

Efecto de la cobertura del suelo sobre el crecimiento y productividad del zacate buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) en suelos degradados de zonas áridas

Ernesto Herssaín Pedroza-Parga ^a

Aurelio Pedroza-Sandoval ^{a*}

Miguel Agustín Velásquez-Valle ^b

Ignacio Sánchez-Cohen ^c

Ricardo Trejo-Calzada ^a

José Alfredo Samaniego-Gaxiola ^d

^a Universidad Autónoma Chapingo. Unidad Regional Universitaria de Zonas Áridas. Bermejillo, Durango, México. Km. 40 Carr. Gómez Palacio – Chihuahua. Bermejillo, 35230, Durango, México.

^b Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Campo Experimental Saltillo. Departamento de Manejo Integrado de Cuencas. Saltillo, Coahuila, México.

^c INIFAP. Centro Nacional de Investigación Disciplinaria en Relaciones Agua Suelo Planta Atmósfera. Gómez Palacio, Durango, México.

^d INIFAP. Departamento de Fitopatología del Centro de Investigación Regional Norte Centro. Matamoros, Coahuila, México.

* Autor de correspondencia: apedroza@chapingo.uruza.edu.mx

Resumen:

El objetivo de este estudio fue evaluar el uso de residuos de cosecha de maíz como cobertura vegetal y su impacto en el contenido de humedad del suelo y el establecimiento, desarrollo y

productividad del pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L). Se usó un diseño de bloques al azar con tres repeticiones. Los tratamientos fueron: siembra de 10 kg ha⁻¹ de semilla de pasto buffel (Sp); cobertura vegetal en suelo con 10 t ha⁻¹ de residuos de cosecha de maíz (Cv); combinación Sp + Cv; y testigo (sin siembra de pasto y sin cobertura vegetal). El tratamiento Sp + Cv mantuvo un mayor contenido de humedad en el suelo ($P \leq 0.05$), con 13.8 % contra 10.6 % del testigo. En consecuencia, el número de plantas de pasto m⁻², cobertura de pasto buffel, altura de la planta, índice de clorofila y producción de biomasa seca, tuvieron una tendencia de mejor respuesta, con valores de 518.5 plantas m⁻², 51.23 %, 31.8 cm, 162 y 167.8 g m⁻², respectivamente, con una tendencia de respuesta estadísticamente similar este tratamiento al aplicarse de manera separada (Cv y Sp). La fotosíntesis ($\mu\text{mol s}^{-2}\text{s}^{-1}$), conductancia estomática, transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{s}^{-1}$) y uso eficiente del agua, no fueron afectadas por ninguno de los tratamientos de este estudio, con respuesta equivalente a la del testigo.

Palabras clave: Estrés vegetal, Humedad del suelo, Pastizal, Ganadería extensiva.

Recibido: 16/03/2021

Aceptado: 02/06/2022

Introducción

Anualmente se pierde la capacidad productiva de 10 millones de hectáreas de tierras de uso agropecuario debido a la degradación de los suelos por una serie de factores causales de tipo natural y antrópico^(1,2). La erosión hídrica es una de las principales causas de la degradación de los suelos en zonas áridas, donde la lluvia tiene un carácter errático y torrencial, lo que produce altos volúmenes de escurrimiento hídrico en corto tiempo con fuerte impacto erosivo⁽³⁾. Entre las propiedades del suelo que determinan la erosión hídrica son las relacionadas a la infiltración y la estabilidad de los sedimentos, tales como la textura, contenido de materia orgánica y tipo de agregados de las partículas⁽⁴⁾.

La cobertura vegetal sobre el suelo reduce el desprendimiento de partículas al interceptar las gotas de lluvia y disminuir su energía erosiva. La vegetación y los residuos vegetales superficiales reducen la velocidad del flujo de agua sobre el suelo y promueve la decantación de sedimentos⁽⁵⁾. El impacto es mayor en estas regiones por falta de una adecuada cobertura vegetal, bajo contenido de materia orgánica y la baja capacidad de retención de humedad en el suelo, entre otros factores⁽⁶⁾. Para mitigar la degradación del suelo, se realizan prácticas agronómicas, según el tipo de sistema de producción agropecuario y condiciones específicas de cada región^(7,8).

