

Estudio preliminar del pastoreo racional Voisin como herramienta para mejorar las condiciones del suelo después del pastoreo extensivo

Preliminary assessment of Voisin grazing as a tool for restoring soil conditions after extensive grazing

Germán Bautista-García¹ , Silvia López-Ortiz^{2*} , Félix David Murillo-Cuevas³ ,
Ponciano Pérez-Hernández² , Eusebio Ortega-Jiménez²  y Catalino Jorge López-Collado² 

¹ Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural. Municipio Libre #377, Santa Cruz Atoyac. 03310 Benito Juárez, Ciudad de México, México.

² Colegio de Postgraduados Campus Veracruz. Carretera Federal Xalapa-Veracruz km 88.5, tepetates. 91690 Manlio Fabio Altamirano, Veracruz, México.

^{*} Autora para correspondencia (silvalopez@colpos.mx)

³ Instituto Tecnológico de Úrsulo Galván, Tecnológico Nacional de México. Carretera Cardel-Chachalacas km 4.5, Col. Campestre. 91667 Úrsulo Galván, Veracruz, México.

Editora de Sección: Dra. Gabriela Rodríguez Licea

RESUMEN

El pastoreo racional Voisin (PRV) promueve el manejo armonioso del ganado, las plantas, el agua y el suelo, lo cual puede inducir cambios positivos en las propiedades de los suelos degradados por la práctica del pastoreo extensivo. El objetivo de la presente investigación fue determinar los cambios en las propiedades fisicoquímicas y biológicas del suelo, perdidas por la práctica del pastoreo extensivo, mediante la implementación del PRV en dos ambientes de pastoreo. Se seleccionaron dos potreros dominados por vegetación secundaria (VegSec) de selva baja y dos monocultivos (MonGra) de *Hyparrhenia rufa* (todos sujetos a pastoreo extensivo). Un potrero de cada ambiente continuó bajo pastoreo extensivo (14 meses) y en los otros dos se implementó el PRV (14 meses). Se tomaron muestras de suelo y hojarasca al inicio y al final del periodo de estudio. Algunas propiedades físicas y químicas variaron por efecto del momento de muestreo ($P < 0.05$), al final del periodo, la densidad aparente (DA), nitrógeno total (NT), materia orgánica (MO) y carbono orgánico (CO) mejoraron mientras que potasio disponible (K) aumentó marginalmente. Hubo efecto del manejo anidado en ambiente de pastoreo ($P < 0.05$); en VegSec, DA ($P < 0.05$) y P disponible ($P < 0.05$) mejoraron con PRV y permanecieron igual

en MonGra; en MonGra, la MO ($P < 0.05$) y CO ($P < 0.05$) aumentaron solo con pastoreo extensivo ($P < 0.05$). La abundancia relativa y riqueza de morfoespecies de fauna edáfica se incrementaron con PRV en ambos ambientes de pastoreo ($P < 0.05$), donde dominó el orden Isóptera. Se concluye que a 14 meses de implementado el PRV, algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo empiezan a regenerarse.

Palabras clave: ganados bovinos, indicadores del suelo, macrofauna edáfica, pradera de gramíneas, vegetación secundaria.

SUMMARY

Voisin Grazing (VG) promotes harmonized management of livestock, plants, water and soil, inducing positive changes in soil properties that have been lost due to extensive grazing management. Thus, the objective of this research is to assess some physical-chemical and biological properties of soils undergoing extensive grazing by implementing VG in two grazing environments. Two paddocks dominated by dry forest early secondary vegetation (SecVeg) and two paddocks dominated by *Hyparrhenia rufa* (GraMon) were chosen (all sites undergoing extensive grazing). One paddock from each environment continued under extensive

Cita recomendada:

Bautista-García, G., López-Ortiz, S., Murillo-Cuevas, F. D., Pérez-Hernández, P., Ortega-Jiménez, E. y López-Collado, J. C. (2022). Estudio preliminar del pastoreo racional Voisin como herramienta para mejorar las condiciones del suelo después del pastoreo extensivo. *Terra Latinoamericana*, 40, 1-12. e893. <https://doi.org/10.28940/terra.v40i0.893>

Recibido: 12 de diciembre de 2020. Aceptado: 28 de enero de 2022.
Artículo. Volumen 40, septiembre de 2022.

grazing (14 months) while VG was implemented in the other paddocks (14 months). Soil and litter samples were collected at the beginning and end of the study. Some physical and chemical properties varied due to the sampling time ($P < 0.05$). Bulk density (BD), total nitrogen (TN), organic matter (OM) and organic carbon (OC) improved at the end of the study, while available potassium (K) marginally increased. Soil properties also varied because of the management nested in grazing environment ($P < 0.05$). In SecVeg, BD ($P < 0.05$) and available P ($P < 0.05$) improved with VG, but remained the same in GraMon. In GraMon, OM ($P < 0.05$) and OC ($P < 0.05$) increased only with extensive grazing ($P < 0.05$). Macrofauna morphospecies abundance and richness increased with VG in both grazing environments ($P < 0.05$), where the order Isoptera dominated. After 14 months of implementing VG, some physical, chemical, and biological soil properties had begun to regenerate.

Index words: cattle, soil indicators, edaphic macrofauna, grass pastures, secondary vegetation.

INTRODUCCIÓN

La degradación del suelo es un problema ambiental de importancia mundial (Gomiero, 2016; Pereira *et al.*, 2017), particularmente en los trópicos y subtrópicos (Gibbs *et al.*, 2010). Oldeman (1992) estimó 1965 millones de hectáreas de suelos degradados en el mundo, destacando la degradación por erosión hídrica (56%), erosión eólica (28%), degradación química por pérdida de nutrientes o materia orgánica (12%) y la degradación física (4%). En América Latina, la deforestación y el sobrepastoreo son las causas más frecuentes de la degradación (Gardi *et al.*, 2014), en particular, la deforestación para expansión de la ganadería que se ha intensificado (Wassenaar *et al.*, 2007; Gibbs *et al.*, 2010). En México, el sobrepastoreo ha disminuido la fertilidad (92.7%) y aumentado la compactación del suelo (68.2%). Esta degradación física expone el suelo desnudo a la erosión eólica e hídrica, lo cual afecta negativamente su fertilidad por escurrimiento superficial y sedimentación (Bilotta, Brazier y Haygarth, 2007).

Los pastizales inducidos asocian vegetación herbácea, arbustiva y arbórea nativa que es útil para el forrajeo del ganado, sin embargo, la tendencia actual

es la reconversión de pastizales nativos a monocultivos de gramíneas introducidas (Brown *et al.*, 2004; Allen *et al.*, 2011). No obstante, los ambientes de pastoreo que albergan una mayor diversidad de plantas pueden tener más beneficios que los monocultivos por la acción simultánea y complementaria de distintos grupos funcionales de plantas que pueden beneficiar al ganado y al suelo. Los herbívoros, incluyendo las especies domésticas, utilizan eficientemente la diversidad de plantas disponibles en ambientes biodiversos de pastoreo (Alayon-Gamboa y Álvarez, 2017; Gómez-Fuentes-Galindo *et al.*, 2017; Espinosa-Palomeque, Castillo, Arellano, Pérez y López, 2020) obteniendo múltiples beneficios. A su vez, las plantas mantienen distintas funciones ecosistémicas que en su conjunto contribuyen a la estabilidad del suelo y del sistema completo (Hoosbeek, Remme y Rusch, 2018; Vazquez, Teutscherova, Lojka, Arango y Pulleman, 2020). Mantener la diversidad vegetal en pasturas y pastizales implica implementar técnicas de pastoreo que eficienten el uso de la vegetación biodiversa, que disminuyan el impacto directo del ganado en el suelo, y también que disminuya la necesidad de insumos y prácticas de manejo agresivas al suelo.

