



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD
INSTITUTO DE ECOLOGÍA
VULNERABILIDAD Y RESPUESTA AL CAMBIO GLOBAL

**SISTEMAS DE PRODUCCIÓN GANADERA COMO
PROVEEDORES DE SERVICIOS ECOSISTÉMICOS
EN VERACRUZ, MÉXICO**

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD

PRESENTA:
ADRIANA PATRICIA ORTEGA FERNÁNDEZ

TUTOR PRINCIPAL:
DR. JULIO CAMPO ALVES
INSTITUTO DE ECOLOGÍA

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR:
DR. FERNANDO TUDELA ABAD POSGRADO EN CIENCIAS DE LA
SOSTENIBILIDAD

DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO
INSTITUTO DE GEOGRAFÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CIUDAD DE MÉXICO, ENERO 2018



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.





Coordinación de Estudios de Posgrado
Ciencias de la Sostenibilidad
Oficio: CEP/PCS/380/17
Asunto: Asignación de Jurado

Lic. Ivonne Ramírez Wence
Directora General de Administración Escolar
Universidad Nacional Autónoma de México
Presente

Me permito informar a usted, que el Comité Académico del Programa de Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, en su vigésimo novena sesión del 10 de octubre del presente año, aprobó el jurado para la presentación del examen para obtener el grado de **MAESTRA EN CIENCIAS DE LA SOSTENIBILIDAD**, de la alumna **ORTEGA FERNÁNDEZ ADRIANA PATRICIA** con número de cuenta **308200540** con la tesis titulada "Sistemas de producción ganadera como proveedores de servicios ecosistémicos en Veracruz, México", bajo la dirección del Dr. Homero Julio Eudes Campo Alves.

PRESIDENTE:	DR. FRANCISCO AURELIO GALINDO MALDONADO
VOCAL:	DR. PABLO ALBERTO TORRES LIMA
SECRETARIO:	DR. LEOPOLDO GALICIA SARMIENTO
SUPLENTE 1:	DR. FERNANDO TUDELA ABAD
SUPLENTE 2:	DR. HOMERO JULIO EUDES CAMPO ALVES

ATENTAMENTE
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, Cd. Mx., 8 de enero de 2018.


Dra. Marisa Mazari Hiriart
Coordinadora
Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM

Agradecimientos

Agradezco al **Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad** por permitirme ser parte de la pequeña porción de personas que tienen la oportunidad de estudiar un posgrado en este país.

Agradezco al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** y a la **sociedad mexicana** por brindarme apoyo económico durante el desarrollo del proyecto.

Agradezco al **proyecto PAPIIT RV200715. Sustentabilidad pecuaria: la relación entre la prestación de servicios ecosistémicos (i.e. mitigación de cambio climático, biodiversidad, bienestar animal) y la producción ganadera en el trópico.** Por brindarme los recursos que me dieron las posibilidades de desarrollar el proyecto.

Agradezco infinitamente a los miembros de mi comité tutor por la retroalimentación que me brindaron todas las veces que lo necesité y por alentarme a confiar en mi intuición como desarrolladora del proyecto.

Dr. Julio Campo Alves

Dr. Fernando Tudela Abad

Dr. Leopoldo Galicia Sarmiento

Agradezco al **M. en C. Enrique Solís Villalpando** por el apoyo en el campo, en el laboratorio y por sus valiosos consejos de vida.

Con agradecimiento a la **Dra. Claudia Hidalgo Moreno** por su profesionalismo, compromiso y apoyo brindado durante la etapa de los análisis de laboratorio.

Por su colaboración, amabilidad y disposición; agradezco a las y a los investigadores, profesores, trabajadores y productores que me permitieron realizar el proyecto en las mejores condiciones en Veracruz.

Dra. Silvia López Ortiz (COLPOS, Veracruz)

Dr. Jesús Jarillo Rodríguez (C.E.I.E.G.T)

M. en C. Maira Lagunes Domínguez

Ing. Feliciano Ruíz León (C.B.T.a 17°)

Sr. Genaro Castro

Sr. Julián Contreras

Sr. Mario Lagunes

Sr. Antonio Díaz

Sr. David Cruz

Sr. Antonio Delgadillo

Agradezco a las personas que con el amor y la amistad que me dan, se han convertido en un elemento básico en mi vida. Gracias por su apoyo dentro y fuera del laboratorio; siempre aprendo cosas nuevas de ustedes.

Alejandra Luévano

Anaitzi Rivero

Andrea Rebollo

Daniela Figueroa

Elizabeth León

Guillermo Maldonado

Jeiner Castellanos

Raúl Peralta

Thalita Abbruzzini

Yutzil Castán

*Con todo mi amor para Lalo, Lety, Faby, Gaby y Sony;
ustedes son el mayor motivo de que yo me atreva a soñar*

Contenido

Resumen	
Introducción	
Capítulo 1. Marco general	1
1.1 Dimensión de la ganadería	2
1.1.1 Ganadería a escala global	2
1.1.2 Ganadería en el trópico	4
1.2 Servicios y Diservicios ecosistémicos ganaderos	6
1.2.1 Sistemas de producción ganadera	6
1.2.2 Servicios y Diservicios ecosistémicos del suelo	10
1.3 Ganadería en México: particularidades de Veracruz	14
1.3.1 El inicio y la evolución de la ganadería en México	14
1.3.2 Productividad ganadera, demografía y sociedad de Veracruz	15
1.3.3 Estudios previos de sistemas de producción	16
Justificación	18
Objetivos e Hipótesis	19
Capítulo 2. Métodos	20
2.1 Sitios de estudio	22
2.2 Análisis de laboratorio	26
2.3 Análisis estadístico	27
Capítulo 3. Resultados	28
3.1 Caracterización de los sistemas de producción	29
3.2 Indicadores funcionales de los sistemas de producción	37
Capítulo 4. Discusión	64
4.1 Intensificación de los sistemas productivos	65
4.2 Provisión de SE y DSE en sistemas ganaderos	67
Conclusiones	73
Perspectivas: Sistemas de producción sostenibles	74
Literatura citada	76
Anexo	82

Acrónimos

C	Carbono
CA	Carga animal
CBM	Carbono en biomasa microbiana
CG	Contenido gravimétrico
COS	Carbono orgánico del suelo
CO₂	Dióxido de carbono
DSE	Diservicio ecosistémico
H₂O	Agua
IR	Intensidad de la Rotación
MNN	Mineralización neta del nitrógeno
MO	Materia orgánica
MS	Materia seca
N	Nitrógeno
NBM	Nitrógeno en biomasa microbiana
NH₄	Amonio
Nm	Nitrógeno mineral
NN	Nitrificación neta
NO₃	Nitrato
Nt	Nitrógeno total
P	Fósforo
pH	Potencial Hidrógeno
PMA	Precipitación media anual
PO₄	Fosfato
Pt	Fósforo total
RBS	Respiración basal del suelo
SE	Servicio ecosistémico
TMA	Temperatura media anual
UA	Unidad Animal

Resumen

La intensidad con la que los sistemas de producción ganadera (bovina) son manejados tiene implicaciones en la provisión de Servicios (SE) y Diservicios (DSE) ecosistémicos a nivel del paisaje. En este estudio se determinaron indicadores funcionales del suelo para evaluar la provisión de tres SE (retención de agua, fertilidad del suelo y almacenamiento de carbono) y de dos DSE (emisiones de CO₂ y riesgo a la contaminación de cuerpos de agua por nitratos) derivados del manejo de tres sistemas de producción ganadera (monte, silvopastoril y pastura) durante la época seca y la época lluviosa en Veracruz, México. Se realizaron entrevistas semi estructuradas para caracterizar las prácticas de manejo de los sistemas de producción con el fin de tener un antecedente del uso del suelo. Se analizaron 16 indicadores funcionales del suelo en los tres sistemas; además, se incluyeron cinco bosques de referencia con la finalidad de comparar los sistemas productivos con un sistema sin perturbación. Los resultados denotaron que los sistemas con mayor intensificación estuvieron en los sitios más áridos debido a las condiciones que limitan la disponibilidad de forraje, particularmente en la época seca del año. Los tres SE evaluados no se favorecieron en los sistemas de manejo, particularmente, la provisión de SE de los silvopastoriles se vieron disminuidos por la alta intensificación y la baja precipitación. Los sistemas que propiciaron mayor emisión de CO₂ fueron las pasturas, consecuente a la mayor actividad metabólica y al sistema radicular superficial de los pastos. Finalmente, las pasturas no denotaron tener un claro riesgo a la contaminación de cuerpos de agua debido a su bajo contenido de NO₃ por ser sistemas con baja intensificación.

Palabras clave: *intensificación, precipitación, monte, silvopastoril y pastura.*

Introducción

La producción ganadera es el mayor usuario de tierras agrícolas (78%) y tierras de cultivo (33%) del planeta (Steinfeld & Wassenaar, 2007). En la actualidad la producción ganadera abarca más de 3.9 mil millones de hectáreas, lo que equivale al 30% de la superficie terrestre del planeta libre de hielo. En el futuro próximo la situación del sector ganadero será crítica debido al aumento de la demanda de alimentos impulsada por 2 300 millones de personas más para el año 2050, por el aumento de la urbanización y por mayores ingresos per cápita previstos (Tilman et al., 2011). Se prevé que la producción mundial de carne y de leche se dupliquen, pasarán de 229 a 465 millones de toneladas de carne, y de 580 a 1,043 millones de toneladas de leche en 2050 (Steinfeld et al., 2009).

El rápido crecimiento de la producción ganadera en el trópico ha incrementado una serie de problemas como la deforestación, la degradación del suelo, la escasez de agua y la baja productividad (Steinfeld et al., 2009; Villa-Herrera et al., 2009). En la región tropical predomina la producción ganadera extensiva de pasturas, la cual tienen un potencial extraordinario para producir biomasa; sin embargo, los pastos tienen bajo contenido de proteína como alimento para el ganado y su disponibilidad en la temporada seca no garantiza niveles estables en la producción ni en la reproducción animal (Solorio-Sánchez et al., 2009; Steinfeld et al., 2009; Herrero et al., 2013).

La degradación de los suelos es un problema mundial del siglo XXI y tiene especial gravedad en los trópicos debido a que cerca del 30% de los suelos sufren algún tipo de deterioro (State of the Tropics, 2014; Lal, 2015). La ganadería asume gran responsabilidad en este problema ya que influye en los componentes y en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo, que a su vez, agravan la susceptibilidad a la compactación, a la reducción de la infiltración de agua, a la acidificación y al agotamiento de nutrientes en el suelo. La ganadería también contribuye con el aumento de las emisiones de GEI provenientes del suelo y con la contaminación de cuerpos de agua por eutrofización. Estas perturbaciones suponen la pérdida de los servicios ecosistémicos que brinda el suelo en cualquiera de sus categorías (ej. provisión, regulación, soporte y cultural) (MEA, 2005; Dominati et al., 2010; Lal, 2015; Bernués et al., 2016).

El reto para la ganadería tropical es ser competitiva y eficiente mediante sistemas de producción que generen mayor productividad por unidad de área (Bacab et al., 2013). Los sistemas agroforestales han asumido un papel importante en el diseño de sistemas altamente productivos y armónicos con el ambiente. Los sistemas agroforestales tienen una conversión alimentaria es más eficiente que la de las pasturas; producen mayor cantidad de forraje para el ganado, incluso en temporada seca; tienen un balance positivo de emisiones de C y su composición arbórea y arbustiva favorece la fertilidad del suelo (Mahecha, 2002; Solorio-Sánchez et al., 2009; Bacab et al., 2013; Broom et al., 2013; Murgueitio et al., 2013; 2014).

El conocimiento de los distintos sistemas de producción ganadera utilizados en el trópico es una herramienta útil para la comprensión de los efectos que las prácticas de manejo tienen sobre los servicios ecosistémicos del suelo. Reconocer los componentes y las prácticas de los sistemas de producción que benefician la provisión de servicios ecosistémicos y que reducen los impactos negativos al ecosistema es fundamental para transitar a una producción sostenible. Por lo anterior, el objetivo general de este proyecto es evaluar la contribución de los SE y DSE que proveen los suelos de tres diferentes sistemas de producción ganadera en el estado de Veracruz.

Capítulo 1. Marco General



1.1 Dimensión de la ganadería

1.1.1 Ganadería a escala Global

El sector ganadero es el mayor sistema de uso de tierra del planeta, ocupa el 30% de la superficie libre de hielo del mundo y utiliza a 20 mil millones de animales como ganado, lo que representa cerca del 20% del total de la biomasa animal terrestre. En el mundo se producen anualmente 229 millones de toneladas de carne y 580 millones de toneladas de leche, estos alimentos generan ingresos a más de 1 300 millones de personas y proveen una fuente de alimento para al menos 800 millones de personas con inseguridad alimentaria. El sector ganadero contribuye con el 40% del PIB agrícola mundial. (Steinfeld et al., 2009; Opio et al., 2013; Herrero et al., 2013).

La actividad ganadera tiene múltiples papeles en la sociedad, el ganado funciona como instrumento financiero que proporciona un medio de diversificación del ingreso a los productores con la venta de leche, huevos, lana y pieles; también es considerado como un almacén del ahorro que puede ser vendido en tiempos de dificultad económica. El ganado proporciona fuerza de trabajo en los sistemas de producción con la tracción animal, y aporta nutrientes al suelo en forma de estiércol y urea. El tamaño de la explotación ganadera de un hogar confiere importancia social, en algunas culturas el ganado es utilizado como un medio para crear o fortalecer relaciones sociales a través de su uso como dote o préstamo (Thornton, 2010).

La estrecha interacción que tiene la ganadería con el medio ambiente puede ser entendida por los modos de la producción del ganado (Steinfeld et al., 2009). La demanda de tierras para la producción de pasturas y cultivos forrajeros modifican y reducen los hábitats naturales, en consecuencia, se exagera la compactación del suelo debido al sobrepastoreo y la eutrofización de cuerpos de agua debido al exceso de fertilizantes (Godfray & Garnett, 2014; Machovina et al., 2015). El sector ganadero aporta al cambio climático el 14% de los GEI de origen antropogénico. El CH₄ proveniente de la fermentación entérica de los rumiantes es la mayor fuente de emisiones (36%); seguida del N₂O asociado a la producción de piensos (27%), el CO₂ liberado por el cambio de uso del suelo (21%) y en menor medida el CH₄ y N₂O proveniente del manejo del estiércol y del uso de fertilizantes (12%) (Herrero et al., 2013; 2016) (**Cuadro 1**).

El futuro próximo del sector ganadero será crítico debido al aumento de la demanda de alimentos, el crecimiento poblacional, la urbanización y mayores ingresos per cápita previstos motivarán el consumo de alimentos de origen animal. Se prevé que la producción mundial de carne y de leche se incremente en más del doble, pasará de 229 a 465 millones de toneladas de carne, y de 580 a 1 043 millones de toneladas de leche para el año 2050 (Steinfeld et al., 2009). Los principales problemas a los que se enfrentará el aumento de la producción será a la reducción de los rendimientos de las pasturas y de los cultivos forrajeros debido a la degradación del suelo (Steinfeld et al., 2009; Tilman et al., 2011).

La ganadería tiene numerosas dualidades, por un lado provee una fuente de alimento para personas con inseguridad alimentaria, aporta valiosos nutrientes para la productividad de los cultivos y genera empleos a millones de personas en el mundo; sin embargo, es responsable de la pérdida de hábitats naturales, de la emisión de grandes cantidades de GEI y de la degradación del suelo. Ante el crecimiento de la demanda mundial de alimentos es necesario incrementar la producción y al mismo tiempo mejorar el desempeño ambiental en la ganadería (Tilman et al., 2011; FAO, 2013).

Cuadro 1. Emisiones de GEI anuales a escala global provenientes del sector ganadero (año 1995 y 2005).

Fuente de emisión	Gt de CO ₂ eq año ⁻¹	%
CH ₄ entérico	2.7	36
CH ₄ manejo del estiércol	0.25	3.3
N ₂ O manejo del estiércol	0.21	2.8
N ₂ O aplicación estiércol al suelo	0.49	6.5
N ₂ O producción de piensos	2	26.6
CO ₂ uso y cambio de uso de suelo	1.6	21.3
Total	7.3	~100

Fuente: Herrero et al., 2013; 2016

1.1.2 Ganadería en el Trópico

La región tropical es la más extensa del mundo con el 40% de la superficie de la Tierra (109 países), en su gran mayoría las naciones tropicales tiene los ingresos más bajos del planeta (PIB per cápita 4 036 dólares o menos) (State of the tropics, 2014; World Bank, 2017) (**Figura 1**). En el trópico habita el 40% de la población mundial (2 900 millones de personas), y es donde vive más del 66% de las personas en pobreza y cerca del 98% de las personas con desnutrición en el mundo. La tasa promedio de crecimiento poblacional en los trópicos es mayor que en el resto del mundo (2.2% y 1.4% anual, respectivamente). Las proyecciones estiman que para el año 2050 más del 50% de la población mundial vivirá en el trópico (State of the tropics, 2014; FAO, IFAD & WFP, 2015).

Actualmente, la ganadería es uno de los subsectores económicos de más rápido crecimiento en el trópico (Steinfeld et al., 2009; Thornton et al., 2010; Herrero et al., 2016). Los sistemas de producción animal de pastoreo extensivo predominan en la región tropical, los cuales se caracterizan por sus bajos rendimientos debido a la composición fibrosa de los pastos, a la poca o nula fertilización inorgánica y a la baja tecnificación (Bernues, 1999; Steinfeld et al., 2009). El modo de producción extensivo influye en la degradación de los suelos al fomentar el sobrepastoreo, la fertilización inadecuada y la quema de biomasa, estas prácticas reducen las reservas de nutrientes disponibles en el suelo (IPCC, 2014; Vendramini et al., 2014; Nesper et al., 2015). Cerca del 33% de los suelos tropicales sufren algún tipo de degradación que limita la productividad, aunado a que en gran parte del trópico la marcada estacionalidad de las lluvias disminuye la disponibilidad de pastos en la época seca del año (Villa-Herrera et al., 2009; Bacab et al., 2013).

Existen oportunidades para aumentar la productividad ganadera en los países tropicales (Thornton, 2010). Las acciones que ayuden a hacer más eficientes a los sistemas de producción podrían ayudar a producir más alimento con los cultivos y el ganado actual. El aumento de la productividad en los sistemas existentes puede modificar la dinámica del uso de la tierra, al determinar los requerimientos de tierras adicionales para pasturas o de tierras naturales en recuperación (Godfray et al., 2010; Havlík et al., 2013). El escenario más responsable para el sector ganadero es que más alimentos tendrán que producirse a partir de la misma cantidad de tierra (o menos); con el compromiso de producir en un paisaje más complejo que incluya menos impactos al medio ambiente, el bienestar animal y la justicia social (Godfray et al., 2010).

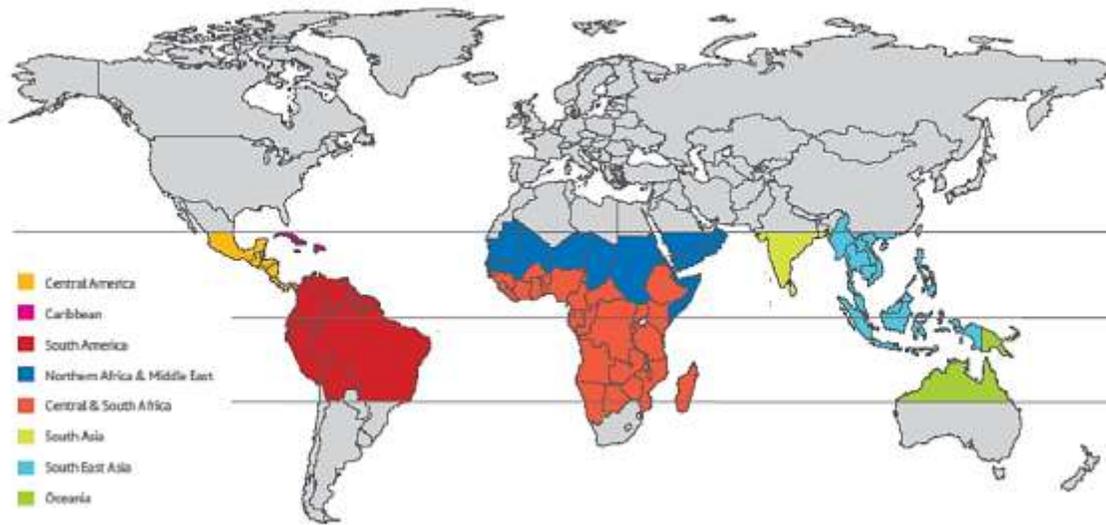


Figura 1. Ubicación y distinción de los países de la región tropical (State of the tropics, 2014).

1.2 Servicios y Diservicios ecosistémicos ganaderos

1.2.1 Sistemas de producción ganadera

Los impactos que ejerce la ganadería en el ambiente dependen de la manera en que se realiza la producción, directamente a través del pastoreo o indirectamente a través del comercio de forraje y cereales (Tilman et al., 2011; Herrero et al., 2013). Los sistemas de producción de rumiantes están conformados por ganado de tipo vacuno, ovino, caprino y búfalo; estos animales consumen el 85% de todo el alimento para ganado que se produce en el mundo (Wirsenius et al., 2010; Herrero et al., 2013; Opio et al., 2013). El ganado vacuno (vacas, bueyes y toros) es especialmente el menos eficiente en la conversión de alimento a productos consumibles, y por lo tanto, el más demandante de recursos (Rask & Rask, 2011; Broom et al., 2013).

En general existen dos tipos de sistemas de producción ganadera, el sistema extensivo que implica el despeje de tierras en las cuales se cultiva una o un número pequeño de herbáceas como forraje y el sistema intensivo que implica la alimentación del ganado con cereales en parcelas de engorde y la utilización de tecnologías (Stenfield et al., 2009; Pereira et al., 2011; Broom et al., 2013). El tipo y la calidad nutricional del alimento para el ganado varía sustancialmente entre sistemas de producción y puede clasificarse en: (1) forrajes fibrosos, pasturas y residuos de cultivos; (2) alimentos concentrados, granos y semillas oleaginosas; (3) residuos domésticos y subproductos agroindustriales (Steinfeld et al., 2009; Wirsenius et al., 2010).

El uso y el manejo de los componentes de un sistema de producción define la intensidad y el alcance que puede tener la producción. La intensificación en un sistema productivo puede ser alcanzada con inversiones en la infraestructura, en el desarrollo del comercio, en avances tecnológicos o en el uso de insumos; especialmente, con irrigación, fertilizantes y/o pesticidas que lleven al incremento de la productividad (Thornton et al., 2010; Herrero et al., 2016). A continuación se describen las particularidades de tres diferentes sistemas de producción que tienen diferentes grados de intensificación:

- **Sistema de Pasturas**

El sistema de producción extensivo de pasturas ocupa el 26% de la superficie total del planeta. Los pastos y los residuos de cultivos son el recurso clave para la alimentación en estos sistemas de los que depende el 56% de los rumiantes en el mundo (Steinfeld et al., 2009; Herrero et al., 2010; 2013). El sistema de pasturas implica el despeje de tierras en las cuales se cultiva una o un número pequeño

de herbáceas exóticas como forraje para el ganado; este sistema utiliza bajos niveles de tecnología y de infraestructura, y poca o nula fertilización inorgánica (**Figura 2**) (Bernues, 1999; Steinfeld et al., 2009; Broom et al., 2013).

El uso de pastos naturales e inducidos tiene un gran potencial para producir biomasa vegetal; sin embargo, los pastos tienen bajo contenido proteico y son de baja digestibilidad (Solorio-Sánchez et al., 2009). La producción en los sistemas de pasturas es modesta debido a la poca utilización de piensos y a la reducida calidad de los pastos que afecta a la ganancia de peso del ganado (Herrero et al., 2013; Rivera et al., 2016). Además, las pasturas son sistemas dependientes principalmente del régimen de precipitación; las fluctuaciones en la precipitación disminuyen la disponibilidad de los pastos en la temporada seca del año o en periodos más largos de sequía, esta situación no garantiza la estabilidad en la producción ni en la reproducción animal (Gregory et al., 2005; Solorio-Sánchez et al., 2009; Tilman et al., 2011). Ante la disminución de pastos es más probable el sobrepastoreo del ganado, y en consecuencia la compactación y degradación del suelo (Murgueitio et al., 2014).

- **Sistema Silvopastoril**

Los sistemas silvopastoriles se basan en la siembra de pastos en combinación con arbustos y árboles multipropósito bajo un modelo de pastoreo rotacional (periodos cortos de pastoreo con periodos largos de descanso), este sistema produce más forraje para el ganado y tiene una conversión alimentaria más eficiente por unidad de área que los sistemas de pasturas (**Figura 2**) (Mahecha, 2002; Bacab et al., 2013; Broom et al., 2013). Los silvopastoriles surgen como una alternativa ante el reto que enfrenta la ganadería de ser más eficiente y más armónica con el ambiente por medio de sistemas de producción con una composición más compleja (Mahecha, 2002; Bacab et al., 2013).

Diferentes estudios le atribuyen beneficios productivos y ambientales a los sistemas silvopastoriles (Solorio-Sánchez et al., 2009; Thornton, 2010; Bacab et al., 2013; Murgueitio et al., 2013; 2014). El aumento en la cantidad y en la calidad del forraje se refleja en una mayor producción y calidad de leche y de carne; además, debido a la mejor calidad del forraje las emisiones de CH₄ entéricas disminuyen. Los sistemas silvopastoriles permiten una mayor carga animal en la parcela por el aumento de la cantidad de forraje, que a su vez contribuye al bienestar animal con la reducción del sobrecalentamiento y la inanición del ganado cuando la cantidad de forraje es limitada (Mahecha, 2002; Broom et al., 2013).

Los silvopastoriles generan un balance positivo de emisiones de C que se almacena en la vegetación y en el suelo protegido de la erosión, también se generan ahorros en fertilizantes debido a una mayor fijación de N en el suelo. La incorporación de árboles y arbustos en los silvopastoriles permite mantener una estructura adecuada del suelo por el sistema radicular extendido y profundo; además, la disponibilidad de nutrientes en el suelo se favorece por un mayor contenido de MO y de humedad que permite la vegetación (Mahecha, 2002; Bacab et al., 2013).

Por sus variados beneficios los sistemas silvopastoriles se perciben como una herramienta de mitigación y adaptación a la fluctuación de la precipitación, además ayudan a disminuir la vulnerabilidad económica de los productores en la temporada seca (Murgueitio et al., 2014). Uno de los problemas de la adopción de los silvopastoriles es la limitada comunicación académica y gubernamental con los productores; la mayoría no considera o desconoce los beneficios que los sistemas silvopastoriles pueden brindar. La divulgación y la implementación de los silvopastoriles también se dificulta debido a que el cambio de un sistema tradicional más seguro y experimentado como las pasturas a un nuevo sistema requiere de un mayor esfuerzo de inversión (Bacab et al., 2013).