El levantamiento de bordos en curvas a nivel, construcción de mampostería que disminuya la velocidad del agua de lluvia, sistemas de captación de agua de lluvia *in situ* a base de microcuencas, la resiembra de pastos nativos con métodos de labranza convencional, establecimiento de diferentes especies de plantas nativas o introducidas de potencial forrajero y uso de diferentes tipos de retenedores de la humedad del suelo⁽⁹⁾, son algunas de las tecnologías que se aplican para mitigar el problema de la erosión. La mayor parte de estas técnicas están dirigidas a la retención de la humedad en el suelo ante las altas tasas de evaporación potencial, la cual llega a ser hasta diez veces mayor que la precipitación en zonas semiáridas.

Los sistemas de producción ganaderos en zonas semiáridas son vulnerables debido la recurrencia de sequías, la presencia de suelos con baja cobertura vegetal y escaso contenido de materia orgánica, lo cual genera un proceso de degradación de los recursos naturales que repercute en un bajo potencial productivo⁽¹⁰⁾. Adicionalmente, el sobrepastoreo es uno de los problemas más recurrentes que incrementa el problema de la productividad en áreas de agostadero con precipitación deficiente⁽¹¹⁾. Lo anterior, hace necesario fortalecer las líneas de investigación y generación de estrategias para mejorar el uso y manejo de los recursos agua, suelo, planta, animal en zonas ganaderas a base de vegetación nativa de ramoneo y presencia regular de pastizal, lo cual permita promover una mayor sustentabilidad desde el punto de vista productivo, económico, social y ambiental⁽¹²⁾.

Un factor que mejora las condiciones físicas edáficas para incrementar y conservar la humedad después de las lluvias es el uso de cobertura en el suelo⁽¹³⁾. Si el uso de cobertura vegetal se complementa con la resiembra de pastos nativos de la región, existe una mayor posibilidad de mitigación de la degradación de los suelos de agostadero.

El pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) es una especie introducida en México que ha mostrado adaptación a condiciones críticas de tipo ambiental en zonas semiáridas, las cuales sustentan en gran medida, su economía en la ganadería extensiva de agostadero^(13,14). Aun cuando esta especie de pasto tiene un alto potencial de adaptación y desarrollo en suelos degradados de zonas semiáridas^(9,15), el establecimiento de esta especie forrajera en condiciones ambientales marginales requiere de un manejo adecuado de los recursos naturales, que garantice su germinación, crecimiento y productividad acorde a su potencial de desarrollo^(16,17). Desde esta perspectiva, las coberturas vegetales en el suelo y otros retenedores de humedad edáfica, entre otras prácticas, están probando ser una estrategia eficaz en el desarrollo sustentable de áreas ganaderas a base de pastizal en suelos degradados de zonas áridas^(6,18,19).

El objetivo de este estudio fue evaluar el uso de residuos de cosecha de maíz como cobertura vegetal y su impacto en el contenido de humedad del suelo y el establecimiento, desarrollo y

productividad del pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L.) en suelos degradados de zonas áridas en el norte de México.

Material y métodos

Ubicación geográfica

El estudio se llevó a cabo en un área con vegetación de matorral micrófilo y rosetófilo y pequeñas áreas de pastizal en el Municipio de Mapimí al norte del Estado de Durango, México. El área se ubica a 25° 52' 23.65" N y 103° 43' 41.74" O y a una altitud de 1,176 m, con un registro de precipitación promedio anual de 304 mm, temperatura máxima de 44 °C y mínima de 10.2 °C⁽²⁰⁾.

Descripción del sitio experimental

Según análisis físico químico de suelos, el sitio experimental presenta 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 (CC) de 19.7 %. Son suelos pobres en macro y microelementos, aunque con buenos niveles de Potasio ($68.4 \text{ mg} \cdot \text{Kg}^{-1}$) y Calcio ($33.7 \text{ meq} \cdot \text{L}^{-1}$), esto último hace que corresponda a suelos alcalinos con un pH de 8.3 y una pendiente del 1 % (Figura 1)⁽²¹⁾.

