

La sostenibilidad y resiliencia de un sistema agroforestal de secano para el altiplano semiárido de México

Esteban Salvador Osuna-Ceja¹

José Pimentel-López²

J. Saúl Padilla-Ramírez¹

M. Ángel Martínez-Gamiño³

Benjamín Figueroa-Sandoval^{2§}

¹Campo 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). ²Programa de Innovación en el Manejo de Recursos Naturales-Campus San Luis Potosí-Colegio de Postgraduados. Iturbide 73, Salinas de Hidalgo, San Luis Potosí, México. CP. 78600. Tel. 01(496) 9630448. ³Campo Experimental San Luís-INIFAP. Domicilio conocido, Ejido Palma de la Cruz. C. Soledad de Graciano Sánchez, San Luís Potosí, México. CP. 78431. Tel. 01(800) 088 2222.

§Autor para correspondencia: benjamin@colpos.mx.

Resumen

El modelo de simulación Environmental Policy Integrated Climate (EPIC) con un horizonte de predicción de 100 años se usó para evaluar la sostenibilidad y resiliencia de un sistema agroforestal (SAF) de secano para el patrón de cultivo de sorgo en rotación con frijol y barreras vivas al contorno de nopal (*Opuntia* sp.) y leucaena (*Leucocephala Glauca*) con el sistema tradicional (ST) con monocultivo. El índice de erosión/productividad (IEP) se usó para medir el impacto de la erosión sobre la productividad del sorgo y frijol. Se determinó el cambio histórico en el patrón de la precipitación anual (PA) y los diferentes fenómenos asociados a ella (escurrimiento Q, erosión E y rendimiento \bar{Y}) utilizando la dimensión fractal (D) de dichos parámetros, aplicando el coeficiente de Hurst (H), para determinar si éstos muestran persistencia. Se encontró que las perspectivas de sostenibilidad y resiliencia del ST, medidas usando los índices de vida productiva (IVP), de pérdida productiva (IPP) y rendimiento de equilibrio (RE), del sorgo (IEP de 0.4) y el frijol (IVP de 0.8 y IEP mayor de 0.6) son bajas. En contraste, el SAF presentó un valor de IEP de 1 que lo hace sostenible y resiliente, con mejores perspectivas para resistir o recuperarse de los climas extremos (sequías o lluvias intensas) en comparación con el ST, el que se recomienda reemplazar para evitar un mayor deterioro de la productividad futura del sistema en la región del altiplano semiárido de Aguascalientes.

Palabras clave: dimensión fractal, modelo de simulación, monocultivo, resiliencia, rotación de cultivos.

Recibido: febrero de 2019

Aceptado: abril de 2019

Introducción

En los sistemas agrícolas de temporal deficiente de la región del Altiplano semiárido de México, donde la resiliencia y la subsistencia son los objetivos principales para los productores de esta región. Mejorar la capacidad de resistencia y recuperación de sus sistemas productivos para reducir el riesgo de perder totalmente la cosecha parece ser tan importante como aumentar el potencial nutricional y las ganancias económicas (Figueroa, 2011; Lin 2011).

Los cultivos básicos (maíz y frijol) de secano y la producción de forraje dominan geográficamente la agricultura de subsistencia en esta región (Turrent *et al.*, 2005; Paredes *et al.*, 2010). Por tanto, es necesario buscar alternativas reales que estimulen la capacidad de los agroecosistemas a resistir y recuperarse de los eventos climáticos severos (ej. sequías intermitentes e impredecibles). De esta manera, se asegura la producción y se mejora la competitividad de los productores, manteniendo los niveles de calidad y de producción dentro de una agricultura sustentable (Osuna *et al.*, 2000; Altieri y Nicholls, 2013).

En el Altiplano semiárido, los productores han generado con cierto éxito, una resiliencia socio-ecológica (habilidad para retener su estructura organizacional y su productividad tras una perturbación) para enfrentar las restricciones naturales presentes en su ambiente, misma que merecen ser examinadas con atención para tratar de obtener de ellas los resultados óptimos. La estrategia de sobrevivencia de los agricultores del semiárido comprende una amplia gama de actividades que incluyen la combinación de prácticas de manejo de suelo y agua (aprovechamiento de escurrimientos superficiales para asegurar la disponibilidad de agua en la agricultura y ganadería), la caza y las manipulaciones sin ecológicas (relación de especies de plantas nativas).

Este conocimiento tradicional y las prácticas autóctonas de manejo de recursos son la base de la resiliencia de los agroecosistemas campesinos. Sin embargo, la implementación de prácticas agroecológicas para el diseño y el manejo de agroecosistemas, permitirían a los productores adoptar una estrategia que aumente la resiliencia y además proporcione beneficios económicos, en un marco de minimización de riesgo frente a climas inciertos (Altieri y Nicholls, 2013).

Entre los principales problemas que limitan la productividad del sistema tradicional están la escasa y errática precipitación que ocasiona largos períodos de sequía, esto trae como consecuencia la reducción de la producción de grano y un déficit de forraje en la época seca del año (Acosta-Díaz *et al.*, 2003; Osuna-Ceja *et al.*, 2015). Asimismo, están presentes dos factores de degradación, como son la erosión del suelo, provocada por la lluvia, el viento y la siembra de cultivos anuales en tierras no aptas y la degradación de los recursos forrajeros y forestales de los agostaderos, originada en su mayor parte por el sobrepastoreo, provocado por el incremento del número de cabezas de ganado bovino (Carranza-Trinidad *et al.*, 2007). Estos problemas se traducen en la descapitalización y emigración de los productores agropecuarios de la región, todo ello pone en riesgo la sostenibilidad y resiliencia del sistema productivo tradicional.