- **Sistema Monte**

El sistema monte (también conocido como “Acahual”) se refiere a las parcelas donde anteriormente se realizaba una actividad agrícola o pecuaria, y que actualmente se encuentra en estadio de sucesión. Generalmente la vegetación de este sistema está dominada por arbustos, pero pueden incluir hierbas y árboles que se establecen como resultado de perturbaciones como la práctica de roza-tumba-quema (**Figura 2**) (Labrière et al., 2015). Existe poca información sobre la dimensión, el manejo y la producción de los sistemas monte, debido a que en general la intensificación es nula, es decir, no hay utilización de insumos, no está establecido un periodo de rotación ni de carga animal. Algunos productores consideran que los sistemas monte son áreas carecen de valor productivo, sin embargo, otros productores tienen la percepción de que el monte es un importante recurso forrajero que puede complementar la alimentación de los animales en la estación seca, así como ser fuente de productos maderables para los productores (Sosa et al., 2006).

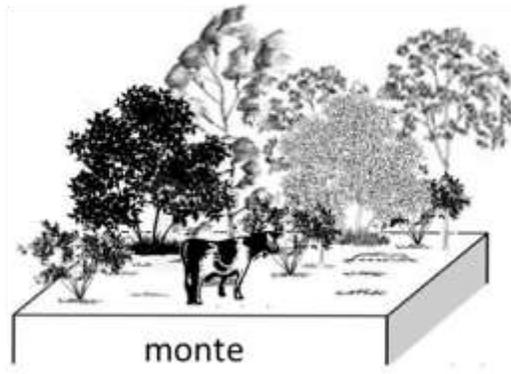
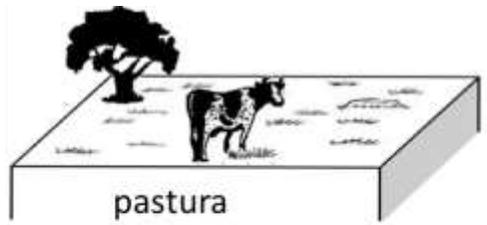


Figura 2. Esquema de los sistemas de producción pastura, silvopastoril y monte
(Elaboración propia para este documento).

1.2.2 Servicios y Diservicios ecosistémicos del suelo

El aumento de la productividad para cubrir las necesidades humanas se ha obtenido gracias a la administración de los servicios que brindan los ecosistemas agrícolas; principalmente, para optimizar el suministro de alimentos, fibra y combustible (MEA, 2005; Poppy et al., 2014). La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio (MEA por sus siglas en inglés) abordó la idea de "los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas" en un marco de *servicios ecosistémicos*; los clasificó como *servicios de provisión* (ej. alimentos, fibra, cosecha de caza), *servicios de regulación* (ej. control de las inundaciones y la sequía), *servicios de soporte* (ej. productividad primaria neta, almacén de carbono, formación del suelo) y *servicios culturales* (ej. religión, identidad)(MEA, 2005). Cuando existe un cambio adverso que conduce a la pérdida de un SE emerge la idea de los *dis servicios ecosistémicos* como una forma de conceptualizar los impactos ecológicos dañinos y la precepción negativa para el bienestar humano (Dominati et al., 2010; Swain et al., 2013; Ango et al., 2014). Cuando se opera en la dualidad de SE y DSE, el marco se convierte en una herramienta más robusta para la investigación de los impactos positivos y negativos que generan los diferentes usos de la tierra (Ango et al., 2014).

La actividad ganadera es considerada una perturbación de gran extensión en los ecosistemas; particularmente, causa cambios en la estructura física, química y biológica del suelo (Hernández, 2001). El uso de la tierra (ej. cultivo, ganado) determina el tipo de perturbación (ej. labranza, pastoreo) y los insumos (ej. excrementos, fertilizantes) que influyen en la dinámica del suelo (Dominati et al., 2010). A diferencia de un ecosistema natural, en un sistema de ganadería convencional los *insumos* añaden nutrientes al suelo; los insumos incluyen fertilizantes, excretas y orina, alimento para el ganado; de forma natural, la entrada de N mediante la fijación biológica y la deposición de nutrientes. Los *almacenes* que retiene el sistema se conforman por el N en leguminosas, las excretas y orina, la materia orgánica y la biomasa microbiana del suelo. Los nutrientes del suelo son exportados del sistema a través de *productos* en cultivos cosechados, productos animales, así como por procesos naturales de lixiviación, volatilización y erosión (Gruhn et al., 2000) (**Figura 3**).

El flujo de nutrientes dentro del sistema esta mediado por procesos de transformación (mineralización e inmovilización), los cuales establecen la disponibilidad de nutrientes para la utilización de las plantas o para el almacenamiento en el suelo. La mineralización y la inmovilización están regidos principalmente por la precipitación y la temperatura; sin embargo, las prácticas de

manejo como la intensidad del pastoreo y la carga animal pueden acelerar estos procesos (Lal, 2015). Cuando los insumos son mayores que los productos existe un balance positivo de nutrientes en el suelo, esto podría indicar que el sistema es ineficiente en la utilización de los nutrientes y que puede estar contaminando el ambiente. Un balance negativo puede indicar que los nutrientes necesitan ser reabastecidos para mantener la producción y la fertilidad del suelo (Gruhn et al., 2000).

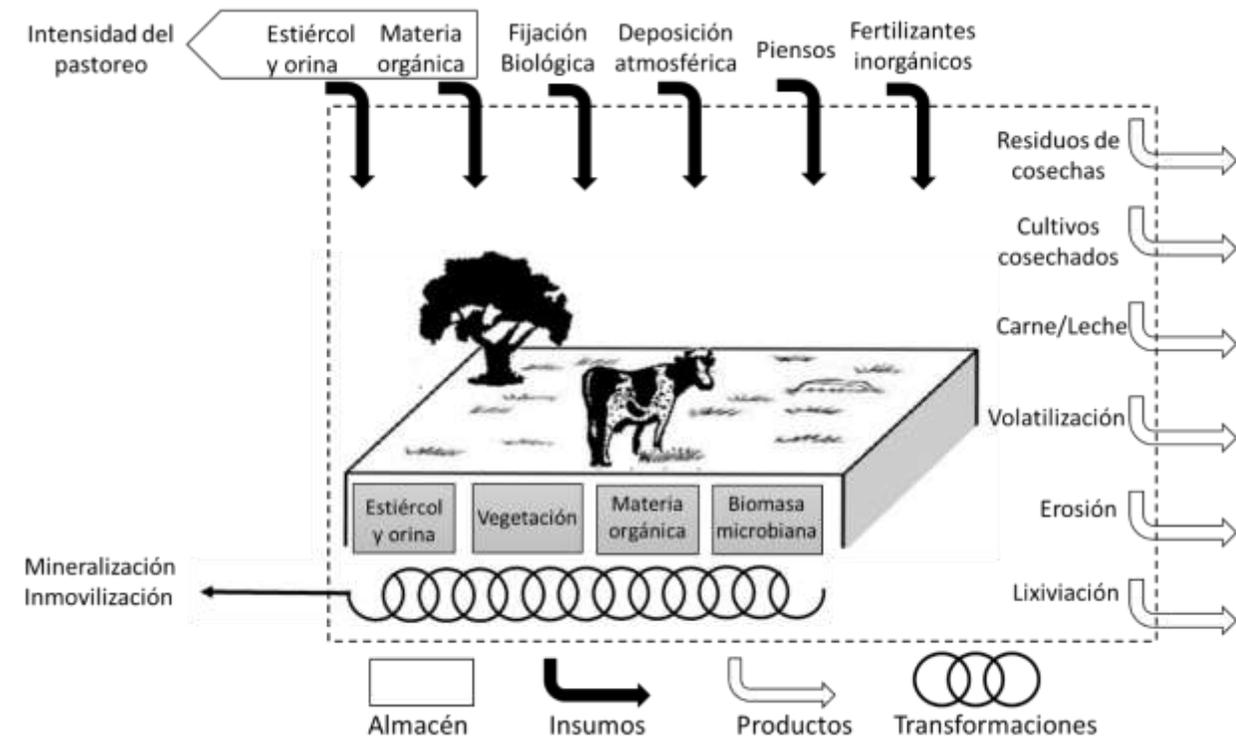


Figura 3. Esquemización de los insumos, los productos, los almacenes y las transformaciones que existen en un sistema de producción ganadera (Elaboración propia para este documento).

Los sistemas ganaderos contribuyen y se benefician de la provisión de SE, la fertilidad del suelo es quizás la propiedad más importante para determinar el potencial productivo en un sistema. La fertilidad corresponde a la interacción de las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo que permiten la disponibilidad de nutrientes para el desarrollo de las plantas. La reducción de los atributos estructurales del suelo debido a la deforestación y al pastoreo agrava la susceptibilidad a la compactación al disminuir el espacio entre las partículas y al aumentar la densidad del suelo. El

espacio disminuido entre las partículas influye directamente en la reducción del flujo de gases, de la infiltración de agua y del espacio para el crecimiento de raíces; en consecuencia, los procesos biológicos se ven limitados y con ello la disponibilidad de nutrientes en el suelo (Pagiola et al., 2007; Dominati et al., 2010; Dikshita & BIRTHAL, 2013; Poppy et al., 2014).

La infiltración de agua y la retención de humedad en el suelo están determinadas por la estructura de las partículas del suelo y por la composición de la vegetación. En pasturas la retención de la humedad es más vulnerable debido a la susceptibilidad del suelo a la compactación que disminuye las entradas de agua entre los poros del suelo; la vegetación disminuida reduce las entradas de materia orgánica al suelo y afecta la estabilidad de los agregados que controlan la compactación. La densidad de la vegetación y un sistema radicular grueso y profundo permiten limitar la compactación del suelo; además mantiene un microclima que evita la evaporación total del agua y que favorece la actividad de la biota del suelo (Dominati et al., 2010; Bell et al., 2011).

En la pérdida de fertilidad del suelo influyen distintos factores como el tipo de suelo, la topografía del paisaje, la vegetación, el clima, el tiempo y el uso de la tierra. La ganadería altera el estado nutricional del suelo en los sistemas de producción extensivos, al eliminar grandes cantidades de nutrientes del sistema con el transporte de productos (cultivos, leche, carne) fuera del sistema y al acelerar la descomposición de la materia orgánica. La intensidad, la frecuencia y la duración del pastoreo modifica la tasa de transformación de los nutrientes a la vez que el ganado excreta la materia vegetal procesada por la digestión; asimismo, el constante pisoteo de los animales altera los fragmentos de los residuos vegetales y favorece su descomposición (Dominati et al., 2010; Lal, 2015).

La ganadería contribuye con la eutrofización de cuerpos de agua debido al efluente de estiércol y el exceso de fertilizantes que contaminan las vías fluviales. La disminución de la fertilidad del suelo impulsa a los productores a recurrir a recursos como la utilización de fertilizantes. En suelo con una estructura alterada y raíces superficiales existe mayor probabilidad de contaminación de cuerpos de agua por la aplicación excesiva de fertilizantes. Un suelo sin compactación y con un sistema radicular profundo y denso disminuirá la lixiviación de NO_3 al retenerlo y utilizarlo en la producción vegetal (Godfray & Garnett, 2014; Machovina et al., 2015). En consecuencia al aumento de ganado para

satisfacer la demanda de alimentos, la competencia por el agua se verá exacerbada por el agotamiento y la contaminación de los acuíferos, incluidos varios de los cuales dependen grandes regiones agrícolas (Thornton, 2010; Godfray & Garnett, 2014).

Los sistemas de producción aportan al cambio climático el 14% de los GEI de origen antropogénico; el CH₄ de la fermentación entérica de los rumiantes, el N₂O de la producción de piensos y el CO₂ liberado por el cambio de uso del suelo son responsables del aumento de la temperatura en el planeta (Herrero et al., 2013; 2016). El cambio climático trae consigo variaciones en el clima, sequías prolongadas e inundaciones extremas que modificarán la dinámica de los nutrientes en el suelo por medio de la erosión eólica, hídrica y del aumento emisiones de GEI. El agotamiento de la reserva de carbono orgánico en el suelo derivado la pérdida de cobertura forestal y la alta densidad de ganado que acelera la descomposición de la materia orgánica en forma de emisiones de CO₂, reduce la capacidad del suelo de comportarse como un sumidero de carbono (MEA, 2005; Dominati et al., 2010; Lal, 2015; Bernués et al., 2016).

Con el despeje de más tierras y la producción de más ganado para cubrir la demanda de alimentos se pronostican mayores impactos al medio ambiente y menores rendimientos de los cultivos. Intensificar los sistemas de producción en un esquema más amigable y donde las tendencias de la disminución de SE puedan revertirse es posible. La adopción de prácticas de manejo del suelo que minimicen la erosión, mejoren la estabilidad estructural, establezcan presupuestos positivos de nutrientes para mejorar la actividad y la diversidad de la biota, y disminuyan las emisiones de GEI con sistemas de producción que integren un estrato arbóreo y arbustivo disminuirán los impactos que la producción de alimentos de origen animal genera (Lal, 2015).

1.3 Ganadería en México: particularidades de Veracruz

1.3.1 El inicio y la evolución de la ganadería en México

La historia social y ambiental de México ha tenido profundos cambios con el arribo de nuevos mamíferos como ganado (vacas, caballos, cerdos, asnos, mulas, cabras y borregos) durante el periodo de colonización española (Saucedo, 1984; Barrera-Bassols, 1996). La actividad ganadera en la Nueva España no existía debido a que anterior a este periodo los indígenas no practicaban la domesticación de los animales (Saucedo, 1984). Fue al actual estado de Veracruz alrededor del año 1524 donde arribaron las primeras 100 reses, y poco después entre el periodo de 1538 y 1570, la región veracruzana y la huasteca potosina fueron las primeras protoregiones donde se situó el crecimiento ganadero más acelerado de la Nueva España (Saucedo, 1984; García, 1994; Barrera-Bassols, 1996; Chevalier, 1976).

El crecimiento de los bovinos transformó las formas de uso de suelo y las actividades productivas en la Nueva España. La ganadería simplificó la producción agrosilvícola tradicional indígena a formas de agostadero bajo una ganadería transhumante (desplazamiento periódico del ganado para aprovechar los pastos estacionales) (Nori & Davies, 2007). La agricultura se revolucionó al utilizar excretas de ganado como fertilizante, además, la circulación del ganado entre las milpas en los tiempos de barbecho integró la práctica agrícola con la pecuaria (Barrera-Bassols, 1996). La flora mexicana se africanizó con el arribo de pastos y otras gramíneas exóticas para ser utilizadas como forraje, las especies más simbólicas fueron *Chloris gayana* Kunth, *Cynodon plectostachyus* (K.Schum.) Pilg., *Pennisetum clandestinum* Hochst. Ex Chiov., *Digitaria decumbens* Stent., *Pennisetum purpureum* Schumacher y *Rhynchelytrum repens* (Willd.) C. E. Hubb. (Barrera-Bassols, 1996).

La ganadería hasta antes de la revolución mexicana (antes de 1910) prosperó como consecuencia de la abundancia de los recursos naturales, estaba basada en producción extensiva sin control de la natalidad, morbilidad o mortalidad del ganado. No había selección de razas, ni conocimiento del tamaño del hato, tampoco había vigilancia ni control sanitario (Saucedo, 1984). En el periodo post-revolucionario (después de 1910) se integró capital nacional para financiar la actividad económica de México; gracias a lo cual el campesino pasó a ser pequeño propietario con oportunidad a recibir préstamos (Saucedo, 1984). Actualmente México ocupa la 8° lugar en la producción mundial de carne de bovino a nivel mundial con una participación del 3.1%; cuenta con 830 127 unidades de

producción con ganado bovino, una población de 30.5 millones de cabezas y una producción anual de 1 879 318 toneladas de carne y 11 607 493 litros de leche (FIRA, 2017; SIAP-SAGARPA, 2017).

1.3.2 Productividad ganadera, demografía y sociedad de Veracruz

En Veracruz se propicia el desarrollo de una variedad de actividades productivas gracias a su ubicación geográfica y a la diversidad climática del estado (INEGI, 2014). La ganadería en Veracruz ocupa el 1° lugar nacional en la producción de carne de bovino con el 13.5% de aportación; es el 6° lugar nacional en la producción de leche de bovino al aportar el 6% (SIAP-SAGARPA, 2017). El 3.7% de la superficie del país pertenece al estado de Veracruz, de este porcentaje, las actividades agropecuarias ocupan el 82% de la superficie; específicamente, la siembra de pastizales dedicados a la ganadería bovina ocupa el 46% de la superficie (INEGI, 2016) (**Cuadro 2**).

Veracruz ocupa el 3° lugar nacional en densidad de población con el 6.8% de la población mexicana, de la cual, el 51.8% son mujeres y el 48.2% son hombres. Gran parte de la población es urbana (61%); sin embargo, la población rural es de importancia (39%) (INEGI, 2015). El 21.8% de las unidades de producción con ganado bovino de todo el país están en Veracruz; gran parte de estas unidades (97.7%) dependen de medianos y pequeños productores (promedio de 17 ha), mientras que un pequeño porcentaje pertenece a grandes productores (promedio 65 ha) (**Cuadro 2**) (INEGI, 2015; 2016). La información anterior sugiere que un gran número de empleos dependen de la actividad ganadera, sin mencionar los numerosos empleos por jornales que se desarrollan dentro cada unidad.

La población veracruzana ocupa el 4° lugar nacional en situación de pobreza, es decir, el 62% de la población presenta una de las seis carencias sociales (rezago educativo, acceso a los servicios de salud, acceso a la seguridad social, calidad y espacios de la vivienda, acceso a servicios básicos en la vivienda y de acceso a la alimentación) y no tiene un ingreso suficiente para satisfacer sus necesidades (CONEVAL, 2016). La falta de oportunidades y la distribución desigual del progreso en la estructura productiva se refleja en un índice de marginación ALTO (1.14) que genera la exclusión del bienestar, del fortalecimiento de capacidades, y de la generación de recursos económicos (CONAPO, 2015).

Cuadro 2. Distribución de la superficie por tipo y cantidad de unidades de producción del estado de Veracruz.

	Superficie (ha)	Porcentaje (%)	Población	Porcentaje (%)
México	195 924 800	100	119 530 753	100
Veracruz	7 182 000	3.7	8 112 505	6.8
	Unidades de producción	Porcentaje (%)	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Veracruz	890 207	100	6 869 027	95.6
Forestal	19 619	2.2	100 114	1.4
Agricultura	559 017	62.8	2 243 325	31.2
Ganadería	213 587	24.0	3 686 328	51.3
Uso Agropecuario	772 604	86.8	5 929 653	82.5
Ganadería Bovina				
Nacional	830 127	100	48 067 426	24.5
Veracruz	180 694	21.8	3 274 059	45.6
Grandes productores	4 234	2.3	274 085	3.8
Medianos y Pequeños productores	176 460	97.7	2 999 974	41.7

Fuente: Elaboración propia con datos de INEGI, 2016; SIAP-SAGARPA, 2017.

1.3.3 Estudios previos de sistemas de producción

Estudios realizados por Mahecha (2002), Villa-Herrera et al. (2009) y Pereira et al. (2011) caracterizaron los sistemas de producción bovina en Veracruz. Los sistemas extensivos de pastura en Veracruz son los más comunes, seguidos de los sistemas intensivos y los silvopastoriles en menor medida; la mayoría de los sistemas son para la producción de leche y carne (doble propósito). La superficie media por potrero es de 5.4 ha con 7 animales en promedio por productor. Existe la rotación de los animales según la disponibilidad estacional de pastos en temporada seca y cuando quedan residuos de cosecha. Los productores que se dedican a la ganadería poseen conocimiento tradicional sobre especies leñosas locales, las cuales utilizan durante la temporada seca como suplemento alimenticio para los animales.

Rivera y colaboradores (2016) estimaron y compararon el impacto ambiental de los sistemas extensivos e intensivos en Veracruz. El mayor impacto que tienen los sistemas extensivos se debe al tiempo prolongado de estadía del ganado para su crecimiento; los sistemas intensivos impactaron el ambiente por a la utilización del uso de combustibles fósiles para la operación de maquinaria,

tuvieron repercusiones en la acidificación del suelo y en la eutrofización de cuerpos de agua debido al mayor uso de fertilizantes. Complementario al estudio anterior, Bacab y colaboradores (2013) compararon el rendimiento de un sistema extensivo de pastura respecto a uno intensivo silvopastoril. Concluyeron que en el sistema silvopastoril tuvo la mayor producción de forraje con $90 \text{ t ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, lo que pudo sostener una mayor CA (2.5 UA:ha) y una mayor producción cárnica (680 kg ha^{-1}). El sistema de pastura produjo $55 \text{ t de forraje ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, sostuvo una CA de 1.3 UA:ha y produjo 180 kg ha^{-1} de carne.

Un estudio más concreto de da Silva y colaboradores (2014) evaluó los efectos de diferentes intensidades de pastoreo en la entrada de C en el suelo. Concluyó que un pastoreo intenso disminuye el contenido de C en el suelo, y con ello la cantidad de pastura del sistema. Devi y colaboradores (2014) evaluaron el contenido de C, N y P en la biomasa microbiana del suelo de pasturas con diferentes niveles de pastoreo. Concluyeron que el pastoreo moderado permite mayor contenido de nutrientes en el suelo, seguido por el sistema sin pastoreo y el pastoreo intenso. Mosquera y colaboradores (2012) compararon el contenido de COS en diferentes usos de la tierra; concluyeron que el bosque sin perturbación tuvo el contenido de COS más bajo ($20.92 \text{ mg}^{-1} \text{ g}^{-1}$), seguido de la pastura ($24.96 \text{ mg}^{-1} \text{ g}^{-1}$) y el silvopastoril ($30.52 \text{ mg}^{-1} \text{ g}^{-1}$). Mahecha (2002) también comparó el contenido de nutrientes (C, N y P) en el suelo de pasturas y silvopastoriles, de igual forma los silvopastoriles tuvieron un mayor contenido de nutrientes en el suelo.

Justificación

El aumento de la productividad para cubrir las necesidades humanas se ha obtenido gracias a los servicios que brindan los ecosistemas agrícolas; sin embargo, la creciente demanda de servicios ecosistémicos compromete la capacidad de los ecosistemas para proveer estos servicios (MEA, 2005; Poppy et al., 2014). La degradación de los suelos es un problema mundial del siglo XXI con especial gravedad en los trópicos debido a que cerca del 30% de los suelos sufren algún tipo de deterioro (State of the Tropics, 2014; Lal, 2015). La ganadería asume gran responsabilidad en este problema debido a que influye directamente en los componentes y en los procesos físicos, químicos y biológicos del suelo, que a su vez agravan la susceptibilidad a la compactación, a la reducción de la infiltración de agua, a la acidificación y al agotamiento de nutrientes. Esta degradación impacta directamente en la disminución de la productividad agropecuaria, al tiempo que contribuye con la deforestación para más tierras productivas y con el aumento en el uso de fertilizantes (MEA, 2005; Dominati et al., 2010; Lal, 2015; Bernués et al., 2016).

La producción ganadera en el estado de Veracruz tiene una gran área de oportunidad para aumentar la productividad, mejorar el desempeño ambiental y mejorar la calidad de vida de los productores. La mitad del estado se dedica a la ganadería y en su gran mayoría los sistemas ganaderos son operados por pequeños y medianos productores en un escenario extensivo y de poca intensificación (INEGI, 2015; 2016; SIAP-SAGARPA, 2017). Una importante cantidad de personas que dependen de la ganadería están en condición de pobreza; y su desarrollo social se dificulta por el ALTO grado de marginación (CONAPO, 2015; CONEVAL, 2016). Cualquier cambio que se dirija a la intensificación sostenible y genere mejoras ambientales, sociales y económicas a los productores de Veracruz tendrá impacto a nivel nacional.

Las tendencias de la degradación ambiental pueden revertirse mediante la adopción de prácticas de manejo que minimicen la degradación del suelo (Lal, 2015). La evaluación del desempeño de los agroecosistemas puede ayudar a identificar intervenciones de manejo dirigidas, con el objetivo de seleccionar y mejorar las prácticas de producción (Uwizeye et al., 2016). Optimizar la eficiencia de los insumos, los almacenes y los productos del sistema es un aspecto importante para mejorar el desempeño ambiental en el sector ganadero (Dominati et al., 2010; Poppy et al., 2014; Uwizeye et al., 2016). Evaluar de qué manera los diferentes sistemas de producción tienen impactos en el suelo

es una herramienta útil para prevenir la disminución de la productividad que pueda generar más vulnerabilidad a los productores.

Por lo anterior, el objetivo general de este proyecto es *evaluar la contribución de servicios y dis servicios ecosistémicos del suelo de tres diferentes sistemas de producción ganadera en el estado de Veracruz*, para lo cual, se establecieron objetivos particulares y sus respectivas hipótesis:

Objetivos particulares

Objetivo 1. Caracterizar la intensificación de las prácticas de manejo de tres diferentes sistemas de producción ganadera (monte, silvopastoril y pastura).

Objetivo 2. Evaluar el aporte de tres servicios ecosistémicos del suelo (retención de agua, fertilidad del suelo y captura de carbono) que aportan tres distintos sistemas de producción ganadera (monte, silvopastoril y pastura) con diferente régimen de precipitación.

Objetivo 3. Evaluar el aporte de dos diservicios ecosistémicos del suelo (emisión de CO₂ y contaminación de cuerpos de agua) que generan tres distintos sistemas de producción ganadera (monte, silvopastoril y pastura) con diferente régimen de precipitación.

Hipótesis

Hipótesis 1. Los sistemas de producción ganadera más intensificados estarán en sitios con menor precipitación pluvial debido a la limitación que existe de recursos forrajeros.

Hipótesis 2. Los servicios ecosistémicos del suelo serán mayores en sistemas que integren una composición vegetal más densa y compleja como la de los sistemas silvopastoriles.

Hipótesis 3. Los diservicios ecosistémicos del suelo serán mayores en sistemas extensivos que generen menos forraje por unidad de área como el sistema de pasturas.

Capítulo 2. Métodos



Diseño Experimental

El diseño experimental de este proyecto se basó en la caracterización de las prácticas de manejo de tres diferentes sistemas de producción bovina y en el análisis de indicadores funcionales del suelo de los sistemas productivos. Para lo cual, se seleccionaron cinco sitios localizados en un gradiente de precipitación que tuvieran cada uno de los tres sistemas de producción (monte, silvopastoril y pastura). En cada sitio se seleccionó una porción de bosque como referencia con la finalidad de comparar los sistemas de producción con un sistema sin perturbación en las mismas condiciones climáticas. Es importante señalar que el diseño experimental no cuenta con sistema silvopastoril en los dos sitios más húmedos, debido a que no se encontró este sistema bajo condiciones climáticas similares (total de 5 montes, 3 silvopastoriles, 5 pasturas y 5 bosques de referencia).

