

## Un sistema agroforestal de secano para el altiplano semiárido de México

Esteban Salvador Osuna-Ceja<sup>1</sup>  
Benjamín Figueroa-Sandoval<sup>2§</sup>  
Miguel Ángel Martínez-Gamiño<sup>3</sup>  
José Pimentel-López<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Campo Experimental Pabellón-INIFAP. Carretera Aguascalientes-Zacatecas km 32.5, Pabellón de Arteaga, Aguascalientes, México. AP. 20. CP. 20660. Tel. 01 (55) 38718700. (osuna.salvador@inifap.gob.mx). <sup>2</sup>Programa de Innovación en el Manejo de Recursos Naturales-Colegio de Postgraduados-Campus San Luis Potosí. Iturbide 73, Salinas de Hidalgo, SLP, México. CP. 78620. Tel. 01 (496) 9630448. <sup>3</sup>Campo Experimental San Luis-INIFAP. Domicilio conocido, Ejido Palma de la Cruz, Col. Soledad de Graciano Sánchez, San Luis Potosí, México. CP. 78431. Tel. 01 (800) 0882222.

§Autor para correspondencia: benjamin@colpos.mx.

### Resumen

En el Altiplano semiárido del centro-norte de México, la erosión del suelo es uno de los principales problemas que afectan la sustentabilidad de las tierras agrícolas. Como resultado, los rendimientos y los ingresos son bajos y la calidad del suelo continúa disminuyendo. Con el objetivo de desarrollar un sistema de explotación agroforestal para el manejo sostenible de suelos, se diseñó un sistema agroforestal (SAF) de secano que incluyó sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) de nervadura café (*bmr*) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en rotación, nopal (*Opuntia* sp.) y leucaena (*Leucocephala glauca*) como alternativa de manejo mejorado de las unidades de producción agrícola, y no como una variante más de la reconversión productiva. El SAF se evaluó en el Sitio Experimental 'Sandoval', Aguascalientes, durante 2014 y 2015, en condiciones ambientales restrictivas, con 344 y 320 mm de precipitación en los ciclos de cultivo para probar que es sostenible, pues favorece la conservación y fertilidad del suelo y el aprovechamiento del agua de lluvia. El rendimiento promedio de sorgo sembrado en cama con seis hileras fue 6.33 t ha<sup>-1</sup> de MS, el del frijol de las variedades Flor de Junio Dalia, Pinto Saltillo, Pinto Centenario, Flor de Mayo Dolores y Azufrado 2, en cuatro hileras fue 2.03, 1.8, 1.74, 1.34 y 0.60 t ha<sup>-1</sup> de grano. Se concluye que es posible implementar un SAF de productividad sustentable, donde el sorgo y el frijol de secano sean incluidos en una rotación de cultivos. El SAF propuesto ofrece opciones técnicamente eficientes para el control de la erosión en la agricultura de secano, con productividad baja.

**Palabras clave:** *Opuntia* sp., *Leucocephala glauca*, agroecosistema, aqueel, barreras vivas, pileteo.

Recibido: febrero de 2019

Aceptado: abril de 2019

## Introducción

La agricultura de secano en el Altiplano semiárido templado del centro-norte de México, se caracteriza por tener bajas producciones de grano y forraje con alta variabilidad espacial y temporal.

Anualmente se siembran 1.25 millones de hectáreas en los estados de Aguascalientes, Chihuahua, Durango, San Luís Potosí y Zacatecas, México. En años con sequía intermitente severa, las pérdidas han afectado 80% de la superficie sembrada (SIAP-SAGARPA, 2011). Por esto, debe darse prioridad a la captación de agua y conservación del suelo para mantener la productividad agrícola de la región (Osuna-Ceja *et al.*, 2013; Arellano-Arciniega *et al.*, 2015).

El Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) ha generado paquetes tecnológicos completos y testimonios de nuevas alternativas de solución, que ayudan a resolver los retos que enfrenta la agricultura moderna y, que contribuyen a mejorar la competitividad del agro nacional.

El establecimiento de barreras de muro vivo y terrazas son prácticas efectivas en la conservación del suelo y agua, tal es el caso del sistema de cultivos en callejones (Lal, 1991; Ramírez-Cruz y Oropeza-Mota, 2001; Uribe-Gómez *et al.*, 2002; Pérez-Nieto *et al.*, 2005, Camas *et al.*, 2012), definido por Nair *et al.* (1994) como un arreglo de cultivos anuales de escarda creciendo entre barreras de muro vivo de arbustos o árboles preferentemente leguminosas, cuyos residuos de su poda continua, incrementan el mantillo y el contenido de materia orgánica del suelo y atrapan el escurrimiento, los sedimentos y los nutrientes.

La rotación de cultivos es una práctica agrícola que en particular bajo condiciones de secano, no pueden garantizar la obtención de altos rendimientos, por lo que se debe acompañar con prácticas de conservación de suelo adecuadas que permitan el máximo aprovechamiento del agua de lluvia y el mejoramiento de la calidad física, química y biológica del suelo, para mantener los niveles de producción dentro de una agricultura sustentable (Osuna-Ceja *et al.*, 2006; Aguilar-Benítez *et al.*, 2012; Osuna-Ceja *et al.*, 2015a; Arellano-Arciniega *et al.*, 2015).

El frijol (*Phaseolus vulgaris*) forma parte de los cultivos que tradicionalmente se siembran bajo las condiciones de temporal en la región semiárida; sin embargo, sus rendimientos unitarios son muy bajos (SIAP-SAGARPA, 2015). Por esta razón se han desarrollado nuevas variedades de frijol mejoradas con probada o probable adaptación en las áreas frijoleras locales. La siembra del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) con gen *bmr* (*brown midrib*) o nervadura café constituye toda una novedad en la región.

Dada la actual demanda de grano y forraje en la región semiárida bajo estudio, resulta de interés conocer si las condiciones agroecológicas de la misma son favorables, al cultivo del sorgo y permiten rendimientos atractivos al productor, para qué en el mediano plazo, lo incorpore a su unidad de producción (Ríos-Saucedo *et al.*, 2010; Osuna-Ceja *et al.*, 2015a). Ante la escasez de agua, el sorgo muestra mayor adaptación que el maíz (*Zea mays* L.) (Borrell y Hammer, 2000).

En general el maíz supera en rendimiento de materia seca al sorgo bajo condiciones adecuadas de humedad en el suelo; sin embargo, con deficiencias de agua moderadas o severas la eficiencia en el uso del agua del sorgo es mayor que la de maíz (Reta *et al.*, 2010), debido a su sistema radical profundo, precocidad y capacidad de ajuste osmótico ante el estrés hídrico (Reta *et al.*, 2006; Bolaños-Aguilar y Emile, 2013).

La agricultura de conservación, se considera un sistema de manejo de suelos sustentable, que permite la conservación del suelo y el agua en tierras de secano, mediante prácticas agronómicas innovadoras que controlan la erosión, disminuyen el escurrimiento superficial y mitigan los efectos de sequía. (Ventura *et al.*, 2003; Figueroa-Sandoval *et al.*, 2011; Bolaños-Aguilar *et al.*, 2012; Osuna-Ceja *et al.*, 2015b; Arrellano-Arciniega *et al.*, 2015).