El pastoreo racional Voisin (PRV) es un sistema eficiente de manejo del ganado y los recursos naturales (Pinheiro-Machado, 2011; López-Ortiz, 2018). Este sistema busca un equilibrio entre los ciclos del suelo, las plantas y el ganado implementando cuatro leyes descritas a detalle por Pinheiro-Machado (2011); las dos primeras estipulan los tiempos de ocupación (pastoreo) y descanso (recuperación de las pasturas) para un uso planificado de los recursos forrajeros (comunidad vegetal) (Pinheiro-Machado, 2011; Hanson, Johnson, Lichtenberg y Minegishi, 2013). Mientras que las otras dos estipulan el manejo nutricional del ganado basado en el pastoreo (ley de los rendimientos máximos y ley de los rendimientos regulares) (Murphy, Rice y Dugdale, 1986; Pinheiro-Machado, 2011). La correcta aplicación de las dos primeras leyes garantiza la restauración de la fertilidad de los suelos y la productividad del sitio en el tiempo, y en su conjunto contribuyen a otros beneficios del sistema completo (p. ej.: confort del ganado, menor emisión de metano, captura de carbono, protección del suelo, incremento de la actividad biológica, descomposición de la materia orgánica, ciclo de nutrientes, mejoras en la estructura y calidad del suelo) (Pinheiro-Machado, 2011). El pastoreo no

se ha visualizado como un medio para restaurar los suelos que su práctica ha deteriorado, sin embargo, con el conocimiento de las prácticas relacionadas al pastoreo extensivo que son causantes del deterioro (sobrepastoreo, nula fertilización, eliminación de la diversidad vegetal, quema, uso de fármacos y agroquímicos, entre otras) es posible modificar el manejo para la restauración paulatina, lo cual podría tomar tiempos distintos dependiendo del grado del deterioro, tipo de suelo y condiciones agroecológicas imperantes en cada región; una vía para la restauración es el pastoreo racional Voisin (Pinheiro-Machado, 2011).

Bajo este escenario, el objetivo de esta investigación fue determinar los cambios en las propiedades del suelo perdidas por la práctica del pastoreo extensivo, después de la implementación del pastoreo racional Voisin en ambientes de pastoreo contrastantes en su composición botánica (monocultivo de gramíneas vs. sitio con vegetación secundaria remanente de selva baja).

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación y Descripción del Área de Estudio

La investigación se realizó en el municipio de Paso de Ovejas, Veracruz, México, dentro de la provincia fisiográfica llanura Costera del Golfo Sur donde predomina un paisaje de lomeríos de relieve moderado (Chiappy-Jhones, Gama, Soto, Geissert y Chávez, 2002), entre las coordenadas 96° 20' O y 19° 08' N, entre 10 y 400 m de altitud (INEGI, 2009). El clima es cálido subhúmedo subtipo Aw₀ (el más seco de los subhúmedos), con lluvias en verano, temperatura media anual de 22 °C y precipitación < 1000 mm anuales (García, 2004). Sin embargo, la precipitación medida localmente no excede los 694 mm anuales (Azuara-Morales *et al.*, 2020).

El ecosistema original de la zona es selva baja caducifolia (Gómez-Pompa y Castillo-Campos, 2010), actualmente altamente fragmentada por la agricultura y ganadería (INEGI, 2020b) con parches de vegetación secundaria en la matriz del paisaje y árboles dispersos en las tierras agrícolas (Avendaño-Yáñez, López, Perroni y Pérez, 2018). Entre 83 y 85% de los productores de la zona se dedican a la ganadería de doble propósito y cultivo de maíz (Villa-Herrera *et al.*, 2009; Bautista-Tolentino *et al.*, 2011). Los principales tipos de suelos

existentes en la zona son Leptosol (37%), Phaeozem (35%) y Vertisol (27%) (INEGI, 2020a).

Descripción del Sitio y de los Ambientes de Pastoreo

Se eligió un sitio donde coinciden potreros dominados por dos tipos de vegetación a los que se nombró ambientes de pastoreo: monocultivo de gramíneas (MonGra) dominado por *Hyparrhenia rufa* (Nees) Stapf y vegetación secundaria (VegSec) en proceso de sucesión ecológica temprana, donde coexisten especies vegetales de distintas formas biológicas. Todos los potreros tienen cerca de 50 años de estar sujetos al pastoreo extensivo.

Descripción e Implementación de los Sistemas de Pastoreo

Se realizó una investigación de tipo longitudinal, con una evaluación inicial (julio de 2017) y otra final (septiembre de 2018). En cada ambiente se implementaron dos tratamientos denominados sistemas de pastoreo (Allen *et al.*, 2011): pastoreo extensivo (PE) y pastoreo racional Voisin (PRV). Entre mayo y julio de 2017 se diseñaron (tamaño y arreglo espacial) y se construyeron los potreros para el PRV; la superficie para MonGra (1 ha) se dividió en 16 potreros de 25 × 25 m y la superficie de VegSec (1 ha) se dividió en 15 potreros de 22.5 × 22.5 m. Los potreros destinados a continuar con pastoreo extensivo permanecieron tal y como los dueños los tenían, es decir, un solo potrero con su extensión original (6 ha en el MonGra y 1.5 ha en VegSec), donde el ganado permaneció forrajeando en periodos irregulares de pastoreo y descanso.

El pastoreo se implementó entre julio de 2017 y septiembre de 2018 en los monocultivos (Castro-Mendoza, 2019¹), y en la vegetación secundaria (Espinosa-Palomeque *et al.*, 2020). En el sistema PRV, el pastoreo se realizó cuando la vegetación mostró indicios de haber alcanzado su punto óptimo de reposo (momento en que las plantas han reestablecido sus reservas después de la última defoliación y se preparan para florecer) (Allen *et al.*, 2011). Espinosa-Palomeque *et al.* (2020) y Castro-Mendoza (2019¹) describen a mayor detalle los momentos en que se efectuó el pastoreo y se evaluó la composición botánica de los sitios. Los potreros con PE continuaron ocupados según la agenda de los propietarios.

¹ Castro-Mendoza, M. A. (2019). Productividad y calidad nutritiva de *Hyparrhenia rufa* bajo pastoreo regenerativo en clima cálido subhúmedo. Tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias. Colegio de Postgraduados, Veracruz, México. Disponible en http://colposdigital.colpos.mx:8080/jspui/bitstream/10521/4195/1/Castro_Mendoza_%20MA_MC_Agroecosistemas_Tropicales_%202019.pdf

Muestreo del Suelo para Análisis Físicoquímico

En MonGra y VegSec destinados a pastoreo extensivo se trazaron tres transectos y se recorrieron en zigzag para recolectar una muestra cada 20 m y obtener tres muestras compuestas formadas por 4 submuestras en MonGra y cinco en VegSec. En los ambientes destinados a PRV se eligieron aleatoriamente cuatro potreros en cada ambiente y en cada potrero se obtuvo una muestra compuesta ($n = 5$ submuestras por potrero). Las muestras se tomaron en los primeros 10 cm de profundidad, porque el horizonte A es superficial y yace sobre una capa de material consolidado (llamado tepetate) (Gama-Castro *et al.*, 2007).