Figura 1: Localización geográfica del área de estudio en el Municipio de Mapimí del Estado de Durango, México



Diseño experimental y de tratamientos

Se usó un diseño experimental de bloques al azar con tres repeticiones y cuatro tratamientos: siembra de 10 kg ha⁻¹ con semilla de pasto buffel (Ps); sin siembra de pasto y solo aplicación de 10 t ha⁻¹ de rastrojo de maíz como cobertura vegetal sobre el suelo (Cv); la combinación de los tratamientos Ps + Cv: más el testigo (sin siembra de pasto, ni aplicación de cobertura vegetal). Cada unidad experimental tuvo una dimensión de 5x5 m.

El estudio se llevó a cabo en el verano-otoño de 2017, para lo cual se realizó preparación del suelo del área experimental mediante uso de rastrillo a una profundidad de 5 cm. En los tratamientos de siembra del pasto, ésta fue al voleo, procurando que la semilla quedara distribuida de manera homogénea sobre el suelo, para posteriormente, cubrirla con una ligera capa del mismo suelo mediante un segundo paso de rastrillo, de tal manera que la semilla no quedara expuesta al arrastre por el viento. En los tratamientos donde se utilizó el rastrojo de maíz seco como cobertura, se realizó inmediatamente posterior a la siembra en los tratamientos correspondientes. El experimento se estableció en suelo seco y los tratamientos se expusieron a la primera lluvia, la cual ocurrió en el mes de julio con un volumen de precipitación de 64.8 mm, lo que permitió la germinación de la semilla del pasto. La precipitación pluvial ocurrida en el área de influencia experimental, durante el período de estudio, se midió mediante una estación microclimática marca La Crosse Technology®, Modelo Heavy Weather Pro WS 2800 (USA).

Variables medidas

El contenido de humedad del suelo (%) se cuantificó mediante uso de tensiómetro digital Soil Tester® Modelo HB-2 (Ontario, Canadá); en tanto que las variables de la planta como el número de plantas de pasto m⁻², se midió con cuadrante de 20x20 cm contabilizando el número de plantas dentro del cuadrante; altura del pasto (cm); cobertura del pasto (%) estimada en un m² con uso de cuadrante de 20x20 cm y uso de escala de 0 a 100 para estimar el % de cobertura del suelo por el pasto por unidad de superficie. Todas estas variables se midieron en seis diferentes fechas: 36, 52, 67, 87, 107 y 127 días después de la siembra del pasto (DDSP) y se tomaron tres mediciones como unidad de muestreo por tratamiento en cada fecha de evaluación.

Las variables fisiológicas del pasto correspondieron a: índice de clorofila, medida con uso de determinador de clorofila marca Spectrum Technologies Inc. Fieldscout CM 1000; fotosíntesis ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); conductancia estomática; transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), medidas estas tres últimas con analizador de flujo de gases por rayos infrarrojos, modelo LI-6400XT (LI-COR®, Inc. Lincoln, Nebraska, USA); eficiencia en el uso del agua, producto del cociente entre la cantidad de CO₂ asimilado y la cantidad de agua transpirada por la planta.

Estas variables fueron medidas una sola vez a los 107 DDS, para lo cual se tomaron tres plantas por unidad experimental. Al final del experimento (127 DDS), se obtuvo la biomasa seca producida del pasto (g m^{-2}), mediante corte y secado a peso constante de toda la planta, excepto la raíz.