El objetivo de este estudio fue desarrollar un sistema agroforestal de secano para el patrón de cultivos de sorgo de nervadura café en rotación con frijol y barreras vivas al contorno de nopal (*Opuntia* sp.) y leucaena (*Leucocephala glauca*), manteniendo la característica de uso bajo de insumos. La hipótesis planteada fue que el establecimiento de varios estratos de cobertura con especies anuales y perennes diferentes combinadas con prácticas de conservación de suelo y captación de agua minimizan la erosión del suelo, maximizan el rendimiento y diversifican el agroecosistema de temporal con sistemas alternativos que mejoran la productividad.

## Materiales y métodos

El estudio se realizó durante 2014-2015, en el Sitio Experimental Sandoval, Aguascalientes México. (21° 53' 09" latitud norte, 102° 04' 14" longitud oeste y 2049 de altitud) con 350 mm de precipitación promedio en el ciclo de cultivo, temperatura media de 16.3 °C y ciclo de cultivo de 110 días (finales de junio a mediados de octubre) (Medina *et al.*, 2006). El suelo es de  $\leq 0.45$  m de profundidad, con menos de 1% de materia orgánica, textura franco-arenosa en la capa arable, 2% de pendiente y pH de 6.6 (Osuna-Ceja *et al.*, 2013).

En 2014 se evaluó, una variedad de sorgo de nervadura café (Triunfo x LT BMR-6) y en 2015, cinco variedades de frijol con hábito de crecimiento y precocidad diferentes: Pinto Centenario, Pinto Saltillo, variedades precoces de desarrollo modesto y reducida área foliar por planta; Flor de Mayo Dolores, Flor de Junio Dalia y Azufrado 2, variedades intermedias con un buen desarrollo y mayor área foliar por planta, todas de hábito de crecimiento indeterminado tipo III. Con excepción del sorgo, todos los materiales de frijol provienen del programa de mejoramiento genético del INIFAP.

El SAF evaluado integró la siguiente rotación de cultivo: en 2014: se establecieron franjas de 15 m de ancho con siembras de sorgo de nervadura café (*bmr*) en camas de 1.6 m (ancho de trocha del tractor) con seis hileras, la separación entre éstas fue de 20 cm y 10 semillas por metro lineal, en 2015 siguió la rotación con frijol en camas a cuatro hileras, la separación entre éstas fue de 30 cm y 14 cm entre planta. Cada 15 m se establecieron tres líneas de nopal (*Opuntia* sp.) de la región al tresbolillo y una hilera de leucaena (*Leucocephala glauca*) plantados a altas densidades (entre 1 800 y 3 000 plantas ha<sup>-1</sup>) y a contrapendiente, con el propósito de que sirvan como barreras vivas que apoyen en el control de la erosión laminar y promuevan el mantenimiento de la materia orgánica y la fertilidad de los suelos.

Estas líneas fueron establecidas en el mes de mayo del año 2014 en toda el área de estudio. La unidad experimental constó de cinco franjas, cada una mide 15 m de ancho por 160 m de longitud donde la siembra del sorgo se realizó en 8 camas por franja y el frijol se sembró en una franja con 8 camas por variedad. La densidad de población establecida fue de 252 y 180 000 plantas ha<sup>-1</sup> para sorgo y frijol respectivamente.

El terreno se barbechó y rastreó en el primer año y en el segundo sólo se aplicó un paso de multirado y un rastreo antes de la siembra. La siembra de sorgo se realizó el 28 de junio de 2014 y la de frijol el 8 de julio de 2015 en suelo húmedo. La primera se hizo con una sembradora mecánica para cultivos forrajeros diseñada para siembra en camas de 1.60 m de ancho con seis hileras acoplada a un sistema de captación de agua *in situ* (rodillo Aqueel). La siembra de frijol se realizó con una sembradora mecánica de precisión versátil diseñada para siembra en camas con cuatro hileras acoplada a un sistema de captación de agua *in situ*. Ambos equipos fueron diseñados por el Programa de Mecanización del Campo Experimental Pabellón, del INIFAP (Rojas *et al.*, 2014). Además, a la siembra se implementó el pileteo en los costados de la cama en ambos casos (Arellano-Arciniega *et al.*, 2015; Osuna-Ceja *et al.*, 2015b).

La semilla de los materiales de sorgo y frijol fueron inoculadas con micorriza al momento de la siembra con la cepa del INIFAP (*Glomus intraradices*). Asimismo, se hizo una aplicación de fertilización foliar: en sorgo ésta se hizo al inicio de la floración, y para frijol se aplicó durante el llenado de grano, con urea y ácido fosfórico al 2 y 1%, respectivamente; dichas prácticas son descritas por Osuna-Ceja *et al.*, (2012). El control de plagas en ambos cultivos se hizo con una aplicación de insecticida; a los 30 dds se aplicó Dimetoato CE 38 en dosis de 1 L ha<sup>-1</sup> para prevenir el ataque de gusano soldado (*Pseudaletia unipuncta*) y el pulgón del cogollo (*Rhopalosiphum maidis*) y para el control de la chicharrita (*Empoasca kraemeri*) y mosquita blanca (*Trialeurodes* sp.).

Las observaciones que se realizaron para determinar la respuesta del sistema fueron:

Para el clima. En los dos años de estudio, se registraron los datos climáticos diarios en una estación meteorológica automatizada, situada a 300 m del sitio experimental. También se realizó una clasificación de los eventos de lluvia de acuerdo con su magnitud para determinar la cantidad de precipitación total anual que causa erosión. Mediante el modelo de aplicación regional generado por Cortés (1991) se estimó la erosividad (R) de la lluvia en función de la precipitación anual.

$$R = 2.8959P + 0.002983P^2$$

Donde: R= representa el índice anual de erosividad de la lluvia, en Mj mm ha<sup>-1</sup> hr<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>; y P= representa la precipitación media anual (mm).

Para el suelo. En cada ciclo de cultivo, antes de la siembra, se tomaron muestras de suelo en la zona de las raíces de las plantas (0-10, 10-20 y 20-30 cm de profundidad) y se enviaron al laboratorio para determinar textura, materia orgánica (MO), pH y conductividad eléctrica (CE) del área experimental. La textura (hidrómetro de Bouyoucos), CE en extracto, MO (Walkley y Black, Page *et al.*, 1982) y pH en una relación agua: suelo 2.5:1 (Page *et al.*, 1982). La densidad aparente ( $\rho_a$ ) del suelo se calculó como el cociente entre la masa de suelo seco a 105 °C ( $M_{ss}$ ) y el volumen total ( $V_t$ ) que ocupa esta masa de suelo sin alterar y se determinó en cinco puntos distribuidos al

azar y en cada uno se muestreó la zona de las raíces de las plantas mediante el método de la barrena de doble cilindro (Jury *et al.*, 1991). Esto permitió determinar el porcentaje de poros ( $f_t$ ) con la siguiente ecuación, donde  $\rho_a$  es el valor medio.

$$\rho_a = \frac{M_{ss}}{V_t} \quad f_t = 1 - \frac{\rho_a}{2.65}$$

Para la planta. Durante el ciclo de cultivo del sorgo y el frijol se cuantificaron las características fenológicas: número de días a la emergencia, a la floración y a la madurez fisiológica. También se determinó la dinámica de cobertura vegetal en las diferentes etapas fenológicas de ambos cultivos en función del índice de área foliar (IAF). Para las mediciones se utilizó un ceptómetro lineal (Decagon Devices Inc. Accupar Ver. 4.1), el cual proporciona directamente el dato de IAF de los cultivos (Padilla *et al.*, 2005). La cosecha de sorgo se realizó a los 97 dds, cuando los granos mostraban un estado lechoso-masoso. Para la determinación del rendimiento de materia seca (MS), dentro de cada unidad experimental se tomaron al azar diez muestras de 1.2 m de ancho por 5 m de longitud.