La densidad aparente (DA) se estimó utilizando una probeta y aplicando el principio del picnómetro (Flores y Alcalá, 2010). Se midió la conductividad eléctrica (CE) directamente en el extracto de saturación con un conductímetro (Richards, 1980), el nitrógeno total (NT) se cuantificó por el método de micro Kjeldahl (Bremner, 1965), el fósforo disponible (P disponible) se estimó por el método de Bray 1 modificado (Bray y Kurtz, 1945), el potasio disponible (K disponible) se extrajo con acetato de amonio 1.0 N, ajustado a pH 7 y se midió por absorción atómica siguiendo la metodología de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002), el carbono orgánico (CO) se obtuvo por el método de Walkley y Black (1934), la materia orgánica (MO) se determinó por digestión húmeda del carbón oxidable con dicromato de potasio (Walkley y Black, 1934; León y Aguilar, 1987) y el pH a través del método electrométrico a partir de una suspensión de suelo: agua (relación 1:2). Los análisis se realizaron siguiendo las metodologías de la NOM-021-RECNAT-2000 (SEMARNAT, 2002) en el Laboratorio de Física de Suelos del Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo, Estado de México.

Diseño y Muestreo del Suelo para Identificar la Macrofauna Edáfica

Se recolectaron muestras de hojarasca y suelo para identificar la macrofauna edáfica siguiendo la metodología de Anderson e Ingram (1993), que consiste en obtener monolitos de $25 \times 25 \times 30$ cm de profundidad, que se modificó para disminuir la profundidad de los monolitos a 10 cm debido a que los suelos son poco profundos. En MonGra y VegSec con pastoreo extensivo, se diseñó un transecto que se recorrió en zigzag para extraer un monolito cada

20 m ($n = 4$ por potrero) y su porción de hojarasca. En MonGra y VegSec asignados a PRV se eligieron los mismos potreros donde se obtuvieron muestras de suelo para análisis ($n = 4$), y en cada uno se colectaron dos monolitos con su respectiva capa de hojarasca. Se extrajeron los organismos de la hojarasca y del suelo, se depositaron en recipientes de plástico (100 ml) con alcohol al 70% y posteriormente se identificaron como morfo especie a nivel de clase, subclase, órdenes y familias taxonómicas, con un microscopio estereoscópico; se utilizaron las claves de Triplehorn y Johnson (2005).

Se calcularon los indicadores ecológicos con el software Species Diversity and Richness (SDR®) Versión IV (Seaby y Henderson, 2006). Se obtuvo la riqueza de especies, la abundancia relativa, y el índice de diversidad de Shannon-Wiener (H') (Magurran, 2004). También se obtuvo la diversidad máxima (H'_{\max}), que representa el valor máximo que H' puede alcanzar en el sitio, se obtiene al multiplicar el ln por el valor de riqueza (S) (Magurran, 2004). Se obtuvo el índice de equidad que representa la proporción de la abundancia de cada morfoespecie (Magurran, 2004).

Análisis Estadístico

Las variables físicas y químicas se analizaron bajo un diseño completamente al azar, que incluyó los efectos de sistema de pastoreo (PE o PRV) anidado en ambiente (MonGra o VegSec), momento del muestreo (inicial y final) y la interacción del sistema de pastoreo * momento de muestreo anidado en ambiente. Se utilizó el procedimiento GLM y la prueba de medias LSmeans, del paquete SAS Versión 9.2 (SAS, 2008). Los índices ecológicos se analizaron bajo un diseño completamente al azar, y solo se incluyó el efecto de tratamiento ($n=4$) porque se evaluaron solo al final de estudio; se utilizó el procedimiento GLM y la prueba de medias LSmeans. Se elaboraron curvas de rango abundancia (Magurran, 2004), para hacer un análisis comparativo de la fauna encontrada entre los ambientes y sistemas de pastoreo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Descripción de los Ambientes y Sistemas de Pastoreo

Los ambientes y sistemas de pastoreo tenían distintas características de paisaje al inicio del estudio (Cuadro 1). Ambos sitios de VegSec tenían alta

Cuadro 1. Características de los ambientes de vegetación secundaria (VegSec) y monocultivo de gramíneas (MonGra) sujetos a pastoreo extensivo y pastoreo racional Voisin (PRV).**Table 1. Characteristics of secondary vegetation (SecVeg) and grass monoculture (GraMon) environments under both extensive and Voisin grazing (VG).**

Condiciones	VegSec		MonGra	
	Extensivo	PRV	Extensivo	PRV
Vegetación dominante	árboles	árboles	gramíneas	gramíneas
Cobertura vegetal del suelo (%)	75	85	35	40
Cobertura de leñosas (%)	40	52 a 95	25	0-30
Cobertura de herbáceas (%)	70	38 a 90	55	20-80
Pedregosidad (%)	80	14 a 78	75	10-80
Pendiente (%)	< 10	< 5	< 20	< 1

cobertura de suelo y similar cobertura de vegetación herbácea, pero diferían ampliamente en su cobertura de leñosas (principalmente de árboles). En VegSec con PE se observaron áreas donde la vegetación tuvo una estructura vertical de tres estratos (incluyendo hierbas, arbustos y árboles) y claros dominados por *H. rufa*; en cambio, en VegSec con PRV, la vegetación se distribuyó claramente en tres estratos con especies de todas las formas biológicas.

Los sitios del ambiente MonGra tuvieron cobertura del suelo y de vegetación muy similares y en ambos dominaba *H. rufa*, hubo baja cobertura del suelo por leñosas, había árboles dispersos de *Caesalpinia cacalaco* Bonpl. y *Vachellia pennatula* (Schltdl. & Cham.) Seigler & Ebinger en el sitio de PE y *Bursera simaruba* (L.) Sarg., *Diphysa minutifolia* Rose y *Lysiloma acapulcense* (Kunth) Benth en el sitio PRV. Todos los sitios tuvieron alto porcentaje de pedregosidad, pendientes moderadas y suelos del tipo migajón-arcilloso.

Propiedades Físicas y Químicas del Suelo

Algunas propiedades del suelo variaron por efecto del momento en que se realizó la evaluación ($P < 0.05$), indicando cambios debido al manejo (Cuadro 2). La DA, NT, MO y CO fueron indicadores que mejoraron después de un año de manejo. La DA disminuyó ($P < 0.0001$), mientras que, NT ($P = 0.0037$), MO ($P = 0.0041$) y CO ($P = 0.0040$) aumentaron.