En resumen, al explicar el deterioro de los recursos naturales se toma el concepto de ‘agricultura sostenible’, la cual implica mantener por tiempo indefinido la productividad y rentabilidad agrícola, mientras se minimizan los impactos ambientales (Faeth, 1993; Villar-Sánchez *et al.*, 2002). Éste es un ‘proceso que permite satisfacer las necesidades de los productores actuales sin comprometer

la capacidad de atender las necesidades de las generaciones futuras' (Fuentes-Castillo *et al.*, 2015). El rescate de los sistemas tradicionales de manejo, en combinación con el uso de prácticas agroecológicas, puede representar la única ruta viable y sólida para incrementar la productividad, la sostenibilidad y la resiliencia de la producción agrícola (Altieri, 2002).

Así, el conocimiento de sostenibilidad y resiliencia dentro de un sistema agrícola debe ser visto de una manera holística, sistémica, de resistencia y recuperación, no solo en términos de los recursos naturales internos, sino también con respecto a las relaciones con el mercado y otros aspectos socioeconómicos (Andreoli y Tellarini, 2000). Existe una profunda brecha entre lo observado en los sistemas físicos y la dinámica de los patrones socio-económicos. La sostenibilidad intenta unirlos dentro del triángulo de la Agricultura Sostenible (Oleschko *et al.*, 2004) y la resiliencia busca la resistencia a los shocks (eventos extremos) y la capacidad de recuperación del sistema (Lin, 2011). Este planteamiento establece que la 'producción sostenible' se mide no sólo por la salida total en un período de tiempo corto, sino por la salida de un período infinitamente largo (generaciones), que puede ser sostenida y 'resiliente' sin afectar la base de recursos naturales de los cuales depende la producción (Villar-Sánchez *et al.*, 2002; Walker *et al.*, 2002; Altieri y Nicholls, 2013).

Para determinar la sostenibilidad dentro de los sistemas agrícolas a nivel de parcela se han evaluado los cambios físicos en el suelo que pudieran resultar al aplicar diferentes prácticas agronómicas, para ello se utilizó el modelo EPIC, el cual ha sido alimentado con información específica, para predecir resultados puntuales (Faeth, 1993). Este modelo permite simular los efectos de las diferentes técnicas de producción y rotación de cultivos sobre el escurrimiento superficial y la pérdida de suelo en terrenos de cultivo (Schröder, 2000; Larose *et al.*, 2004).

Los principales componentes de este modelo de erosión se fundamentan en una serie de factores básicos: características físico-químicas del suelo, pendiente del terreno, precipitación diaria y su desviación, velocidad y dirección del viento, monocultivos, rotación de cultivos y labranza (Schröder, 2000). Actualmente EPIC se ha convertido en una herramienta tecnológica para describir con elevado grado de certidumbre el rendimiento de cultivos con rotaciones complejas y operaciones de labranza en más de 100 cultivos anuales. Asimismo, puede auxiliar, de manera sobresaliente, en la selección de estrategias de manejo de suelo y vegetación con el fin de incrementar los rendimientos de cultivos específicos y además frenar el proceso erosivo (Villar-Sánchez *et al.*, 2002; Wang *et al.*, 2006; Gaiser *et al.*, 2010; Flores *et al.*, 2014).

Esta nueva tecnología representa el 'estado del arte' cuando se trata de modelar los efectos de los cambios en las características de los suelos asociadas con la erosión. Además, se puede predecir el impacto de las diferentes prácticas de manejo de un cultivo sobre la erosión del suelo y la producción del cultivo a largo plazo (Sharpley y Williams, 1990). La serie de valores de las variables respuesta (lluvia anual, erosión, escurrimiento, rendimiento, entre otros) pueden ser comparadas mediante un análisis fractal que permite detectar las propiedades de autosimilitud y determinar la dimensión fractal (D). Esta técnica mide cuanta complejidad es repetida en cada escala y en una serie de tiempo explica la relación entre incrementos (Breslin y Belward, 1999). La dimensión fractal puede ser estimada por una gran variedad de algoritmos, uno de ellos es el exponente Hurst, el cual constituye una medida de la tendencia o persistencia de una serie de datos y está vinculado con la dimensión fractal $D = 2 - H$ (Mandelbrot, 1982).

Las medidas derivadas de la Teoría Fractal favorecen una cuantificación unificada de los aspectos dinámicos y energéticos de un sistema complejo. Muchos investigadores (Breslin y Belward, 1999; Karambiri *et al.*, 2000; Biaoou *et al.*, 2003; Amaro *et al.*, 2004; Pérez *et al.*, 2009) han utilizado la Teoría Fractal como una herramienta valiosa para la comprensión de los procesos pluviométricos y los diferentes fenómenos asociados a estos.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar y comparar la sostenibilidad y resiliencia de 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*) y el sistema tradicional. Además, se estudió la dimensión fractal de la serie de valores de las variables respuesta (lluvia anual, escurrimiento, erosión y rendimiento), a fin de determinar si las mismas muestran persistencia, en las tendencias observadas.

Materiales y métodos

Este estudio se realizó en el Sitio Experimental Sandoval, Aguascalientes, México. Se localiza a 21° 53' 09" latitud norte y 102° 04' 14" longitud oeste, a una altura de 2 049 msnm, donde se registran en promedio 300 mm de precipitación en el ciclo de cultivo; la temperatura media es de 16.3 °C y el ciclo de cultivo de 110 días (finales de junio a mediados de octubre) (Medina *et al.*, 2006). El suelo es de ≤ 0.4 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.*, 2015).

Durante el verano de 2014 se estableció un estudio de largo plazo, en una superficie de dos hectáreas con antecedentes contrastantes: 1) área (una ha) con suelo cubierto de pastizal natural; y 2) área (una ha) con suelo desnudo laboreado por más de diez años. En el área 1, se estableció un sistema agroforestal (SAF), donde se realizan prácticas de conservación de suelo, captación de agua *in situ*, rotación de cultivos de gramíneas y leguminosas para producción de forraje y grano con barreras de muro vivo de nopal y leucaena y en el área 2 se estableció el sistema tradicional (ST) con siembra en monocultivo en surcos rectos, sin captación de agua.