En cada sistema de producción se realizaron entrevistas semi estructuradas a los productores y/o trabajadores para caracterizar las prácticas de manejo y tener un antecedente del uso del suelo. Las entrevistas fueron diseñadas para relacionar la dimensión y el uso de la parcela con el efecto que estos tienen en los indicadores funcionales del suelo. Por lo cual los puntos de interés de las entrevistas se enfocaron en conocer el tamaño de la unidad de producción, el tamaño de la parcela de donde se tomaron las muestras, la antigüedad del sistema, la cantidad de animales y su tiempo de estancia en la parcela, el forraje y/o suplemento utilizados para la alimentación del ganado, la utilización de fertilizantes y las perturbaciones como la última quema de la vegetación, sequías o inundaciones anteriores. Se realizaron un total de 8 entrevistas debido a que algunos productores tenían más de un sistema de producción que fue integrado en este proyecto.

El muestreo de suelo para el análisis de los indicadores funcionales se realizó en cada sistema de producción de cada sitio de estudio (**Figura 4**). En las parcelas de los sistemas se estableció un transecto de 50 m de largo, donde se colectó una sub muestra de suelo cada 10 m del transecto para formar una muestra compuesta (10 cm de profundidad); se realizaron 3 transectos por cada parcela ($n= 3$). Finalmente con el objetivo de conocer la variación anual de los indicadores del suelo se realizaron dos muestreos, el primero en temporada seca (mayo del 2016) y el segundo en temporada de lluvias (septiembre del 2016)

2.1 Sitios de estudio

Se seleccionaron cinco sitios ubicados en el estado de Veracruz, los sitios difieren en características climáticas a pesar de su relativa cercanía geográfica. Para considerar lo anterior en la diferenciación de los sitios (árido, semiárido, subhúmedo, húmedo e hiperhúmedo), se utilizó el índice de Lang (PMA acumulada: TMA promedio) como una medida del grado de aridez (Sánchez & Garduño, 2008); también se utilizó la clasificación de Köppen adaptado por García (2004) debido a que considera la distribución de la PMA a lo largo del año.

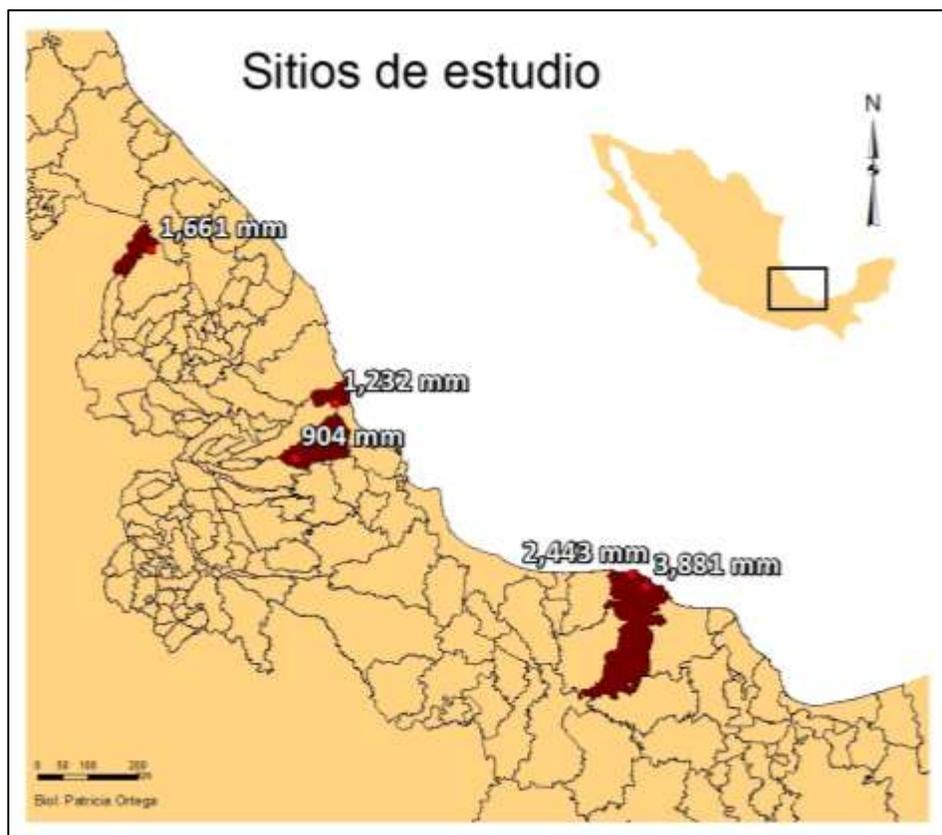


Figura 4. Localización de los sitios de estudio en un gradiente de PMA en Veracruz, México. Sitio Árido (904 mm), sitio Semiárido (1,232 mm), sitio Subhúmedo (1,661 mm) sitio Húmedo (2,443 mm) y sitio Hiperhúmedo (3,881 mm).

El sitio Árido se localiza en el municipio de Paso de Ovejas ($19^{\circ} 11.885' N$, $96^{\circ} 33.127' O$; 282 msnm) (Figura 4). La PMA del sitio árido es de 904 mm y su TMA es de $25.1^{\circ} C$, tiene una estación anual seca de 7 meses donde caen en promedio 78 mm de precipitación (Figura 5). De acuerdo con Köppen

adaptado por García (2004) el clima de este sitio es Cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw1); este tipo de clima es común en Veracruz (54% del estado) (INEGI, 2014). El suelo dominante es Leptosol (37% del estado) (INEGI, 2014), estos suelos son muy delgados y ricos en fragmentos gruesos. Los Leptosoles son comunes en regiones con pendiente topográfica, particularmente en áreas erosionadas; la poca profundidad y el drenaje excesivo en los leptosoles puede causar sequía incluso en ambientes húmedos, además, son el grupo más extenso de suelos en el planeta (WRB, 2015) (**Cuadro 3**).

El sitio Semiárido se ubica en el municipio de Ursulo Galván (19° 24.264' N, 96° 22.717' O; 14 msnm) (**Figura 4**). La PMA del sitio Semiárido es de 1,232 mm y su TMA es de 25.4 °C, tiene una estación anual seca de 7 meses con 73 mm de precipitación. El clima de este sitio es Cálido subhúmedo con lluvias en verano (Aw1) (**Figura 5**). El suelo dominante es Vertisol (25.2 % del estado) (INEGI, 2014), estos suelos son característicos por su alta proporción de arcillas expandibles y su pH ligeramente alcalino (7.40 ± 0.20). Los Vertisoles tienen gran potencial agrícola por su fertilidad química, aunque por sus características físicas son de difícil manejo (WRB, 2015) (**Cuadro 3**). El siguiente sitio del gradiente es el sitio Subhúmedo ubicado en el municipio de Tlapacoyan (20° 01.463' N, 97° 06.331' O; 121 msnm) (**Figura 4**). La PMA del sitio Subhúmedo es de 1,661 mm y la TMA de 24.4 °C (**Figura 5**); el clima es Semicálido húmedo con lluvias todo el año ((A)C(m)(f)) (5.74 % del estado) (INEGI, 2014). El suelo dominante de este sitio es Phaeozem (12.82% del estado) (INEGI, 2014), estos suelos son característicos por ser ricos en MO y excelentes tierras de cultivo (WRB, 2015) (**Cuadro 3**).

El sitio Húmedo se ubica en el municipio de San Andrés Tuxtlas (18° 41.750' N, 95° 12.134' O; 159 msnm) (**Figura 4**). La PMA del sitio Húmedo es de 2,443 mm y la TMA es de 25.7 °C (**Figura 5**); el clima es Cálido húmedo con abundantes lluvias en verano (Am(f)) (26.42% del estado) (INEGI, 2014). El suelo dominante de este sitio es Andosol (7.8% del estado) (INEGI, 2014), generalmente los Andosoles se desarrollan en eyecciones volcánicas o bajo meteorización ácida en climas húmedos; estos suelos tienen un alto potencial para la producción agrícola (WRB, 2015) (**Cuadro 3**). Por último, el sitio Hiperhúmedo también se ubica en el municipio de San Andrés Tuxtlas (18° 38.377' N, 95° 08.748' O; 250 msnm) (**Figura 4**). La PMA de este sitio es de 3,881 mm y la TMA es de 24.5 °C (**Figura 5**); el clima es Cálido húmedo con lluvias todo el año (A(f)) (5.07% del estado) (García, 2004; INEGI, 2014). El suelo dominante al igual que el sitio Húmedo es Andosol (INEGI, 2014) (**Cuadro 3**).

Cuadro 3. Características de los sistemas de referencia de Veracruz, México.

Sitio	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Localización	19° 11.885' N 96° 33.127' O	19° 24.264' N 96° 22.717' O	20° 01.463' N 97° 06.331' O	18° 41.750' N 95° 12.134' O	18° 38.377' N 95° 08.748' O
Altitud (msnm)	284	14	121	189	250
Clima ¹	Aw1	Aw1	(A)C(m)(f)	Am(f)	A(f)
PMA (mm) ²	904	1,232	1,661	2,443	3,881
TMA (°C) ²	25.1	25.4	24.4	25.7	24.5
PMA:Evaporación	0.6	0.8	1.4	1.9	2.7
Meses de la estación seca	E,F,M,A,M,N,D	E,F,M,A,M,N,D	-	M,A	-
Precipitación estación seca (mm)	78	73	-	32	-
Suelo ^{3,6}	Leptosol	Vertisol	Phaeozem	Andosol	Andosol
Ph (H ₂ O)	6.59 ± 0.10	7.40 ± 0.20	5.63 ± 0.18	6.53 ± 0.09	5.81 ± 0.13

¹Clasificación de clima de acuerdo con Köppen adaptado por García (2004); ²Servicio Meteorológico Nacional (serie 1951-2010); ³INEGI. *Marco Geoestadístico Municipal* (2005); ⁴INEGI. Mapa Geológico (2008); ⁵Tarback et al. (2005); ⁶Krasilnikov et al. (2008)

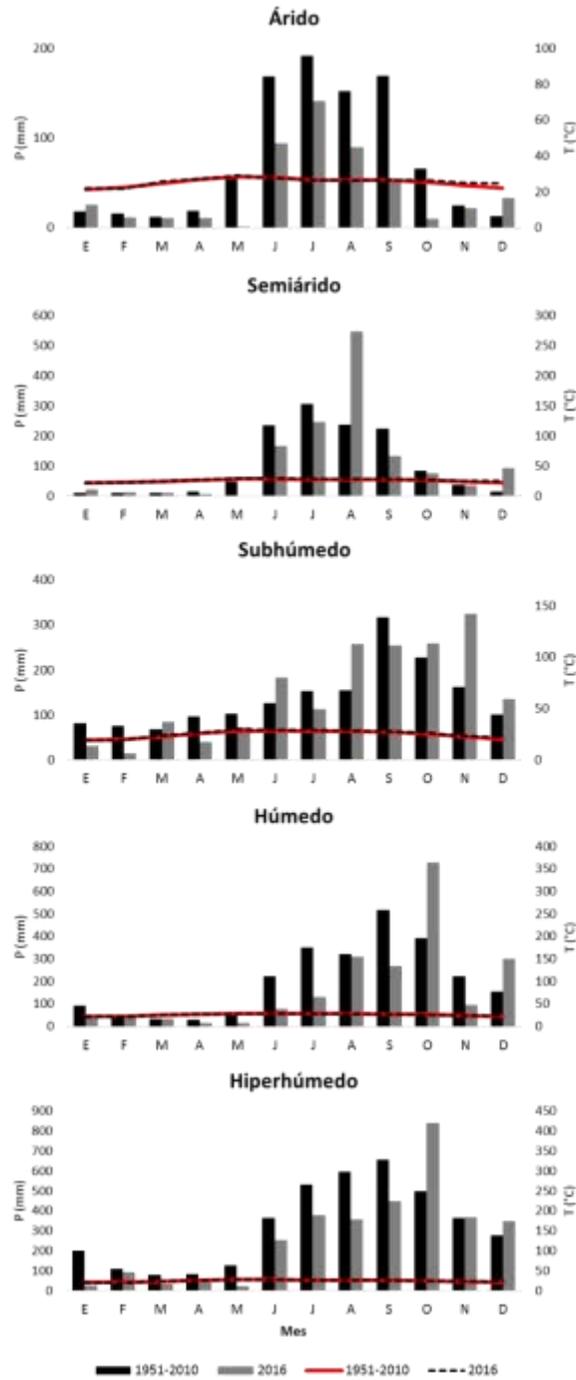


Figura 5. Los datos en barras son medias de la precipitación total mensual y en líneas son valores de la temperatura promedio mensual. Sitio Árido (1951-2010; 904 mm, 25.1 °C) (2016; 498 mm, 25.7 °C) Estación climatológica CONAGUA (19° 21' 47" N, 096° 39' 30" O; 242 msnm). Sitio Semiárido (1951-2010; 1,232 mm, 25.4 °C) (2016; 1,342 mm, 26.5 °C) Estación climatológica CONAGUA (19° 21' 53" N, 096° 22' 28" O; 28 msnm). Sitio Subhúmedo (1951-2010; 1,661 mm, 24.4 °C) (2016; 1,765 mm, 25.2 °C) Estación climatológica CONAGUA (20° 04' 45" N, 097° 03' 50" O; 89msnm). Sitio Húmedo (1951-2010; 2,443 mm, 25.7 °C) (2016; 2,047 mm, 25.6 °C) Estación climatológica CONAGUA (18° 35' 50" N, 095°26'50" O; 28 msnm). Sitio Hiperhúmedo (1951-2010; 3,881 mm, 24.5 °C) (2016; 3,227 mm, 24.3 °C) Estación climatológica CONAGUA (18° 30' 15" N, 095°02'08" O; 11 msnm).

2.2 Análisis de laboratorio

Determinación de los indicadores para los SE

Para el cumplimiento de los objetivos de este trabajo se analizaron 16 variables indicadoras del contenido y del flujo de C, de N y de P en el suelo. Todas las muestras de suelo fueron tamizadas (malla 2 mm) y refrigeradas para su posterior análisis. En la determinación de la **Capacidad de almacenamiento de agua** se analizaron tres indicadores; la *densidad aparente* del suelo se determinó mediante el método de probeta (Baver, 1956), la *textura* del suelo fue determinada por el método del hidrómetro y el *contenido gravimétrico de H₂O* se determinó como la diferencia del peso seco y del peso húmedo del suelo. En la determinación del **Almacenamiento de carbono** se analizaron dos indicadores, el *contenido de arcillas* en el suelo y el contenido de *carbono orgánico* en el suelo; este último fue determinado con el método basado en la oxidación total de los compuestos orgánicos no volátiles a CO₂ a través de la combustión catalítica (Vance et al., 1987).

En la determinación de la **Fertilidad del suelo** se analizaron seis indicadores; el *pH* se evaluó mediante la disolución de la muestra en agua destilada (1:2.5) y su posterior medición con un pH-metro (Robertson et al., 1999). La concentración de *nitrógeno total* se determinó por medio del método de digestión ácida (360°C con H₂SO₄ concentrado) (Anderson & Ingram 1993), y el contenido de *amonio* fue determinado por el método de Robertson et al (1999). La *mineralización neta del nitrógeno* fue determinada como la diferencia entre la concentración de nitrato y de amonio del suelo durante 15 días de incubación de la muestra (Robertson et al., 1999), la concentración de *nitrógeno en biomasa* microbiana fue determinada mediante el procedimiento de fumigación-extracción con cloroformo (Vance et al., 1987). Finalmente los contenidos de *fósforo total* y de *fósforo disponible* fueron determinados con el método modificado de Hedley para la fracción de fósforo edáfico (Hedley et al., 1982).

Determinación de los indicadores para los DSE

En la determinación de las **Emisiones de CO₂** se analizaron dos indicadores, la evolución del dióxido de carbono que fue determinada mediante la *respiración basal del suelo*, medida como la tasa de mineralización del C durante 15 días (Anderson, 1982); y el contenido de *C en biomasa microbiana* del suelo mediante el procedimiento de fumigación-extracción con cloroformo (Vance et al., 1987). Finalmente, la determinación del riesgo a la **Contaminación de cuerpos de agua** se analizó mediante

el contenido *de nitrato* en el suelo con el método de Robertson et al. (1999), y la *nitrificación neta* fue determinada como la diferencia entre la concentración de nitrato del suelo inicial y final durante 15 días (Robertson et al., 1999).

2.3 Análisis estadístico

Los datos obtenidos de las entrevistas para la caracterización de las prácticas de manejo permitieron establecer la intensidad del uso del suelo en los sistemas de producción. Las dos principales prácticas que se tomaron en cuenta fueron la intensidad por CA en la parcela (número de animales: ha) y la intensidad por tiempo de recuperación de la parcela después de ser pastoreada (días de descanso: días de pastoreo). Estas prácticas denotan la cantidad de animales y su tiempo de estadía en la parcela, lo que impacta directamente en los indicadores funcionales del suelo.

Los datos obtenidos del análisis de los indicadores del suelo se procesaron con el software R. Con el fin de explorar similitudes o diferencias en el comportamiento de las variables entre temporadas, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) por separado para la temporada seca y para la temporada de lluvias. Posteriormente, se realizaron las pruebas de normalidad y de homogeneidad de varianzas de los datos; cuando los datos no cumplieron con los supuestos, se transformaron con logaritmo de base diez. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) para comparar los valores de los indicadores del suelo entre los sistemas de producción (cada sitio por separado). Debido a que algunos datos a pesar de la transformación no cumplieron con los supuestos, se realizó la prueba de Kruskal-Wallis con el mismo fin que del ANOVA. Finalmente, se realizó el análisis Post Hoc para evidenciar las agrupaciones de los sistemas de producción cuando las diferencias eran significativas ($p < 0.05$).

Capítulo 3. Resultados



3.1 Caracterización de los sistemas de producción

Sitio Árido

El sistema monte tiene una superficie total de 60 ha y 50 años de antigüedad. El monte del sitio árido es un potrero sin divisiones donde pastorean 170 animales (2.8 UA:ha). La rotación es estacional, en época seca los animales forrajean sin traslados a otras parcelas y en lluvias forrajean en el monte de 60 a 90 días y rotan a otros pastos durante 120 días mientras la vegetación del monte se recupera (IR 1.3). El ganado es de raza suiza de doble propósito (carne y leche), su alimentación se basa en hierbas y arbustos silvestres suplementado con sal mineral. La fertilización del sistema depende de la excreta animal del ganado y la quema de la vegetación es una práctica anual (**Cuadro 4, Figura 6**).

El sistema silvopastoril del sitio árido se encuentra en una propiedad de 4 ha divididas en 3 secciones (silvopastoril, pastos y un banco de proteína de *G. ulmifolia* Lam.). La superficie del silvopastoril es de 1 ha con 18 animales forrajeando (18 UA:ha), 3 animales son propiedad del productor y 15 son de otro productor que renta el espacio. La rotación es estacional, en época seca el ganado permanece en el silvopastoril y en época de lluvias el ganado permanece 8 días en el silvopastoril y 24 días en las otras secciones (IR 3). El ganado es de raza criolla lechera de doble propósito, se alimenta de *Panicum máximum* Jacq. y *Guazuma ulmifolia* Lam. con suplementación de sal mineral y vaina de *G. ulmifolia*, esta última en época seca. La fertilización del potrero depende de las excretas del ganado y la quema de la vegetación es una práctica anual; como antecedente, 8 años atrás en la parcela era cultivado maíz (**Cuadro 4, Figura 6**).

La pastura del sitio árido se encuentra en una propiedad de 100 ha divididas en 3 poteros con un total de 120 animales. La superficie de la pastura es de 18 ha con 40 animales (2.2 UA:ha), los animales permanecen pastoreando sin traslados durante la época seca y en lluvias permanecen de 10 a 15 días en la pastura y son trasladados durante 45 días a otros potreros (IR 3). El ganado es de raza Suiza de doble propósito y su alimentación se basa en *Cynodon dactylon* (L.) Pers. con sal mineral y silo con pollinaza como suplemento. La fertilización del potrero depende de las excretas del ganado y la quema de la vegetación es una práctica anual (**Cuadro 4, Figura 6**).

Cuadro 4. Caracterización de las unidades de producción y del manejo técnico de diferentes sistemas de producción en el sitio Árido

	Propiedad total (ha)	60	4	100
	Número de potreros	1	3	3
	Cabezas de ganado	170	3 propias, 15 rentan	120
	Sistema	Monte	Silvopastoril	Pastura
	Coordenadas	19° 12.091' N 96° 33.051' O	19° 13.695' N 96° 31.699' O	19° 12.148' N 96° 32.771' O
	Tamaño (ha)	60	1	18
	Carga animal (UA:ha)	2.8	18	2.2
	Rotación (días)	Sin rotación	Sin rotación	Sin rotación
	(estancia:descanso)	(secas) 60:90-120	(secas) 8:24	(secas) 10-15:45
Parcela		(lluvias)	(lluvias)	(lluvias)
	Forraje	Hierbas y arbustos	<i>Panicum máximum</i> <i>Guazuma ulmifolia</i>	<i>Cynodon dactylon</i>
	Años uso actual	50 (1968)	8 (2010)	50 (1968)
	Propósito	Leche y Carne	Leche y pie de cría	Leche y Carne
	Raza	Suizo	Criolla lechera	Suizo
Ganado	Suplemento alimenticio	Sal mineral	Sal mineral/vaina de <i>Guazuma ulmifolia</i>	Sal mineral; Silo con pollinaza
	Abono	Excreta animal	Excreta animal	Excreta animal
	Fertilización artificial	No	NPK y Herbicida	Herbicida
Manejo	Ultima quema	2016	2016	2016
	Cultivo anterior	No	Maíz	No
	Perturbación	No	No	No

Sitio Semiárido

Los tres sistemas de producción (monte, silvopastoril y pastura) del sitio Semiárido comparten una propiedad de 63 ha seccionadas, la sección pecuaria es de 20 ha con un total de 60 animales. El monte tiene 5 años de antigüedad y una superficie de 1 ha donde pastorean de 20 a 24 animales (24 UA:ha). El ganado pastorea 7 días en el monte y 60 días el ganado rota a otros potreros (IR 8.6). El ganado es raza Simenthal Fleckvieh y Brahman con propósito lechero y son utilizados para la formación de estudiantes. El ganado se alimenta de hierbas y arbustos silvestres con suplemento de maíz verde y sal mineral. La fertilización proviene de la excreta animal y la última quema de vegetación fue hace 16 años (2002); anteriormente se sembraba jitomate y maíz (**Cuadro 5, Figura 6**).

El sistema Silvopastoril fue establecido hace 4 años (2014), se compone de 40 parcelas silvopastoriles de 2.3 ha cada una donde pastorean de 20 a 30 animales (13 UA:ha). Debido a que es un sistema intensivo, la rotación es de 1 día de estancia por 39 días de descanso (IR 8.6). El ganado es Simenthal Fleckvieh y Brahman con propósito lechero, se alimenta de *Brachiaria brizantha* cv. Toledo con

Leucaena leucocephala (Lam.) con suplementación de maíz verde y sal mineral. La fertilización depende de la excreta animal y la última quema de la vegetación fue en 2013 (**Cuadro 5, Figura 6**).

La pastura del sitio semiárido tiene una superficie de 1 ha donde pastorean de 5 a 12 animales (12 UA:ha). La rotación es de un día de estancia por 60 días de descanso (IR 60). El ganado es raza Simenthal Fleckvieh y Brahman con propósito lechero, la alimentación del ganado es *Panicum máximum* Jacq. con suplemento de maíz verde y sal mineral. La fertilización de la parcela depende de las excretas del ganado y la última quema fue en 1999 cuando se estableció la pastura (1999) (**Cuadro 5, Figura 6**). En los tres sistemas de este sitio, el huracán Karl (año 2010) y la tormenta tropical Barry (año 2013) afectaron la zona con fuertes lluvias e inundaciones.

Cuadro 5. Caracterización de la unidad de producción y del manejo técnico de diferentes sistemas de producción en el sitio Semiárido.

Unidad de Producción	Propiedad total (ha)	63		
	Número de potreros	Área pecuaria 20 ha		
	Cabezas de ganado	60		
	Sistema	Monte	Silvopastoril	Pastura
	Coordenadas	19° 24.643' N 96° 22.299' O	19° 24.547' N 96° 22.722' O	19° 24.655' N 96° 22.373' O
Parcela	Tamaño (ha)	1	2.3	1
	Carga animal (UA:ha)	20-24:1	20-30:2.3	5-12:1
	Rotación (días) (estancia:descanso)	7:60	1:40	1:60
	Forraje	Hierbas y arbustos	<i>Brachiaria brizantha</i> <i>Leucaena leucocephala</i>	<i>Panicum máximum</i>
	Años uso actual	5 (2013)	4 (2014)	19 (1999)
		Propósito	Leche	Leche
Ganado	Raza	Simenthal Fleckvieh y Brahman	Simenthal Fleckvieh y Brahman	Simenthal Fleckvieh y Brahman
	Suplemento alimenticio	Maíz verde y sal mineral	Maíz verde y sal mineral	Maíz verde y sal mineral
	Abono	Excreta animal	Excreta animal	Excreta animal
Manejo	Fertilización artificial	No	No	NPK 46-00-00
	Ultima quema	15	3	18
	Cultivo anterior	Jitomate y maíz	Caña azúcar	Selva
	Perturbación	Huracán Karl (2010) y Tormenta tropical Barry (2013)		

Sitio Subhúmedo

Los tres sistemas de producción (monte, silvopastoril y pastura) del sitio Subhúmedo comparten una propiedad de 130 ha divididas en 31 potreros destinados al pastoreo de 229 cabezas de ganado. El

sistema monte tiene una superficie de 0.5 ha, en esta parcela no se tiene información del número de animales que entran, ni de cuánto tiempo permanecen en la parcela (**Cuadro 6, Figura 6**).

El sistema silvopastoril del sitio Subhúmedo tiene una superficie de 1 ha con una CA de 1.9 a 2.1 UA:ha. Los animales se encuentran en un sistema de rotación de 3 a 6 días de estancia en el silvopastoril por 30 o 45 días en otra parcela (IR 7.5). El ganado es de doble propósito raza F1, se alimenta de *Brachiaria brizantha* cv. Toledo con *Cratylia argenteae* (Desv.) O. Kuntze, con suplemento de sal mineral y dosis altas de fósforo a libre acceso. La fertilización es vía excreta animal y no se practica la quema de vegetación en la parcela (**Cuadro 6, Figura 6**). La pastura tiene una superficie de 1 ha con CA de 1.9 a 2.1 UA:ha. Los animales permanecen en la pastura de 3 a 6 días y rotan de 30 a 45 días a otro potrero (IR 7.5). El ganado es F1 de doble propósito, se alimenta de una combinación de *Brachiaria brizantha* cv. Toledo con *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst y se suplementa con sal mineral y fósforo (**Cuadro 6, Figura 6**).