La mayoría de las propiedades del suelo evaluadas mostraron un cambio positivo en sus contenidos al final del estudio, y aunque P disponible, K disponible y CE

se mantuvieron igual, se puede considerar un balance positivo, a pesar del corto tiempo de haber implementado los sistemas de pastoreo. Otros autores han reportado resultados similares después de implementar sistemas de pastoreo mejorados, pero en periodos más largos (3 a 25 años) (Conant, Six y Paustian, 2003; Teague *et al.*, 2010; Sanderman, Reeseigh, Wurst, Young y Austin, 2015). En 3 años de evaluación, Teague *et al.* (2010) encontraron cambios solo en CO en una sábana de clima continental. En otros estudios de corto plazo (5 años) se observó aumento de CO, NT, y disminución de la DA y P extraíble bajo un pastoreo de tiempo controlado (time-controlled grazing) (Sanjari, Ghadiri, Ciesiolka y Yu, 2008). Algo similar reportaron Battisti, Filho, Loss y Sinisgalli (2018) en un periodo de 4 años, bajo un sistema de pastoreo rotacional. En el corto plazo, en el presente estudio se observaron cambios en la DA, NT, MO y CO como en las citadas investigaciones, lo cual es un indicio positivo de que, mediante sistemas mejorados, las condiciones del suelo pueden empezar a mejorar en el corto plazo. Las otras variables podrían requerir mayor tiempo de manejo para mostrar cambios medibles.

Al mismo tiempo, las propiedades del suelo variaron por efecto del sistema de pastoreo anidado en el tipo de ambiente ($P < 0.05$) (Cuadro 3). En VegSec con PRV, DA disminuyó ($P < 0.05$), mientras que en MonGra no hubo cambios en ningún sistema. La MO ($P < 0.05$) y CO ($P < 0.05$) aumentaron en MonGra con PE, mientras que en VegSec ambas propiedades permanecieron igual ($P > 0.05$). El P disponible fue mayor en VegSec con PRV en comparación con PE, mientras que en MonGra

Cuadro 2. Propiedades físicas y químicas del suelo evaluadas antes (inicial) y después (final) de implementar dos sistemas de pastoreo en ambientes con distinto tipo de vegetación.

Table 2. Soil physical and chemical properties evaluated before (beginning) and after (end) implementing two grazing systems in environments with different types of vegetation.

Variables	Inicial	Final
Densidad Aparente (g cm^{-3})	1.118 ± 0.011 ^{a†}	1.042 ± 0.11 ^b
Nitrógeno Total (%)	0.258 ± 0.015 ^b	0.340 ± 0.019 ^a
Fósforo disponible (mg kg^{-1})	0.188 ± 0.041	0.143 ± 0.040
Potasio disponible (cmol (+) kg^{-1})	0.862 ± 0.077	1.585 ± 0.356
Materia orgánica (%)	4.917 ± 0.233 ^b	5.991 ± 0.305 ^a
Carbono orgánico (%)	2.852 ± 0.135 ^b	3.476 ± 0.177 ^a
Conductividad eléctrica (dS m^{-1}) [‡]	0.325 ± 0.016	0.350 ± 0.040

[†] Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas, $\alpha = 0.05$ (LSmeans). [‡] deciSiemens por metro.

[†] Different letters in the same row indicate significant differences, $\alpha = 0.05$ (LSmeans). [‡] deciSiemens per meter.

no hubo cambios ($P = 0.1950$) en ningún sistema de pastoreo, sin embargo, la concentración es similar a VegSec con PRV.

Los valores de DA registrados en esta investigación fueron influidos positivamente por el sistema PRV, particularmente en VegSec con PRV. Sanjari *et al.* (2008) reportaron valores ligeramente más altos a estos (1.17 a 1.20 g cm^{-3}) al implementar el pastoreo controlado como método de pastoreo mejorado en comparación al continuo. Por el contrario, Teague *et al.* (2011) reportaron DA inferior (0.98 a 1.06 en pastoreo continuo, 0.91 en pastoreo rotacional y 0.90 g cm^{-3} en sin pastoreo o control). El cambio en DA en VegSec con PRV puede ser efecto de manejo de potreros realizado

por Espinosa-Palomeque *et al.* (2020), principalmente por los tiempos de ocupación cortos y periodos de reposo largos, lo cual disminuye el impacto constante del pisoteo por el ganado. Rotich, Onwonga, Mbau y Koech (2018) atribuyeron menor DA a las mismas razones, cuando practicaron un sistema rotacional en suelos del tipo Vertisol, Acrisol y Cambisol de ambientes semi áridos.

En general, el P disponible fue más bajo que lo reportado por Battisti *et al.* (2018) después de 4 años de pastoreo rotacional en clima subtropical húmedo. Sin embargo, en VegSec con PRV hubo cambios, lo cual es positivo. El P disponible puede ser variable en el tiempo debido a la interacción en la interfase

Cuadro 3. Composición física y química del suelo en los ambientes de vegetación secundaria (VegSec) y monocultivo de gramíneas (MonGra) sujetos a pastoreo extensivo y pastoreo racional Voisin (PRV), en condiciones de clima cálido subhúmedo.

Table 3. Soil physical and chemical composition in secondary vegetation (SecVeg) and grass monoculture (GraMon) environments under both extensive and Voisin grazing (VG), in warm sub-humid climate conditions.

Variables	VegSec		MonGra	
	Extensivo	PRV	Extensivo	PRV
Densidad Aparente (g cm^{-3})	1.090 ± 0.010 ^{a†}	1.045 ± 0.010 ^b	1.096 ± 0.010 ^a	1.090 ± 0.010 ^a
Nitrógeno Total (%)	0.303 ± 0.017	0.341 ± 0.017	0.268 ± 0.017	0.283 ± 0.017
Fósforo disponible (mg kg^{-1})	0.084 ± 0.041 ^b	0.163 ± 0.041 ^a	0.156 ± 0.041 ^a	0.260 ± 0.041 ^a
Potasio disponible (cmol (+) kg^{-1})	0.906 ± 0.261	1.187 ± 0.261	1.153 ± 0.261	1.648 ± 0.261
Materia orgánica (%)	5.702 ± 0.235 ^b	5.243 ± 0.235 ^b	6.366 ± 0.235 ^a	4.505 ± 0.235 ^b
Carbono orgánico (%)	3.306 ± 0.136 ^a	3.043 ± 0.136 ^a	3.693 ± 0.1365 ^a	2.615 ± 0.136 ^b
Conductividad eléctrica (dS m^{-1}) [‡]	0.346 ± 0.032	0.315 ± 0.032	0.353 ± 0.032	0.336 ± 0.032

[†] Letras diferentes en la misma hilera indican diferencias significativas para cada tipo de ambiente, $\alpha = 0.05$ (LSmeans). [‡] deciSiemens por metro.

[†] Different letters in the same row indicate significant differences for each type of environment, $\alpha = 0.05$ (LSmeans). [‡] deciSiemens per meter.

suelo-planta, por ejemplo, Sanjari *et al.* (2008) detectaron una disminución drástica después de 5 años, debido al consumo de P por las plantas que aumentaron su cobertura. Las propiedades como K disponible y CE se le da hado menor importancia en este tipo de estudios. A 8 años de evaluación, Vecchio, Golluscio, Rodríguez y Taboada (2018) reportaron mayor CE en suelos salinos-sódicos (distinto al tipo evaluado por nosotros).

La MO y CO aumentaron en MonGra con PE, Benito, Brossard, Pasini, Guimarães y Bobillier (2004) sugieren que esto sucede en potreros que son más o menos estables en ausencia de labranza; también se ha sugerido (Battisti *et al.*, 2018) que altos contenidos de MO en sistemas extensivos se debe a la mayor cantidad de raíces de las gramíneas, que dominan en las capas superficiales del suelo. En VegSec, las leñosas dominaron sobre las herbáceas, creando posiblemente un entramado radicular diferente y con menor abundancia de raíces en las capas más superficiales. No obstante, el contenido de CO observado es más alto que lo reportado por Rotich *et al.* (2018) y Vecchio *et al.* (2018).