La altura de corte fue de 5 cm del nivel de suelo. El forraje cortado se pesó, obteniéndose posteriormente una submuestra de 0.5 kg por parcela cosechada, la cual se llevó al laboratorio para ser secada en una estufa de aire forzado a 60 °C hasta alcanzar peso constante, para tener el porcentaje de MS y transformar los resultados en base seca (Reta *et al.*, 2007). También se determinó la calidad de forraje en términos de concentración de proteína cruda (PC), fibra detergente neutro (FDN) y fibra detergente ácido (FDA). En frijol se cuantificó el rendimiento, de grano y paja y el número de vainas por planta (NV planta<sup>-1</sup>), número de granos por vaina (G V<sup>-1</sup>), el peso de 100 semillas y el Índice de cosecha (IC). Para la determinación de dichos parámetros, dentro de cada unidad experimental se tomaron al azar cinco repeticiones de 1.2 m de ancho por 5 m de longitud.

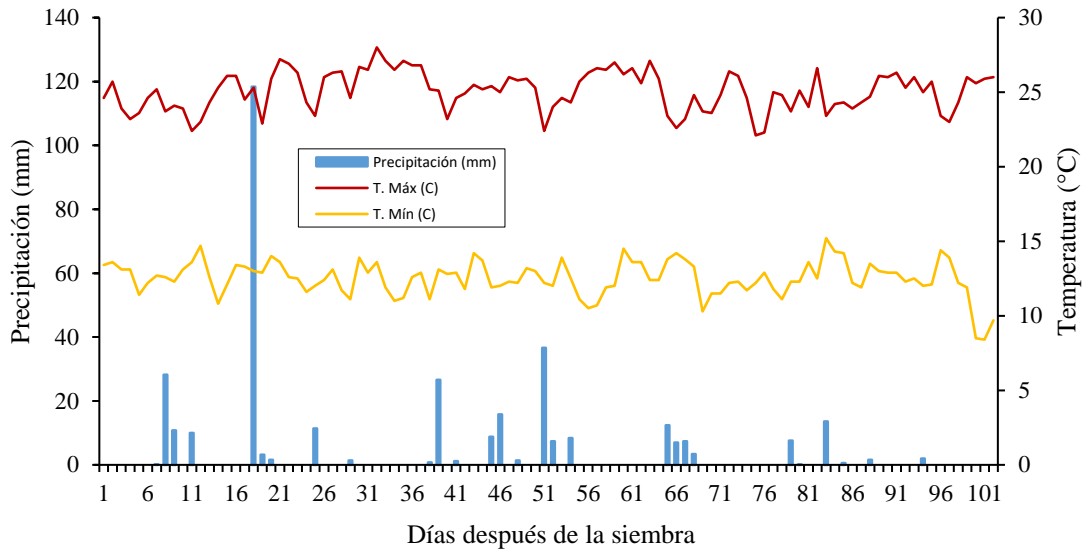
El diseño experimental fue de bloques completamente al azar, los tratamientos en 2015 fueron: las variedades de frijol, la unidad experimental fue de 15 m de ancho por 100 m de longitud por tratamiento. Con los datos se realizó un análisis de varianza y las medias de los tratamientos se compararon con la prueba de Tukey ( $p \leq 0.05$ ). Para estos análisis se usó SAS versión 8 (SAS, 1999).

## Resultados y discusión

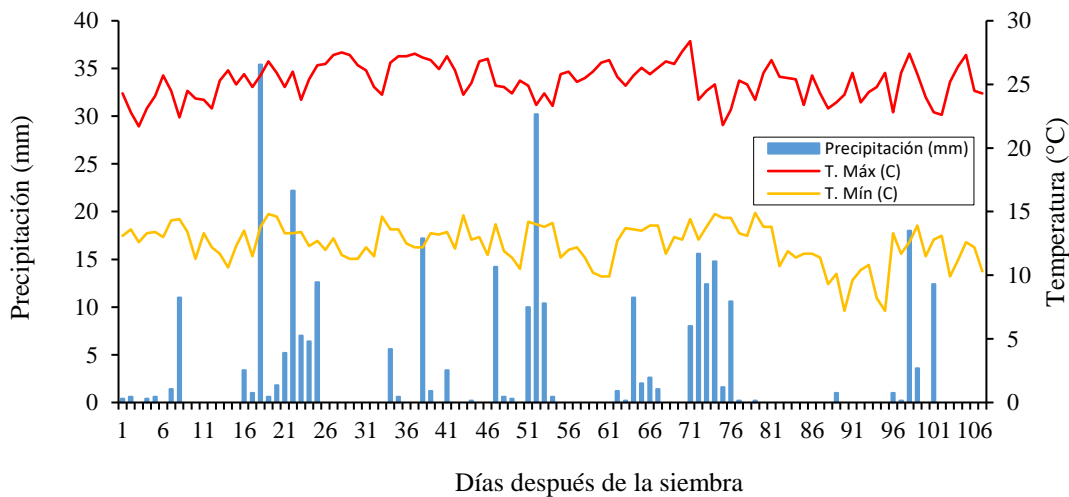
En los cultivos de secano la lluvia es factor determinante de la productividad, más aún si se trata de una región semiárida, como es la mayor parte del Altiplano. En la Figura 1 (a y b) se presentan los datos de temperatura máxima (T<sub>máx</sub>) y mínima (T<sub>mín</sub>) para los dos años de estudio; en ésta se observa que la distribución diaria durante el desarrollo del sorgo fluctuó entre 23 y 26 °C, para T<sub>máx</sub> y entre 11 y 14 °C, para T<sub>mín</sub>, en 2014, mientras que para 2015 durante el desarrollo del frijol, la temperatura fluctuó entre 24 y 26 °C, para T<sub>máx</sub> y entre 6 y 11°C, para T<sub>mín</sub>, respectivamente.

Cabe señalar que tanto T<sub>máx</sub> como T<sub>mín</sub> se mantuvieron prácticamente constantes durante todo el desarrollo del cultivo en ambos años. La precipitación estacional fue de 573.5 mm en el primer año y 531.6 mm en el segundo, 60% (344.1 y 320.6 mm) de ésta ocurrió durante el desarrollo del

cultivo. De los 344.1 y 320.6 mm, 63% (216.8 y 202.6 mm) ocurrieron durante la etapa de desarrollo vegetativo y 37% (127.3 y 118. mm) durante las etapas de floración y reproductiva de los materiales de sorgo y frijol; esto indica una distribución errática para las necesidades del agrosistema.