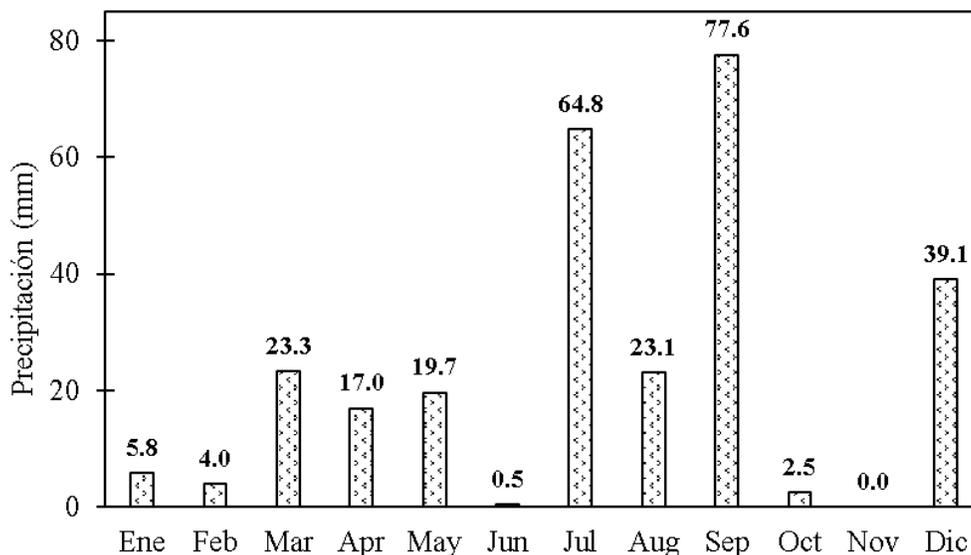
Análisis de datos

Se realizaron análisis de varianza y prueba de rango múltiple de medias Tukey ($P \leq 0.05$) con uso del paquete SAS Versión 9.0 para identificar el efecto de tratamiento.

Resultados y discusión

De acuerdo con los registros de precipitación en el área de estudio, el año 2017 registró una precipitación de 277.4 mm, que fue ligeramente inferior a la media anual, la cual fue de 304 mm. El período julio-septiembre fue el de mayor precipitación, con un total de 165.5 mm, que representa el 59.6 % del total en el año (Figura 2). Bajo estas condiciones pluviométricas, el pasto buffel prosperó adecuadamente, ya que el rango de lluvia óptimo en verano que se ha reportado para su crecimiento es de 150 a 550 $\text{mm}^{(22)}$, lo cual coincide con lo reportado en el sitio de estudio. Martin *et al*⁽²³⁾ reportaron que, para un periodo de tres años, la actividad de crecimiento de esta especie se observó 15 días posteriores a una precipitación igual o superior a 20 mm; condición que ocurrió en los meses de julio y septiembre en el presente estudio. En pastizales áridos del sur de Nuevo México, se encontró que lluvias de < 20 mm en un día, no contribuyen a humedecer adecuadamente la parte superior del suelo en $0.1 \text{ m}^{(24)}$.

Figura 2: Comportamiento de la precipitación pluvial ocurrida durante el año de 2017 en el área de estudio. Mapimí, Durango, México



Contenido de humedad del suelo, crecimiento y desarrollo del pasto

El contenido promedio de humedad del suelo fue superior significativamente ($P \leq 0.05$) en el tratamiento siembra de pasto + cobertura del suelo con residuos de cosecha de maíz (Sp + Cv) respecto del testigo, con valores de 13.8 vs 10.6 %, respectivamente, sin diferencia estadística del primero (Sp + Cv), respecto de los otros dos tipos de cobertura por separado (Sp y Cv) (Cuadro 1).

Cuadro 1: Efecto en suelo en el crecimiento y desarrollo de pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L) con y sin uso de cobertura vegetal a base de residuos de cosecha de maíz en suelo

Tratamientos	Humedad en suelo (%)	Número de plantas m ⁻²	Cobertura del pasto (%)	Altura de planta (cm)
Testigo*	10.6 ^b	172.8 ^b	12.65 ^c	17.1 ^{bc}
Sp	12.2 ^a	358.0 ^{ab}	7.11 ^c	6.5 ^c
Cv	13.0 ^{ab}	481.5 ^{ab}	25.68 ^b	22.3 ^{ab}
Sp + Cv	13.8 ^a	518.5 ^a	51.23 ^a	31.8 ^a

*Sin siembra de pasto ni aplicación de cobertura vegetal en el suelo, solo el pasto nacido en forma natural.

Sp= Siembra de 10 Kg ha⁻¹ de semilla de pasto buffel sin aplicación de residuos de cosecha de maíz en el suelo. Cv= Aplicación de 10 t ha⁻¹ de residuos de cosecha de maíz como cobertura vegetal sobre el suelo. Sp + Cv= Combinación de los dos últimos tratamientos antes citados.

^{ab} Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son iguales ($P \leq 0.05$).