En el ciclo 2015 se continuó el estudio, realizando la rotación en el SAF y el establecimiento de ambas especies en monocultivo en el ST. En ambos años se determinó el rendimiento de MS para el sorgo y de grano para el frijol en los dos sistemas de producción evaluados. Los datos de rendimiento (MS y grano), así como los parámetros de cultivo (índice de área foliar, índice de cosecha, altura máxima del cultivo, relación biomasa-energía, entre otros) fueron utilizados para alimentar el modelo EPIC. Además, los datos climáticos (temperatura máxima, mínima, precipitación diaria y velocidad de viento) requeridos por el modelo fueron colectados diariamente y se seleccionaron mediante el criterio de continuidad para un período de 43 años en la estación meteorológica del Sitio Experimental Sandoval, ubicada a 300 m del área experimental.

Para conocer la respuesta del manejo holístico y sistémico de los recursos naturales e identificación de indicadores, se hizo una evaluación de la sostenibilidad y resiliencia de los dos agrosistemas de sorgo-frijol en rotación y en monocultivo. La metodología utilizada se basó en el modelo de simulación Environmental Policy Integrated Climate (EPIC), versión 5300) (Williams, 1990), el cual sirvió para medir el impacto de la erosión sobre la productividad del sorgo y frijol de secano en la región del Altiplano semiárido de Aguascalientes.

Las simulaciones se realizaron para los dos sistemas de manejo utilizando la estación meteorológica de Sandoval, Aguascalientes, considerando un horizonte de predicción de 100 años. Las variables respuesta: precipitación anual (mm), escurrimiento (mm), erosión ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$) y rendimiento del cultivo de sorgo y frijol ($t\ ha^{-1}$), fueron comparadas su serie de valores obtenidas con EPIC, mediante un análisis fractal, para explicar la relación entre incrementos (Breslin y Belward, 1999). Se calculó el exponente de Hurst (H) y la dimensión fractal (D) para cada una de la serie de valores de las variables respuesta, con el fin de estudiar el comportamiento a largo plazo de las fluctuaciones de las mismas (Mandelbrot y Wallis, 1968). Para ello se aplicó el método de ondoletas (D_w), el cual forma parte del software comercial 'Benoit', utilizado en el presente trabajo. Son cinco las técnicas que maneja el paquete Benoit, para medir las dimensiones fractales de los conjuntos autoafines, calculando el exponente de Hurst a partir de sus valores.

Un exponente H superior a 0.5 revela fenómenos de persistencia: la variable es sensible a su historia y la fuerza del fenómeno de persistencia crece cuando H se acerca a 1. A la inversa, un exponente inferior a 0.5 revela un fenómeno antipersistente (Pérez *et al.*, 2009).

Evaluación de las perspectivas de sostenibilidad y resiliencia de los dos agrosistemas con sorgo y frijol en el área de estudio

La evaluación del efecto de las prácticas de manejo para sorgo y frijol en los dos sistemas de producción de secano para decidir si son o no sostenible y resiliente fue necesario utilizar los escenarios de simulación de largo plazo (100 años). Esta evaluación estuvo basada en tres criterios principales: el índice de vida productiva (IVP), el índice de pérdida productiva (IPP) y el rendimiento de equilibrio (RE), IVP y IPP están sustentados por el índice de erosión/productividad (IEP), concepto introducido por Perrens y Foster (1984); Williams *et al.* (1984) y RE es el ámbito de variación del rendimiento, los cuales se describen a continuación.

Índice erosión-productividad (IEP)

Este se define como la relación entre el rendimiento anual de un cultivo en un terreno erosionado y el rendimiento anual del mismo cultivo en un terreno no erosionado.

Índice de vida productiva (IVP)

Este índice, definido como el período de tiempo al que un sistema de producción deja de ser sostenible y vulnerable por bajar de cierto nivel de productividad (en este caso $IEP < 0.4$ para el cultivo de sorgo y 0.6 para frijol, respectivamente), fue considerado importante en esta evaluación, para determinar las tendencias de productividad del sorgo y frijol.

Índice de pérdida productiva (IPP)

La magnitud de la pérdida de productividad del sorgo y frijol por efecto de la erosión acumulada del suelo dentro del horizonte de planeación de 100 años se evaluó por medio de este índice. Éste fue definido como la pendiente de la curva obtenida al graficar el IEP en el eje Y contra la erosión acumulada en el eje X.

El criterio de evaluación en este caso fue que, si el sistema presenta valores de IPP cercanos a cero, éste sería sostenible y resiliente al ser indicativo de pérdidas de suelo poco significativas del rendimiento. Valores umbrales que determinaron este criterio no están definidos, por tanto, mientras no sean determinados para las condiciones del área de estudio, el criterio del investigador para caracterizarlos es fundamental.

Rendimiento de equilibrio (RE)

Un sistema sostenible y resiliente implica una producción en equilibrio en donde la variación anual del rendimiento oscila dentro de una amplitud pequeña. La evaluación de este nivel de equilibrio significa cuantificar la amplitud de variación del rendimiento en relación a un rango ‘típico’ de fluctuación en el ambiente del área de estudio. Por tanto, el RE definido como la desviación del rendimiento con respecto al valor promedio en el tiempo, fue usado para considerar las variaciones estacionales del clima de la región y el efecto de la erosión acumulada, y su efecto sobre la productividad del sorgo y frijol en la escala del tiempo.