El pH difirió entre los tipos de manejo debido a la interacción sistema de pastoreo*momento de muestreo anidado en ambiente ($P = 0.0010$) (Cuadro 4). Los cambios en pH sucedieron bajo PRV en ambos ambientes; sin embargo, esta propiedad se incrementó en VegSec y disminuyó en MonGra. Se sugiere que en VegSec con PRV pudo deberse a una distribución irregular de la hojarasca de la vegetación secundaria, mientras que menor pH en MonGra con PRV pudo ser a un mayor impacto del sistema de pastoreo, la deposición continua de residuos de raíz de gramíneas, así como mayor actividad de la biota del suelo que liberan ácidos orgánicos que repercute en altos niveles de materia orgánica y por lo tanto menor pH (Battisti

et al., 2018). Se espera una tendencia a la neutralidad y estabilización del pH bajo un manejo de PRV en el largo plazo, porque un manejo adecuado de los recursos en pastizales debe mantener en equilibrio los procesos del ecosistema que garantizan que todos los componentes funcionen en armonía para mantener los servicios ecosistémicos.

Indicadores Ecológicos del Suelo

La abundancia relativa de grupos taxonómicos de fauna edáfica difirió marginalmente entre los ambiente y sistemas de pastoreo ($P = 0.063$), (Cuadro 5), fue más alta con manejo PRV ($P < 0.05$). En las curvas de rango abundancia (Figura 1), el sistema PRV promovió mayor abundancia de los órdenes Isoptera, Oligochaeta, Formicidae y Araneae, en ambos ambientes. Al agrupar las morfoespecies por orden, Isoptera representó el 62% en MonGra y 52% en VegSec, lo que influyó en una menor equidad (representada por una mayor pendiente de la curva) que el sistema extensivo (menor pendiente) (Magurran, 2004). Si se quitara el orden dominante, la equidad aumenta.

La riqueza de morfoespecies ($P = 0.0021$) y H_{\max} ($P = 0.0106$) fueron mayores en PRV de ambos ambientes, la abundancia relativa cambió solo marginalmente ($P = 0.063$), mientras la diversidad ($P = 0.3246$) y equidad ($P = 0.4561$) no cambiaron (Cuadro 5). Aunque estos atributos son bajos y permanecieron similares entre tratamientos, la H_{\max} esperada es superior con manejo PRV que en PE. Estos resultados son prometedores después de un año de implementar el PRV en ambos ambientes aun con una historia de 50 años de pastoreo extensivo, significa que la fauna del suelo empieza a restablecerse para efectuar sus funciones ecológicas en el suelo, como la fertilidad (Huerta *et al.*, 2008; Pinheiro-Machado, 2011).

Cuadro 4. pH del suelo en los ambientes de vegetación secundaria (VegSec) y monocultivo de gramíneas (MonGra) sujetos a pastoreo extensivo y pastoreo racional Voisin (PRV), en dos momentos de evaluación (inicial y final).

Table 4. Soil pH in secondary vegetation (SecVeg) and grass monoculture (GraMon) environments under both extensive and Voisin grazing (VG), at two evaluation moments (beginning and end).

Año	VegSec		MonGra	
	Extensivo	PRV	Extensivo	PRV
1 (beginning)	6.378 ± 0.014 ^{a†}	6.360 ± 0.014 ^b	6.500 ± 0.014 ^a	6.750 ± 0.014 ^a
2 (end)	6.372 ± 0.014 ^a	6.395 ± 0.014 ^a	6.563 ± 0.014 ^a	6.445 ± 0.014 ^b

[†] Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas para cada tipo de manejo, $\alpha = 0.05$ (LSmeans).

[†] Different letters in the same column indicate significant differences for each type of handling, $\alpha = 0.05$ (LSmeans).

Cuadro 5. Indicadores ecológicos del suelo en los ambientes de vegetación secundaria (VegSec) y monocultivo de gramíneas (MonGra) sujetos a pastoreo extensivo y pastoreo racional Voisin (PRV), en condiciones de clima cálido subhúmedo.

Table 5. Soil ecological indicators in secondary vegetation (SecVeg) and grass monoculture (GraMon) environments under both extensive and Voisin grazing (VG), in warm sub-humid climate conditions.

Variables	VegSec_Extensivo	VegSec_PRV	MonGra_Extensivo	MonGra_PRV
Abundancia relativa	11.00 ± 7.152 ^{b†}	35.25 ± 7.152 ^{ab}	3.00 ± 7.152 ^b	68.25 ± 7.152 ^a
Riqueza	5.60 ± 0.888 ^{bc}	10.50 ± 0.888 ^{ab}	2.66 ± 0.888 ^c	15.25 ± 0.888 ^a
Diversidad	1.21 ± 0.175	1.82 ± 0.175	0.94 ± 0.175	1.71 ± 0.175
Hmax	1.41 ± 0.157 ^{bc}	2.30 ± 0.157 ^{ab}	0.96 ± 0.157 ^c	2.69 ± 0.157 ^a
Equidad	0.67 ± 0.076	0.82 ± 0.076	0.98 ± 0.076	0.64 ± 0.076

[†] Letras diferentes en la misma fila indican diferencias significativas para el efecto de manejo en ambiente, $\alpha = 0.05$ (LSmeans).

[†] Different letters in the same row indicate significant differences for the ambient handling effect, $\alpha = 0.05$ (LSmeans).

La mayor abundancia encontrada en PRV coincide con sitios de mayor cobertura vegetal donde dominan grupos funcionales de detritívoros (Cabrera-Dávila *et al.*, 2017), en este caso las termitas (Isoptera), el manejo PRV concentra los residuos vegetales y heces en espacios delimitados, lo cual puede favorecer las poblaciones de termitas comparado a grandes potreros que se usan en PE, aunque las poblaciones de termitas pueden variar temporalmente por las condiciones

climáticas imperantes. Brown *et al.* (2004) y Marchão *et al.* (2009) también registraron alta densidad del orden Isoptera (y Oligochaeta) con pastoreo mejorado (no PRV), en trópico seco y condiciones de estiaje. Lo registrado en nuestra evaluación y los resultados de Brown *et al.* (2004) y Marchão *et al.* (2009) sugieren que los organismos del orden Isoptera toleran condiciones de ecosistemas secos, pero bajo cobertura de vegetación con prácticas de manejo racional de