Cuadro 6. Caracterización de la unidad de producción y del manejo técnico de diferentes sistemas de producción en el sitio Subhúmedo.

Unidad de Producción	Propiedad total (ha)	130 (90 destinadas a pastoreo)		
	Número de potreros	31		
	Cabezas de ganado	229		
	Sistema	Monte	Silvopastoril	Pastura
	Coordenadas	20° 01.547' N 97° 06.587' O	20° 01.548' N 97° 06.566' O	20° 01.463' N 97° 06.331' O
Parcela	Tamaño (ha)	0.5	1	1
	Carga animal (UA:ha)	nd	1.9-2.1:1	1.9-2.1:1
	Rotación (días) (estancia:descanso)	nd	3-6:30-45	3-6:30-45
	Forraje	Hierbas y arbustos	<i>Brachiaria brizantha</i> <i>Cratylia argenteae</i>	<i>Brachiaria brizantha</i> <i>Cynodon nlemfuensis</i>
	Años uso actual	nd	4 (2014)	4 (2014)
Ganado	Propósito	Leche y carne	Leche y carne	Leche y carne
	Raza	F1	F1	F1
	Suplemento alimenticio	Sal mineral y dosis altas de P	Sal mineral y dosis altas de P	Sal mineral y dosis altas de P
Manejo	Abono	Excreta animal	Excreta animal	Excreta animal
	Fertilización artificial	No	No	No
	Ultima quema	Sin quemas	Sin quemas	Sin quemas
	Cultivo anterior	Selva	Pastura	Pasto estrella <i>Cynodon plectostachium</i> - <i>Cynodon nlemfluensis</i>
	Perturbación	No	No	No

nd= información no disponible

Sitio Húmedo

El sistema monte del sitio húmedo tiene una superficie total de 20 ha sin divisiones de donde se alimentan 30 animales (1.5 UA:ha). En el monte no hay rotación, el ganado permanece pastoreando en la parcela durante todo el año. La raza del ganado es cebú con suizo para la producción de leche, su alimentación se basa en hierbas y arbustos silvestres, la cual suplementan con sal mineral. La fertilización es por medio de la excreta animal y se practica la quema de vegetación (**Cuadro 7, Figura 6**). Por su parte la pastura del sitio húmedo está en una propiedad con 26 ha de superficie divididas en 3 potreros, donde ubica a 50 animales. La sección de la pastura tiene una superficie de 16 ha con 30 animales (1.9 UA:ha), los cuales pastorean en la parcela durante 7 días y rotan a los otros potreros durante 28 días (IR 4). El ganado es de raza cebú con suizo con propósito lechero, el forraje es *Cynodon nlemfuensis* Vanderyst y *Paspalum notatum* Flügge desde hace 50 años que se implementó la pastura. La fertilización es con urea y no practican la quema de vegetación en la parcela (**Cuadro 7, Figura 6**).

Cuadro 7. Caracterización de las unidades de producción y del manejo técnico de diferentes sistemas de producción en el sitio Húmedo.

	Propiedad total (ha)	20	26
	Número de potreros	1	3
	Cabezas de ganado	30	50
	Sistema	Monte	Pastura
	Coordenadas	18° 41' 45.0" N 95° 12' 8.0" O	18° 41' 43.5" N 95° 11' 06.2" O
	Tamaño (ha)	20	16
	Carga animal (ha)	30:20	30:16
	Rotación (días)		
Parcela	(estancia:descanso)	Sin rotación	7:28
	Forraje	Hierbas y arbustos	<i>Cynodon nlemfuensis</i> <i>Paspalum notatum</i>
	Años uso actual	10 (2007)	50 (1967)
	Propósito	Leche	Leche
Ganado	Raza	Cebú con suizo	Cebú con suizo
	Suplemento alimenticio	Sal mineral	Sal mineral y alfalfa
	Abono	Excreta animal	Excreta animal
	Fertilización artificial	No	Urea
Manejo	Ultima quema	Sin quemas	Sin quemas
	Cultivo anterior	Pasto Estrella	No
	Perturbación	No	No

Sitio Hiperhúmedo

La propiedad donde se ubica el sistema monte del sitio hiperhúmedo es de 24 ha divididas en dos potreros con 40 cabezas de ganado. El potrero del monte es de 0.5 ha, no es de conocimiento del productor la cantidad y el tiempo de estancia de los animales en el sistema debido a que es un parche de vegetación secundaria de libre acceso. El ganado es de raza cebú con suizo de doble propósito, se alimentan de hierbas y arbustos silvestres, y suplementan con sal mineral. La fertilización del monte proviene de la excreta animal y no se practica la quema de vegetación (**Cuadro 8, Figura 6**). Por último, la pastura del sitio hiperhúmedo tiene una superficie de 12 ha donde ubican a 28 animales (2.3 UA:ha). El ganado permanece 15 días pastoreando y rota a otro potrero durante 30 días (IR 2). La raza del ganado es cebú con suizo de doble propósito, su alimentación está basada en *Brachiaria brizantha* cv. Toledo con suplementación de sal mineral. La fertilización de la parcela es depende de la excreta animal y no se practica la quema de forraje (**Cuadro 8, Figura 6**).

Cuadro 8. Caracterización de la unidad de producción y del manejo técnico de diferentes sistemas de producción en el sitio Hiperhúmedo.

	Propiedad total (ha)	24	
	Número de potreros	2	
	Cabezas de ganado	40	
	Sistema	Monte	Pastura
	Coordenadas	18° 38.423' N 095° 8.609' O	18° 38.396' N 095° 08.759' O
Parcela	Tamaño (ha)	0.5	12
	Carga animal (UA:ha)	25:0.5	28:12
	Rotación (días) (estancia:descanso)	Sin rotación	15:30
	Forraje	Hierbas y arbustos	<i>Brachiaria brizantha</i>
	Años uso actual	15 (2002)	4 (2013)
Ganado	Propósito	Leche y Carne	Leche y Carne
	Raza	Cebú con suizo	Cebú con suizo
	Suplemento alimenticio	Sal mineral	Sal mineral
Manejo	Abono	Excreta animal	Excreta animal
	Fertilización artificial	No	No
	Ultima quema	No	No
	Cultivo anterior	Selva	Pastura
	Perturbación	No	No

SISTEMAS DE PRODUCCIÓN							
	Referencia	Monte	Silvopastoril	Pastura			
SITIOS	Árido	Selva Caducifolia	60	1	18	UA:ha	descanso:pastoreo
			2.8	18	2.2		
			1.3	3	3		
			2016	2016	2016		
			1968*	2011	1968*		
		Vegetación en sucesión	<i>G. ulmyfolia</i> <i>P. Maximum</i>	<i>C. doctylon</i>			
Semiárido	Selva Caducifolia	1	2.3	1	UA:ha	descanso:pastoreo	
		24	13	12			
		8.6	40	60			
		2002	2013	1999			
		2013	2013	1999			
		Vegetación en sucesión	<i>B. labiata</i> <i>L. Inscrubata</i>	<i>P. maximum</i>			
Subhúmedo	Selva Perennifolia	1	1	1	UA:ha	descanso:pastoreo	
		nd	2.1	2.1			
		nd	7.5	7.5			
		No	No	No			
		2007	2015	2015			
		Vegetación perturbada	<i>B. Brizantha</i> <i>C. argentea</i>	<i>B. Brizantha</i> <i>C. alenformata</i>			
Húmedo	Selva Perennifolia	20		16	UA:ha	descanso:pastoreo	
		1.5		1.9			
		0		4			
		No		No			
		2007		-1977			
		Vegetación en sucesión		<i>P. notatum</i> <i>C. nymphaea</i>			
Hiperhúmedo	Selva Perennifolia	0.5		12	UA:ha	descanso:pastoreo	
		nd		2.3			
		nd		2			
		No		No			
		2002		2013			
		Vegetación perturbada		<i>B. Brizantha</i>			

Parcela	Carga animal	Rotación	Última quema	Uso	Forraje
ha	UA:ha	descanso:pastoreo	año	año	especie

Figura 6. Caracterización de las prácticas de manejo de tres sistemas de producción (monte, silvopastoril y pastura) en cinco sitios con un gradiente de precipitación en Veracruz, México (Elaboración propia para este documento).

Síntesis de la caracterización de los sistemas de producción

Las prácticas de manejo además de ser diferentes entre los sistemas (monte, silvopastoril y pastura) lo son entre los sitios y entre las temporadas. La presencia y la intensidad de algunas prácticas son determinadas por la PMA y por el tamaño de la parcela.

El tamaño de las parcelas de los sistemas de producción fue mayor en los sitios áridos respecto a los sitios húmedos; asimismo, el monte fue el sistema que mayor superficie tuvo respecto a los otros sistemas. La quema de la vegetación en las parcelas fue una práctica recurrente en los sitios áridos, en contraste, no es una práctica que se lleve a cabo en los sitios húmedos. La antigüedad de los sistemas de producción fue mayor en las pasturas respecto a los otros sistemas, particularmente, los silvopastoriles fueron los sistemas de más reciente establecimiento.

Finalmente, la Intensificación por Carga Animal fue mayor en los sistemas de producción de los sitios áridos respecto a los sitios húmedos, sin embargo, la mayor CA de los sistemas de manejo la tuvo el sistema silvopastoril de los sitios áridos. La mayor Intensificación por Rotación estuvo en los sistemas de producción de los sitios húmedos y del sitio más árido; al parecer la IR fue consecuente del sitio y no del sistema de manejo.

3.2 Indicadores funcionales de los sistemas de producción

Se realizó el Análisis de Componentes Principales (ACP) independiente para la temporada seca y la temporada lluviosa con el fin de evaluar si la PMA ejercía cambios en el comportamiento de los indicadores del suelo. En el ACP de la estación seca el componente principal 1 (PC1) explicó el 36% de la variación de los datos, los indicadores que aportaron mayor información a la variabilidad fueron el Nm y el CG. El PC2 explicó la segunda mayor porción de la variación con el 16%, la RBS y PO₄ fueron las variables que aportaron más información entre los indicadores del suelo. Por su parte, el PC3 explicó el 11% de la variación, el COS y el Nt fueron los indicadores que aportaron más información al comportamiento de los datos (**Cuadro 9**). En la estación seca los indicadores del suelo se asociaron a determinados sitios; asimismo, se formaron cuatro grupos entre los cinco sitios juntando al sitio Subhúmedo y al Húmedo en un conjunto (**Figura 7**).

En el ACP de la estación lluviosa el PC1 explicó el 40% de la variación de los datos, el Nm y el CG fueron los indicadores que aportaron mayor variabilidad. El PC2 explicó la segunda porción más grande de la variación de los datos de lluvias con el 12%, el CBM y NBM tuvieron la mayor aportación a la explicación. El PC3 explicó el 11% de la variación, el Pt y el pH fueron los indicadores que aportaron más información al comportamiento de los datos (**Cuadro 9**). En la estación lluviosa los indicadores también se asociaron a determinados sitios, se formaron tres grupos entre los cinco sitios, juntando al sitio Árido, Semiárido y Subhúmedo en un grupo (**Figura 8**). Finalmente, el comportamiento diferenciado de los indicadores entre la temporada seca y la temporada lluviosa mostraron la pertinencia de realizar el análisis de varianza independiente entre las estaciones.

SECAS

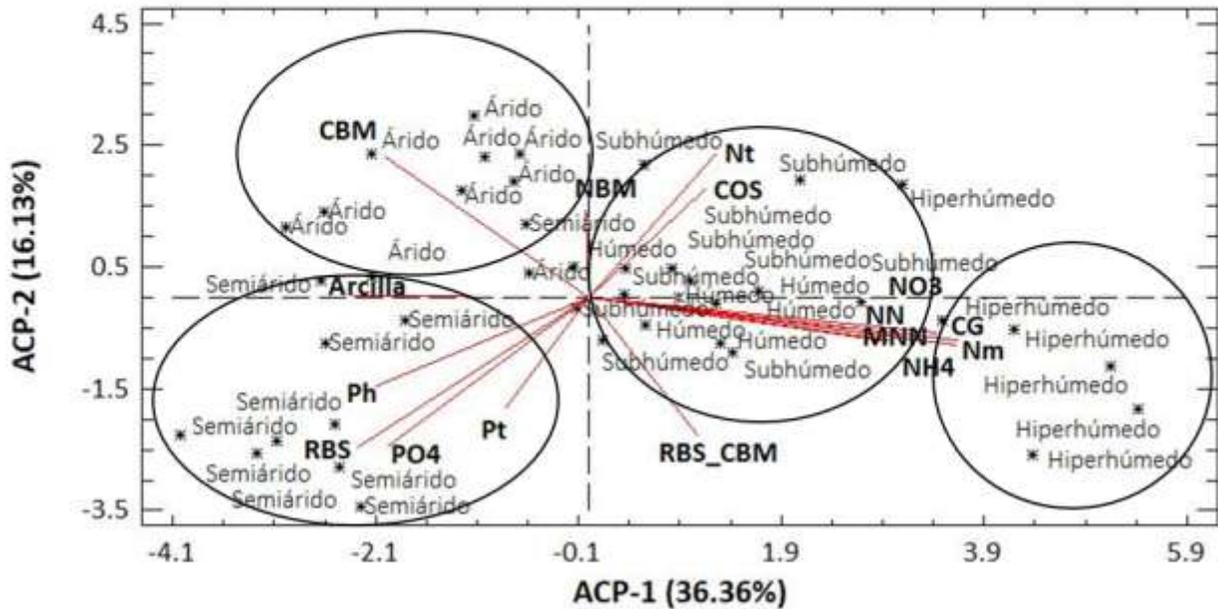


Figura 7. Biplot del Análisis de Componentes Principales de los indicadores del suelo en la estación seca.

LLUVIAS

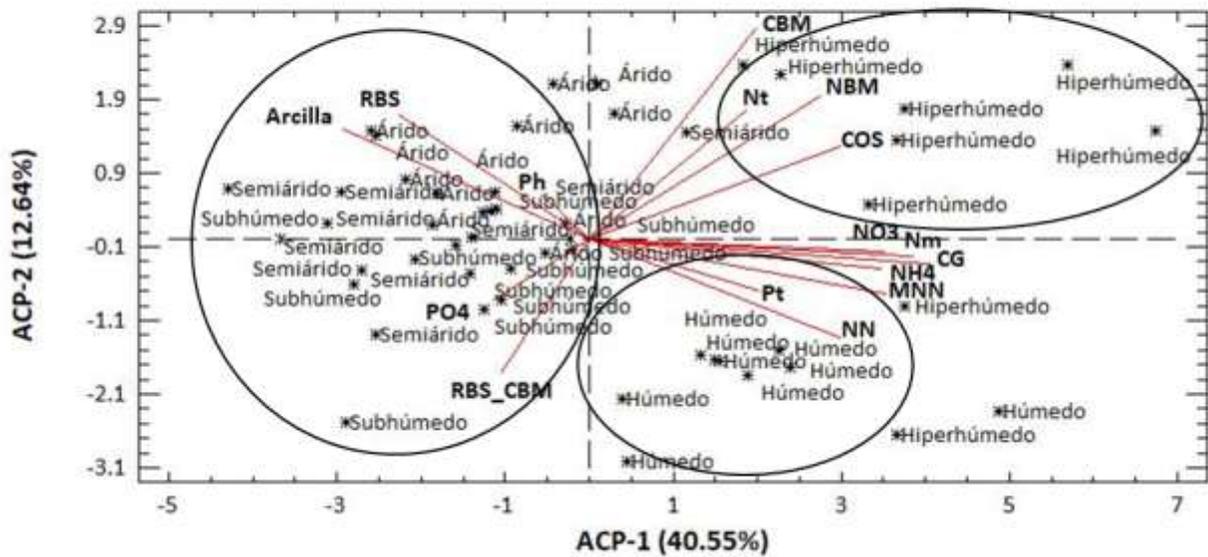


Figura 8. Biplot del Análisis de Componentes Principales de los indicadores del suelo en la estación lluviosa.

Cuadro 9. Variación explicada por los componentes principales (3) en la estación seca y en la lluviosa

	<i>Secas</i>			<i>Lluvias</i>		
	PC1	PC2	PC3	PC1	PC2	PC3
Eigenvalor	5.818	2.587	1.831	6.487	2.021	1.810
Variación acumulada (%)	36.36	52.49	63.94	40.55	53.18	64.50
Eigenvectores						
COS	0.121	0.279	-0.573	0.272	0.234	0.009
RBS	-0.209	-0.378	0.015	-0.206	0.314	0.156
RBS_CBM	0.113	-0.351	-0.319	-0.095	-0.333	0.236
CBM	-0.212	0.359	-0.044	0.180	0.530	0.059
NBM	-0.002	0.224	0.214	0.248	0.359	0.067
NH ₄	0.363	-0.090	0.211	0.316	-0.076	0.231
NO ₃	0.313	-0.110	-0.025	0.319	-0.032	-0.224
Nm	0.385	-0.111	0.124	0.349	-0.044	-0.156
Nt	0.132	0.366	-0.396	0.169	0.323	-0.061
MNN	0.306	-0.108	-0.211	0.321	-0.138	0.181
NN	0.270	-0.078	-0.270	0.271	-0.246	0.015
Pt	-0.086	-0.283	-0.101	0.183	-0.128	-0.463
PO ₄	-0.241	-0.383	-0.134	-0.103	-0.155	-0.358
pH	-0.222	-0.226	-0.381	-0.051	0.113	-0.630
CG	0.384	-0.121	0.114	0.367	-0.062	0.073
Arcilla	-0.245	0.004	-0.015	-0.266	0.276	-0.054

Servicio Ecosistémico Capacidad de almacenamiento de agua

Indicador Contenido Gravimétrico de H₂O. El contenido gravimétrico de agua en los suelos fue mayor en los sitios húmedos respecto a los sitios áridos, sin embargo, en la época seca solo en los sitios secos la humedad fue afectada por las prácticas de manejo. El bosque de referencia de los sitios áridos tuvo significativamente mayor humedad que los sistemas de manejo, particularmente, el silvopastoril tuvo la menor humedad del suelo. En contraste, en la temporada de lluvias la humedad del suelo fue afectada por el manejo en todos los sitios del gradiente; asimismo, la humedad fue mayor en los bosques de referencia en relación a los sistemas de manejo, de nuevo, el silvopastoril tuvo significativamente el CG más bajo (Figura 9, Cuadro A1).

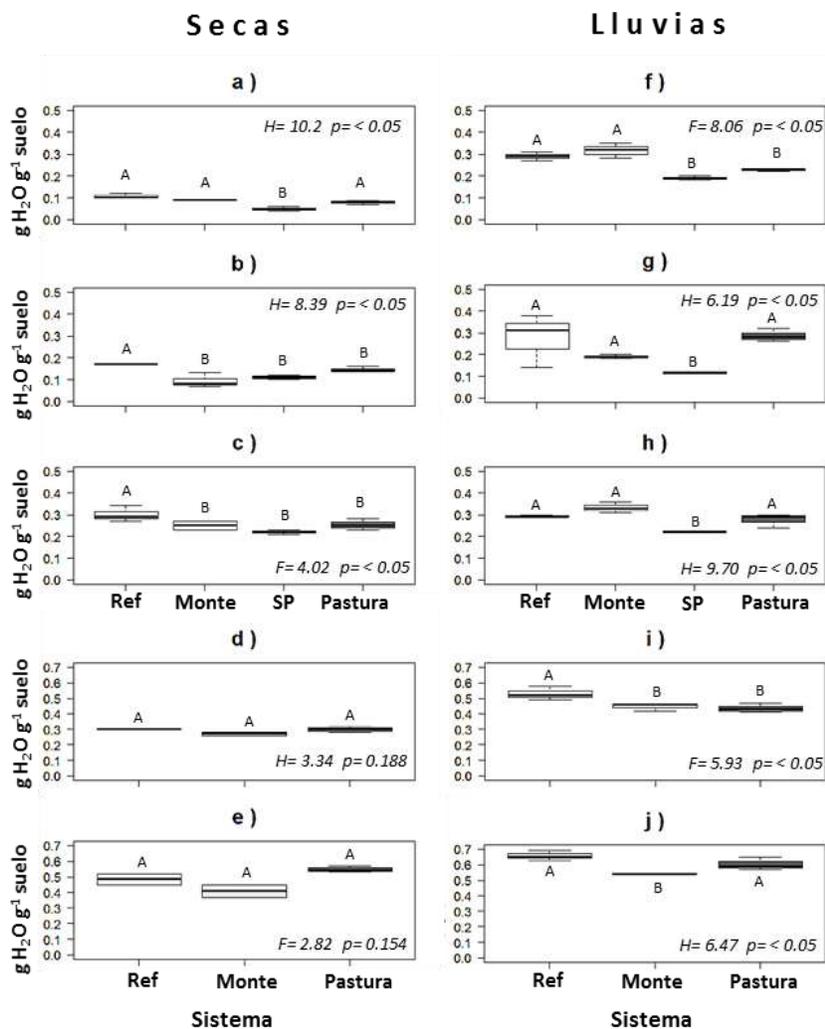


Figura 9. Boxplot del contenido gravimétrico de H₂O ($\text{g}^{-1} \text{H}_2\text{O g}^{-1} \text{suelo}$) en el suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Indicador Textura del suelo. La textura del suelo fue la misma para los sistemas de producción que comparten sitio, sin embargo, los sitios áridos tuvieron mayor porcentaje de arcillas (promedio 17%) respecto a los sitios húmedos (promedio 10%). Es decir, la textura del suelo no fue afectada por el manejo, pero si fue dependiente del sitio (**Figura 10, Cuadro A2**).

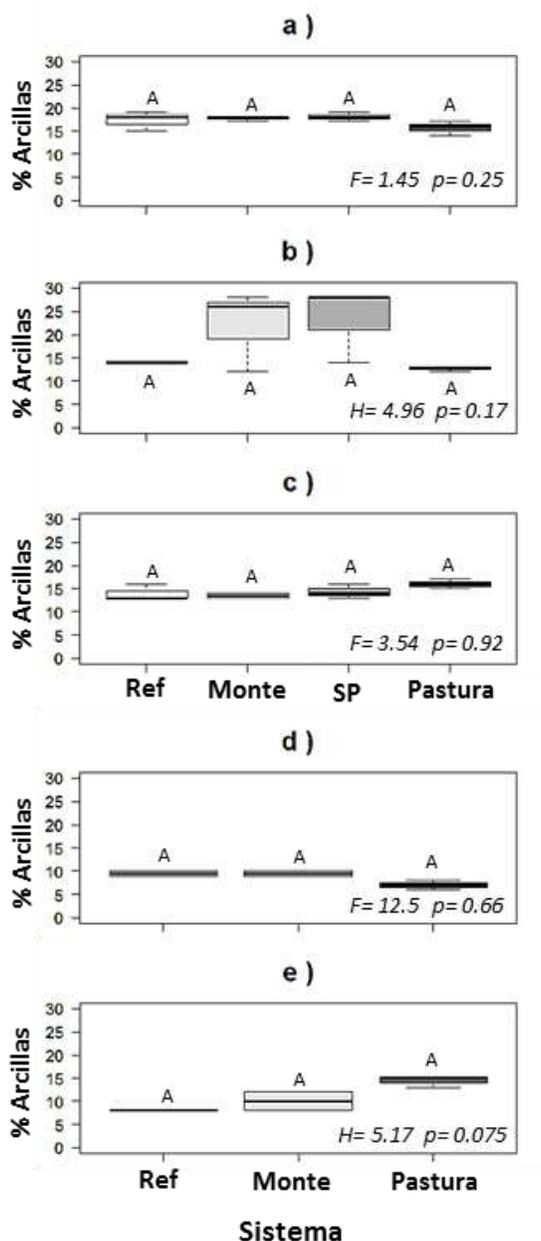


Figura 10. Boxplot del contenido de arcillas (%) en el suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual. **a** Sitio Árido; **b** Sitio Semárido; **c** Sitio Subhúmedo; **d** Sitio Húmedo; **e** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Correlación Contenido Gravimétrico de H₂O y % de Arcillas. La relación entre el CG de H₂O y el % de Arcillas en el suelo en la estación seca ($\rho = -0.52$, $P = 0.001$) y en la lluviosa ($\rho = -0.65$, $P < 0.001$) fue negativa, es decir, la humedad en los suelos disminuyó cuando el contenido de arcillas en los suelos aumentó (Figura 11, Cuadro 9).

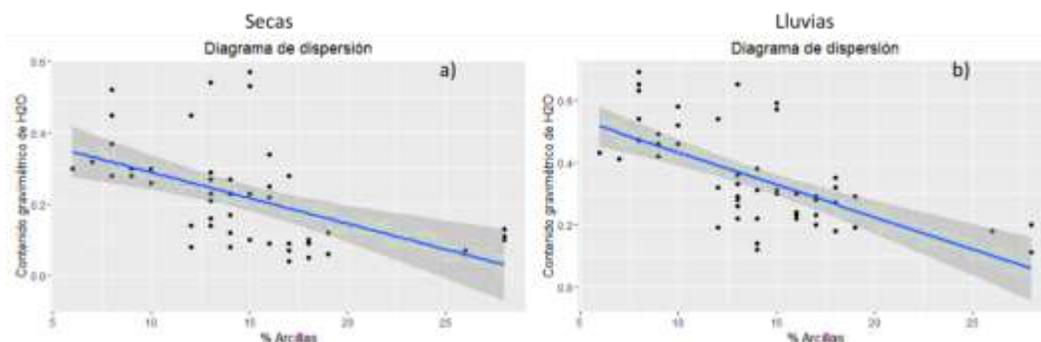


Figura 11. Diagramas de dispersión del Contenido gravimétrico de H₂O y del % de Arcillas en el suelo **a)** Estación seca **b)** Estación lluviosa.

Correlación Contenido Gravimétrico de H₂O y densidad del suelo. La relación entre el CG de H₂O y la densidad del suelo dependió de la temporada y no de las prácticas de manejo. En época seca la humedad disminuyó con el aumento de la densidad del suelo ($\rho = -0.42$, $P < 0.001$), sin embargo, en época de lluvias el comportamiento de una variable fue independiente de la otra variable ($\rho = 0.21$, $P = 0.14$) (Figura 12, Cuadro 9).

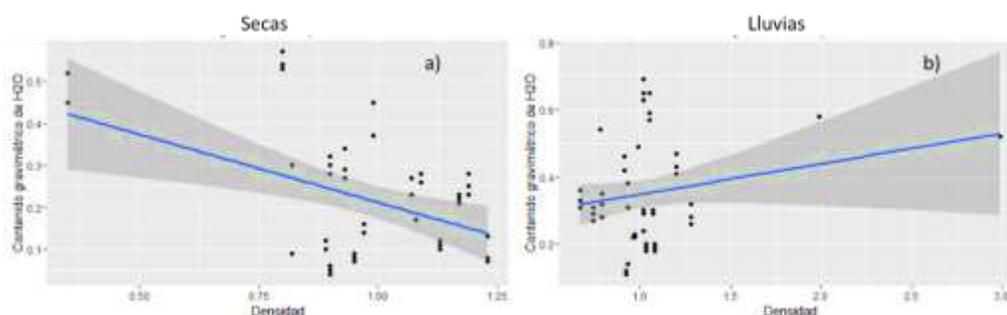


Figura 12. Diagramas de dispersión del Contenido gravimétrico de H₂O y de la densidad aparente del suelo **a)** Estación seca **b)** Estación lluviosa.