**Figura 1a. Temperatura máxima y mínima y precipitación diaria, durante el ciclo de cultivo de sorgo y frijol de temporal. Sandoval, Aguascalientes, 2014.**

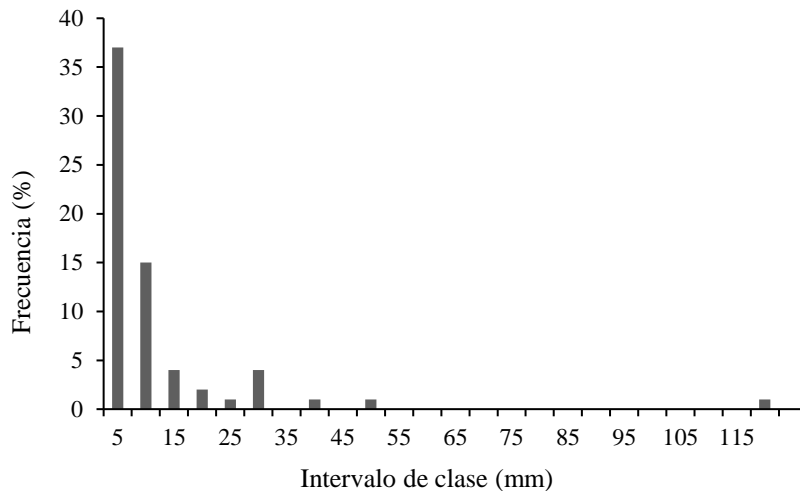


**Figura 1b. Temperatura máxima y mínima y precipitación diaria, durante el ciclo de cultivo de sorgo y frijol de temporal. Sandoval, Aguascalientes, 2015.**

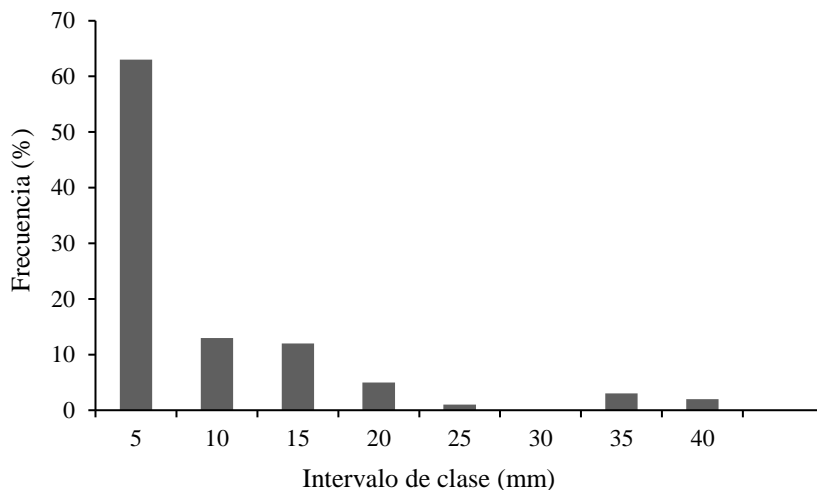
### Frecuencia de la cantidad de lluvia

En 2014 y 2015, para el Sitio Experimental Sandoval, Aguascalientes, México, las lluvias diarias ocurridas indican que sólo 52 y 76% correspondió a 5 a 10 mm diarios, en este intervalo se incluyen las lluvias  $\leq 5$  mm (Figura 2); para las lluvias entre los 15 a 20 mm, las frecuencias están entre 6 y

17%, para las lluvias de 25 a 30 mm, están entre 5 y 1% y de 35 a 40 mm, están entre 1 y 5%, para los dos años, respectivamente. La ocurrencia de lluvias con valores por encima de los 100 mm fue de 1% y sólo se presentaron en 2014. La erosividad de la lluvia anual (R) descrita por la ecuación de Cortés (1991) para esta región fue de 2 653.9 Mj mm ha<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en 2014 y de 2 900 para 2015, respectivamente. La distribución de la erosividad se concentró con un 60 y 53% durante los dos años de estudio, en tres meses, comprendidos de julio a septiembre, lo cual coincide con el período de cultivo (Figura 3).

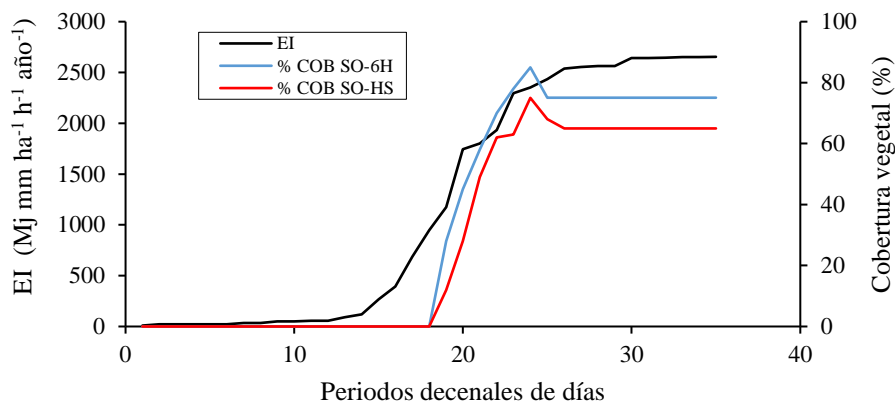


**Figura 2a. Frecuencia de las lluvias diarias en el Sitio Experimental Sandoval, durante 2014.**

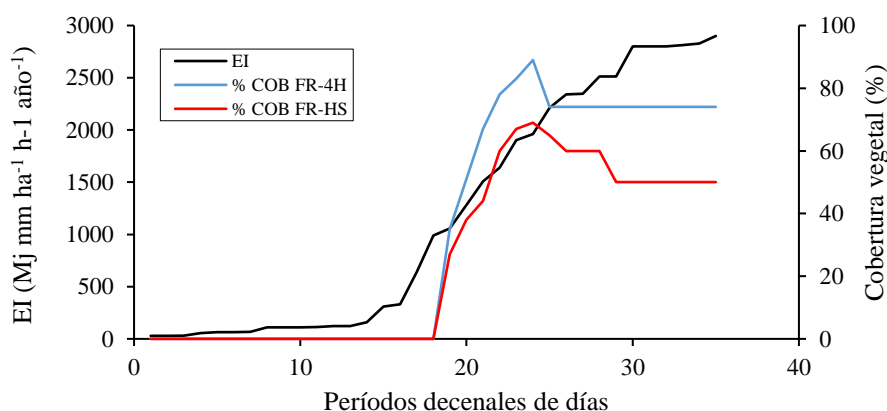


**Figura 2a. Frecuencia de las lluvias diarias en el Sitio Experimental Sandoval, durante 2015.**

Al comparar la distribución acumulada del 'EI' anual para los dos años de estudio y la cobertura vegetal de sorgo y frijol de secano con método diferente de siembra (SAF y sistema tradicional 'ST') se observaron diferencias en la cobertura vegetal (CV) de los cultivos (Figura 3). Al comparar los sistemas se nota un cubrimiento del suelo a través de la CV de 30% a los 10 días después de la siembra en el caso del frijol y el sorgo bajo el SAF mientras que al sistema tradicional le llevo 20 días después de la siembra alcanzar este valor de CV.