Producto de esta condición de disponibilidad hídrica en el tratamiento Sp + Cv, el número de plantas de pasto m⁻², cobertura del pasto, índice de clorofila y altura de planta de pasto, fueron significativamente mayores ($P \leq 0.05$) con valores de 518.5 plantas m⁻², 51.23 %, 162 y 31.8 cm, respectivamente; el testigo registró los valores más bajos en estas variables, sin diferencia estadística de este último con el tratamiento Sp. No hubo una respuesta consistente en los tratamientos Sp y Cv al aplicarse por separado, ya que fluctúan entre valores estadísticamente similares al tratamiento Sp + Cv y el testigo (Cuadro 1).

Los anteriores resultados son coincidentes con lo reportado por Cruz-Martínez *et al*⁽⁹⁾, quienes encontraron que el pasto buffel, mejora el crecimiento, contenido de clorofila y cobertura del pasto en el suelo, cuando se aplicó hidrogel a diferentes dosis como retenedores de humedad en el suelo. Alcalá⁽²⁵⁾, indica que el desarrollo del pasto buffel, depende en buena medida de la cantidad de agua retenida en el suelo. Por otra parte, se ha reportado que las prácticas de conservación de humedad en el suelo en sitios de agostadero, incrementa la infiltración hídrica y por lo tanto la productividad vegetal⁽²⁶⁾. En contraste, la degradación

física del suelo afecta negativamente el crecimiento y rendimiento de los cultivos agrícolas, como consecuencia de limitada profundidad de raíz, baja reserva de humedad en suelo y bajo contenido de nutrientes disponibles, lo cual afecta negativamente el contenido de carbono orgánico, nitrógeno, fósforo y potasio y pH en el suelo⁽²⁷⁾.

Indicadores fisiológicos y productividad de biomasa del pasto

El tratamiento Sp + Cv, destacó por su mayor índice de clorofila con respecto al testigo, lo que se reflejaría en una adecuada actividad fotosintética⁽²⁸⁾. Pezeshki⁽²⁹⁾ y Carter y Knap⁽³⁰⁾, identificaron que una degradación de clorofila por cualquier factor de estrés repercute en la reducción de la capacidad fotosintética de la hoja, pues limita el proceso fotoquímico en la absorción de la radiación.

El contenido de clorofila y la producción de biomasa fueron significativamente mayores ($P \leq 0.05$) en el tratamiento donde se combinó la siembra 10 kg ha⁻¹ de pasto y aplicación de 10 t ha⁻¹ de residuos de cosecha de maíz como cobertura del suelo (Sp + Cv), respecto del resto de los tratamientos, con valores de 162.0 y 167.8 g m⁻², respectivamente, en comparación con el testigo que registró valores de 18.9 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 105.7 y 54.4 g m⁻². Lo anterior, representa un incremento del 12.1, 53.2 y 208.4 % de incremento entre estas variables, respectivamente, lo cual sugiere que la siembra del pasto requiere ser complementada con la incorporación de una cobertura en el suelo, que en este estudio fue los residuos de cosecha de maíz o bien algún otro tipo de retenedor de la humedad edáfica, como lo reportaron diferentes autores^(12,17,28). La conductancia estomática, transpiración y la eficiencia en el uso del agua, no fueron afectadas por los tratamientos aplicados en este estudio (Cuadro 2).

Cuadro 2: Indicadores fisiológicos y productividad de biomasa de pasto buffel (*Cenchrus ciliaris* L) en diferentes tratamientos de siembra de pasto y uso de residuos de cosecha de maíz como cobertura vegetal en el suelo

Tratam.	Fotosíntesis ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	Conductancia estomática	Transpiración ($\text{mmol H}_2\text{O}_2$ $\text{m}^{-2}\text{s}^{-1}$)	EUA	Índice de clorofila	Materia seca (g m^{-2})
Testigo*	18.9 ^{ab}	0.156 ^a	2.75 ^a	6.9 ^a	105.7 ^b	54.4 ^c
Sp	14.1 ^b	0.111 ^a	2.16 ^a	7.1 ^a	75.1 ^c	53.3 ^c
Cv	20.1 ^{ab}	0.176 ^a	2.95 ^a	7.0 ^a	146.4 ^a	102.7 ^b
Sp + Cv	21.2 ^a	0.138 ^a	2.53 ^a	8.4 ^a	162.0 ^a	167.8 ^a

Tratam.= Tratamientos. EUA= Eficiencia en el uso del agua. *Sin siembra de pasto ni aplicación de cobertura vegetal en el suelo, solo el pasto nacido en forma natural. Sp= Siembra de 10 Kg ha⁻¹ de semilla de pasto buffel sin aplicación de residuos de cosecha de maíz en el suelo. Cv= Aplicación de 10 t ha⁻¹ de residuos de cosecha de maíz como cobertura vegetal sobre el suelo. Sp + Cv= Combinación de los dos últimos tratamientos antes citados.