Resultados y discusión

Productividad de la rotación sorgo-frijol en SAF

Con los cambios introducidos en SAF (sistema innovador), se logró incrementar la productividad del sorgo y frijol en 112 y 217%, superando el rendimiento medio comercial de 3 a 6.6 t ha⁻¹ de MS en sorgo y de 0.57 a 1.4 t ha⁻¹ en frijol, respectivamente. Otra diferencia entre ambos sistemas es que el innovador propone un esquema de producción de cultivo diferente a los métodos convencionales y una alternativa de manejo productivo del suelo. Sus aportes son significativos en el incremento de la producción, la retención de agua, reducción del escurrimiento y la producción de sedimentos. Sin embargo, más allá del criterio productivo, dos rasgos de este sistema poseen un enorme valor ecológico: su capacidad a resistir y recuperarse de eventos climáticos extremos para sostenerse a lo largo del tiempo (Figura 1) y explicación de lo anterior, su habilidad para considerar las interacciones de los recursos naturales (suelo, agua, plantas, microorganismos), sin destruirlos o deteriorarlos, por lo que, aumenta más su resiliencia.

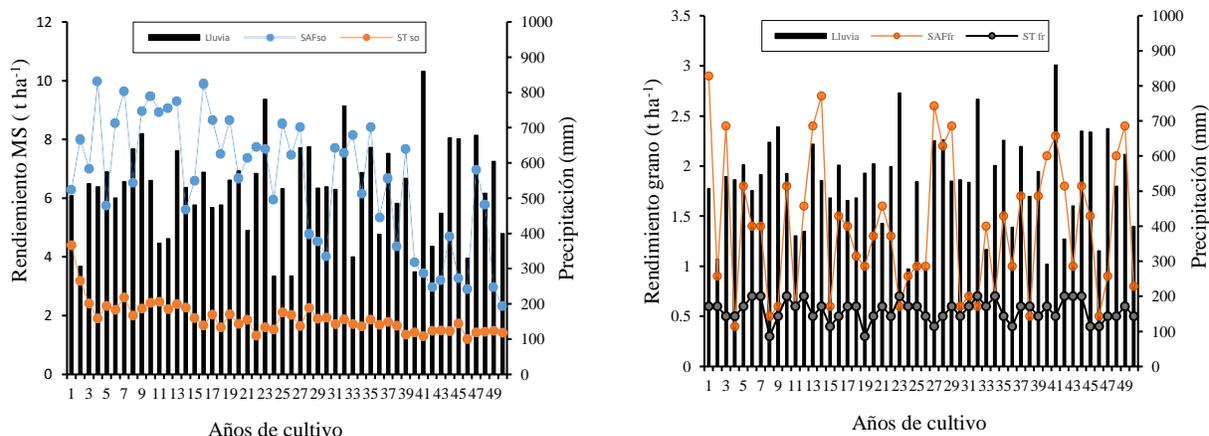


Figura 1. Rendimiento de la rotación sorgo (a) y frijol (b) simulados por EPIC en Sandoval, Aguascalientes, para un período de 100 años (50 años sorgo y 50 años frijol).

En el sistema tradicional (ST), se observa una notable baja productividad de los cultivos evaluados, los rendimientos de sorgo y frijol en monocultivo muestran una tendencia clara de mantenerse a un nivel de subsistencia con el paso de los años, siendo más marcado para sorgo, situación que se relaciona probablemente con la tendencia del escurrimiento y la erosión en el futuro como resultado de utilizar el ST. Esto significa que, bajo condiciones actuales de producción, es necesario sustituir a ST por otro de conservación que revierta estas tendencias y asegure una mayor resistencia a los eventos climáticos al traducirse en menor vulnerabilidad y mayor sustentabilidad y resiliencia a largo plazo, manteniendo así un rendimiento sostenido de los cultivos bajo estas condiciones de producción de secano en la región del semiárido. Además, pueda producir beneficios colaterales para la subsistencia y contribuir a la disminución de la pobreza.

Variabilidad de la productividad de sorgo y frijol

Con la integración de las innovaciones tecnológicas se estima que es factible lograr un incremento en el rendimiento de sorgo y frijol (Figura 1). El análisis de la simulación del rendimiento muestra que la productividad del SAF para la rotación sorgo y frijol fluctúa menos (con un CV= 30 y 16%) que el ST (CV= 32 y 47%). En ambos casos, esta variación probablemente se debe a las diferencias en la cantidad y distribución de las lluvias que se dan entre un año y otro y durante la estación de crecimiento. Sin embargo, aún en los años más secos, la producción del sistema innovador fue mayor ($p \leq 0.05$) que la del tradicional.

Pérdida de suelo y agua para un escenario de 100 años

En la Figura 2, se presentan los datos de escurrimiento y erosión simulados, con el modelo EPIC para los cultivos de sorgo y frijol bajo los dos sistemas de producción evaluados (SAF vs ST) para un período de 100 años, en ésta se observan que las mayores pérdidas de suelo y agua fueron en el ST para ambos cultivos. El SAF redujo significativamente el escurrimiento y la erosión en comparación al anterior. SAF como era de esperarse, resultó ser un sistema más eficaz para reducir el escurrimiento y la erosión debido a que de acuerdo con Figueroa-Sandoval *et al.* (2011), además de tener la eficiencia del trazo al contorno, modifica a dos factores que influyen en el escurrimiento superficial y en la erosión, la longitud y el grado de pendiente originales del terreno; así como el efecto positivo de las barreras vivas de nopal y la cobertura vegetal de los cultivos anuales (siembra de sorgo y frijol a altas densidades de plantas).

En general los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por otros autores (Larose *et al.*, 2004; Figueroa-Sandoval *et al.*, 2011; Camas *et al.*, 2012) en lo referente a eficiencias comparativas, ya que los valores absolutos de las pérdidas de suelo y agua varían considerablemente de acuerdo al manejo racional del suelo y de los cultivos. Debido a que las prácticas de conservación son diseñadas para usar racionalmente la tierra y manejar apropiadamente el escurrimiento (Lal, 1991; Farahani *et al.*, 1998). La reducción de la erosión y el escurrimiento superficial son más evidentes y prácticamente sostenibles y resilientes con el SAF más barreras vivas, lográndose un control casi total de la erosión y aprovechamiento del agua de lluvia y longevidades de 100 años, tomando en cuenta la rotación sorgo-frijol (Figura 2). Estos resultados muestran que el actual ST no es sostenible y es más vulnerable para la erosión y el escurrimiento, por lo que es necesario incorporar cambios tecnológicos si esperamos conseguir una agricultura sostenible en la región estudiada.