Cuadro 9. Matriz de correlación entre variables

	Arcillas	CG	Densidad	COS
Arcillas	1	-0.65*	-0.19	-0.26
CG	-0.51*	1	0.21	0.61*
Densidad	0.39	-0.42*	1	-0.08
COS	-0.06	0.06	-0.46	1

*Significancia < 0.05. Casillas grises corresponden a la estación seca y casillas blancas a la estación lluviosa

Indicador Densidad del suelo. La densidad aparente del suelo no fue afectada por las prácticas de manejo de los sistemas productivos. Los valores de densidad oscilaron entre 0.82 y 1.13 g^{-1} suelo por cm^3 en los cinco sitios del gradiente de precipitación (**Figura 13, cuadro A3**).

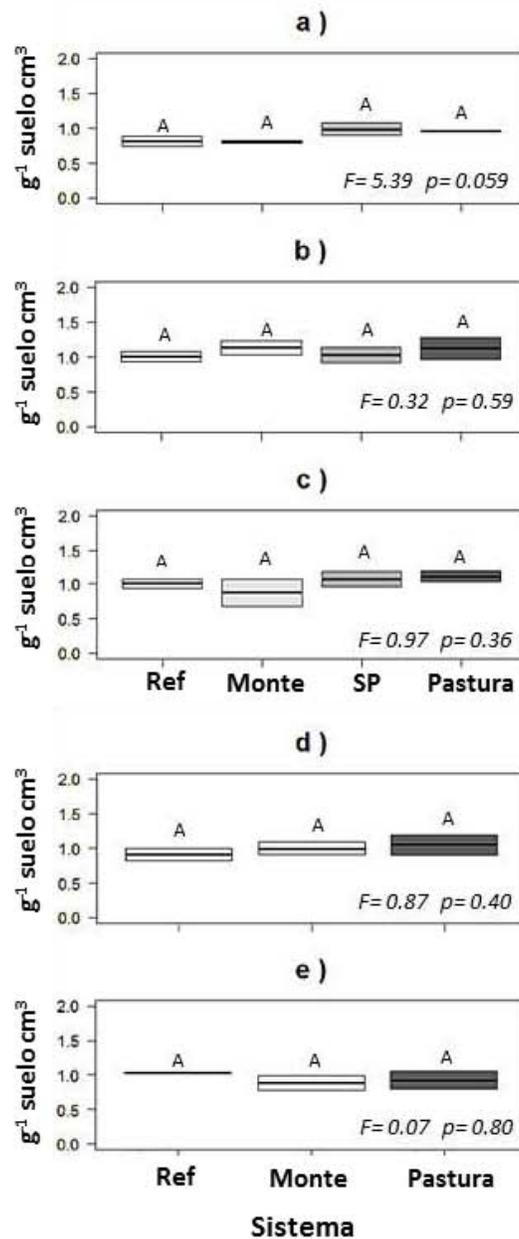


Figura 13. Boxplot de la densidad del suelo (g^{-1} suelo cm^3) de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual. **a** Sitio Árido; **b** Sitio Semiárido; **c** Sitio Subhúmedo; **d** Sitio Húmedo; **e** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Servicio Ecosistémico Almacenamiento de C

Indicador Carbono Orgánico del Suelo. El contenido de COS fue mayor en los sitios extremos del gradiente, en el más árido y en el más húmedo, sin embargo, en ambas épocas el contenido de COS de los sitios secos fue afectado por las prácticas de manejo. El bosque de referencia de los sitios áridos tuvo significativamente mayor COS en el suelo que los sistemas de manejo, particularmente, el silvopastoril tuvo el menor contenido de COS (Figura 14, cuadro A4).

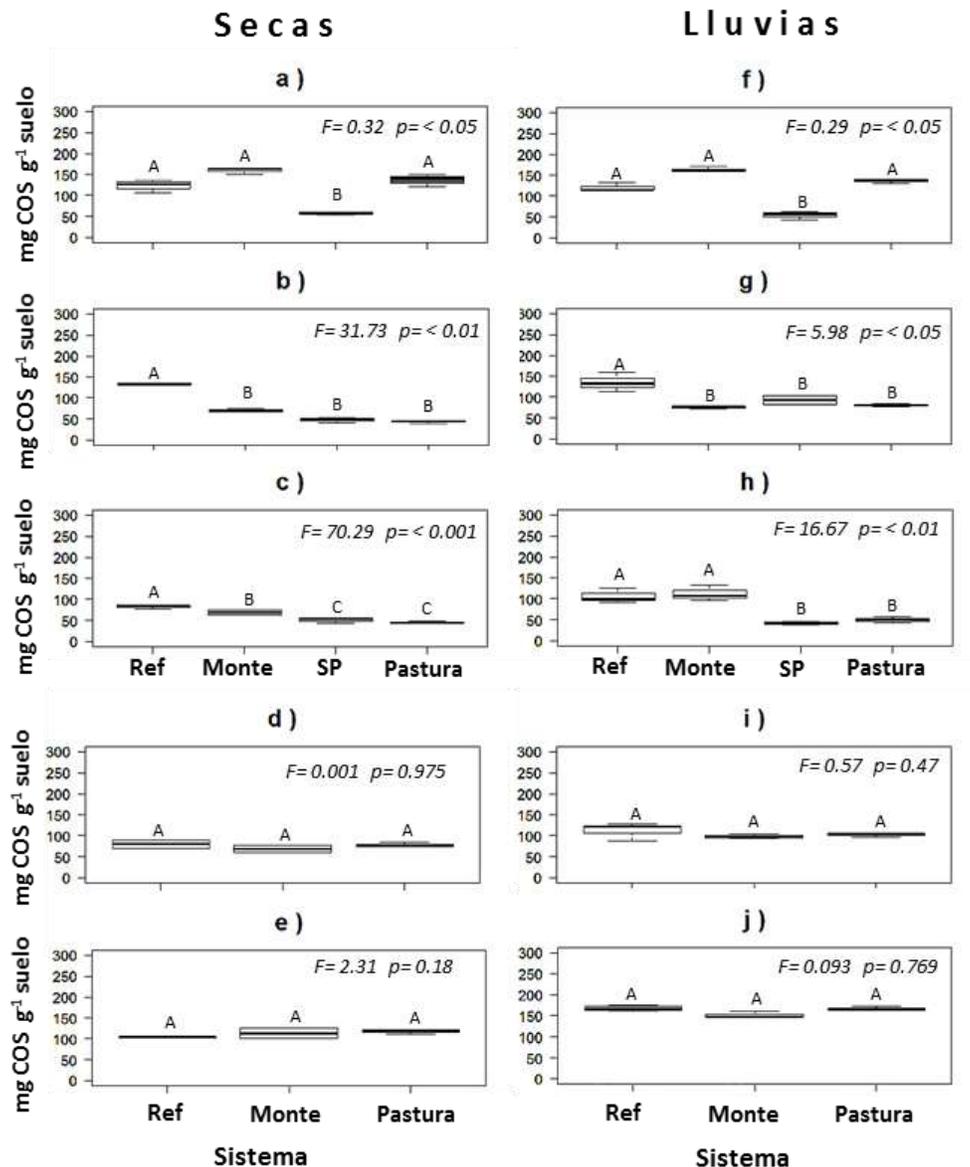


Figura 14. Boxplot de la concentración de carbono orgánico ($\text{mg}^{-1} \text{COS g}^{-1} \text{suelo}$) en el suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Correlación Carbono Orgánico del Suelo y Contenido Gravimétrico de H₂O. La relación entre el contenido de COS y el CG de agua dependió de la temporalidad. En la estación seca no existió dependencia entre las variables, sin embargo, en la época de lluvias el aumento en la humedad en el suelo fue consistente con el aumento del contenido de COS ($\rho = 0.61$, $P < 0.05$) (Figura 15, cuadro 9).

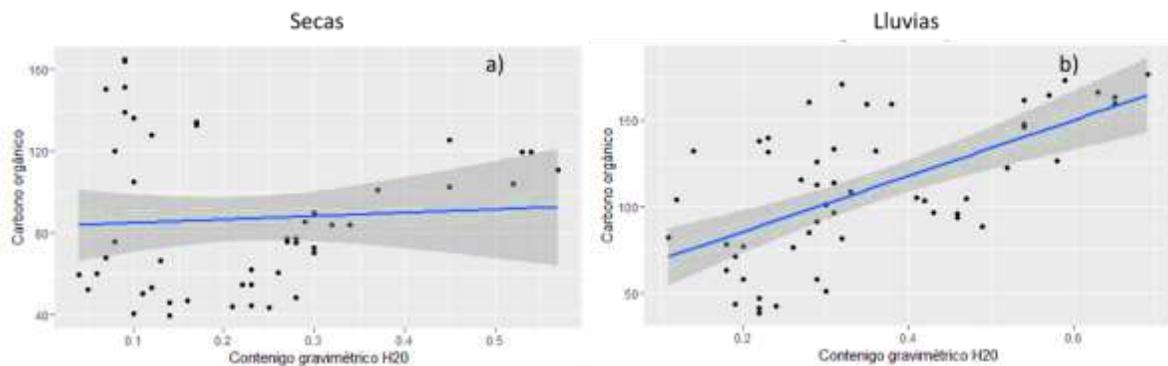


Figura 15. Diagramas de dispersión del Carbono orgánico del suelo y el contenido gravimétrico de H₂O en el suelo **a)** Estación seca **b)** Estación lluviosa.

Servicio Ecosistémico Fertilidad del suelo

Indicador pH. El pH del suelo fue más ácido en los sitios húmedos respecto al suelo de los sitios áridos, sin embargo, en todos los sitios el pH fue afectado por las prácticas de manejo. El bosque de referencia tuvo significativamente el pH menos ácido que los sistemas de manejo, particularmente, la pastura tuvo el pH más ácido en temporada seca y de lluvias (**Figura 16, Cuadro A5**).

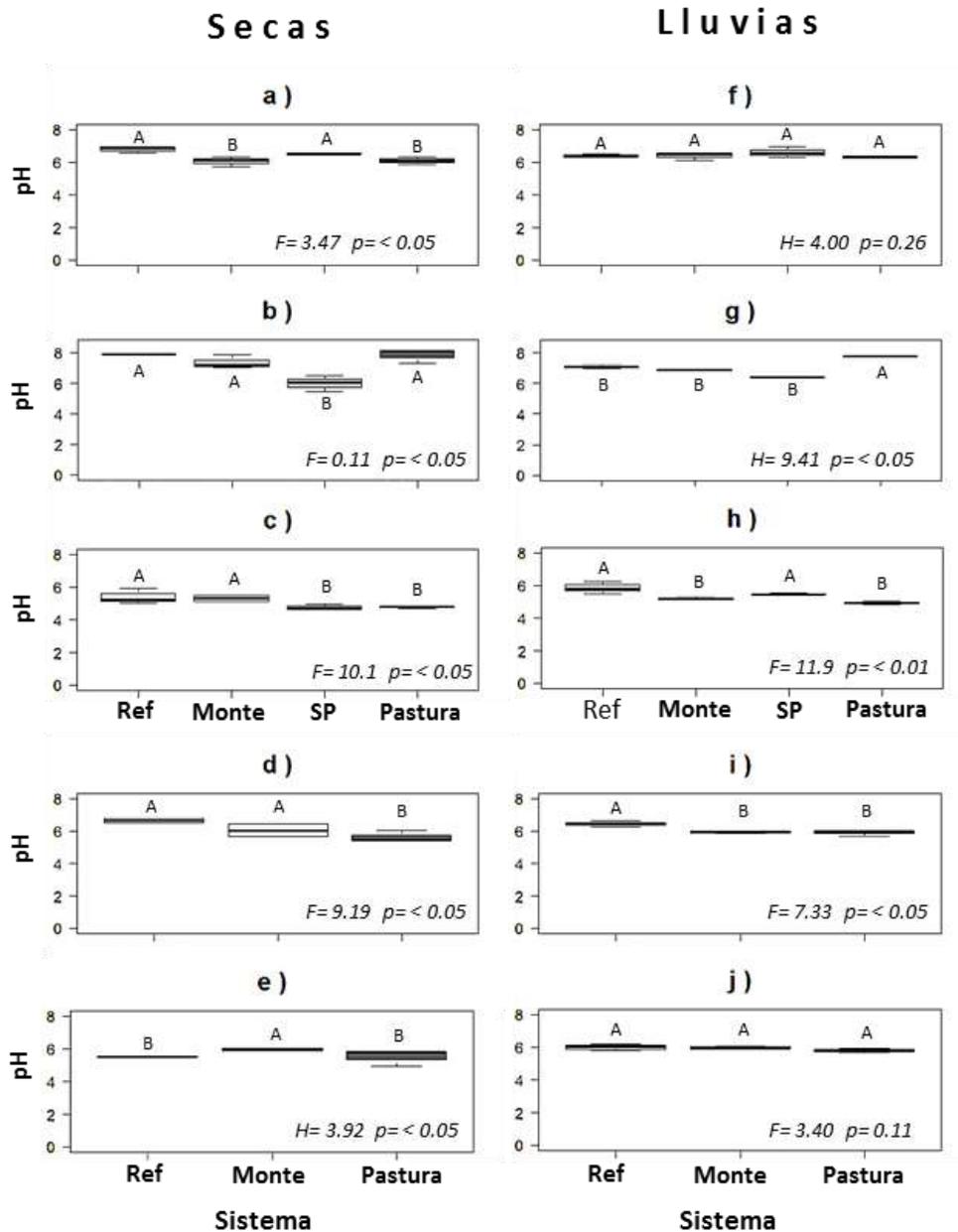


Figura 16. Boxplot del pH (H₂O) del suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Indicador Nitrógeno total. El contenido de Nt en el suelo en ambas estaciones fue mayor en los sitios áridos respecto a los sitios húmedos, sin embargo, solo en los sitios áridos el contenido de Nt fue afectado por las prácticas de manejo. El bosque de referencia de los sitios áridos tuvo significativamente mayor contenido de Nt que los sistemas de manejo, especialmente, el sistema silvopastoril tuvo el menor contenido de Nt en el suelo (Figura 17, Cuadro A6).

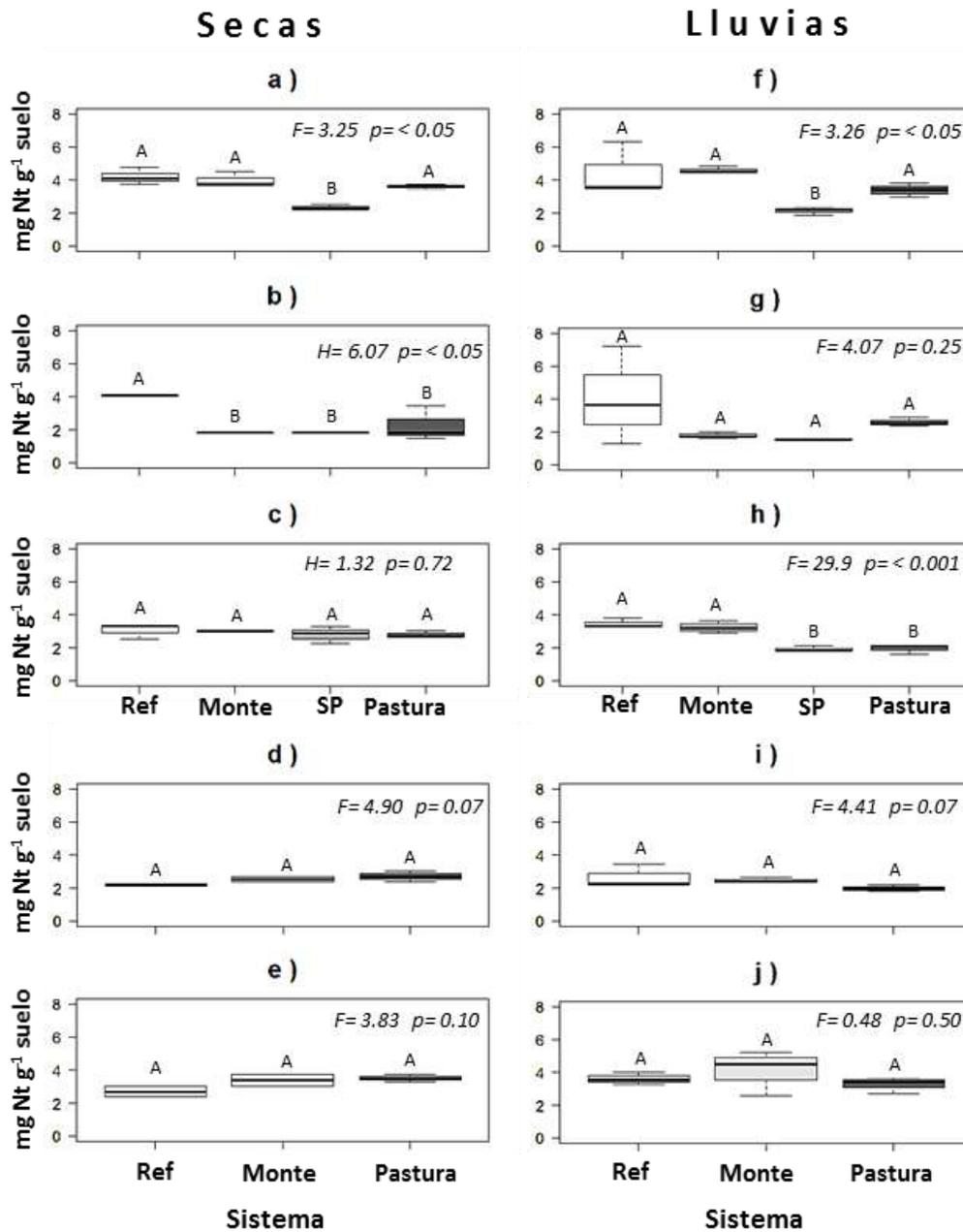


Figura 17. Boxplot de la concentración de nitrógeno total ($\text{mg}^{-1} \text{N g}^{-1} \text{suelo}$) en el suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Indicador Relación Carbono Orgánico del Suelo: Nitrógeno total. La relación COS: Nt en el suelo fue mayor en la época lluviosa respecto a la seca; asimismo, en ambas estaciones fue mayor en los sitios húmedos respecto a los sitios áridos, sin embargo, solo en los sitios áridos la relación COS: Nt fue afectada por las prácticas de manejo. El bosque de referencia de los sitios áridos tuvo significativamente mayor relación COS: Nt en el suelo que los sistemas de manejo, particularmente, el sistema silvopastoril tuvo los valores más bajos de relación COS: Nt en el suelo (**Figura 18, Cuadro A7**).

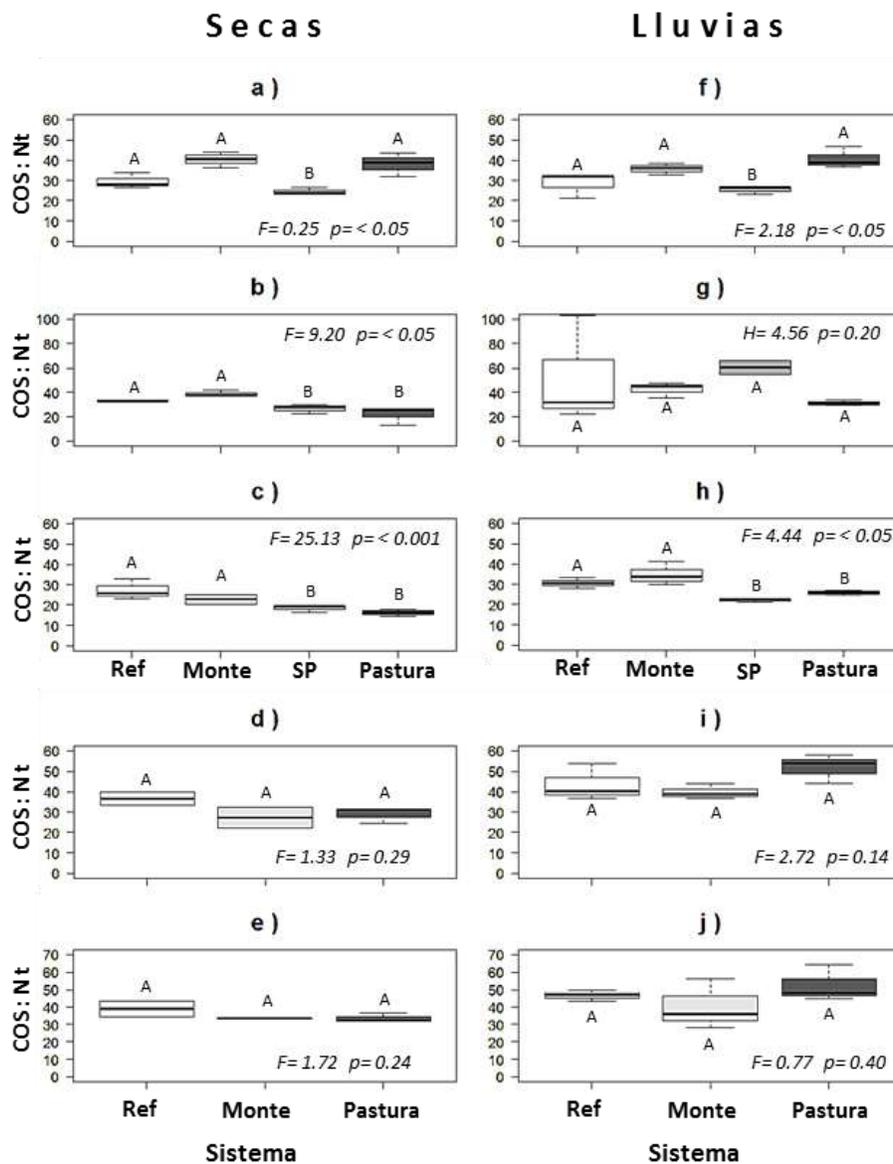


Figura 18. Boxplot de la relación carbono orgánico: nitrógeno total en el suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Indicador Amonio. El contenido de NH_4 en el suelo fue menor hasta en doce magnitudes en sitios áridos respecto a los sitios húmedos, sin embargo, en la estación seca las prácticas de manejo afectaron el contenido de NH_4 en el suelo en la mayoría de los sitios. El bosque de referencia en ambas estaciones tuvo significativamente mayor contenido de NH_4 que los sistemas de manejo, particularmente, el silvopastoril y la pastura tuvieron menor NH_4 en el suelo (Figura 19, Cuadro A8).

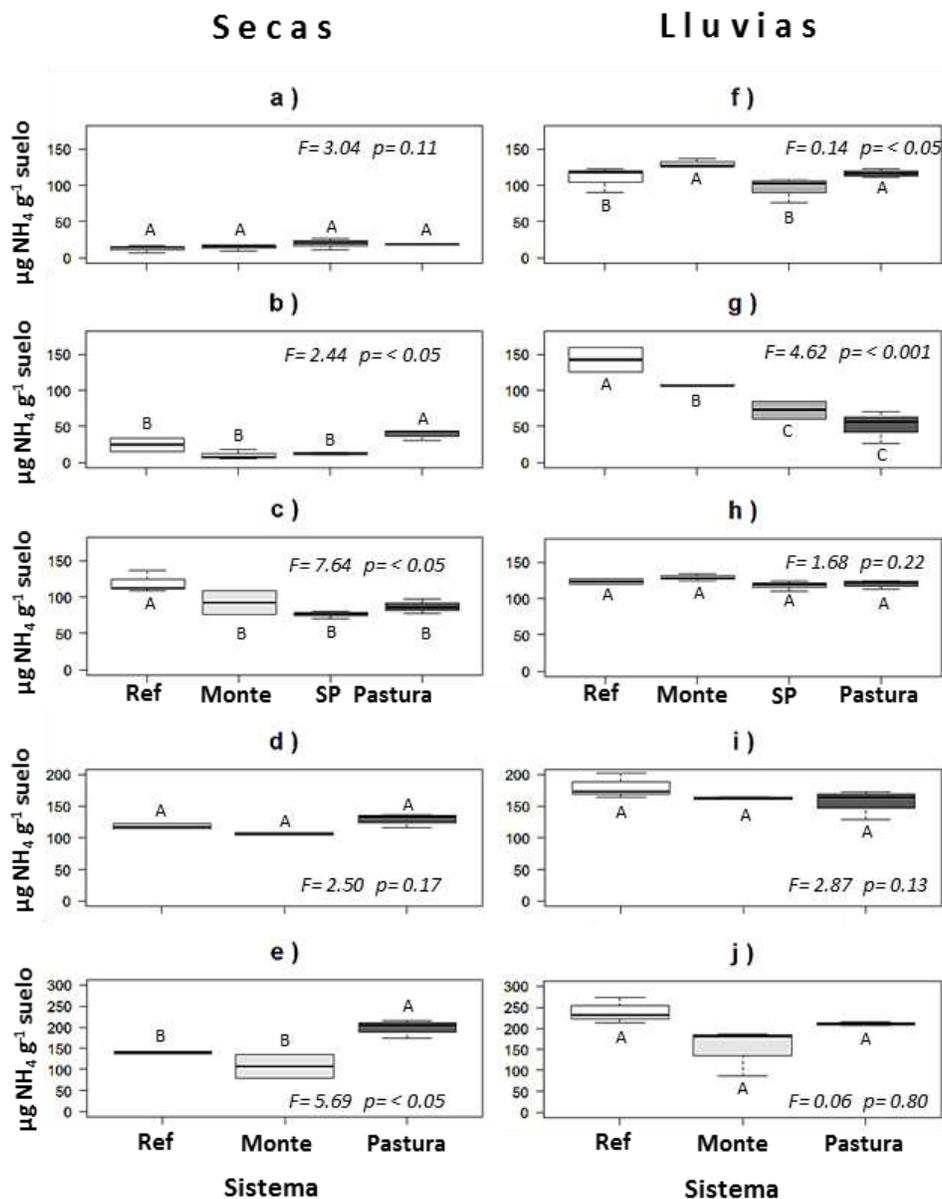


Figura 19. Boxplot de la concentración de amonio ($\mu\text{g}^{-1} \text{NH}_4 \text{g}^{-1} \text{suelo}$) en el suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Indicador Nitrógeno mineral. El contenido de Nm en el suelo en ambas estaciones fue mayor en los sitios con mayor precipitación respecto a los sitios más secos, sin embargo, en la estación lluviosa las prácticas de manejo afectaron el contenido de Nm en el suelo. El bosque de referencia en la época de lluvias tuvo los valores más altos de Nm, particularmente, el silvopastoril tuvo los valores más bajos; el monte y la pastura también estuvieron por debajo de la referencia pero en menor magnitud respecto al silvopastoril (Figura 20, Cuadro A9).