^{abc} Cifras con las mismas letras dentro de una misma columna, son iguales ($P \leq 0.05$).

En una proyección de la producción de biomasa seca en g m^{-2} , se tiene que el rendimiento por hectárea es equivalente a 1.6 t ha⁻¹ en el mejor tratamiento (Sp + Cv), con respecto al testigo que produjo 0.54 t ha⁻¹, 208.4 % más del primero, con respecto del segundo y un promedio general de 0.89 t ha⁻¹ entre todos los tratamientos. Por lo anterior, esta tecnología en términos de productividad también es de perspectiva, debido a la baja bioproductividad de estas áreas.

Los resultados de los Cuadros 1 y 2, muestran que a una menor humedad en el suelo correspondió una disminución significativa ($P \leq 0.05$) de la actividad fotosintética, al menos en el tratamiento Sp + Cv, con respecto del testigo. Lo anterior, coincide con lo reportado por Tezara *et al*⁽³¹⁾, quienes indican que la presencia de humedad en el suelo favorece la fotosíntesis de la planta, en tanto que el déficit hídrico la disminuye. Con respecto al resultado positivo del índice de clorofila en función de un mayor contenido de humedad en el suelo, es contrario a lo reportado por Meléndez *et al*⁽³²⁾ y Trujillo *et al*⁽³³⁾, quienes observaron que el contenido de clorofila aumenta en suelos con bajos gradientes de humedad y disminuye en suelos con altos gradientes de humedad en suelo. En cambio, Aguilar y Peña⁽³⁴⁾, en un estudio realizado en *Opuntia ficus-indica*, reportaron que las plantas bajo sequía redujeron significativamente la concentración de clorofila, lo cual es congruente con lo encontrado en este estudio. Los anteriores resultados contrastantes de respuesta al estrés hídrico en el contenido de clorofila podrían estar relacionado a la naturaleza genética de los materiales vegetales utilizados, como el nopal, y las propias condiciones ecológicas en que fueron

realizados los diferentes estudios⁽³⁵⁾. Adicionalmente, Cabrera⁽³⁶⁾ señala que la actividad fisiológica como la fotosíntesis, conductancia y transpiración del pasto buffel, dependen de las fluctuaciones del estado del tiempo propias de cada año.

Conclusiones e implicaciones

El uso de cobertura vegetal con residuos de cosecha de maíz en combinación con siembra de pasto (*Cenchrus ciliaris* L.), fue el tratamiento de mejor efecto en el contenido de humedad del suelo, lo cual favoreció el crecimiento y desarrollo de la planta de pasto, con un mejor número de plantas por unidad de superficie, una mayor cobertura vegetal, mayor índice de clorofila y una mayor producción de materia seca. No obstante, estos mismos tratamientos, pero aplicados por separado, mostraron un comportamiento inconsistente, con respuesta similar a la de la combinación de ambas prácticas, pero ésta diferenciada de la respuesta del testigo. La fisiología de la planta de pasto en términos de fotosíntesis, conductancia estomática, transpiración y uso eficiente del agua, no mostraron efecto por las prácticas de cobertura vegetal probadas en este estudio.