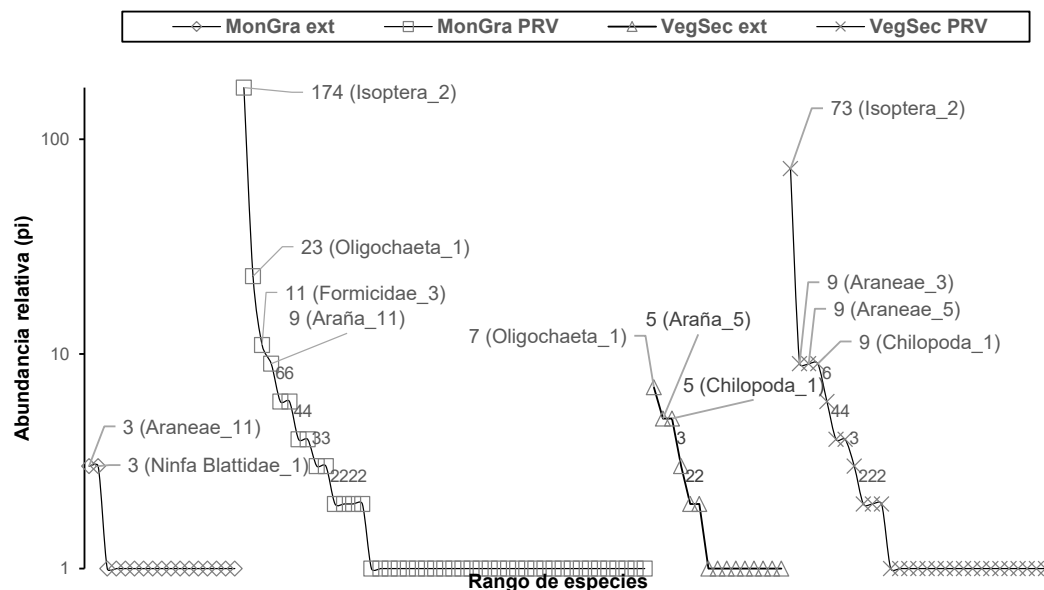


Figura 1. Curva del rango abundancia de macrofauna edáfica (grupos taxonómicos) en los ambientes de vegetación secundaria (VegSec) y monocultivo de gramíneas (MonGra) sujetos a pastoreo extensivo y pastoreo racional Voisin (PRV), en condiciones de clima cálido subhúmedo.

Figure 1. Relative abundance curves of taxonomic edaphic macrofauna (taxa) in secondary vegetation (SecVeg) and grass monoculture (GraMon) environments under both extensive and Voisin grazing (VG), in warm sub-humid climate conditions.

ganado y sistemas integrados, donde se crean las condiciones adecuadas de hábitat. Un mejor manejo del pastoreo y una mayor diversidad vegetal (similar a los bosques secundarios) en conjunto, propician mayor abundancia de organismos del suelo (Cabrera-Dávila, Robaina y Ponce de León, 2011), porque brindan sombra, protección, humedad, regulación de la temperatura y aportan hojarasca y detritos, que, en su conjunto, benefician a la gama de macrofauna (Cabrera-Dávila *et al.*, 2017).

La elevada abundancia relativa de algunas especies refleja su éxito en la competencia por el acceso a recursos limitados en los ambientes de pastoreo, mientras que las especies de baja abundancia relativa se consideran raras o infrecuentes (Magurran, 2004; Magurran y Henderson, 2011). Aunque la abundancia depende de las características de la comunidad (p. ej.: en ambientes tropicales existe tendencia a alto número de especies raras), así como de aspectos metodológicos (momento, método e intensidad de muestreo y espacio) (Magurran y Henderson, 2011).

El reemplazo de los bosques por pastizales aunado a otras prácticas ganaderas hace vulnerable a los suelos, reducen drásticamente el número de morfoespecies y las especies exóticas reemplazan a las nativas (Decaëns *et al.*, 2004). De la Rosa y Negrete-Yankelevich (2012) demostraron que en pasturas de gramíneas hay menos taxones y menor diversidad (en suelo y hojarasca) que en pastizales con vegetación nativa y vegetación secundaria. El pastoreo extensivo después de la deforestación también impacta negativamente la riqueza de especies, la estructura y biomasa de la macrofauna del suelo (Benito *et al.*, 2004; García, Ramírez y Sánchez, 2014). Aunque el tipo de pastoreo es un factor preponderante que afecta estos indicadores, también influyen otros factores como el reemplazo de la vegetación nativa y el clima (Brown *et al.*, 2004; Marchão *et al.*, 2009). Todos estos factores se conjuntaron en los potreros evaluados en esta investigación.

Es posible que la concentración de heces y el periodo de descanso de los potreros en PRV explique la mayor abundancia de termitas, ya que el descanso es una tregua a la perturbación de estos insectos que habitan en la interfase suelo-superficie, en cambio cuando el ganado permanece indefinidamente, la perturbación a la vida de otros organismos es continua. Por otro lado,

las termitas suelen tener mayor actividad en sitios con alta cantidad de materia muerta con alta cantidad de fibra (Coleman, Crossley y Hendrix, 2004), lo cual pudo suceder en el ambiente MonGra, aunque esto solo sucedió en PRV.

CONCLUSIONES

A 14 meses de implementarse el PRV en ambientes sujetos a pastoreo extensivo por más de 50 años, fue posible observar algunos cambios positivos en las condiciones fisicoquímicas y biológicas del suelo, en un ecosistema de selva baja de clima subhúmedo. Algunos cambios ocasionados por el PRV sucedieron tanto en MonGra como en VegSec, principalmente cambios en la biología del suelo, pero otros como la DA y P disponible fueron más evidentes en VegSec o MonGra en el caso de MO y CO. La DA, P disponible, MO, CO, abundancia riqueza y diversidad máxima se modificaron visiblemente, sin embargo, se requieren periodos de evaluación más largos para observar cambios en otros indicadores al implementar sistemas de manejo mejorados como el PRV.

DECLARACIÓN DE ÉTICA

No aplicable.

CONSENTIMIENTO PARA PUBLICACIÓN

No aplicable.

DISPONIBILIDAD DE DATOS

Los conjuntos de datos generados y analizados durante el estudio estarán disponibles hasta el momento en que los autores los hayan publicado.

CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran que no tienen intereses en competencia.

FONDOS

Beca otorgada por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología al estudiante Germán Bautista García.

CONTRIBUCIÓN DE LOS AUTORES

Conceptualización: S.L.O., P.P.H. y G.B.G. Contribuyeron en la formulación y desarrollo de ideas iniciales, y objetivos de investigación. Metodología: S.L.O., F.D.M.C. y G.B.G. diseñaron e implementaron los muestreos, y análisis estadístico de datos. Validación: S.L.O., G.B.G., P.P.H., F.D.M.C., E.O.J. y C.J.L.C. aprobaron las ideas y objetivos de investigación contribuyendo con ideas para la interpretación. Investigación: G.B.G. elaboró la revisión bibliográfica y documentación. Escritura: S.L.O., P.P.H. y G.B.G. colaboraron en la redacción general del manuscrito. Escritura: revisión y edición: S.L.O., F.D.M.C., G.B.G., C.J.L.C. y P.P.H. contribuyeron en la corrección de estilo, normas editoriales, edición de cuadros y figuras. Administración del proyecto: S.L.O. contribuyó en la gestión de recursos institucionales asignados a G.B.G.

AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por financiar sus estudios de Doctorado, a los señores José Justino Castro Tejeda y Gerardo Castro Tejeda por facilitar sus parcelas para realizar esta investigación, y a los estudiantes del Tecnológico de Úrsulo Galván: Diana Xocua Panzo, Ángel Rivera García, José Luis Verdejo Mendoza y Mario Vázquez Carranza quienes ayudaron en el trabajo de campo y laboratorio, durante su Residencia Profesional.