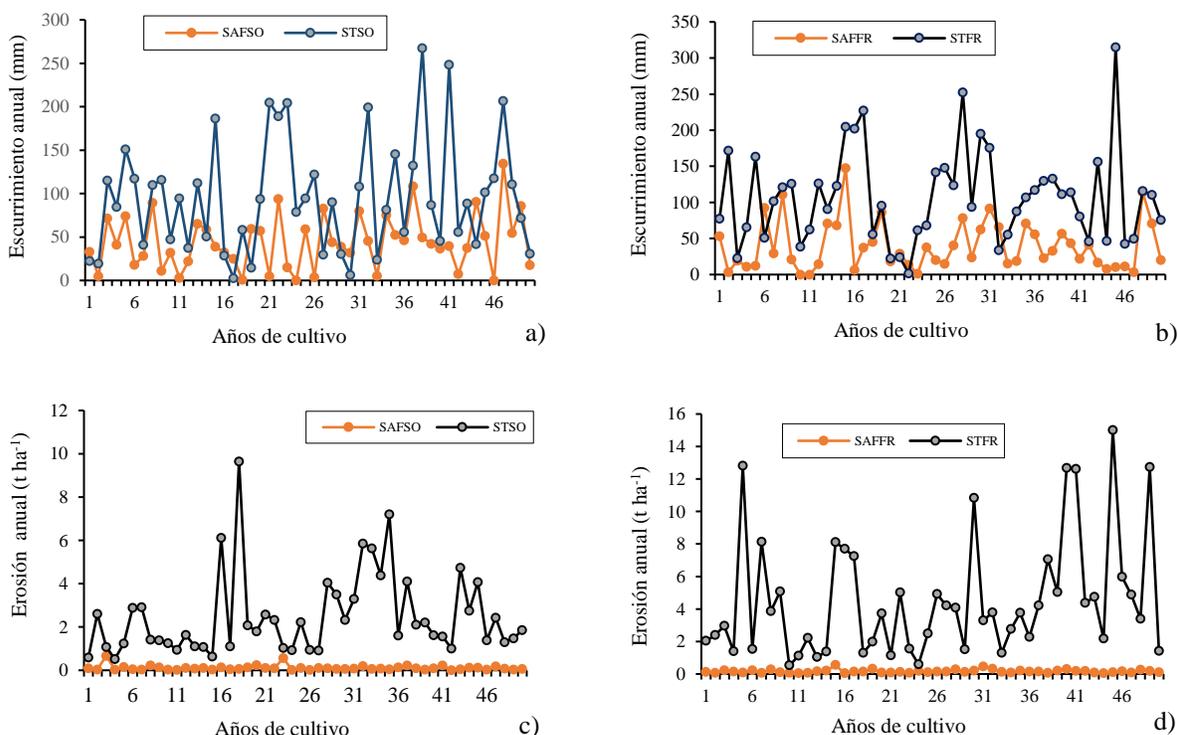


Figura 2. Simulación a largo plazo del escurrimiento (a, b) y la erosión (c, d) para el sistema agroforestal vs tradicional. Sandoval, Aguascalientes.

Análisis fractal de las series de tiempo lluvia, escurrimiento, erosión y rendimiento de sorgo y frijol en dos agrosistemas

El Cuadro 1 muestra los valores del exponente Hurst (H) y la dimensión fractal (D) calculada para cada una de la serie de valores de las variables respuesta: precipitación anual, rendimiento de biomasa y grano, escurrimiento y erosión, correspondientes a las Figuras 1 y 2. En el caso de la lluvia para un horizonte de 100 años, favorece la tendencia de estabilización de la variabilidad anual de su comportamiento, ya que ésta presenta un claro patrón fractal con la persistencia de $D= 1.299$ y $H= 0.701$. Con valores de D cercanos a 1, el proceso se hace cada vez más fiable, pues expone mayor persistencia. Es decir, la tendencia de la serie de precipitación se fortalece a medida que transcurre el tiempo. Al igual que la lluvia, la serie de rendimiento de frijol para el SAF (Figura 1b) de acuerdo con el exponente H (0.651) se puede establecer que la serie es persistente, por tanto, la variable es sensible a su historia. El proceso de persistencia aumenta conforme el valor se acerca a 1. Sin embargo, la serie de rendimiento de sorgo y frijol para SAF_{SO} y ST_{SO-FR}, son antipersistentes ($0 < H < 0.5$); es decir, las series tienden a oscilar de modo más errático (Cuadro 1).

Los resultados coinciden con estudios realizados anteriormente por Oñate, (1997); Amaro *et al.* (2004); Pérez *et al.* (2009). Si $0 < H < 0.5$ significa que la serie de tiempo es antipersistente. Un sistema antipersistente cubre menos distancia que uno aleatorio, en el caso de una partícula errática. Los valores de H y D reportados en el Cuadro 1, permiten determinar que las series de escurrimiento (Q) para SAF_{SO-FR} son antipersistentes; esto significa que, si en un pequeño rango de tiempo Q aumenta, la probabilidad es alta que en el siguiente rango de tiempo Q disminuya. Con

un valor medio de $D= 1.753$, lo cual indica que la serie de Q tienden a oscilar de modo más errático. Sin embargo, la serie de Q para ST_{SO-FR} , muestran persistencia a largo plazo. Esto significa que esta serie se fortalece a medida que transcurre el tiempo.