Literatura citada:

1. David P, Burgess M. Soil erosion threatens. Food production. Agriculture 2013;3(3):443-463.
2. Encinas RA, Ibarra J. La degradación del suelo y sus efectos sobre la población. Población y Desarrollo 2003:5-9.
3. Bolaños GMA, Paz PF, Cruz G, Carlos O, Argumedo EJA, Romero B, *et al.* Mapa de erosión de los suelos de México y posibles implicaciones en el almacenamiento de carbono orgánico del suelo. Terra Latinoamericana 2016;34(3):271-288.
4. Diaz GM. Alternativas para el control de la erosión mediante el uso de coberturas convencionales, no convencionales y revegetalización. Ingeniería e Investigación 2011;31(3):80-90.
5. Distrito de Conservación de Recursos del Condado de Monterrey. Guía de prácticas para el manejo de erosión y escorrentía agrícola en laderas. 2016: https://www.rcdmonterrey.org/pdf/rcdmc_hillslope_guide_en_espanol-10-5-16-final.pdf.
6. Pedroza-Sandoval A, Trejo-Calzada R, Sánchez-Cohen I, Yáñez-Chávez JA, Cruz-Martínez A, Figueroa-Viramontes U. Water harvesting and soil water retention for forage production in degraded areas in arid lands of Mexico. In: New perspectives in forage crops. Loiola ER, Leilson RB editors. USA : Editorial Intechopen; 2018:3-23.

7. Pedroza-Sandoval A, Chávez-Rivero JA, Trejo-Calzada R, Sánchez-Cohen I, Ruiz-Torres J. 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. Moreno RA, Reyes CJL, editores. México, DF: Editorial CLAVE. 2016:69-90.
8. Sánchez-Cohen I, Díaz-Padilla G, Velásquez-Valle M, Slack DC, Heilman P, Pedroza-Sandoval A. A decision support system for rainfed agricultural areas of Mexico. *Computers Electronics Agric* 2015;14:178-188.
9. Cruz-Martínez A, Pedroza-Sandoval A, Trejo-Calzada R, Sánchez-Cohen I, Samaniego-Gaxiola JA, Hernández-Salgado R. Captación de agua de lluvia y retención de humedad edáfica en el establecimiento de buffel (*Cenchrus ciliaris*). *Rev Mex Cienc Pecu* 2016;7(2):159-172.
10. Kéfi S, Rietkerk M, Alados CL, Pueyo Y, Papanastasis VP, Elaich A, de Ruiter PC. Spatial vegetation patterns and imminent desertification in Mediterranean arid ecosystems. *Nature* 2007;449(7159):213-227.
11. Velásquez VMA, De Alba AA, Gutiérrez LR, García EG. Prácticas de restauración de suelos para la conservación del agua. Centro Investigación Regional Norte Centro del INIFAP. Campo Experimental de Zacatecas. Folleto Técnico. Núm. 46; 2012.
12. Roco FL, Engler PA, Jara-Rojas R. Factores que influyen en la adopción de tecnologías de conservación de suelos en el secano interior de Chile Central. *Rev FCA UNCUYO* 2012;44(2):31-45.
13. Sharma BA, Lewi, SD, Gaston A, Darapuneni M, Wang JJ, Sepat S, Bohara H. Winter cover crops effect on soil moisture and soybean growth and yield under different tillage systems. *Soil Tillage Res* 2019;195.
14. Brorens BAHV, VanEs HM, Verheyden SML, Schindelbeck RR. Soil hydraulic properties as affected by tillage. Final report. Master degree. Department of Soil, Crop and Atmospheric Sciences. Ithaca, NY: Cornell University; 1991.
15. Saucedo TRA. Guía técnica para el establecimiento y utilización de plantaciones de chamizo. Centro de Investigación Regional Norte Centro del INIFAP. Campo Experimental de Zacatecas. Folleto Técnico Núm. 10;2003.
16. Velásquez VMA, Muñoz VJA, Macías RH, Esquivel AG, Rivera GM. 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. *Rev AGROFAZ* 2014;14(1):69-76.