LITERATURA CITADA

- Anderson, J. M., & Ingram, J. S. I. (1993). *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. Wallingford, UK: CABI Publishing.
- Alayon-Gamboa, J. A., & Álvarez-Flores, F. (2017). Diversidad e importancia de la vegetación secundaria en un sistema silvopastoril en Yucatán, México. *Agro Productividad*, 10(2), 60-64.
- Allen, V. G., Batello, C., Berretta, E. J., Hodgson, J., Kothmann, M., Li, X., ... Sanderson, M. (2011). An international terminology for grazing lands and grazing animals. *Grass and Forage Science*, 66(1), 2-28. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2010.00780.x>.
- Avendaño-Yáñez, M. L., López-Ortiz, S., Perroni, Y., & Pérez-Elizalde, S. (2018). Leguminous trees from tropical dry forest generate fertility islands in pastures. *Arid Land Research and Management*, 32(1), 57-70. <https://doi.org/10.1080/15324982.2017.1377782>
- Azuara-Morales, I., López-Ortiz, S., Jarillo-Rodríguez, J., Pérez-Hernández, P., Ortega-Jiménez, E., & Castillo-Gallegos, E. (2020). Forage availability in a silvopastoral system having different densities of *Leucaena leucocephala* under Voisin grazing management. *Agroforestry Systems*, 94, 1701-1711. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00487-5>
- Battisti, L. F. Z., Filho, A. L. S., Loss, A., & Sinisgalli, P. A. de A. (2018). Soil chemical attributes in a high biodiversity silvopastoral system. *Acta Agronómica*, 67(4), 486-493. <https://doi.org/10.15446/acag.v67n4.70180>
- Bautista-Tolentino, M., López-Ortiz, S., Pérez-Hernández, P., Vargas-Mendoza, M., Gallardo-López, F., & Gómez-Merino, F. C. (2011). Sistemas agro y silvopastoriles en la comunidad El Limón, municipio de Paso de Ovejas, Veracruz, México. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 14, 63-76.
- Benito, N. P., Brossard, M., Pasini, A., Guimarães, M. F., & Bobillier, B. (2004). Transformations of soil macroinvertebrate populations after native vegetation conversion to pasture cultivation (Brazilian Cerrado). *European Journal of Soil Biology*, 40(3-4), 147-154. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2005.02.002>
- Bilotta, G. S., Brazier, R. E., & Haygarth, P. M. (2007). The impact of grazing animals on the quality of soils, vegetation, and surface waters in intensively managed grasslands. *Advances in Agronomy*, 94, 237-280. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(06\)94006-1](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(06)94006-1)
- Bray, R. H., & Kurtz, L. T. (1945). Determination of total organic, and available phosphorus in soil. *Soil Science*, 59(1), 39-46.
- Bremner, J. M. (1965). Total nitrogen. In A. G. Norman (Ed.). *Methods of soil analysis. Part 2: Chemical and microbiological properties* 9.2 (pp. 1149-1178). Madison, WI, USA: Inc. Publisher.
- Brown, G. G., Moreno, A. G., Barois, I., Fragoso, C., Rojas, P., Hernández, B., & Patrón, J. C. (2004). Soil macrofauna in SE Mexican pastures and the effect of conversion from native to introduced pastures. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 103(2), 313-327. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.006>
- Cabrera-Dávila, G. C., Robaina, N., & Ponce de León, D. (2011). Composición funcional de la macrofauna edáfica en cuatro usos de la tierra en las provincias de Artemisa y Mayabeque, Cuba. *Pastos y Forrajes*, 34(3), 331- 346.
- Cabrera-Dávila, G. C., Socarrás-Rivero, A. A., Hernández-Vigoa, G., de León-Lima, D. P., Menéndez-Rivero, Y. I., & Sánchez-Rondón, J. A. (2017). Evaluación de la macrofauna como indicador del estado de salud en siete sistemas de uso de la tierra, en Cuba. *Pastos y Forrajes*, 40(2), 118-126.
- Chiappy-Jhones, C. J., Gama, L., Soto-Esparza, M., Geissert, D., & Chávez, J. (2002). Regionalización paisajística del estado de Veracruz, México. *Universidad y Ciencia*, 18(36), 87-113.
- Coleman, D. C., Crossley Jr., D. A., & Hendrix, P. F. (2004). *Fundamentals of soil ecology*. San Diego, CA, USA: Academic Press.
- Conant, R. T., Six, J., & Paustian, K. (2003). Land use effects on soil carbon fractions in the southeastern United States. I. Management-intensive versus extensive grazing. *Biology and Fertility of Soils*, 38, 386-392. <https://doi.org/10.1007/s00374-003-0652-z>
- De la Rosa, I. N., & Negrete-Yankelevich, S. (2012). Distribución espacial de la macrofauna edáfica en bosque mesófilo, bosque