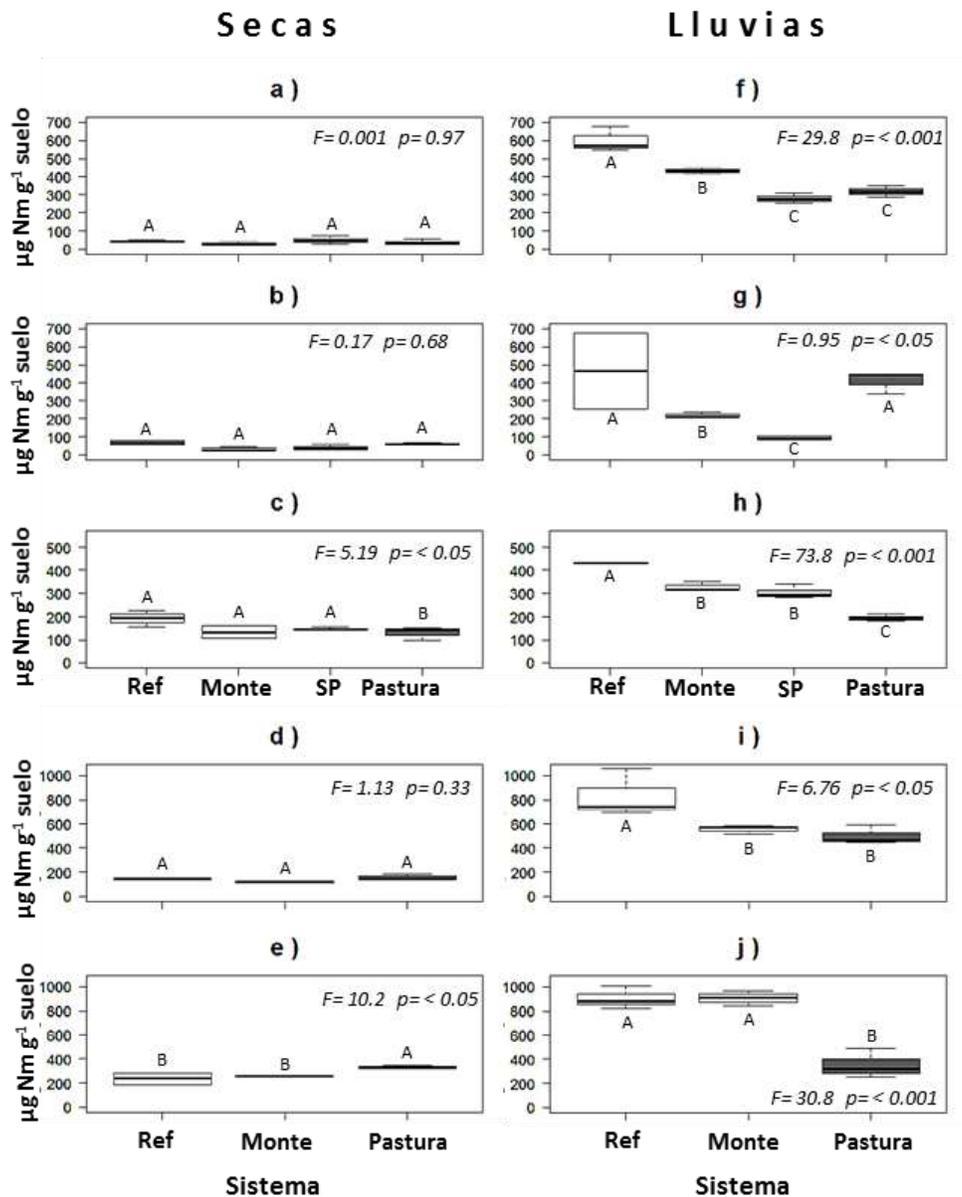


Figura 20. Boxplot de la concentración de nitrógeno mineral ($\mu\text{g}^{-1} \text{N g}^{-1}$ suelo) del suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Indicador Mineralización Neta del Nitrógeno. La MNN en los suelos fue mayor en los sitios húmedos respecto a los sitios áridos, sin embargo, solo en los sitios secos la MNN fue afectada por las prácticas de manejo. En época seca el bosque de referencia del sitio más árido tuvo significativamente mayor MNN en el suelo que los sistemas de manejo, particularmente que el silvopastoril y la pastura. En contraste, en la temporada de lluvias el sistema monte tuvo la MNN del suelo más alta de los sistemas de manejo; inclusive fue más alta que el bosque de referencia (Figura 21, cuadro A10).

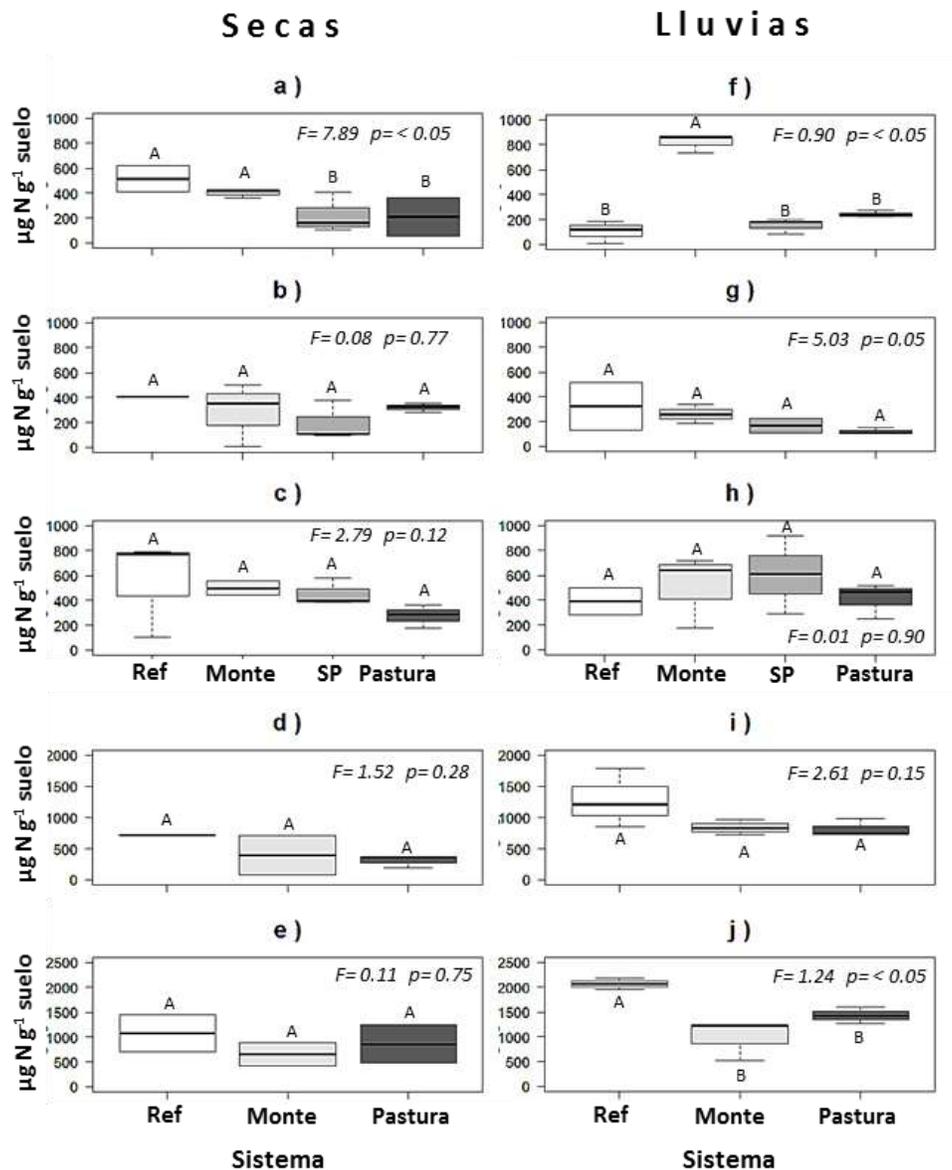


Figura 21. Boxplot de la mineralización del nitrógeno ($\mu\text{g}^{-1} \text{N g}^{-1}$ suelo) del suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Indicador Nitrógeno en Biomasa Microbiana. El contenido de NBM en los suelos fue mayor en los sitios húmedos respecto a los sitios áridos, sin embargo, en ambas épocas los sitios áridos fueron afectados por las prácticas de manejo. El bosque de referencia de los sitios áridos tuvieron el mayor contenido de NBM en el suelo, en contraste, el monte y la pastura fueron los sistemas con menos NBM en el suelo (Figura 22, Cuadro A11).

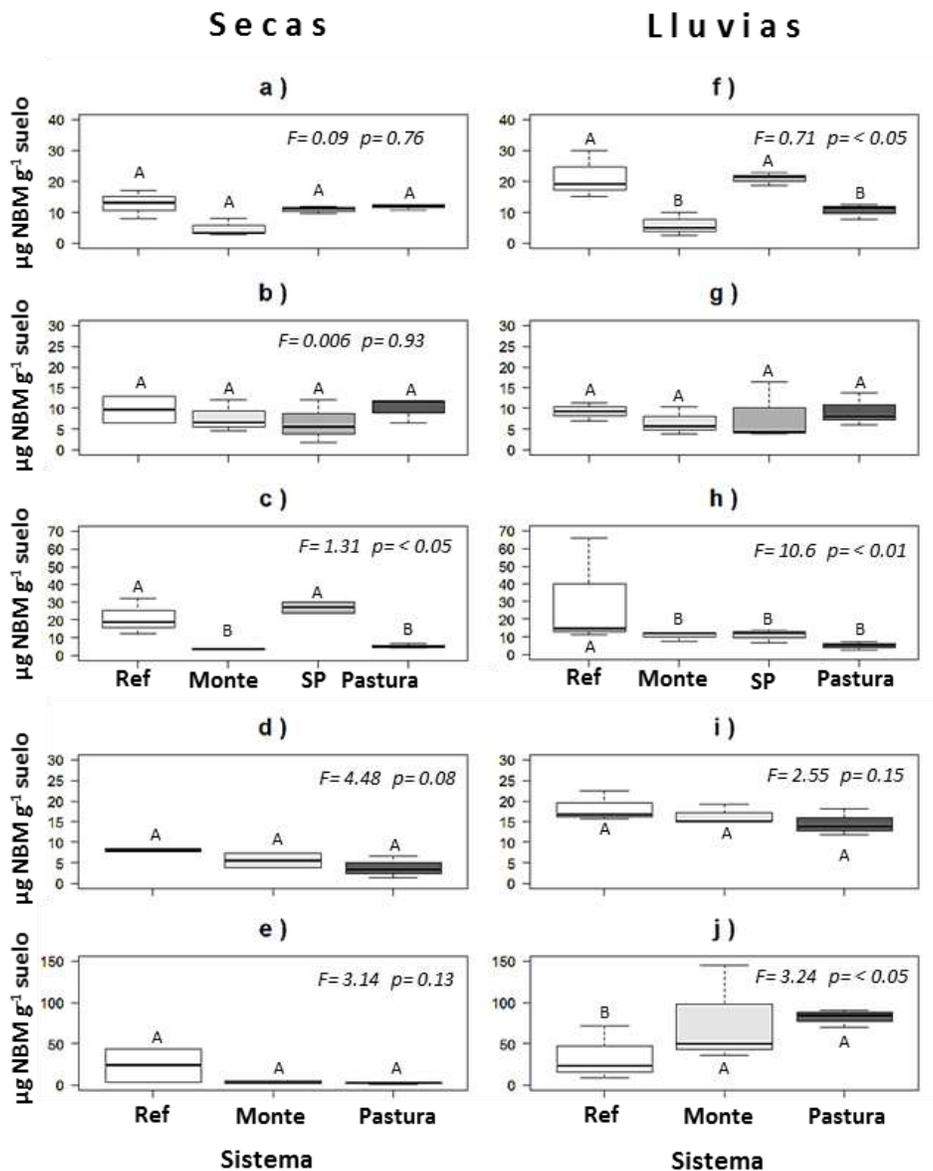


Figura 22. Boxplot de la concentración de nitrógeno en biomasa microbiana (μg^{-1} NBM g^{-1} suelo) en el suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Indicador Fósforo total. El contenido de Pt en los suelos fue mayor en sitios húmedos respecto a los sitios áridos del estudio, sin embargo, en el sitio con mayor humedad el contenido de Pt fue afectado por las prácticas de manejo. La pastura tuvo significativamente mayor contenido de Pt en el suelo que el monte; inclusive que el bosque de referencia (**Figura 23, Cuadro A12**).

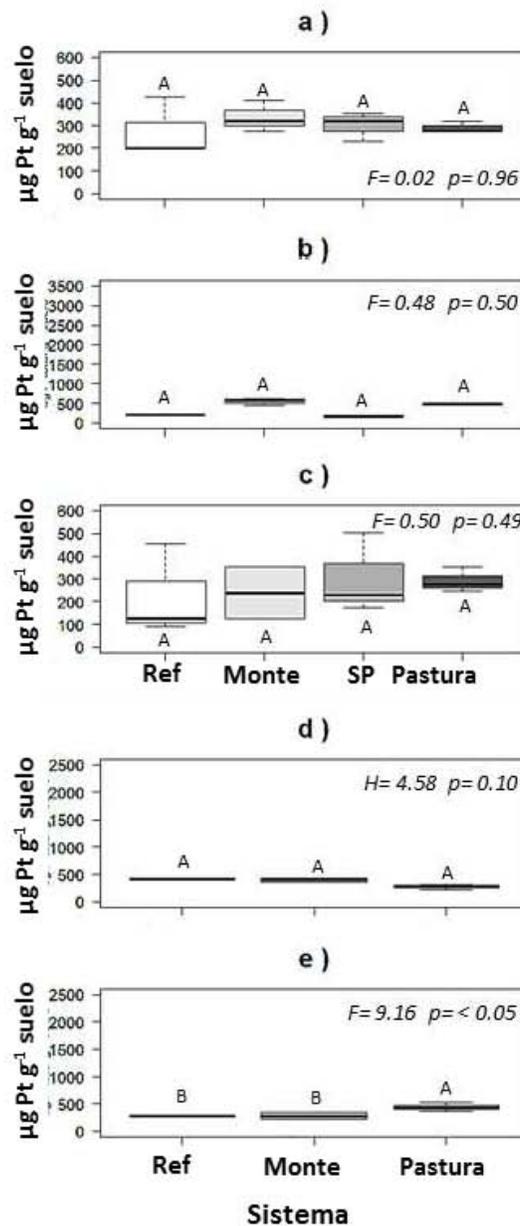


Figura 23. Boxplot de la concentración de fósforo total ($\mu\text{g}^{-1} \text{P g}^{-1}$ suelo) en el suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual. **a** Sitio Árido; **b** Sitio Semiárido; **c** Sitio Subhúmedo; **d** Sitio Húmedo; **e** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Indicador Fósforo. El contenido de PO_4 en los suelos fue mayor en los sitios áridos respecto a los sitios húmedos (contrario a lo ocurrido en las variables anteriores), sin embargo, en los sitios áridos el contenido de PO_4 fue afectado por las prácticas de manejo. El bosque de referencia de los sitios áridos tuvo significativamente menor contenido de PO_4 en el suelo que los sistemas de manejo, particularmente, el monte y la pastura tuvieron los mayores valores de PO_4 en el suelo (Figura 24, Cuadro A13).

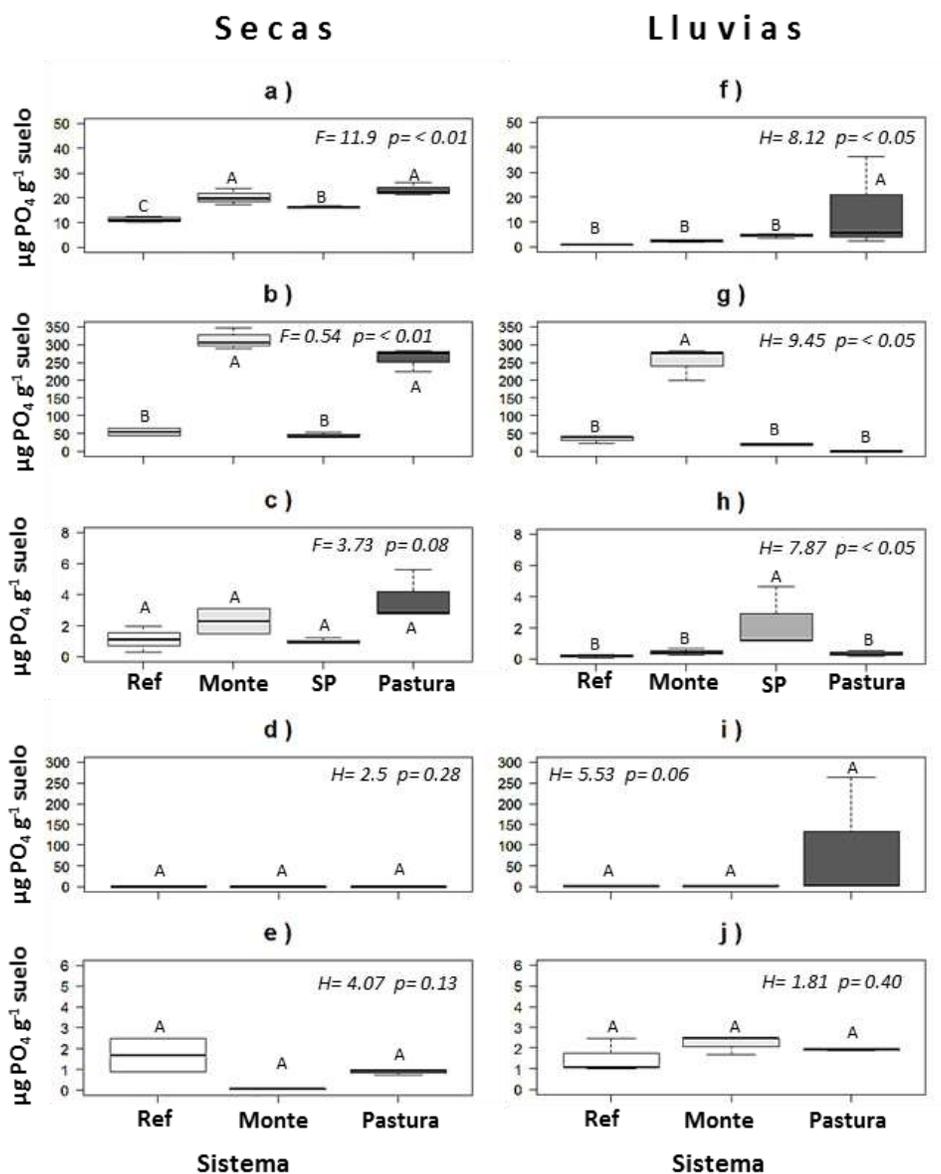


Figura 24. Boxplot de la concentración de fósforo disponible ($\mu\text{g}^{-1} \text{PO}_4 \text{g}^{-1}$ suelo) en el suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Síntesis de los Servicios Ecosistémicos que proveen los sistemas de producción

La capacidad de retención de agua en los suelos fue mayor en los sitios húmedos respecto a los sitios áridos, sin embargo, en la época seca y en la época lluviosa la retención de agua fue afectada por las prácticas de manejo. El bosque de referencia retuvo significativamente mayor agua que los sistemas de manejo, particularmente, el sistema silvopastoril tuvo la menor retención de agua en el suelo.

El almacenamiento de C en los suelos en ambas estaciones fue afectado por las prácticas de manejo en los sitios áridos, específicamente, el sistema silvopastoril tuvo el menor almacenamiento de C en el suelo. En contraste, en los sitios húmedos el almacenamiento de C no denotó ser afectado por las prácticas de manejo.

La fertilidad del suelo fue mayor en los sitios húmedos respecto a los sitios áridos, sin embargo, en la temporada seca la fertilidad de los sitios áridos fue afectada por las prácticas de manejo, específicamente, el sistema silvopastoril tuvo menor contenido de nutrientes. En contraste, en ambas temporadas en los sitios húmedos la fertilidad del suelo no se vio afectada por las prácticas de manejo.

Diservicio Ecosistémico Emisiones de CO₂

Indicador Respiración Basal del Suelo. La RBS en ambas estaciones fue mayor en los sitios áridos respecto a los sitios húmedos, sin embargo, solo en los sitios áridos la RBS fue afectada por las prácticas de manejo. La pastura tuvo significativamente mayor RBS que los otros sistemas de manejo; inclusive que el bosque de referencia (Figura 25, Cuadro A14).

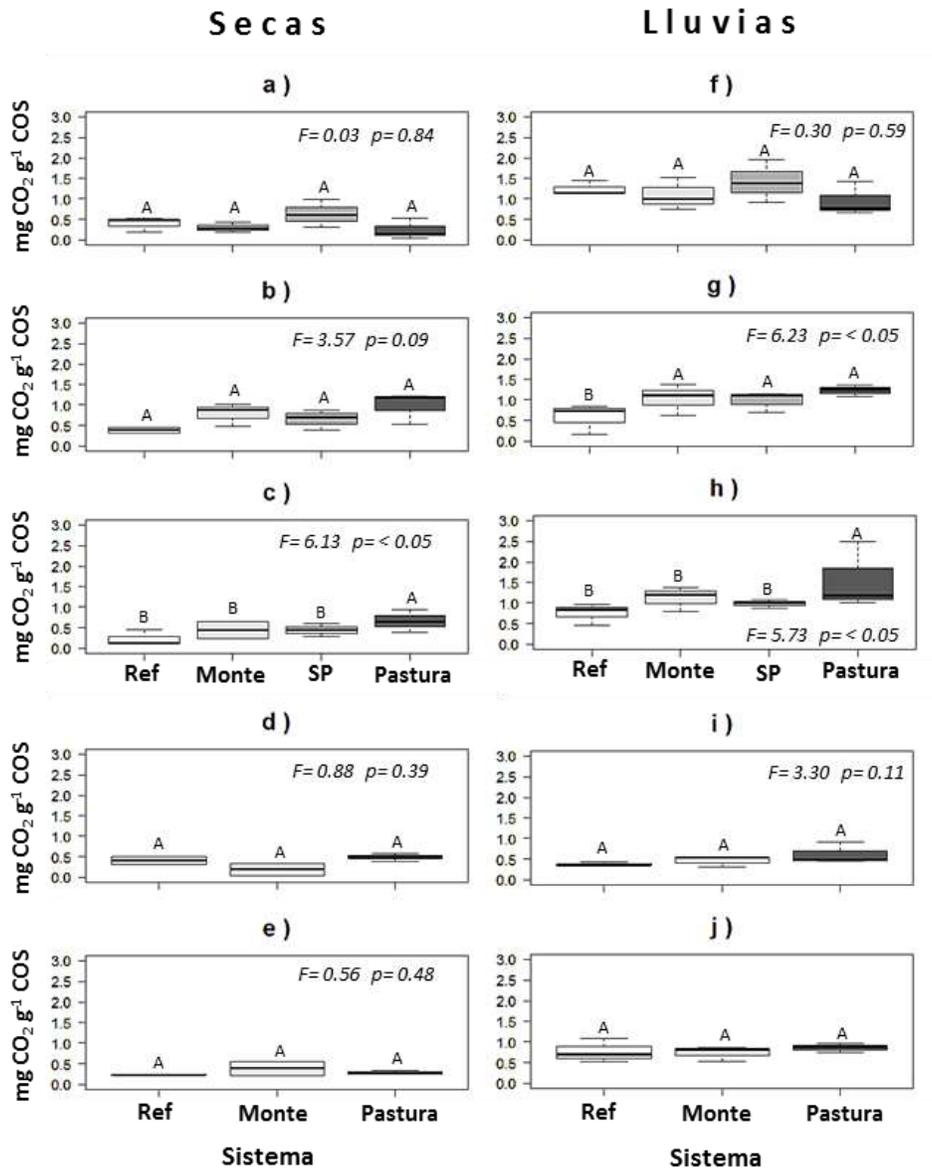


Figura 25. Boxplot de la respiración basal del suelo ($\text{mg}^{-1} \text{CO}_2 \text{g}^{-1} \text{COS}$) de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Indicador Carbono en Biomasa Microbiana. El contenido de CBM en los suelos fue mayor en sitios áridos respecto a los sitios húmedos en la época seca, en contraste, en la época lluviosa el contenido de CBM en los suelos fue mayor en sitios húmedos respecto a los sitios secos. El bosque de referencia de los sitios áridos tuvo significativamente mayor contenido de CBM que los sistemas de manejo, particularmente, la pastura tuvo los valores más bajos de CBM en el suelo (Figura 26, Cuadro A15).