**Figura 3a. Erosividad de la lluvia (EI) y porcentaje de cobertura vegetal para sorgo de temporal, 2014. Sandoval, Aguascalientes.**



**Figura 3b. Erosividad de la lluvia (EI) y porcentaje de cobertura vegetal para frijol de temporal, 2015. Sandoval, Aguascalientes.**

Lo anterior se atribuye, por una parte, a la siembra al contorno en camas de seis y cuatro hileras para sorgo y frijol, respectivamente. Lo cual, debido a su temprano cierre vegetativo, procura una mayor cobertura protegiendo al suelo de su desprendimiento por el impacto de las gotas de lluvia, así como el fortalecimiento del filtro de escurrimiento con las barreras de muro vivo (de nopal y leucaena). En los sistemas de labranza de conservación señala que 30% de cobertura del suelo provoca una disminución de 50% en la erosión (Galeana *et al.*, 1999; Velázquez *et al.*, 2002).

### Comportamiento de las barreras vivas de nopal-leucaena

Las barreras vivas de nopal y leucaena establecidas a inicios del verano 2014, al cabo de dos años de desarrollo, tienen una dinámica de crecimiento óptimo que garantizan el mejoramiento y estabilidad de la productividad sustentable del SAF (Figuroa-Sandoval *et al.*, 2011). El establecimiento de las barreras se acompaña de bordos de desagüe que disminuyen la escorrentía, suavizan la velocidad del escurrimiento e interceptan los sedimentos movilizados por las escorrentías, por lo que constituyen filtros eficaces que retienen suelo y propician el paso lento del agua (Figuroa-Sandoval *et al.*, 2011).



## Comportamiento de la rotación sorgo-frijol

Como complemento de las barreras vivas, se utilizaron como cubiertas vegetales, la siembra en camas con líneas múltiples manejadas en el sistema de rotación sorgo-frijol con seis y cuatro hileras respectivamente. La decisión de validar estas dos especies como promisorias en el sistema de rotación, se debe a los resultados obtenidos con las mismas en las investigaciones llevadas a cabo en el trienio, 2012-2014, en el Sitio experimental Sandoval, Aguascalientes (Osuna-Ceja *et al.*, 2013; Osuna-Ceja *et al.*, 2015b).

El comportamiento de estas coberturas (Cuadro 1), muestra que la velocidad de cubrimiento de ambos cultivos, en el caso del SAF, alcanza más de 60% a partir de los 30 días de germinados, produciendo una reducción casi total al cabo de los 50 días de las malezas y de los espacios vacíos sin plantas. En este período (término de agosto) la cobertura del cultivo llega a su máximo desarrollo, proporcionándole la máxima protección al suelo contra el impacto de las gotas de lluvia; además, hay menos humedad en el suelo debido a la transpiración del cultivo y consecuentemente decrece el escurrimiento y con ello las pérdidas de suelo. Además, la alta rugosidad producida por el pileteo establecido en los costados de la cama de siembra garantiza una retención de los escurrimientos provenientes del área de surcos.

**Cuadro 1. Dinámica de la cobertura por follaje estimada para los cultivos de sorgo-frijol. Sandoval, Aguascalientes. 2014-2015.**

Sistema de cultivo	Etapas fenológicas de sorgo-frijol							
	V <sub>2</sub> (10)	V <sub>3</sub> (20)	V <sub>4</sub> (30)	R <sub>5</sub> (40)	R <sub>6</sub> (50)	R <sub>7</sub> (60)	R <sub>8</sub> (70)	R <sub>9</sub> (80)
	(%) de cobertura							
Sorgo a seis hileras	28	48	65	75	84	92	75	73
Sorgo tradicional	12	28	36	55	62	69	56	52
Frijol a cuatro hileras	35.1	51.4	66.7	77.5	85	92.6	83.7	73
Frijol tradicional	20	35	44	55	62	69	56	50

Sorgo= V<sub>2</sub>-R<sub>5</sub>- etapa vegetativa 10-55 DDS; R<sub>6</sub>-R<sub>9</sub>-etapa reproductiva 55-95 DDS, frijol= V<sub>2</sub>-V<sub>4</sub> - etapa vegetativa 10-30 DDS; R<sub>5</sub>-R<sub>8</sub>- etapa reproductiva 30-75 DDS; R<sub>9</sub>-maduración 75-95 DDS. El valor entre paréntesis es el número de días transcurridos después de la siembra.

Estos resultados indican el efecto positivo de CV de sorgo y frijol en SAF al cubrir más rápidamente el suelo mediante el manejo y arreglo topológico del cultivo. SAF es más eficiente para reducir la erosión y los escurrimientos superficiales, comparado con ST de ambos cultivos debido a que en este último CV no alcanza a cubrir toda el área del surco quedando un porcentaje importante de suelo desprotegido y expuesto al impacto directo de la lluvia (Cuadro 1).

## Modificaciones de las propiedades del suelo bajo prácticas de conservación

La textura del suelo es franco arenoso en la capa arable (0-10 y 10-20 cm) y arcillo-arenoso en la capa subyacente (20-30 cm), con un pH de 6.6 a 7.6, correspondiendo el valor más bajo a los primeros 10 centímetros del perfil. La CIC varió de 2.2 a 4.6 cmol<sup>(+)</sup> kg<sup>-1</sup>, la MO de 0.4 a 1.3% y el N total de 0.1 a 0.2% (Cuadro 2). Por tanto, la fertilidad del suelo en este ecosistema es baja. En general, el suelo estudiado presentó fuertes problemas de compactación en toda la zona de raíces

de las plantas. La variación de densidad aparente ( $\rho_a$ ) osciló entre 1.36-1.45  $\text{Mg m}^{-3}$  con un promedio general de 1.42 ( $\pm 0.044$ )  $\text{Mg m}^{-3}$  (Cuadro 2). Los valores más bajos se asocian a la capa superficial laboreada (0-10 cm de profundidad).

Los valores más altos, pueden estar relacionados con los bajos contenidos de MO y el mayor grado de compactación que existe en las capas inferiores debido al proceso de sedimentación de los materiales. Sin embargo, en la literatura se reporta que el valor crítico de  $\rho_a$  para la penetrabilidad del suelo por las raíces, para diferentes cultivos varía entre 1.47 y 1.9  $\text{Mg m}^{-3}$  (Alvarado y Forsythe, 2005). Por tanto, los valores de  $\rho_a$  en este estudio al ser inferiores a los reportados permiten aseverar que no hubo restricciones para el crecimiento radical.

