Esquivel A. y M. Rivera G. 2014. Producción de forraje de variedades de zacate buffel [*Pennisetum ciliare* L. (Link.) Sin. *Cenchrus ciliaris* L.] en la región árida del Estado de Durango, México. *Revista AGROFAZ*, 14(1): 69 - 76.

Velásquez. V. M.A., De Alba, A. A., Gutiérrez, L.R. y García, E.G. (2012). Prácticas de restauración de suelos para la conservación del agua. Centro Regional de Investigación Regional Norte Centro. Campo Experimental de Zacatecas. Folleto Técnico. Núm. 46. 97 pp.

Vento M., Caballero R., Pacheco O., Cabezas R., Corrales I., Martín O., Martínez, D. (2010). Conservación y mejoramiento de suelos de relieve llano a ondulado a partir de indicadores físicos y químicos. *Centro Agrícola*, 37(1), 29-34.