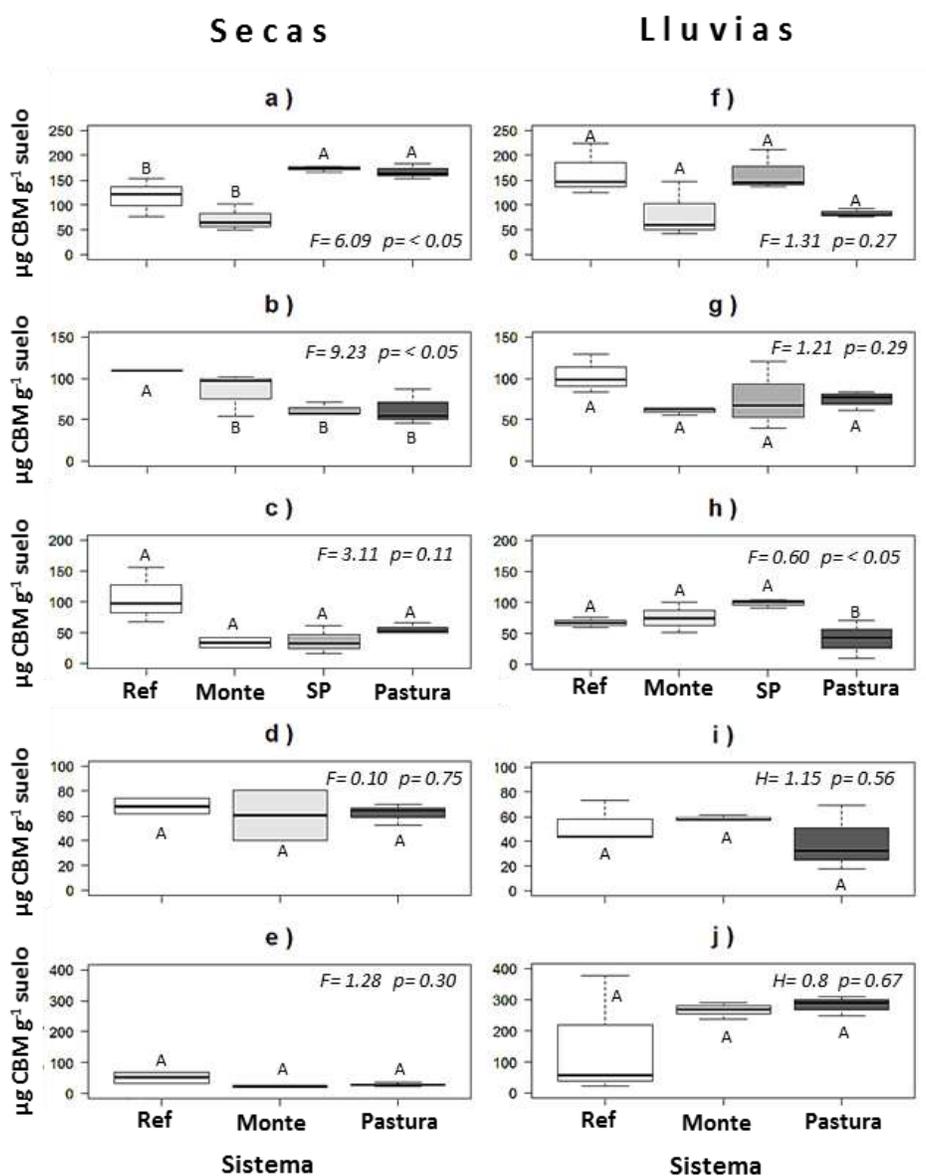


Figura 26. Boxplot de la concentración de carbono en biomasa microbiana (mg^{-1} CBM g^{-1} suelo) del suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Indicador Relación Respiración Basal del Suelo: Carbono en Biomasa Microbiana. La relación RBS: CBM en los suelos fue mayor en sitios húmedos respecto a los sitios áridos, sin embargo, en los sitios áridos de la época seca la relación fue afectada por las prácticas de manejo. El bosque de referencia de los sitios áridos tuvo significativamente menor relación RBS: CBM que los sistemas de manejo, particularmente, la pastura tuvo los mayores valores de RBS: CBM en el suelo. En contraste, en la temporada de lluvias la relación RBS: CBM solamente fue afectada en el sitio intermedio del gradiente; asimismo, la pastura tuvo valores mayores en cuatro magnitudes al bosque de referencia (Figura 27, Cuadro A16).

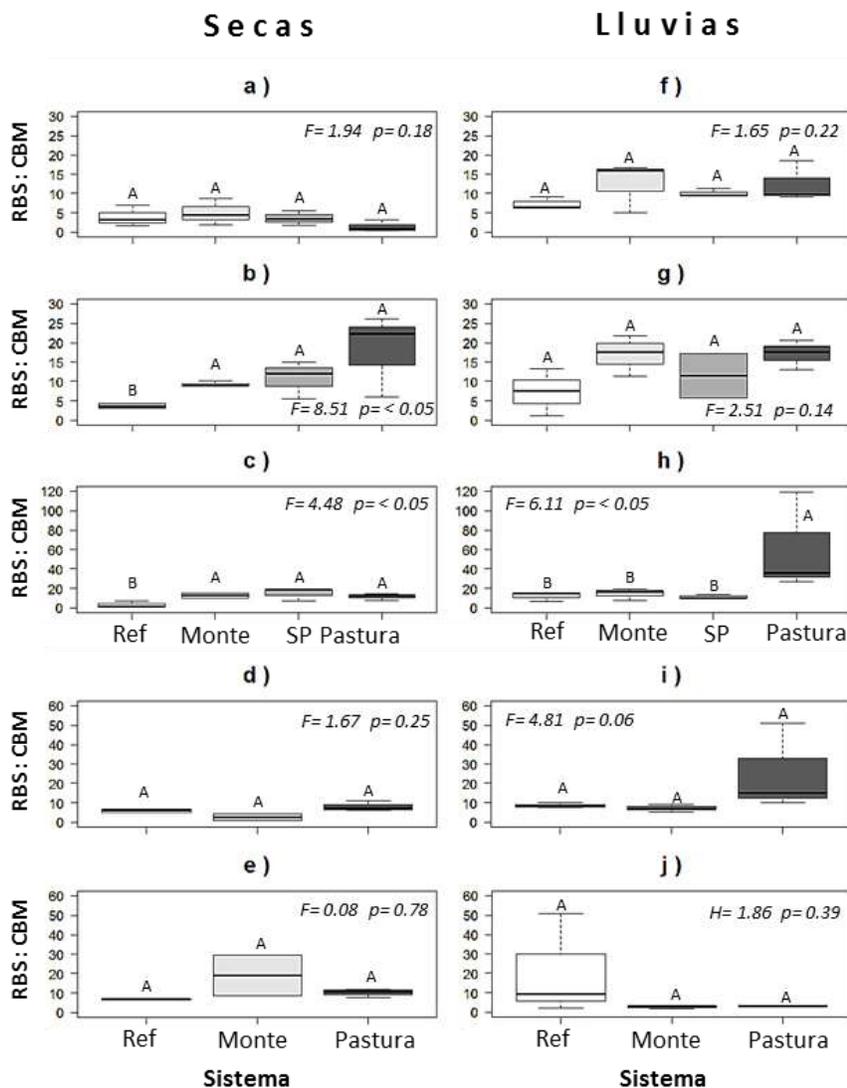


Figura 27. Boxplot de la relación respiración basal: carbono en biomasa microbiana del suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Diservicio Ecosistémico Contaminación de cuerpos de agua

Indicador Nitrato. El contenido de NO_3 en los suelos fue mayor en los sitios húmedos respecto a los sitios áridos, sin embargo, solamente en la época lluviosa el contenido de NO_3 fue afectado por las prácticas de manejo. El bosque de referencia de todos los sitios del gradiente tuvo significativamente mayor NO_3 que los sistemas de manejo, particularmente, la pastura tuvo el menor contenido de NO_3 en el suelo (Figura 28, Cuadro A17).

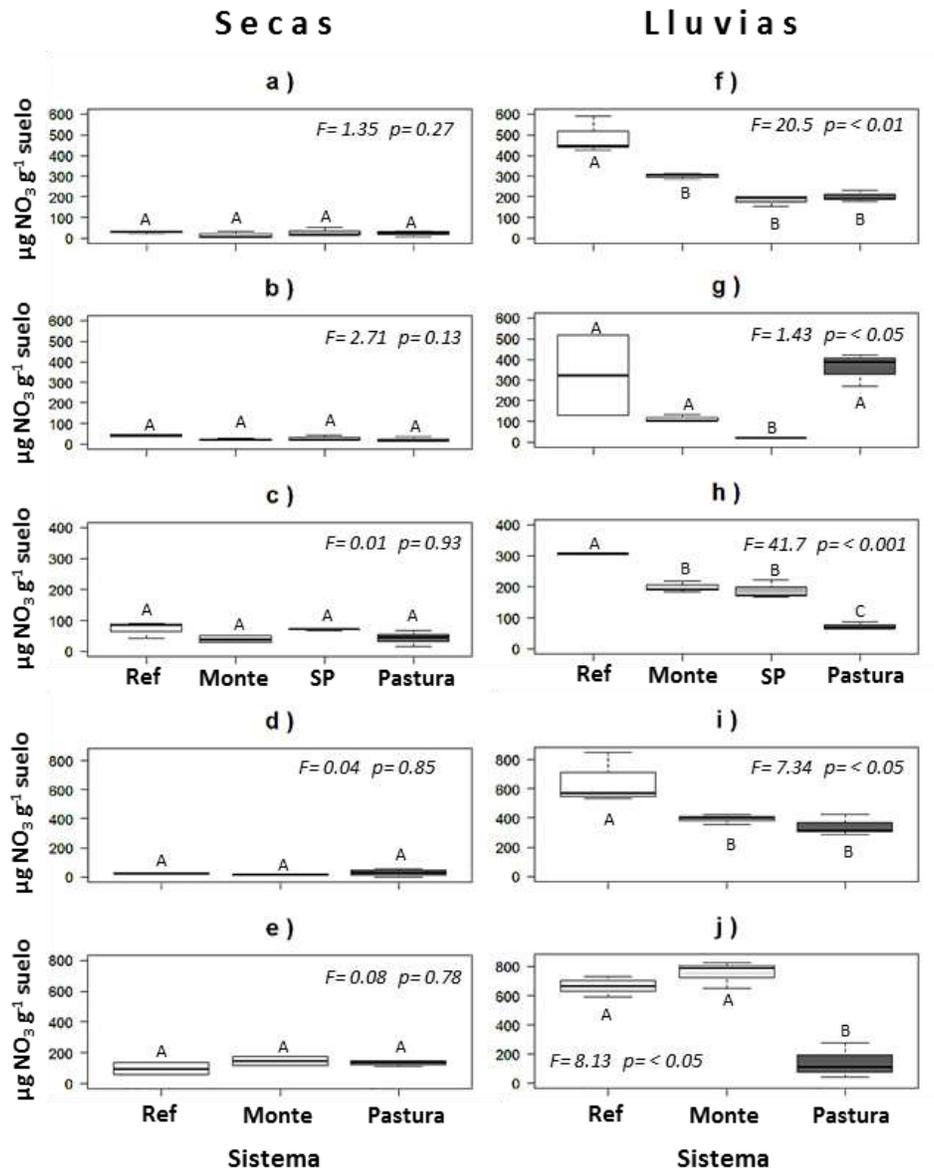


Figura 28. Boxplot de la concentración de nitrato en el suelo ($\mu\text{g}^{-1} \text{NO}_3 \text{ g}^{-1} \text{ suelo}$) de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Indicador Nitrificación Neta. La NN en los suelos fue mayor en los sitios húmedos respecto a los sitios áridos, sin embargo, en ambas estaciones en el sitio más árido la NN fue afectada por las prácticas de manejo. En general, el bosque de referencia tuvo significativamente mayor NN que los sistemas de manejo, particularmente, la pastura tuvo menor NN en el suelo (**Figura 29, Cuadro A18**).

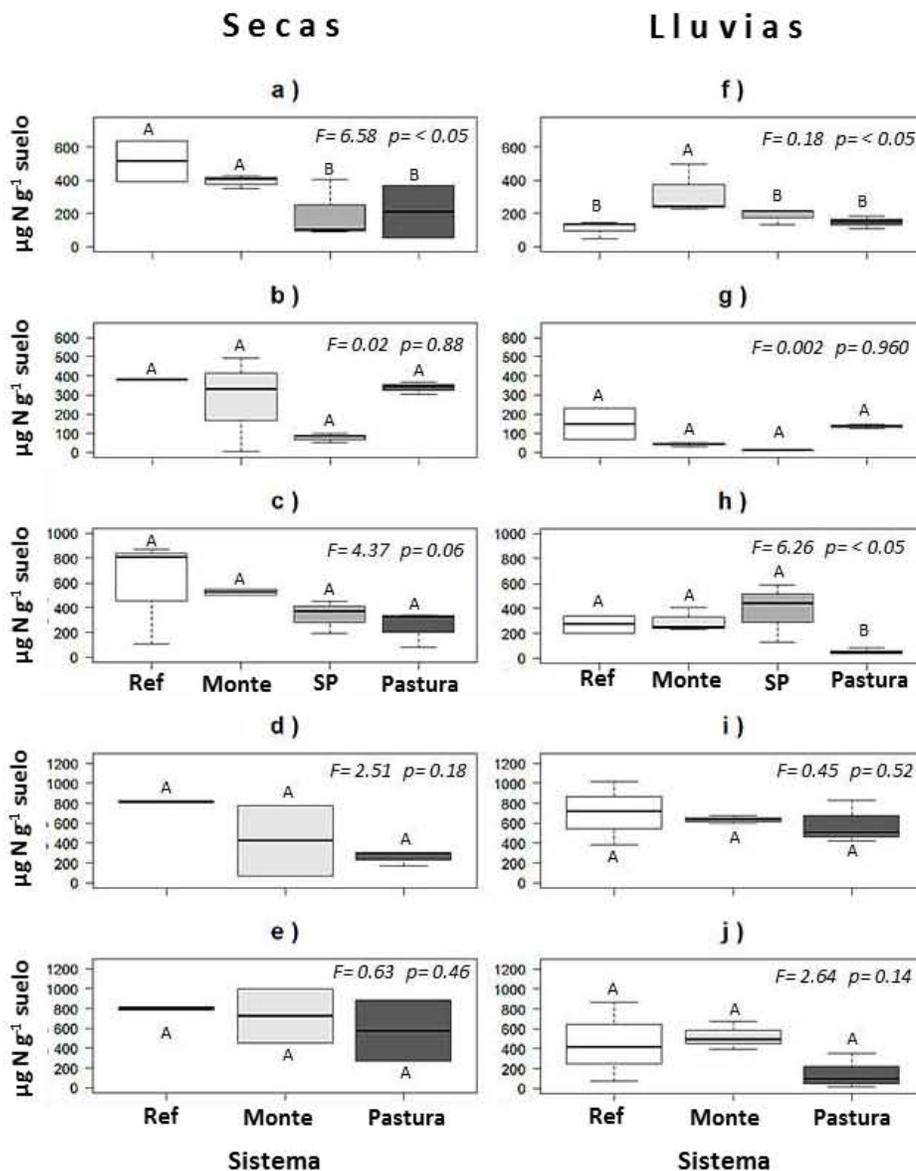


Figura 29. Boxplot de la nitrificación neta del suelo ($\mu\text{g}^{-1} \text{N g}^{-1} \text{suelo}$) de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Indicador Relación Nitrato: Amonio. La relación $\text{NO}_3:\text{NH}_4$ en los suelos fue mayor en los sitios áridos respecto a los húmedos en la época seca, sin embargo, en la época lluviosa fue mayor en los sitios húmedos respecto a los áridos. En la época lluviosa el bosque de referencia tuvo significativamente mayor relación $\text{NO}_3:\text{NH}_4$ que los sistemas de manejo, particularmente, la pastura tuvo la menor relación $\text{NO}_3:\text{NH}_4$ en el suelo (**Figura 30, Cuadro A19**).

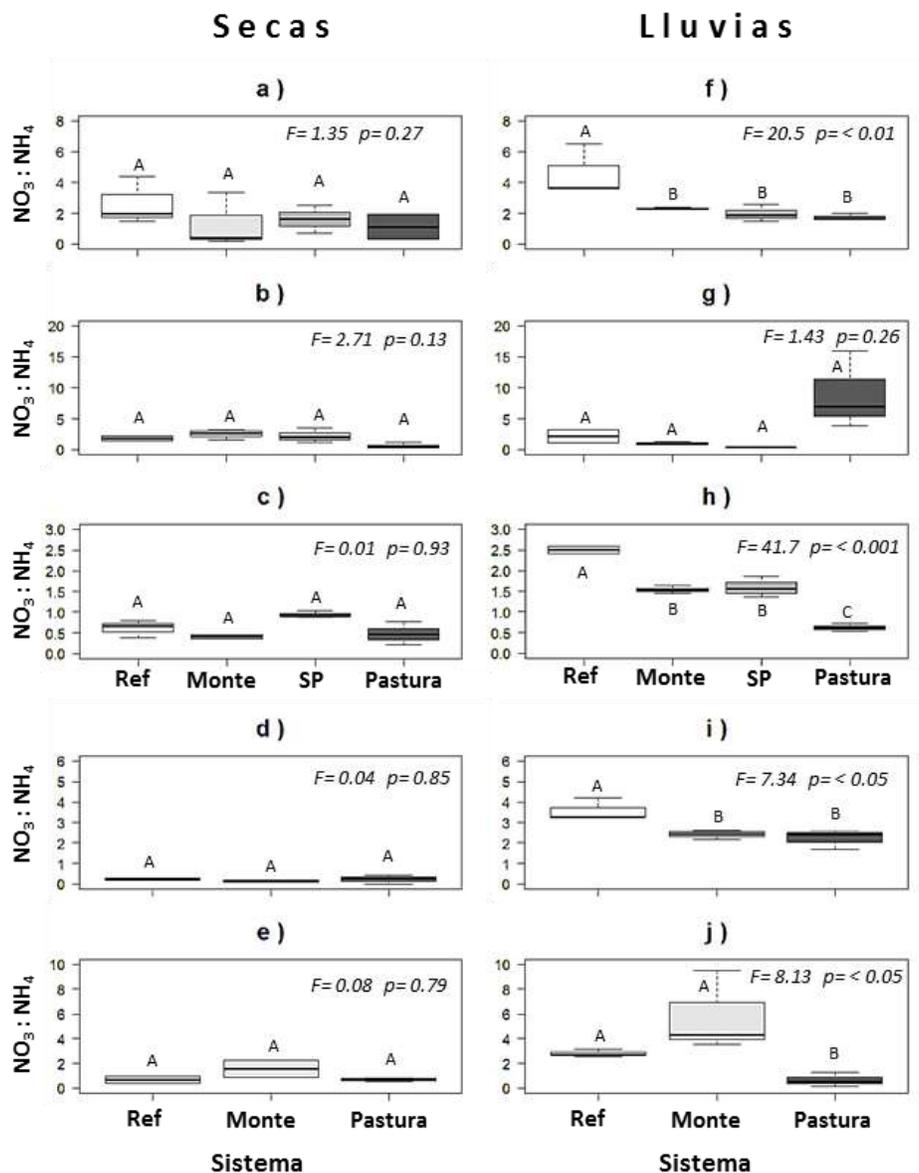


Figura 30. Boxplot de la relación nitrato: amonio del suelo decinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Indicador Relación Carbono en Biomasa Microbiana: Nitrógeno en Biomasa Microbiana. La relación CBM: NBM en los suelos fue mayor en los sitios áridos respecto a los sitios húmedos, sin embargo, solo en los sitios áridos la relación CBM: NBM fue afectada por las prácticas de manejo. El bosque de referencia tuvo significativamente menor relación CBM: NBM que los sistemas de manejo, particularmente, la pastura tuvo la mayor relación CBM: NBM en el suelo (Figura 31, Cuadro A20).

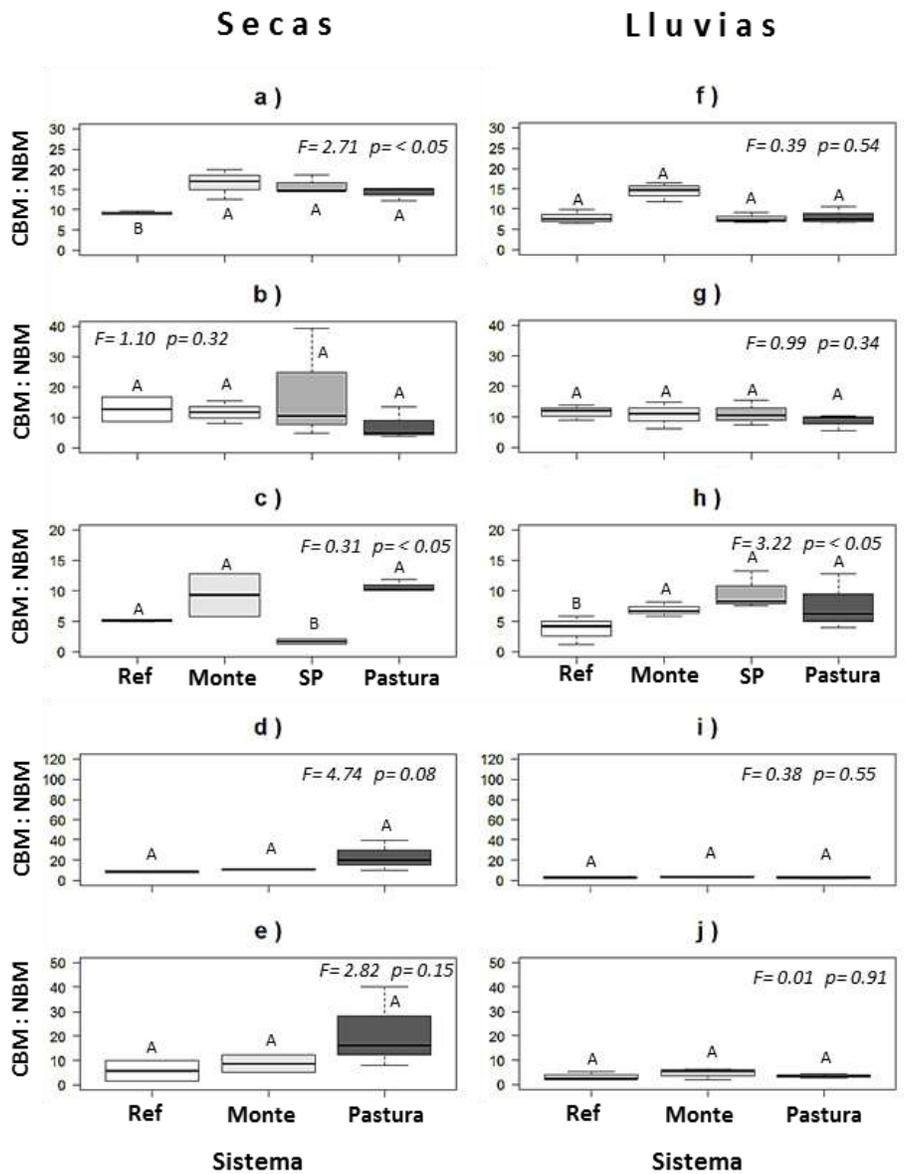


Figura 31. Boxplot de la relación carbono en biomasa: nitrógeno en biomasa microbiana del suelo de cinco sitios con un gradiente de precipitación media anual, en temporada seca y de lluvias. **a, f** Sitio Árido; **b, g** Sitio Semiárido; **c, h** Sitio Subhúmedo; **d, i** Sitio Húmedo; **e, j** Sitio Hiperhúmedo. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc entre los sistemas por sitio.

Síntesis de los Diservicios Ecosistémicos que proveen los sistemas de producción

Las emisiones de CO₂ de los suelos fueron mayores en la temporada lluviosa respecto a la temporada seca, sin embargo, en ambas estaciones las emisiones de los sitios áridos fueron afectadas por las prácticas de manejo. La mayor cantidad de emisiones de CO₂ la tuvieron los suelos de pasturas, consecuente a que las pasturas tuvieron significativamente mayor actividad biológica respecto a los otros sistemas de manejo.

La probabilidad de contaminación de cuerpos de agua fue mayor en la estación lluviosa respecto a la estación seca, particularmente en los sitios húmedos del gradiente. En la estación lluviosa la probabilidad de contaminación fue afectada por las prácticas de manejo en todos los sitios; el bosque de referencia tuvo significativamente mayor NO₃ en el suelo que los sistemas de manejo, particularmente, las pasturas tuvieron el menor contenido de NO₃ en el suelo.

Capítulo 4. Discusión



Intensificación de los sistemas productivos

La eficiencia del uso de forraje y su valor nutritivo dependen de factores como el clima, el suelo, la especie vegetal, la fertilización, la CA y el periodo de rotación; particularmente, la CA modifica la cantidad de pasto disponible para el ganado y define parte de la productividad del sistema (Murillo, 1999; Moreno & Molina, 2007; Luisoni, 2010). A medida que aumenta la defoliación, la capacidad de rebrote de la vegetación disminuye debido a que el tejido meristemático se daña por el ramoneo y se lacera por el pisoteo. Las consecuencias del ramoneo y del pastoreo excesivo se reflejan en la disminución de la densidad del forraje, el establecimiento de vegetación sin valor forrajero y del suelo expuesto a la erosión. Un sistema puede soportar mayor CA cuando la densidad y el valor nutritivo del forraje son altos, debido a que el forraje es más eficiente para alimentar a más ganado; asimismo, los períodos de pastoreo cortos (1 a 4 días) y los periodos de descanso largos de la parcela permiten que la planta no sea defoliada excesivamente y le permite un período de tiempo para su crecimiento (Murillo, 1999; Moreno & Molina, 2007).

El sitio árido fue el más intensificado por IR al tener periodos de descanso cortos y quemas anuales de vegetación. El sistema monte tuvo una baja CA y un periodo de descanso corto; sin embargo, el desconocido valor nutricional del forraje puede no estar siendo un alimento efectivo para el ganado. El silvopastoril tuvo una CA alta y un periodo de descanso corto; sin embargo, la alta productividad de la asociación de *G. ulmifolia* (1.1 a 5.3 t/ha/año MS) y *P. maximum* (10 y 30 t/ha/año MS) pudieron disminuir los efectos de la alta intensificación con forraje eficiente (Giraldo, 1998; Villa-Herrera et al., 2009; Bertín et al., 2010). La pastura tuvo una CA baja y un periodo de descanso corto con productividad de *C. dactylon* (7.5 t/ha/año MS) (Ames et al., 2014).

Los tres sistemas del sitio semiárido fueron los de mayor intensificación por CA de este estudio. El sistema monte tuvo una CA muy alta y un periodo de descanso medio. El silvopastoril tuvo una CA alta y un periodo de descanso prolongado; sin embargo, este sistema tiene una gran productividad forrajera derivado de la asociación de *B. brizantha* (1.6 t/ha/año MS) y *L. leucocephala* (20 t/ha/año MS). La pastura tuvo una CA alta y un periodo de descanso prolongado y utilizaron el forraje *P. maximum* (10 y 30 t/ha/año MS) como forraje (Castillo et al., 2008; Villa-Herrera et al., 2009).

El sitio semihúmedo tuvo la CA y los periodos de rotación más equilibrados de todos los sitios. El monte no tuvo intensificación debido a que no tiene una CA ni rotación determinados. El silvopastoril con CA baja y periodos de descanso medios en asociación de *B. brizantha* (1.6 t/ha/año MS) y *C. argentea* (20 t/ha/año) tuvo valores similares a los silvopastoriles del árido y del semiárido. La pastura

tuvo baja CA con periodos de descanso medios y forraje *B. brizantha* y *C. nlemfuensis* (12 a 17 t/ha/año MS); este sistema combinó dos tipos de pasturas (Castillo et al., 2008; Villalobos & Arce, 2014). El sitio húmedo tuvo una CA baja y un periodo de recuperación nulo en el sistema monte y medio en la pastura. El forraje del monte es vegetación en sucesión y el de la pastura es *P. notatum* (5.5 t/ha/año MS) y *C. nlemfuensis* (12 a 17 t/ha/año MS) que se pudieron ver favorecidos por la alta precipitación (Juárez-Hernández et al., 2004; Villalobos & Arce, 2014). El monte del sitio hiperhúmedo no tiene una CA ni de rotación determinados. La pastura tuvo una CA baja y un periodo de recuperación corto con *B. brizantha* (1.6 t/ha/año MS) (Castillo et al., 2008).