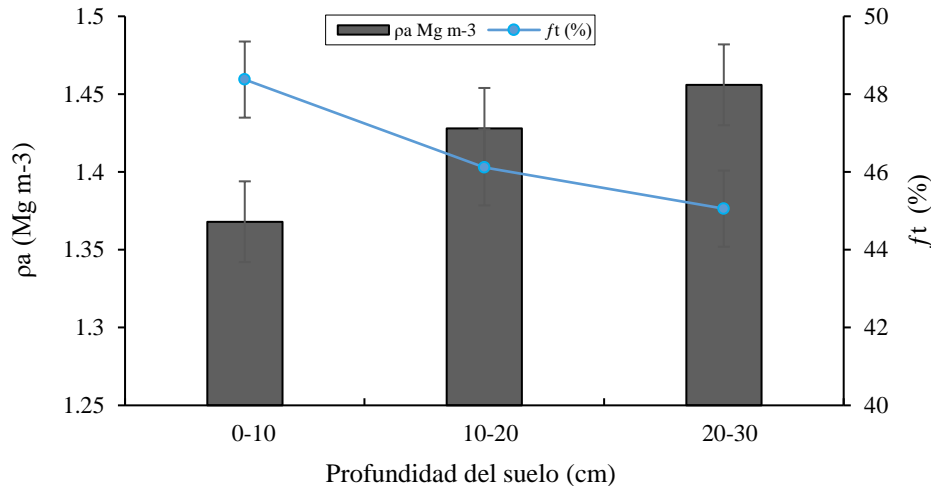
**Cuadro 2. Características físicas y químicas del suelo en el SAF donde se evaluaron las variedades de frijol. Sandoval, Aguascalientes, 2015.**

Características	Profundidad valores de suelo (cm)		
	0-10	10-20	20-30
Textura	Franco-arenoso	Franco-arenoso	Franco arcillo-arenoso
Arena (%)	53.44	56.88	51.44
Arcilla (%)	18.2	17.12	20.2
Limo (%)	28.36	26	28.36
$\rho_a \text{ Mg m}^{-3}$	1.36 a	1.42 b	1.45b
$f_t^{\text{¶}}$ (%)	48.68 a	46.4 b	45.28b
pH (1:2.5)	6.6	6.7	7.6
CIC ( $\text{cmol}^{(+)} \text{ kg}^{-1}$ )	4.6	2.3	2.2
MO (%)	1.3	0.5	0.4
N total (%)	0.2	0.1	0.1

$\rho_a$ = densidad aparente;  $^{\text{¶}}$ = porosidad total. Medias con distintas letras son estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

En relación con la profundidad del suelo, se puede notar un valor de  $\rho_a$  ligeramente inferior en el primer estrato de profundidad, probablemente debido a una mayor influencia de las operaciones de labranza y una mayor actividad biológica cerca de la superficie, lo que redundaría en un alto porcentaje de raíces, un importante número de fauna del suelo y una adición de residuos mayor al que ocurre en los intervalos de más profundidad. La  $\rho_a$  aumenta con la profundidad del suelo debido a la reducción de MO y a la compactación de los materiales gruesos (arenas y grava) (Figura 4).

Los indicadores de calidad estructural del suelo como  $\rho_a$  y la porosidad total ( $f_t$ ) fueron diferentes ( $p \leq 0.05$ ) en los primeros 10 cm de profundidad, con relación a los demás horizontes compactados de las capas subyacentes. Estas diferencias deben interpretarse como favorables, puesto que menores valores de  $\rho_a$  y  $f_t$  en la capa superficial, indican un menor grado de compactación y una estructura más favorable. Los valores de  $f_t$  muestran que el estrato superior presenta mayor cantidad de espacios poroso dentro de la matriz del suelo.



**Figura 4. La densidad aparente ( $\rho_a$ ) y porosidad total ( $f_t$ ) en relación con la profundidad para los horizontes estudiados. Sandoval, Aguascalientes, 2015.**

Esto se explica debido a que coincide con el mayor nivel de MO alcanzado (Cuadro 2), pues el C es importante para la porosidad (Osuna-Ceja *et al.*, 2006; Sandoval-Estrada *et al.*, 2008). La labranza vertical y horizontal en suelos con degradación física, produce una disminución de la  $\rho_a$  y un aumento de la  $f_t$  (López-Santos *et al.*, 2011) que favorecen la retención de agua y protegen la MO del ataque microbiano (Bronick y Lal, 1992). Esto coincide con Salazar-Sosa *et al.*, (2010), quienes indican que la MO promueve la retención de agua en el suelo debido a su naturaleza coloidal, favoreciendo su porosidad.

Los datos del año 2014 no mostraron cambio en la fertilidad, pues los valores de MO, N, P y K, fueron similares a los de 2015 y corroboran que éste suelo es de fertilidad baja. En relación con las propiedades físicas, en 2015 existió un ligero incremento de la porosidad y una disminución de la compactación en el estrato superficial del suelo bajo estudio.

### Fenología del cultivo

Las etapas fonológicas en los materiales de sorgo y frijol evaluados mostraron un comportamiento variable: en sorgo de nevadura café, la emergencia (E) se presentó a 9 DDS, el inicio de floración (IF) a 85 DDS y la madurez fisiológica (MF) a 100 DDS. Para frijol Pinto Centenario, la E ocurrió a 7 DDS, el IF a 33 DDS y la MF a 80 DDS, para Pinto Saltillo, la E ocurrió a 8 DDS, la F a 42 DDS y la MF a los 90 DDS, para FM Dolores, FJ Dalia y Azufrado 2, la E osciló entre 7 y 8 DDS, el periodo de floración de 46 a 49 DDS. Un comportamiento similar ocurrió, aunque con mayor variación, en el caso del número de días a la madurez fisiológica, en las variedades FM Dolores y FJ Dalia ya que el número de días osciló entre los 95 a 98 DDS y el Azufrado 2 alcanzó 100 DDS.

### Impacto de las prácticas establecidas sobre el rendimiento de sorgo, frijol y sus componentes de rendimiento

En 2014 el rendimiento promedio de materia seca (MS) de sorgo nevadura café sembrado en camas a seis hileras bajo secano fue de 6.33 t ha<sup>-1</sup> ( $\pm$  0.923), lo que se considera un buen rendimiento (Cuadro 3). La calidad de forraje de sorgo (*bmr*) evaluado con este método de siembra,

se considera superior al forraje de maíz tradicional, debido sobre todo a su contenido de proteína cruda (PC), a valores bajos de fibra detergente ácido (FDA), fibra detergente neutra (FDN) y contenido de lignina (Cuadro 3). Esta respuesta está en consonancia de la mejora de la eficiencia en el aprovechamiento del agua de lluvia y del incremento en la densidad de población a 252 mil plantas por hectárea (Reta *et al.*, 2006). El sistema de manejo propuesto permite que el sorgo de nervadura café bajo condiciones de secano presente características de adaptación y calidad de forraje de potencial importante para el ecosistema del altiplano semiárido (Osuna *et al.*, 2015a).