Cuadro 1. Dimensión fractal de las series de valores de lluvia, escurrimiento, erosión y del rendimiento de sorgo y frijol, estimada con el método de Ondoletas (D_w), bajo diferente manejo.

Sistema de manejo	Parámetros	H^{f}	D_w
	Lluvia	0.701	1.299
SAF_{SO}	Q	0.138	1.862
ST_{SO}	Q	0.564	1.436
SAF_{FR}	Q	0.344	1.644
ST_{FR}	Q	0.6	1.4
SAF_{SO}	E	0.733	1.267
ST_{SO}	E	0.206	1.794
SAF_{FR}	E	0.638	1.362
ST_{FR}	E	0.729	1.271
SAF_{SO}	\bar{Y}	0.152	1.848
ST_{SO}	\bar{Y}	0.228	1.772
SAF_{FR}	\bar{Y}	0.651	1.349
ST_{FR}	\bar{Y}	0.379	1.621

Q = escurrimiento; E = erosión del suelo; \bar{Y} = rendimiento de sorgo y frijol; $^{\text{f}}$ = exponente de Hurst.

Finalmente, al considerar los valores de H y D para las series de erosión (E), en el Cuadro 1 se observa que para SAF con sorgo y frijol en rotación, muestra una alta persistencia. Es decir, la tendencia de cada serie se fortalece a medida que transcurre el tiempo. No obstante, los valores de erosión que presenta SAF en ambos cultivos están por debajo de los permisibles. Es así que SAF incrementa su resiliencia contra posibles eventos climáticos extremos como tormentas de alta intensidad.

Los resultados confirman que la precipitación anual en el sitio Sandoval, Aguascalientes, puede ser caracterizada a través de su dimensión fractal, alcanzando valores de D cercano a 1 y un alto exponente H (0.701), que corroboran un alto nivel de persistencia. Por otro lado, los resultados que presentan la mayoría de las series de valores de las variables respuesta en los sistemas de manejo evaluados (SAF_{SO-FR} vs ST_{SO-FR}) bajo condiciones de secano, corroboran que dichos fenómenos pueden ser caracterizados a través de su dimensión fractal. En términos prácticos, el análisis contribuye a la estimación de fenómenos hidrológicos asociados a la variabilidad de la precipitación y al diseño de ‘sistemas’ orientados a modificar las técnicas de producción para aumentar de forma sostenible y ‘resiliente’ la productividad y la rentabilidad global de los sistemas productivos tradicionales.

Mediante el análisis fractal se puede determinar la variabilidad temporal de una serie de tiempo y su persistencia. Asimismo, se puede determinar la existencia de un cambio en el patrón de la precipitación y los diferentes fenómenos asociados a ella de acuerdo a la evidencia histórica.

Perspectivas de sostenibilidad y resiliencia de la productividad del SAF con sorgo-frijol de secano en rotación

En el Cuadro 2 se presentan los valores de los tres criterios evaluativos de sostenibilidad y resiliencia del sorgo y frijol para los dos agrosistemas comparados. De acuerdo al valor del IVP, el ST con sorgo no es productivo (el IEP baja del valor mínimo de 0.4) prácticamente desde los primeros años de cultivo continuo (IVP= 0.02). Por su parte, el ST con frijol presenta un IVP de 0.8 (IEP mayor al valor de 0.6) que indica una vida productiva prácticamente de 80 años y finalmente, el SAF con sorgo-frijol en rotación presenta un valor de IEP de 1, que indica que en el período de evaluación de 100 años, el SAF es sostenible y resiliente. De los resultados se infiere que, bajo este criterio, la rotación de sorgo-frijol mantiene más cerca a sus condiciones óptimas, debido a prácticas agrícolas y de conservación de suelo y captación de agua que integra el SAF.

Cuadro 2. Parámetros utilizados para evaluar las perspectivas de sostenibilidad del sistema agroforestal con sorgo-frijol en rotación y monocultivo, en Sandoval, Aguascalientes.

Parámetros	ST		SAF	
	S _{OT}	Fr _T	S _{OR}	Fr _R
IVP	0.02	0.8	1	1
IPP	0.002	-0.0002	0	0
RE	0.539	0.105	2.145	0.685
Criterio evaluativo	No sostenible	Sostenible	Sostenible	Sostenible

IVP= índice de vida productiva; IPP=índice de pérdida productiva y RE= rendimiento de equilibrio; S_{OT}= sorgo tradicional; Fr_T=frijol tradicional; S_{OR}=sorgo en rotación y Fr_R=frijol en rotación.

En relación con el IPP, en el Cuadro 2 se observa que el ST con sorgo presenta mayor pendiente de tendencia de la curva del IEP de los dos agrosistemas, esto es un indicador que este sistema de producción presenta una pérdida de rendimiento de 0.54 t de materia seca en 100 años de cultivo continuo que equivalen a una pérdida de 100% de la productividad. Por su parte, el ST con frijol tiene un IPP bajo con este sistema, el frijol pierde 0.1 t de grano en 100 años, que equivale a una pérdida de la productividad de 20%. Finalmente, el SAF presentó un IPP muy bajo, la rotación sorgo-frijol pierde una cantidad insignificante de su productividad. Por tanto, los resultados obtenidos para el SAF con esta rotación de cultivo exhiben mayor estabilidad en los rendimientos y menor disminución de productividad en condiciones de sequía, a diferencia de los monocultivos.

Finalmente, al considerar el criterio de RE, en el Cuadro 2 se observa que para ST con sorgo, el ámbito de variación del IEP dio una desviación estándar de 0.53, el ST con frijol de 0.1, SAF con sorgo de 2.14 y con frijol de 0.68, respectivamente. En este caso una prueba de hipótesis de igualdad de varianzas no significativa, lo que significó que el ámbito de variación fue igual en ambos sistemas de producción para los dos cultivos.