- secundario y pastizal en la reserva La Cortadura, Coatepec, Veracruz, México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 83(1), 201-215.
- Decaëns, T., Jiménez, J. J., Barros, E., Chauvel, A., Blancart, E., Fragoso, C., & Lavelle, P. (2004). Soil macrofauna communities in permanent pastures derived from tropical forest or savanna. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 103(2), 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.12.005>
- Espinosa-Palomeque, O., Castillo-Campos, G., Arellano, L., Pérez-Hernández, P., & López-Ortiz, S. (2020). Floristic diversity and stocking rate in tropical dry forest secondary vegetation used for grazing. *Global Ecology and Conservation*, 23, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01088>
- Flores-Delgadillo, L., & Alcalá Martínez, J. R. (2010). Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelos. México, D. F.: UNAM.
- Gama-Castro, J., Solleiro-Rebolledo, E., Flores-Román, D., Sedov, S., Cabadas-Báez, H., & Díaz-Ortega, J. (2007). Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: el caso del Glacis de Buenavista, Morelos. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1), 133-145. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2007v59n1a11>
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México. D.F.: UNAM.
- García, Y., Ramírez, W., & Sánchez, S. (2014). Efecto de diferentes usos de la tierra en la composición y la abundancia de la macrofauna edáfica, en la provincia de Matanzas. *Pastos y Forrajes*, 37(3), 313-321.
- Gardi, C., Angelini, M., Barceló, S., Comerma, J., Cruz Gaistardo, C., Encina Rojas, A., ... Vargas, R. (2014). *Atlas de suelos de América Latina y el Caribe*. Luxembourg: Oficina de Publicaciones Oficiales de las Comunidades Europeas.
- Gibbs, H. K., Ruesch, A. S., Achard, F., Clayton, M. K., Holmgren, P., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2010). Tropical forest were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. *PNAS*, 107(38), 16732-16737. <https://doi.org/10.1073/pnas.0910275107>
- Gómez-Pompa, A., & Castillo-Campos, G. (2010). La vegetación de Veracruz. En A. Gómez-Pompa, T. Krömer, & R. Castro-Cortés (coord.). *Atlas de la flora de Veracruz: Un patrimonio natural en peligro* (pp. 57-76). Xalapa, Veracruz, México: Comisión del Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y de la Revolución Mexicana.
- Gómez-Fuentes-Galindo, T., González-Rebeles, C., López-Ortiz, S., Ku-Vera, J. C., Albor-Pinto, C. J., & Sangines-García, J. R. (2017). Dominancia, composición química-nutritiva de especies forrajeras y fitomasa potencial en una selva secundaria. *Agricultura, Sociedad y Desarrollo*, 14(4), 617-634.
- Gomiero, T. (2016). Soil degradation, land scarcity and food security: reviewing a complex challenge. *Sustainability*, 8(3), 281. <https://doi.org/10.3390/su8030281>
- Hanson, J. C., Johnson, D. M., Lichtenberg, E., & Minegishi, K. (2013). Competitiveness of management-intensive grazing dairies in the mid-Atlantic region from 1995 to 2009. *Journal Dairy Science*, 96(3), 1894-1904. <https://doi.org/10.3168/jds.2011-5234>
- Hoosbeek, M. R., Remme, R. P., & Rusch, G. M. (2018). Trees enhance soil carbon sequestration and nutrient cycling in a silvopastoral system in south-western Nicaragua. *Agroforestry Systems*, 92, 263-273. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0049-2>
- Huerta-Lwanga, E., Rodríguez-Olán, J., Evia-Castillo, I., Montejomeneses, E., De la Cruz-Mondragón, M., & García-Hernández, R. (2008). Relación entre la fertilidad del suelo y su población de macroinvertebrados. *Terra Latinoamericana*, 26(2), 171-181.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2009). *Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos*. Paso de Ovejas, Veracruz de Ignacio de la Llave. Clave geoestadística 30126. Jalapa, Veracruz, México: INEGI
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2020a). *Edafología*. INEGI México. Consultado el 08 de julio, 2020, desde <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). (2020b). *Uso de suelo y vegetación*. INEGI México. Consultado el 08 de julio, 2020, desde <http://www.inegi.org.mx/temas/usosuelo>
- León-Arteaga, R., & Aguilar-Santelises, A. (1987). Materia orgánica. En A. Aguilar-Santelises, J. D. Etchevers Barra, & J. Z. Castellanos Ramos (Eds.). *Análisis químico para evaluar la fertilidad del suelo* (pp. 85-91). Publicación especial No. 1. Texcoco, Edo. de México, México: Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A. C.
- López-Ortiz, S. (2018). ¿Qué es la ganadería sustentable? En G. Halffter, M. Cruz, & C. Huerta (Comp.). *Ganadería sustentable en el Golfo de México* (pp. 65-73). México: Instituto de Ecología, A.C.
- Magurran, A. E. (2004). An index of diversity. In A. E. Magurran (Ed.). *Measuring biological diversity* (pp. 100-130). Victoria, Australia: Blackwell Publishing.
- Magurran, A. E., & Henderson, P. A. (2011). Commonness and rarity. In A. E. Magurran, & B. J. McGill (Eds.). *Biological diversity: frontiers in measurement and assessment* (pp. 97-104). New York, NY, USA: Oxford University Press.
- Marchão, R. L., Lavelle, P., Celini, L., Balbino, L. C., Vilela, L., & Becquer, T. (2009). Soil macrofauna under integrated crop-livestock systems in a Brazilian Cerrado Ferralsol. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 44(8), 1011-1020. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2009000800033>
- Murphy, W. M., Rice, J. R., & Dugdale, D. T. (1986). Dairy farm and income effects of using Voisin grazing management of permanent pastures. *American Journal of Alternative Agriculture*, 1(4), 147-152. <https://doi.org/10.1017/S0889189300001211>
- Oldeman, L. R. (1992). Global extent of soil degradation. In *Bi-Annual Report 1991-1992/ISRIC* (pp. 19-36). Wageningen, The Netherlands: ISRIC.
- Pereira, P., Brevik, E. C., Muñoz-Rojas, M., Miller, B. A., Smetanova, A., Depellegrin, D., ... Cerdà, A. (2017). Soil mapping and processes modeling for sustainable land management. In P. Pereira, M. Muñoz-Rojas, & B. A. Miller (Eds.). *Soil mapping and process modeling for sustainable land use management* (pp. 29-60). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-805200-6.00002-5>
- Pinheiro-Machado, L. C. (2011). Leyes universales del pastoreo racional. En L. C. Pinheiro-Machado (Ed.). *Pastoreo racional Voisin: tecnología agroecológica para el tercer milenio* (pp. 63-83). Buenos Aires, Argentina: Hemisferio Sur.

- Richards, L. A. (1980). *Diagnóstico y rehabilitación de suelos salinos y sódicos*. Distrito Federal, México: Limusa.
- Rotich, H., Onwonga, R., Mbau, J., & Koech, O. (2018). Soil organic carbon content and stocks in relation to grazing management in semi-arid grassland of Kenya. *Journal Rangeland Science*, 8(4) 143- 155.
- Sanderman, J., Reseigh, J., Wurst, M., Young, M.-A., & Austin, J. (2015). Impact of rotational grazing on soil carbon in native grass-based pastures in southern Australia. *PlosOne*, 10, e0136157. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0136157>
- Sanjari, G., Ghadiri, H., Ciesiolka, C. A. A., & Yu, B. (2008). Comparing the effects of continuous and time-controlled grazing systems on soil characteristics in Southeast Queensland. *Australian Journal of Soil Research*, 46(4), 348-358. <https://doi.org/10.1071/SR07220>
- SAS Institute. (2008). *SAS/STAT 9.2 user's guide*. Cary, NC, USA: SAS Publishing.
- Seaby, R. M. H., & Henderson, P.A. (2006). *Species diversity & richness (SDR), Version 4.1*. Lymington, UK: Pisces Conservation.
- SEMARNAT (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). (2002). Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000 antes NOM-021-RECNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudio, muestreo y análisis. *Diario Oficial de la Federación*. D. F., México: SEGOB.
- Teague, W. R., Dowhower, S. L., Baker, S. A., Ansley, R. J., Kreuter, U. P., Conover, D. M., & Waggoner, J. A. (2010). Soil and herbaceous plant responses to summer patch burns under continuous and rotational grazing. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 137(1-2), 113-123. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2010.01.010>
- Teague, W. R., Dowhower, S. L., Baker, S. A., Haile, N., DeLaune, P. B., & Conover, D. M. (2011). Grazing management impacts on vegetation, soil biota and soil chemical, physical and hydrological in tall grass prairie. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 141(3-4), 310-322. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.009>
- Triplehorn, C. A., & Johnson, N. F. (2005). *Borror and delong's introduction to the study of insects*. Australia: Thompson Brooks/Cole.
- Vazquez, E., Teutschero, N., Lojka, B., Arango, J., & Pulleman, M. (2020). Pasture diversification affects soil macrofauna and soil biophysical properties in tropical (silvo)pastoral systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 302, 107083. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107083>
- Vecchio, M. C., Golluscio, R. A., Rodríguez, A. M., & Taboada, M. A. (2018). Improvement of saline-sodic grassland soils properties by rotational grazing in Argentina. *Rangeland Ecology & Management*, 71(6), 807-814. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2018.04.010>
- Villa-Herrera, A., Nava-Tablada, M. E., López-Ortiz, S., Vargas-López, S., Ortega-Jiménez, E., & Gallardo-López, F. (2009). Utilización del guácimo (*Guazuma ulmifolia* Lam.) como fuente de forraje en la ganadería bovina extensiva del trópico mexicano. *Trop. Subtrop. Agroecosystems*, 10, 253-261.
- Walkley, A., & Black, I. A. (1934). An examination of the different method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*, 37(1), 29-38. <https://doi.org/10.1097/00010694-193401000-00003>
- Wassenaar, T., Gerber, P., Verburg, P. H., Rosales, M., Ibrahim, M., & Steinfeld, H. (2007). Projecting land use changes in the Neotropics: The geography of pasture expansion into forest. *Global Environmental Change*, 17(1), 86-104. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.03.007>