**Cuadro 3. Rendimiento de materia seca, características de calidad de forraje de maíz, sorgo y eficiencia del uso de agua bajo diferentes sistemas de siembra. Sandoval, Ags., 2014.**

Tratamientos	Materia seca (t ha <sup>-1</sup> )	PC <sup>¶</sup> (%)	FDN <sup>§</sup> (%)	FDA <sup>■</sup> (%)	Lignina (%)
Sorgo en camas a 6 hileras	6.33 a	14.54 a	42.44 b	23.38	1.2
Maíz tradicional <sup>†</sup>	3.49 b	12.93 b	51.44 a	25.68	2.7

<sup>†</sup>= siembra de maíz a 76 cm entre surcos; <sup>¶</sup>= proteína cruda; <sup>§</sup>= fibra detergente neutro; <sup>■</sup>= fibra detergente ácido. Medias con distintas letras son estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

En 2015 la siembra de frijol en camas a cuatro hileras después de sorgo mostró diferencia significativa (Tukey;  $p \leq 0.05$ ) para las variables rendimiento y sus componentes (Cuadro 4). Sin embargo, el rendimiento obtenido con la variedad Azufrado 2 resultó por debajo de la media de las variedades ensayadas. Lo anterior, pudo ser debido al exceso de humedad relativa y humedad del suelo, lo que provocó un fuerte ataque de tizón común (*Xanthomonas campestris* pv *phaseoli*), lo que afectó el crecimiento y el follaje de las plantas. En relación a la producción de paja (t ha<sup>-1</sup>), el promedio general obtenido fue de 0.92 t ha<sup>-1</sup>, las variedades que superaron esta media fueron: Pinto Saltillo y FJ Dalia. El resto de las variedades tuvieron rendimientos inferiores a la media, dichos materiales son: FM Dolores, Pinto Centenario y Azufrado 2 (Cuadro 4). Con excepción del número de vainas por planta, los componentes del rendimiento, granos por vaina y el peso de cien semillas, mostraron una respuesta similar a la del rendimiento. Los resultados (Cuadro 4) superan 257% a la media regional de frijol (0.44 t ha<sup>-1</sup>), reportada para el sistema tradicional (SIAP-SAGARPA, 2015).

**Cuadro 4. Valores promedio de rendimiento de grano y paja (t ha<sup>-1</sup>), número de vainas planta<sup>-1</sup>, número de granos vaina<sup>-1</sup>, peso de cien semillas (g) e índice de cosecha (%) de cinco variedades de frijol sembrado en camas a cuatro hileras en Sandoval, Ags., 2015.**

Variedad	RG <sup>†</sup>	RP <sup>¶</sup>	NV PI <sup>-1§</sup>	G V <sup>-1■</sup>	P 100 S <sup>□</sup>	IC <sup>††</sup>
P. Saltillo	1.8 a	1.03 ab	9.8	3.81 ab	27.2 c	0.636 b
P. Centenario	1.74 ab	0.77 c	9	2.81 c	33.74 a	0.69 a
FM. Dolores	1.34 b	0.87 bc	9.4	3.52 abc	29 bc	0.608 b
FJ. Dalia	2.03 a	1.18 a	8.8	3.99 a	29.22 b	0.632 b
Azufrado-2	0.6 c	0.76 c	7.6	3.03 bc	28.72 bc	0.438 c

<sup>†</sup>= rendimiento de grano; <sup>¶</sup>= rendimiento de paja; <sup>§</sup>= número de vainas por planta; <sup>■</sup>= granos por vaina; <sup>□</sup>= peso de cien semillas; <sup>††</sup>= índice de cosecha. Medias con distintas letras son estadísticamente diferentes (Tukey,  $p \leq 0.05$ ).

En relación con el índice de cosecha el mismo mostró diferencias ( $p \leq 0.05$ ) entre variedades. El IC de la variedad Pinto Centenario fue superior a Pinto Saltillo, FJ Dalia, FM Dolores y Azufrado 2. El valor promedio varió 0.43 a 0.69 con un promedio general de 0.6 ( $\pm 0.096$ ). El bajo índice que presentó la variedad Azufrado 2, probablemente se relacionó con una baja asignación de fotoasimilados hacia las estructuras reproductivas debido al fuerte ataque de tizón común

(*Xanthomonas campestris* pv *phaseoli*) que sufrió esta variedad durante la etapa de formación de vaina y llenado de grano. Lo anterior demuestra que las variedades de frijol Pinto Centenario, Pinto Saltillo, FM Dolores y FJ Dalia presentan un alto grado de adaptación a esta región del altiplano.

La adaptación y el potencial productivo en parte fue conferida por el ciclo biológico y el nivel de resistencia a las enfermedades, sobre todo a las enfermedades que causan las pudriciones de raíz (*Fusarium* spp. y *Rhizoctonia solani*) y tizón común (*Xanthomonas campestris* pv. *phaseoli*), patógenos que estuvieron presentes en esta localidad (Acosta-Gallegos *et al.*, 2011; Acosta-Gallegos *et al.*, 2014; Rosales-Serna *et al.*, 2012).

El SAF propuesto que incluye la rotación de cultivo sorgo-frijol de secano, en camas a seis y cuatro hileras en franjas al contorno con barreras de muro vivo (nopal y leucaena), son opciones técnicamente eficientes para el control de la erosión de suelo en condiciones del semiárido y precipitaciones de alta intensidad y corta duración.

## Conclusiones

Se diseñó y probó en el Altiplano templado semiárido del centro-norte de México un SAF de productividad sustentable que integra prácticas de labranza de conservación, captación de agua de lluvia *in situ*, rotación de cultivos, altas densidades de plantas, uso de variedades mejoradas y barreras de muro vivo de nopal y leucaena, comprobando que el SAF ofrece opciones técnicamente eficientes para el control de la erosión en la agricultura de secano al prevenir los procesos erosivos a través de la intercepción de la energía de la lluvia con la vegetación, incrementar los rendimientos y diversificar las fuentes de forraje.

## Literatura citada

- Acosta-Gallegos, J. A.; Montero-Tavera, V.; Jiménez-Hernández, Y.; Anaya-López, J. L. y González-Chavira, M. M. 2014. Dalia, nueva variedad de frijol de grano tipo flor de junio para la región centro de México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 5:331-336.
- Acosta-Gallegos, J. A.; Sánchez-García, B. M.; Jiménez-Hernández, Y.; Montero-Tavera, V.; Mendoza-Hernández, F. M.; Herrera-Hernández, G. y Silva-Rosales, L. 2011. Flor de mayo Dolores: nueva variedad de frijol para riego y temporal en Guanajuato. *Rev. Mex. Cienc. Agr.* 2:993-999.
- Aguilar-Benítez, G.; Peña-Valdivia, C. B.; García-Nava, J. R.; Ramírez-Vallejo, P. S.; Benedicto-Valdés, G. y Molina-Galán, J. D. 2012. Rendimiento de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en relación con la concentración de vermicompost y déficit de humedad en el sustrato. *Agrociencia.* 46:37-50.
- Alvarado, A. y Forsythe, W. 2005. Variación de la densidad aparente en órdenes de suelos de Costa Rica. *Agron. Costarric.* 29(1):85-94.
- Bolaños-Aguilar, E. D.; Emile, J. C. y Audebert, G. 2012. Rendimiento y calidad de híbridos de sorgo con y sin nervadura café. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3(2):441-449.
- Borrell, A. K. and Hammer, G. L. 2000. Nitrogen dynamics and the physiological basis of stay-green in sorghum. *Crop Sci.* 40:1295-1307.
- Bronick, C. J. and Lal, R. 2005. Soil structure and management: a review. *Geoderma.* 124:3-22.