En base a los resultados observados en esta evaluación es claro que, de los dos sistemas de producción analizados, SAF es el que presenta las mejores perspectivas para resistir o recuperarse de los climas extremos (sequías o lluvias intensas). Simultáneamente, permite alcanzar un rendimiento sostenido y resiliente del sorgo y frijol bajo rotación de cultivo, mientras que el ST, actualmente usado, es necesario reemplazarlo para evitar un mayor deterioro de la productividad futura del sistema en el área de estudio, sobre todo el ST con monocultivo.

Conclusiones

La erosión actual para la región del semiárido es un problema grave bajo el sistema de producción tradicional utilizado por los productores de subsistencia, porque son altamente vulnerables a los impactos del cambio climático y favorecen los procesos erosivos y aceleran la pérdida de la productividad de los cultivos. La rotación de sorgo-frijol presentó mayor sostenibilidad y resiliencia en el SAF reduciendo los efectos negativos de la variación climática sobre el rendimiento del cultivo. El uso de modelos dinámicos de simulación constituye una moderna herramienta metodológica, útil en la cuantificación de la erosión y la planeación de la conservación de recursos, así como en la selección del mejor sistema de producción. La precipitación anual en la región del altiplano semiárido de Aguascalientes y los diferentes fenómenos asociados a ella como la E, Q y \bar{Y} pueden ser caracterizada a través de la dimensión fractal, alcanzando valores de D cercanos a 1, que corroboran un alto nivel de persistencia. Los índices IVP, IPP y RE, utilizados para evaluar las perspectivas de la sostenibilidad y resiliencia del sorgo y frijol lograron determinar el desempeño sostenible de los cultivos anuales a largo plazo, para la región templada, semiárida del altiplano de Aguascalientes.

Literatura citada

- Acosta, D. E.; Amador, R. M. D. y Acosta, G. J. A. 2003. Abscisión de estructuras reproductoras en frijol común bajo condiciones de secano. *Agric. Téc. Méx.* 29(2):155-168.
- Altieri, M. A. 2002. Agroecology: the science of natural resource management for poor farmers in marginal environments. *Agric. Ecosys. Environ.* 93:1-24.
- Altieri M. A. y Nicholls, C. I. 2013. Agroecología y resiliencia al cambio climático: principios y consideraciones metodológicas. *Agroecología.* 8(1):7-20.
- Amaro, I; Demey, J. R. and Macchiavelli, R. 2004. Aplicación del análisis R/S de Hurst para estudiar las propiedades fractales de la precipitación en Venezuela. *Interciencia.* 11(29):617-620.
- Andreoli, M. and Tellarini, V. 2000. Farm sustainability evaluation: methodology and practice. *Agric. Ecosys. Environ.* 77(2):43-52.
- Biaou, A.; Humbert, P.; Schertzer, D.; Hendrickx, F.; Tchiguirinsskaia, I. and Bendjoudi, H. 2003. Fractals, Multifractals et previsions des precipitations. *Sud Sci. Technol.* 10(2):10-17.
- Breslin, M. C. and Belward, J. A. 1999. Fractal dimensión for rainfall time series. *Mathematics Computers Simulation.* 48(6):437-446. [http://doi.org/10.1016/S0378-4754\(99\)00023-3](http://doi.org/10.1016/S0378-4754(99)00023-3).
- Camas, G. R.; Turrent, F. A.; Cortés, F. J. I.; Livera, M. M.; González, E. A.; Villar, S. B.; López, M. J.; Espinoza, P. N. y Cadena, I. P. 2012. Erosión del suelo, escurrimiento y pérdida de nitrógeno y fósforo en laderas bajo diferente sistema de manejo en Chiapas, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3(2):231-243.
- Carranza, T. R. G.; Macedor, B. R.; Cámara, C. J.; Sosa, R. J.; Meráz, J. A. de J. y Valdivia, F. A. G. 2007. Competitividad en la cadena productiva de leche de vaca en el estado de Aguascalientes, México. *Agrociencia.* 41(6):701-709.
- Espinoza, O. A.; Álvarez, M. A.; del Valle, M. C. y Chauvete, M. 2005. La economía de los sistemas campesinos de producción de leche en el estado de México. *Téc. Pec. Méx.* 43(1):39-56.
- Faeth, P. 1993. An economic framework for evaluating agricultural policy and the sustainability of production systems. *Agriculture, ecosystems and environment.* 46(4):161-173.