17. Yáñez-Chávez LG, Pedroza-Sandoval A, Sánchez-Cohen I, Velásquez-Valle MA, Trejo-Calzada R. Management practices and bioproductivity in grassland of dry areas. In: Grasses as food and feed. Publisher: Intech Open (Edited by Zerihun Tadele). London, SE19SG-United Kindom 2018;49-65.
18. Yáñez-Chávez LG, Pedroza-Sandoval A, Martínez-Salvador M, Sánchez-Cohen I, Echavarría-Cháirez FG Vásquez-Valle MA, López-Santos A. Uso de retenedores de humedad edáfica en la sobrevivencia y crecimiento de dos especies de pastos *Bouteloua curtipendula* [Michx.] Torr. y *Chloris gayana* Kunth. Rev Mex Cienc Pecu 2018;9(4):702-718.
19. Huerta-Olague JJ, Oropeza MJL, Guevara GRD, Ríos BJD, Martínez MMR, Barreto GOA, *et al.* Efecto de la cobertura vegetal de cuatro cultivos sobre la erosión del suelo. Idesia (Arica) 2018;36:153-162.
20. Medina GG, Díaz PG, López HJ, Ruíz CJA, Marín SM. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Durango. (Periodo 1961 – 2003). Libro Técnico № 1. Campo Experimental Valle del Guadiana. CIRNOC-INIFAP; 2005.
21. García I, Martínez JJG. Caracterización de la Reserva de la Biosfera Mapimí Mediante el uso de sistemas de información geográfica. En: Memorias del IV Simposio Internacional sobre la Flora Silvestre en Zonas Áridas. Universidad Autónoma de Chihuahua-Universidad de Sonora; 2004:369-377.
22. Cox JR, Martin RMH, Ibarra FFA, Fourie JH, Rethman NFG, Wilcox DG. The influence of climate and soils on the distribution of four African grasses. J Range Management 1988;41(2):127–139.
23. Martin RM, Cox JR, Ibarra FF. Climatic effects on buffelgrass productivity in the Sonoran Desert. J Range Management 1995;48(1):60–63.
24. Herbel CH, Gibbens RP. Matric potential of clay loam soils on arid rangelands in southern New Mexico. J Range Management 1989;42(5):386–392.
25. Alcalá GC. Guía práctica para el establecimiento, manejo y utilización del zacate buffel. Patronato del Centro de Investigaciones Pecuarias del Estado de Sonora, AC. 1995.
26. Beltrán LS, Loredó OC, Núñez T, González ELA. Buffel titán y buffel regio nuevas variedades de pasto para el altiplano de San Luis Potosí. Folleto técnico N° 35. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. 2008.
27. Lal R, Singh BR. Effects of soil degradation on crop productivity in East Africa. J Sust Agr 2008;13(1):15-36.

28. Pedroza-Sandoval A, Yáñez-Chávez LG, Sánchez-Cohen I, Samaniego-Gaxiola JA, Trejo-Calzada R. Hydrogel, biocompost and its effect on photosynthetic activity and production of forage maize (*Zea mays* L.) plants. *Acta Agronómica* 2017;66(1):63-68.
29. Pezeshki SR. Wetland plant responses to soil flooding. *Environ Exper Botany* 2001;46:299-312.
30. Carter GA, Knapp AK. Leaf optical properties in higher plants: linking spectral characteristics to stress and chlorophyll concentration. *Am J Botany* 2001;88(4):677-684.
31. Tezara WM, Driscoll SD, Lawlor DW. Water stress inhibits plant photosynthesis by decreasing coupling factor and ATP. *Nature* 1999;1401:914-917.
32. Meléndez L, Hernández A, Fernández S. Efecto de la fertilización foliar y edáfica sobre el crecimiento de plantas de maíz sometidas a exceso de humedad en el suelo. *Bioagro* 2006;18(2):107-114.
33. Trujillo ME, Méndez JR, Hossne AJ, Parra FJ. Efecto de la humedad y compactación de un Ultisol de la sabana del estado Monagas sobre la concentración de clorofila y carotenoides, lavado de electrolitos y contenido relativo de agua en plantas de soya. *Acta Universitaria* 2010;20(3):18-30.
34. Aguilar BG, Peña VCB. Alteraciones fisiológicas provocadas por sequía en nopal (*Opuntia ficus-indica*). *Rev Fitotec Mex* 2006;29(3):231-127.
35. Bacarrillo-López R, Pedroza-Sandoval A, Inzunza-Ibarra MA, Flores-Hernández A, Macías-Rodríguez FJ. Productividad de forraje de variedades de nopal (*Opuntia* spp.) bajo diferentes regímenes de humedad del suelo. *Ecosist Recur Agropecu* 2021;8(3):e2878.
36. Cabrera HM. Respuestas ecofisiológicas de plantas en ecosistemas de zonas con clima mediterráneo y ambientes de alta montaña. *Rev Chilena Historia Natural* 2002;75:625-637.