- Cortés T. H. 1991. Caracterización de la erosividad de la lluvia en México utilizando métodos multivariados. Tesis de Maestría en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Montecillos, Estado de México. 168 p.
- Galeana de la C. M.; Trinidad, S. A.; García, C. N. E. y Flores, R. D. 1999. Labranza de conservación y fertilización en el rendimiento de maíz y su efecto en el suelo. *Terra*. 17(4):325-335.
- Jury, W. A.; Gardner, W. R. and Gardner, W. H. 1991. *Soil physics*. John, W. Sons. New York. 328 p.
- Lal, R. 1991. Myths and scientific realities of agroforestry as a strategy for sustainable management for soil in the tropics. *In: advances in soil science*. Stewardt, B. N. (Ed.). Springer-Verlag, New York. 15:91-137.
- López-Santos A.; González-Cervantes, G.; Cadena-Zapata, M. y González-Barrios, J. L. 2011. Efecto de la labranza sobre la porosidad de un suelo arcilloso de pastizal estimada mediante análisis de imagen. *Rev. Chapingo*. <http://dx.doi.org/10.5154/r.rchscfa.2010.08.055>.
- Luna, F. M. y Gaytán, B. R. 2001. Rendimiento de maíz de temporal con tecnología tradicional y recomendada. *Agric. Téc. Méx.* 27(2):163-169.
- Osuna-Ceja, E. S.; Arias-Chávez, L. E.; Núñez-Hernández, G. y González-Castañeda, F. 2015a. Producción de forrajes de temporal con estiércol bovino y captación de agua en siembras a triple hilera. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6(8):1743-1756.
- Osuna-Ceja, E. S.; Figueroa-Sandoval, B.; Oleschko, K. Ma. de L.; Flores-Delgadillo; Martínez-Menes, M. R. y González-Cossío, F. V. 2006. Efecto de la estructura del suelo sobre el desarrollo radical del maíz con dos sistemas de labranza. *Agrociencia*. 40:27-38.
- Osuna-Ceja, E. S.; Padilla-Ramírez, J. S.; Martínez-Gamiño, M. A. y Reyes-Muro, L. 2015b. Grain yield of dry beans under rainfall catchment systems and four rows sowing. *Annu. Rep. Bean Improv. Coop.* 58:111-112.
- Osuna-Ceja, E. S.; Reyes-Muro, L.; Padilla-Ramírez, J. S. y Martínez-Gamiño, M. A. 2012. Rendimiento de frijol Pinto Saltillo en altas densidades de población bajo temporal. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3(7):1389-1400.
- Padilla, R. J. S.; Acosta, D. E.; Gaytán, B. R. y Rodríguez, M. V. 2005. Índice de área foliar en frijol de temporal y su relación con biomasa y rendimiento. *Agr. Téc. Méx.* 31(2):213-219.
- Page, A. L.; Miller, R. H. and Keeney, D. R. 1982. *Methods of soil analysis. Chemical and microbiological properties*. Agronomy No. 9, Part 2. ASA and SSSA. Madison, WI, USA.
- Ramírez-Cruz, M. E. y Oropeza-Mota, J. L. 2001. Eficiencia de dos prácticas productivo-conservacionistas para controlar la erosión en laderas en el trópico. *Agrociencia*. 35:489-495.
- Reta, S. D. G.; Cruz, C. S.; Palomo, G. A.; Santos, C. J. S. y Cueto, W. J. A. 2010. Rendimiento y calidad de forraje de kenaf (*Hibiscus cannabinus* L.) en tres edades en comparación con maíz y sorgo x sudán nervadura café. *Rev. Mex. Cienc. Pec.* 1(1):13-23.
- Reta, S. D. G.; Cueto, W. J. A.; Gaytán, M. A. y Santamaría, C. J. 2007. Rendimiento y extracción de nitrógeno, fósforo y potasio de maíz forrajero en surcos estrechos. *Agr. Téc. Méx.* 33(2):145-151.
- Reta-Sánchez D. G., Serrato-Corona, J. S.; Cueto-Wong, J. A.; Santamaría, C. J.; Chávez-González, F. J. J. y Romero-Paredes, R. J. I. 2006. Rendimiento y Calidad de forraje de Kenaf y Sorgo Nervadura Café en unicultivo y en asociación con maíz. *Rev. Fitotec. Mex.* 29(2):91-95.

- Ríos-Saucedo, J. C.; Valenzuela-Núñez, L. M.; Rivera-González, M.; Trucío-Caciano, R. y Sosa-Pérez, G. 2010. Diseño de un sistema silvopastoril en zonas degradadas con mezquite en Chihuahua, México. *Tecnociencia Chihuahua*. 6(3):174-180.
- Rojas-Santillan, C.; Osuna-Ceja, E. S.; Padilla-Ramírez, J. S. and Reyes-Muro, L. 2014. Validation of dry bean sowing prototype in Aguascalientes, México. *Ann. Report of the Bean Improvement Cooperative*. 57:257-258.
- Rosales-Serna, R.; Ibarra-Pérez, F. J. y Cuellar-Robles, E. 2012. Pinto Centenario, nueva variedad de frijol para el estado de Durango. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3:1655-1662.
- Salazar-Sosa, E.; Trejo-Escareño, H. I.; López-Martínez, J. D.; Vásquez-Vásquez, C.; Serrato-Corona, J. S.; Orona-Castillo, I. y Flores-Márgez, J. P. 2010. Efecto residual de estiércol bovino sobre el rendimiento de maíz forrajero y propiedades del suelo. *Terra Latinoam.* 28:381-390.
- Sandoval-Estrada, M.; Stolpe-Lau, N.; Zagal-Venegas, E.; Mardones-Flores, M. y Celis-Hidalgo, J. 2008. Aporte de carbono orgánico de la labranza cero y su impacto en la estructura de un Andisol de la Precordillera Andina Chilena. *Agrociencia*. 42:139-149.
- SAS. 1999. SAS Institute Inc. User's guide. Statistics Versión 8. 6ª (Ed.). SAS Inc. Cary, North, Carolina. USA. 956 p.
- SIAP. 2011. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera Información Agrícola. Avances mensuales por estado. <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>.
- SIAP. 2015. Servicio de Información y Estadística Agroalimentaria y Pesquera Información Agrícola. Avances mensuales por estado. <http://www.siap.sagarpa.gob.mx>.
- Uribe-Gómez, S.; Francisco-Nicolás, N. y Turrent-Fernández, A. 2002. Pérdida de suelo y nutrimentos en un Entisol con prácticas de conservación en los Tuxtla, Veracruz, México. *Agrociencia*. 36:161-168.
- Velázquez, G. J. J.; Salinas, G. J. R.; Potter, K. N.; Gallardo, V. M.; Caballero, H. F. y Díaz, M. P. 2002. Cantidad, cobertura y descomposición de residuos de maíz sobre el suelo. *Terra*. 20(2):171-182.
- Ventura, R. E. Jr.; Domínguez, M. A.; Norton, L. D.; Ward, K.; López, B. M. and Tapia, N. A. 2003. A new reservoir tillage system for crop production in semiarid areas. ASAE Paper No. 032315. St. Joseph, Michigan.