- Farahani, H. J.; Peterson, G. A.; Westfall, D. G.; Sherrod, L. A. and Ahuja, L. R. 1998. Soil water storage in dryland cropping systems: the significance of cropping intensification. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62(4):984-991.
- Figueroa, S. B. 1991. Agricultura sostenible y deterioro ambiental. La erosión del suelo. En *Agricultura sostenible: una opción para el desarrollo sin deterioro ambiental. In: Memorias del Primer Simposio Nacional. Colegio de Postgraduados. Montecillos, Estado de México.* 111-140 pp.
- Figueroa, S. B.; Talavera, M. D.; García, H. E. J. y Méndez, G. S. de J. 2011. Programa de reconversión productiva. *RESPYN Rev. Salud Pública y Nutrición. Pub. Esp. Núm.* 5:169-184.
- Flores, L. H. E.; Ruíz, C. J. A.; De la Mora, O. C.; Zarazúa, V. P.; Chávez, D. A. A.; Ramírez, V. H.; y Velásquez, V. M. A. 2014. Aplicación del modelo EPIC para evaluar el efecto del cambio climático y prácticas de manejo sobre el rendimiento de grano de maíz de temporal. *Rev. Mex. Cienc. Agríc. Pub. Esp. Núm.* 10:2007-2020.
- Fuentes, C. M. J.; Jiménez, V. M. A.; García, C. J. L. y Caamal, C. I. 2015. Evaluación de la sustentabilidad del sistema de papel amate. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 6(1):125-138.
- Gaiser, T.; de Barros, I.; Sereke, F. and Lange, F. M. 2010. Validation and Reliability of the EPIC model to simulate maize production in small-holder farming systems in tropical sub-humid West Africa and semi-arid Brazil. *Agric. Ecosys. Environ.* 135(4):318-327.
- Karambiri, H; Humbert, P. and Bendjoudi, H. 2000. Multifractals contribution to the study of long pluviometric series. *Sud Sci. Technol.* 6:4-14. <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00477-007-0121-6>.
- 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.
- Larose, M.; Oropeza, M. J. L.; Norton, D.; Turrent, F. A.; Martínez, M. M.; Pedraza, O. J. A. and Francisco, N. N. 2004. Aplicación del modelo WEEP en terrenos de ladera de los Tuxtlas, Veracruz, México. *Agrociencia.* 38(2):155-163.
- Lin, B. B. 2011. Resilience in agriculture through crop diversification: adaptive management for enviomental change. *BioSci.* 61(3):183-193.
- Mandelbrot, B. B. 1982. *The fractal geometry of nature.* New York. Freeman. 461 p.
- Mandelbrot, B. B. and Wallis, J. R. 1968. Noah, Joseph, and the operational hydrology. *Water Resour Res.* 5(4):909-918.
- Medina, G. G.; Maciel, P. L. H.; Ruiz C. J. A.; Serrano, A. V. y Silva, S. M. M. 2006. Estadísticas climatológicas básicas del estado de Aguascalientes (período 1961-2003). INIFAP- Campo Experimental Pabellón, Fundación Produce, Aguascalientes. Secretaría de Agricultura Ganadería Pesca y Alimentación (SAGARPA). Libro técnico Núm. 2. 155p.
- Oleschko, K.; Figueroa, B.; Korvin, S. G. y Martínez, M. M. 2004. Agroecometría: una caja de herramientas para el diseño de una agricultura virtual. *Agric. Soc. Des.* 1(1):53-71.
- Oñate, R. J. J. 1997. Fractal analysis of climatic data: annual precipitation records in Spain. *Theor. Appl. Climatol.* 56(1):83-87.
- Osuna, C. E. S.; Padilla, R. J. S y Esquivel, V. F. 2000. Desarrollo de sistemas de producción sostenible para uso y conservación de suelo y agua en las zonas áridas y semiáridas del Norte-Centro de México. Cuaderno de trabajo. Área de Recursos Naturales. SIHGO-CONACYT. Querétaro, Querétaro. 45 p.

- Osuna, C. E. S.; Arias, C. L. E.; Núñez, H. G. y González, C. F. 2015. 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.
- Paredes, L. M. R.; Hernández, M. J.; Ruiz de la, R. R.; Zesati, del V. P. y Luna, F. M. 2010. Calabaza, canola y girasol para la rotación de cultivos de temporal en Zacatecas. *Investigación Científica. Nueva Época.* 6(1):1-11.
- Pérez, S.; Sierra, E. M.; Massobrio, M. J. y Momo, F. R. 2009. Análisis fractal de la precipitación anual en el este de la Provincia de La Pampa, Argentina. *Rev. Climatol.* 9:25-31.
- Perrens, S. J. and Foster, G. R. 1984. Productivity changes due to erosion on non-uniform slopes. In proceeding of the conference on agricultural engineering. Institution of Engineers, Bundaberg, Barton. 409 p.
- Schröder, A. 2000. WEEP, EUROSEM, E-2D: result of application at the plot scale. *In: Schmidt, J. (Ed.). Soil erosion: application of physically based models.* Springer-Verlag, Berlin. 199-247 pp.
- Sharpley, A. N. and Williams, J. R. 1990. EPIC-erosion productivity impact calculator. 1. Model documentation. Technical Bulletin 1768. US Department of Agriculture. Washington, DC. USA. 25 p.
- Turrent, F. A.; Laird, R. J.; Cortés, F. J. I. y Volke, H. V. 2005. Un reencuentro con la productividad de agrosistemas: I. Fundamentos y herramientas. *Agrociencia.* 39(1):29-39.
- Villar, S. B.; López, M. J.; Pérez, N. J. y Camas, G. R. 2002. Aplicación del modelo de simulación EPIC en la predicción del efecto de sistemas de labranza del suelo. *Terra Latinoam.* 21(3):381-388.
- Walker, B.; Carpenter, S.; Anderies, J.; Abel, N.; Cumming, G.; Janssen, M.; Lebel, L.; Norberg, J.; Peterson, G. D. and Pitchard, R. 2002. Resilience management in social-ecological systems: a working hypothesis for a participatory approach. *Conservation Ecol.* 6:1-14. <http://www.consecol.org/vol6/iss1/art14>.
- Wang, X.; Harmel, R. D.; Williams, J. R. and Harman, W. L. 2006. Evaluation of EPIC for assessing crop yield, runoff, sediment and nutrient losses from watersheds with poultry litter fertilization. *Transactions of the ASABE.* 49(1):47-59.
- Williams, J. R. 1990. EPIC erosion productivity impact calculator. Model documentation. User Manual. USDA-ARS. Technical Bulletin 2. 236 p.
- Williams, J. R.; Jones, C. A. and Dike, P. T. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. *Trans. ASAE.* 27(1):129-144.
- Williams, J. R. and Renard, K. G. 1985. Assessment of soil erosion and crop productivity with process model (EPIC). *In: Follet, R. F. and Stewart, B. A. (Eds.). Soil erosion and crop productivity.* ASA-CSSA-SSSA. Madison, WI. 67-103 pp.
- Wischmeier, W. H. and Smith, D. D. 1978. Predicting rainfall erosion losses-a guide to conservation planning. *Agricultural Handbook No. 537.* US Department of Agricultural-Science and Education Administration. Washington, DC. 58 p.