Devi y colaboradores (2014) evaluaron los efectos del pastoreo en el C, N y P en suelos de pastizales subtropicales no pastoreados, con pastoreo moderado (12-15 UA:ha pastando 1 mes por 12 meses de descanso) y con pastoreo intenso (12-15 UA:ha pastando por todo el año). Los resultados indicaron que el pastoreo moderado puede ser benéfico para las pasturas gracias al aumento de los almacenes de nutrientes. En el sitio húmedo (monte) e hiperhúmedo (pastura) los sistemas tuvieron pastoreo intenso, probablemente porque sus condiciones climáticas permiten la recuperación más pronta de la vegetación. Los sistemas con mayor intensificación y en condiciones más desfavorables para la recuperación del forraje estuvieron en los sitios áridos; el recurso limitante en los sitios con baja precipitación es el forraje, con la falta de forraje los pequeños productores sin otra alternativa disponible de tierra no tienen más opción que sobre pastorear sus parcelas para que el ganado no sufra pérdida de peso o inanición.

La intensificación de la producción se recomienda para satisfacer la demanda de productos pecuarios y para mejorar los medios de vida de los hogares rurales. El hecho de que las unidades de producción respondan o no a la intensificación depende de la disponibilidad de los recursos del productor, la situación familiar, el conocimiento y las alternativas de subsistencia. Las innovaciones en la producción ganadera sólo serán adoptadas por los pequeños agricultores si se ajustan a las prioridades y a los recursos de los hogares. La introducción de tecnologías debe ser de fácil desempeño, apropiación y procurando la valoración del contexto, la cultura y la economía campesinas (Moreno & Molina, 2007; Udo et al., 2011).

Provisión de SE y DSE en sistemas ganadero

Servicio Ecosistémico Retención de Agua en el suelo

La retención de humedad en los suelos fue mayor en los sitios húmedos respecto a los sitios áridos; particularmente, el bosque de referencia retuvo significativamente mayor agua que los sistemas de manejo. La retención de agua en los suelos de sistemas con diversidad de hierbas, arbustos y árboles como el bosque de referencia y el monte, permiten el desarrollo de mayor cobertura vegetal que protege al suelo de la incidencia del sol, que regula la temperatura y evita la pérdida de humedad en el suelo; asimismo, las raíces gruesas de la vegetación permiten que la macroporosidad del suelo aumente la retención de agua, incluso en sitios con poca precipitación (Hamza & Anderson, 2005; Bell et al., 2011).

Los resultados de la retención de humedad en el suelo del sistema silvopastoril no reflejaron las propiedades que un sistema compuesto de hierbas, arbustos y árboles puede tener; probablemente en consecuencia a que los silvopastoriles fueron los sistemas más intensificados por CA y por IR. El aumento de la cantidad de ganado y de su tiempo de estancia en la parcela pudo haber disminuido la disponibilidad de forraje que protege al suelo de la pérdida de humedad. A pesar de que los silvopastoriles buscan disminuir el impacto de la sequía en la producción de forraje, en este estudio el silvopastoril no amortiguó la pérdida de humedad en el suelo probablemente a las prácticas del manejo que disminuyeron la densidad de la vegetación en el sistema.

Servicio Ecosistémico Captura de Carbono en el suelo

El almacenamiento de C orgánico en los suelos en ambas estaciones fue afectado por las prácticas de manejo en los sitios áridos; específicamente, el sistema silvopastoril tuvo el menor almacenamiento de C en el suelo. El contenido de C en el suelo es multifactorial, la disminución del contenido de C puede ser afectado por el cambio de uso de suelo, la edad del sistema, la intensidad del pastoreo o el clima; asimismo, prácticas como la labranza, la quema de la vegetación y el pastoreo excesivo disminuyen el contenido de C en el suelo (Mahecha, 2002; Mosquera et al., 2012; Yadava & Garkoti, 2014).

En el establecimiento relativamente reciente (4-8 años) y durante el manejo de los silvopastoriles de este estudio hay prácticas que disminuyen el contenido de C en el suelo; principalmente la quema de

la vegetación, la labranza y el pastoreo excesivo afectaron el contenido de C en el suelo (Mahecha, 2002). Un estudio de da Silva y colaboradores (2014) evaluó los efectos de diferentes intensidades del pastoreo en la entrada de C del suelo, concluyeron que un pastoreo intenso disminuye la cantidad de C y con ello la cantidad de pastura del sistema. Además, se ha reportado que el cambio de un bosque a otro uso de la tierra afecta el contenido de C debido a que una mayor incidencia del sol acelera los procesos oxidativos de los compuestos orgánicos del suelo (Mahecha, 2002). Es importante mencionar que el uso de la tierra anterior al establecimiento de los silvopastoriles era maíz, caña de azúcar y pastura; usos que pudieron heredar un bajo contenido de C en el suelo (Mosquera et al., 2012).

En los sitios húmedos el almacenamiento de C orgánico en el suelo no denotó ser afectado por las prácticas de manejo, probablemente debido al mayor contenido de MO característico de sitios con alta precipitación que mejora la retención de nutrientes por su capacidad para unir partículas y mantener la estabilidad de los agregados en el suelo (Bell et al., 2011). El constante ingreso de precipitación en el suelo también estimula la actividad de los microorganismos y con ello la disponibilidad de C y otros nutrientes que no se vieron afectados por las prácticas de manejo (Zagal & Córdoba, 2005; Yadava & Garkoti, 2014).

Servicio Ecosistémico Fertilidad del suelo

La fertilidad es una cualidad compleja del suelo y está relacionada con las propiedades físicas, químicas y biológicas, las cuales afectan directa o indirectamente la capacidad de los suelos para permitir el crecimiento de las plantas (Gruhn et al., 2000; Roy et al., 2006). La fertilidad del suelo en la temporada seca de los sitios áridos fue afectada por las prácticas de manejo, específicamente, el sistema silvopastoril tuvo menor contenido de nutrientes. El pH de la mayoría de los sistemas silvopastoriles y de las pasturas fue más ácido que su referencia; para la mayor asimilabilidad de nutrientes es el pH del suelo debe ser ligeramente ácido, pero prácticas agrícolas intensivas y altos niveles de fertilización pueden acelerar el aumento de la acidez de los suelos y con ellos su pérdida de asimilación (Guo et al., 2010).

Los sistemas más intensificados por CA tuvieron menos nutrientes (Nt, NH₄, Nm, Pt) que los sistemas con menor intensificación, incluidos los silvopastoriles por ser los sistemas más intensificados. La CA intensiva reduce la entrada de biomasa vegetal que se integra al suelo y limita la entrada de MO; una

CA moderada puede equilibrar la liberación de nutrientes debido a que deja residuos de MO en el suelo (Devi et al., 2014). Los sistemas que presentaron menor COS:Nt también coinciden con los sistemas de mayor CA y que están expuestos a una mayor cantidad de excretas. Las tasas de mineralización de las excretas son más rápidas que la de los residuos vegetales debido a que durante la digestión del ganado los nutrientes son transformados a formas disponibles (heces y orina) y posteriormente liberados al suelo. Una relación COS:Nt muy baja, denota que la descomposición es rápida y podría provocar la disminución o desaparición de la cubierta protectora del suelo que lo esponja a la erosión (da Silva et al., 2014). Devi y colaboradores (2014) evaluaron el contenido de nutrientes (C, N y P) en suelos de sistemas con diferentes intensidades de pastoreo; concluyeron que el pastoreo moderado permite un mayor contenido de nutrientes, seguido por un sistema sin pastorear; finalmente un sistema con pastoreo intenso tiene menor contenido de nutrientes en el suelo.

En contraste, en ambas temporadas en los sitios húmedos la fertilidad del suelo no se vio afectada por las prácticas de manejo. Con el ingreso de las lluvias los nutrientes inmovilizados por los microorganismos se mineralizan y aumentan su concentración en lluvias. La MNN (La mineralización es la transformación del nitrógeno orgánico en amonio mediante la acción de microorganismos del suelo) consistentemente fue mayor en los sitios más húmedos que en los sitios con menor precipitación; este proceso se exagera con el aumento de la temperatura y la humedad en el suelo (Myrbeck et al., 2012). Además, los sistemas de sitios con mayor humedad están asociados a mayor productividad primaria, y con más residuos vegetales disponibles el pisoteo del ganado puede acelerar la disponibilidad de nutrientes; asimismo, mayor disponibilidad de forraje también significa más aporte de excretas al sistema con tasas de mineralización altas (da Silva et al., 2014). Valores mayores de nutrientes en lluvias también pueden deberse a la rápida degradación de los residuos vegetales y a que la biomasa microbiana es una fracción lábil de MO que contiene cantidades sustanciales de nutrientes (Zagal & Córdoba, 2005).

Diservicio Ecosistémico Emisión de CO₂

Las emisiones de CO₂ fueron mayores en la temporada lluviosa respecto a la temporada seca. La descomposición de la MO es un proceso mediado por los organismos heterótrofos que utilizan el material orgánico como fuente de C y energía; durante la descomposición de la MO una parte del C es devuelto a la atmósfera en forma de CO₂ por la actividad metabólica de los organismos y otra parte

del C es almacenado en las estructuras de los organismos. El aumento de la actividad biológica en la temporada lluviosa o en sitios húmedos está influenciada por la precipitación y la temperatura debido a que son variables que promueven la actividad biológica del suelo y la descomposición de la MO (Guerrero-Ortiz, et al., 2012).

En ambas estaciones las emisiones de los sitios áridos fueron afectadas por las prácticas de manejo, particularmente, la mayor cantidad de emisiones de CO₂ la tuvo la pastura. El sistema pastura tuvo una mayor actividad metabólica, lo cual se refleja en un menor contenido de CBM y de COS, y una mayor emisión de CO₂. La disminución del CBM en los sistemas pudo deberse a la poca disponibilidad de MO que se ve afectada por el cambio de uso de suelo, a la intensidad del pastoreo que disminuye la entrada de MO al suelo o a la alta precipitación de los sitios (Mahecha, 2002; Mosquera et al., 2012; Yadava & Garkoti, 2014). La relación RBS:CBM alta en las pasturas denota que la actividad metabólica de los organismos puede estar siendo favorecida por la exposición del suelo desnudo (por el aumento de la temperatura), por la mayor cantidad de excretas (mayor mineralización) y por el enraizamiento superficial característico de los pastos que favorecen el contenido de CBM y con ello las emisiones de CO₂ provenientes del suelo (Groppo et al., 2015).

La importancia de este resultado radica en que los sistemas extensivos de pasturas ocupan el 26% de la superficie total del planeta, y ante la baja productividad de las pasturas tropicales se espera la expansión de la ganadería hacia bosques. Esta situación acentuará el incremento del CO₂ a la atmósfera, principalmente por el cambio de uso de suelo, por la quema de vegetación y por su sistema radicular superficial (Steinfeld et al., 2009; IPCC, 2013).

Diservicio Ecosistémico Probabilidad de contaminación de cuerpos de agua por lixiviación de NO₃

La probabilidad de contaminación de cuerpos de agua fue mayor en la estación lluviosa respecto a la estación seca, particularmente en los sitios húmedos del gradiente. En sistemas agrícolas, la pérdida de nutrientes por lixiviación de NO₃ y el riesgo a la consecuente contaminación de cuerpos de agua es más alto en sistemas de climas húmedos, con suelos arenosos y bajo contenido de MO (Lehmann & Schroth, 2002). La carga negativa del NO₃ hace que las partículas de suelo cargadas negativamente (arcillas) lo repelan. En consecuencia, el NO₃ se desplaza fácilmente por el perfil del suelo junto con

el agua, y cuando sobrepasa la zona radicular se pierden los nutrientes con probabilidad de contaminar cuerpos de agua subterráneos o superficiales (Frate, 2008).

En la estación lluviosa la probabilidad de contaminación fue afectada por las prácticas de manejo en todos los sitios; el bosque de referencia tuvo significativamente mayor NO_3 en el suelo que los sistemas de manejo. Los valores más altos de NN y de NO_3 los tuvo el bosque de referencia y el monte, estos sistemas conllevan menor riesgo a la lixiviación debido a su composición vegetal que evita el lavado de nutrientes por retenerlos en sus raíces densas y profundas. Tampoco existió un riesgo claro del aumento en la lixiviación de NO_3 debido a que las pasturas tuvieron el menor contenido de NO_3 en el suelo respecto a los otros sistemas de manejo. La baja NN del suelo en pasturas que sugiere que la poca concentración de NO_3 se debe a la baja transformación de N orgánico a NO_3 , y no específicamente a la lixiviación. Sin embargo, el sistema radicular superficial de los pastos podría permitir la lixiviación de los nutrientes a pesar de tener poco contenido en el suelo.

Conclusiones



Conclusiones

- Cada productor desarrolla un manejo adaptado a sus capacidades, oportunidades, necesidades, recursos y condiciones climáticas, por lo que no existe un sistema de carga animal y ni de pastoreo universal. En este estudio los sistemas con mayor intensificación estuvieron en los sitios más áridos, específicamente, los sistemas silvopastoriles fueron los sistemas más intensificados.
- La capacidad de retención de agua, la captura de carbono y la fertilidad del suelo no fueron servicios ecosistémicos que se favorecieron en los sistemas de manejo, particularmente, la reciente perturbación por su establecimiento, la alta intensificación y la baja precipitación de los silvopastoriles fueron factores importantes que afectaron la provisión de servicios ecosistémicos.
- Los sistemas que propiciaron mayor emisión de CO₂ fueron las pasturas; las emisiones fueron favorecidas por la exposición del suelo desnudo o con poca vegetación y por el enraizamiento superficial de los pastos. Las grandes emisiones de CO₂ provenientes de las pasturas tienen gran relevancia por ser el sistema de predominio estatal y nacional.
- Las pasturas no denotaron tener un riesgo claro a la contaminación de cuerpos de agua debido a su baja transformación de N inorgánico a orgánico y del bajo contenido de NO₃ en el suelo; sin embargo, el sistema radicular superficial de los pastos puede no estar reteniendo todo el NO₃ del suelo.
- La provisión de servicios y diservicios ecosistémicos no depende solamente de las prácticas de manejo, también dependen de la época del año. A pesar del sistema de producción, la fertilidad del suelo, las emisiones de CO₂ y la probabilidad de contaminación de cuerpos de agua se vieron favorecidas en la temporada lluviosa respecto a la temporada seca.

Perspectivas: Sistemas de producción sostenibles

Las técnicas tradicionales para mantener y aumentar la producción de alimentos tales como la expansión de tierras, la quema de pastos, el sobrepastoreo y la fertilización ya no son tan factibles como lo fueron en el pasado. La necesidad actual de aumentar la producción y los ingresos de subsistencia es tan grande que es necesario acrecentar la intensidad del uso de la tierra en un esquema consiente y responsable (Gruhn et al., 2000). Alternar prácticas convencionales y novedosas que en complemento no expongan las funciones del ecosistema y donde los productores, trabajadores y sus familias se encuentren lejos de la condición de pobreza y de marginación; con ayuda de herramientas que permitan la concientización del consumidor de adquirir productos alimenticios sanos, responsables con el ambiente y con los productores. Lo anterior, aunado a la diversificación del ingreso, a la educación y al acceso al empleo no agrícola, las familias productoras tendrán mayores probabilidades de acceder a las tecnologías y el conocimiento necesario para disminuir su vulnerabilidad y aumentar sus capacidades de adaptación (Eakin, 2005).

Muchas prácticas de producción ganadera no satisfacen los requisitos para ser sostenibles, la producción ganadera puede transitar a la sostenibilidad siempre y cuando los esfuerzos se orienten a garantizar el bienestar humano, *el bienestar animal, la integridad ambiental, a mantener la diversidad nativa, además de proporcionar un estilo de vida justo a los trabajadores y a las familias que de ellos dependen* (Godfray et al., 2010; Broom et al., 2013; Redman, 2014). La introducción de medidas para promover la sostenibilidad no quiere decir que los rendimientos de los cultivos se vean afectados. Una gestión eficiente es esencial para mantener altos rendimientos y al mismo tiempo generar beneficios ambientales a largo plazo; esto puede alcanzarse al apoyar el monitoreo de las prácticas de producción para mejorar la eficiencia del uso de los recursos en los sistemas de producción (Gruhn et al., 2000; Godfray et al., 2010; Watanabe & Ortega, 2011; Uwizeye et al., 2016).

El análisis de los regímenes sociales y ecológicos en los sistemas ganaderos podría señalar oportunidades para alcanzar la sostenibilidad ganadera con recursos como la legislación del uso de suelo (Olsson et al., 2014). La evaluación del desempeño de los agroecosistemas puede ayudar a identificar intervenciones de manejo dirigidas, con el objetivo de seleccionar y mejorar las prácticas

de producción (Uwizeye et al., 2016). Optimizar la eficiencia de los insumos, los almacenes y los productos del sistema es un aspecto importante para mejorar el desempeño ambiental en el sector ganadero, por ello la importancia de considerar la degradación de los servicios ecosistémicos e identificar y cuantificar los procesos detrás de esta degradación (Dominati et al., 2010; Poppy et al., 2014; Uwizeye et al., 2016).

El uso de complementos o suplementos alimentarios debe ser acorde con la explotación, el tipo de animales, las edades y los estados fisiológicos que recuperen el saber local y que impliquen una mínima o nula dependencia de insumos y recursos externos al pequeño productor (Moreno & Molina, 2007). Para poder favorecer los SE y mitigar los DSE provenientes de las prácticas de manejo, se sugiere la aplicación focalizada de fertilizantes inorgánicos, orgánicos y/o pesticidas; labranza mínima (y cero), tráfico controlado de maquinaria; adecuar el número de animales por superficie a las condiciones de la parcela; permitir el pastoreo a una humedad adecuada del suelo; mantener la cobertura del suelo por medio de la vegetación y los ingresos de MO a través de la retención de residuos de cultivos; utilizar un forraje mixto de gramíneas-leguminosas de preferencia nativo y con enraizamiento profundo; disminuir la transferencia de estiércol de pasturas a tierras de cultivo; gestionar el periodo de pastoreo corto (1-4 días) con un periodo de recuperación suficiente respecto a las condiciones del sitio; y conducir el secuestro de C mediante el uso de árboles en cercas vivas (Gruhn et al., 2000; Hamza & Anderson, 2005; Steinfeld & Wassenaar, 2007; Vendramini et al., 2014; Sattari et al., 2016).

Los sistemas ganaderos eficientes deben estimular las interacciones entre el gobierno, la academia, los productores, los animales y el ecosistema; asimismo, la implementación de sistemas productivos debe utilizar un enfoque holístico en el que la integridad y funcionalidad de todo el sistema es más importante que una fase específica (da Silva et al., 2014). Alcanzar la sostenibilidad depende de la capacidad innovadora de las sociedades, esto es una oportunidad para reconocer que las respuestas a la pérdida de SE podrían no estar en la dimensión ecológica, si no en la social (Ernstson et al., 2010).

Literatura citada

- Adger WN, Arnell NW & Tompkins EL. 2005. Successful adaptation to climate change across scales. *Global Environmental Change* 15: 77- 86
- Aguirre BG. 1992. Pobladores del Papaloapan: biografía de una hoya. México: Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. 245 p.
- Ahern JF. 2011. From fail-safe to safe-to-fail: sustainability and resilience in the new urban world. *Landscape and Urban Planning*
- Ames JP, Neres MA, Castagnara DD, Mufatto LM, Ducati C, Jobim CC & Tres TT. 2014. Dry matter production, chemical composition, dry matter digestibility and occurrence of fungi in Bermuda grass hay (*Cynodon dactylon*) under different fertilization systems or associated with pea plantings in Winter. *Cien. Inv. Agr.* 41(2):163-174
- Ango TG, Börjeson L, Senbeta F & Hylander K. 2014. Balancing ecosystem services and disservices: smallholder farmers' use and management of forest and trees in an agricultural landscape in southwestern Ethiopia. *Ecology and Society* 19(1): 30
- Bacab HM, Madera NB, Solorio FJ, Vera F & Marrufo DF. 2013. Los sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala*: una opción para la ganadería tropical. *Avances en Investigación Agropecuaria* 17(3): 67-81
- Barrera-Bassols N. 1996. Los orígenes de la ganadería en México. *Ciencias*, 44: 14-27
- Bell LW, Kirkegaard JA, Swan A, Hunt JR, Huth NI & Fettel NA. 2011. Impacts of soil damage by grazing livestock on crop productivity. *Soil & Tillage Research* 113:19–29
- Bernués A, Tello-García E, Rodríguez-Ortega T, Ripoll-Bosch R & Casasús I. 2016. Agricultural practices, ecosystem services and sustainability in High Nature Value farmland: Unraveling the perceptions of farmers and nonfarmers. *Land Use Policy* 59: 130–142
- Bernues A, Rodríguez-Ortega T, Olaizola AM & Ripoll-Bosch R. 2017. Evaluating ecosystem services and disservices of livestock agroecosystems for targeted policy design and management. *Grassland Science in Europe* (22)
- Bertín MJT, Moreno CM, Cancino JS, Hernández GA, Pérez PJ & Gómez VA. 2010. Rendimiento y calidad de semilla de pasto guinea (*Panicum maximum Jacq.*) cv. Tanzania usando la fitohormona esteroide cidef-4. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*, 1(3), 237-249
- Broom DM, Galindo FA & Murgueito E. 2013. Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. *Proc R Soc B* 280: 20132025
- Butzer KW & Butzer EK. 1995. "Transfer of the Mediterranean Livestock Economy to New Spain: Adaptation and Ecological Consequences," in *Global Land Use Change: A Perspective from the Columbian Encounter*, 151-193. B. L. Turner II, Antonio Gómez Sal, Fernando
- Castillo AR, Ligarreto MGA & Garay E. 2008. Producción de forraje en los pastos *Brachiaria decumbens* cv. Amargo y *Brachiaria brizantha* cv. Toledo, sometidos a tres frecuencias y a dos intensidades de defoliación en condiciones del piedemonte llanero colombiano. *Rev.Fac.Nal.Agr. Medellín* 61(1):4336-4346
- Chevalier F. 1976. La formación de los latifundios en México. México: FCE
- Consejo Nacional de Población. CONAPO. 2015. Tomado de http://www.conapo.gob.mx/es/CONAPO/Datos_Abiertos_del_Indice_de_Marginacion
- Consejo Nacional para la Evaluación de la Política de Desarrollo Social. CONEVAL. 2016. Tomado de <http://www.coneval.org.mx/coordinacion/entidades/Veracruz/Paginas/principal.aspx>

- da Silva FD, Carneiro ATJ, Ferreira AO, Assmann JM, Anghinoni I & de Faccio CPC. 2014. Soil carbon indices as affected by 10 years of integrated crop–livestock production with different pasture grazing intensities in Southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 190: 60–69
- Dávila MMEN. 2014. El surgimiento de la ganadería en la Ciénega de Chapala Michoacán, México). El caso de la Hacienda Guaracha (siglos XVI-XIX). *Universidad Nacional Autónoma de México, México* 6:11 pp185-219
- Dominati E, Patterson M & Mackay A. 2010. A framework for classifying and quantifying the natural capital and ecosystem services of soils. *Ecological Economics* 69(9), 1858–1868
- Eakin HC. 2005. Institutional Change, Climate Risk, and Rural Vulnerability: Cases from Central Mexico. *World Development* 33 (11): 1923- 1938
- Eakin HC, Lemos MC & Nelson DR. 2014. Differentiating capacities as a means to sustainable climate change adaptation. *Global Environmental Change* 27: 1–8
- Eriksen S, Aldunce P, Bahinipati CS, Martins RD, molefe JI, Nhemachena C, O’Brien K, Olorunfemi F, Park J, Sygna L & Ulsrud K. 2011. When not every response to climate change is a good one: Identifying principles for sustainable adaptation. *Climate and Development* 3(1): 7-20
- Ernstson H, van der Leeuw CL, Redman CL, Meffert DJ, Davis G, Alfsen C & Elmqvist T. 2010. Urban Transitions: On Urban Resilience and Human-Dominated Ecosystems. *AMBIO* 39: 531-545
- FAO, IFAD & WFP. 2015. The State of Food Insecurity in the World 2015. Meeting the 2015 international hunger targets: taking stock of uneven progress. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome
- Flores DL & Alcalá MJR. 2010. Manual de procedimientos analíticos. Laboratorio de física de suelo. Universidad Nacional Autónoma de México
- García E. 2004. Modificaciones al Sistema de Clasificación Climática de Köppen. Serie Libros, núm. 6, Instituto de Geografía, UNAM, México
- Gerber PJ, Steinfeld H., Henderson B, Mottet A, Opio C, Dijkman J, Falcucci A & Tempio, G. 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome
- Giraldo VLA. 1998. Potencial de la arbórea guácimo (*Guazuma ulmifolia*), como componente forrajero en sistemas silvopastoriles. *Agroforestería para la producción animal en Latinoamérica*
- Gregory PJ, Ingram JSI & Brklacich M. 2005. Climate change and food security. *Phil. Trans. R. Soc. B* 360, 2139–2148
- Groppo JD, Lins SRM, Camargo PB, Assad ED, Pinto HS, Martins SC, Salgado PR, Evangelista, Vasconcellos BE, Sano EE, Pavão E, Luna R & Martinelli LA. 2015. Changes in soil carbon, nitrogen, and phosphorus due to land-use changes in Brazil. *Biogeosciences*, 12, 4765–4780
- Gruhn P, Goletti F & Yudelman M. 2000. Integrated Nutrient Management, Soil Fertility, and Sustainable Agriculture: Current Issues and Future Challenges. International Food Policy Research Institute. Washington, D.C.
- Guo JH, Liu XJ, Zhang Y, Shen JL, Han WX, Zhang WF, Christie P, Goulding KWT, Vitousek PM, Zhang FS. 2010. Significant Acidification in Major Chinese Croplands. *Science* 327, 1008
- Fideicomisos Instituidos en Relación con la Agricultura. FIRA. 2017. Panorama Agroalimentario. Carne de Bovino. Dirección de Investigación y Evaluación Económica y Sectorial.
- Folke C, Carpenter SR, Walker B, Scheffer M, Chapin T & Rockstrom J. 2010. Resilience Thinking: Integrating Resilience, Adaptability and Transformability. *Ecology and Society* 15(4): 20
- Frate C. 2008. Nitrogen Transformations in Soil. University of California Cooperative Extension, Tulare County

- García B. 1994. Los primeros pasos del ganado en México. *Relaciones: Estudios de Historia y Sociedad*, 59:11-44
- Garnett T, Appleby MC, Balmford A, Bateman IJ, Benton TG, Bloomer P, Burlingame B, Dawkins M, Dolan L, Fraser D, Herrero M, Hoffmann I, Smith P, Thornton PK, Toulmin C, Vermeulen SJ & Godfray HCJ. 2013. Sustainable Intensification in Agriculture: Premises and Policies. *Science* 341: 33- 34
- Godfray HCJ, Beddington JR, Crute IR, Haddad L, Lawrence D, Muir JF, Pretty J, Robinson S, Thomas SM & Toulmin C. 2010. Food Security: The challenge of feeding 9 billion people. *Science* 327: 812-818.
- Godfray HCJ & Garnett T. 2014. Food security and sustainable intensification. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*. 369: 1–10
- Hamza MA & Anderson WK. 2005. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil and Tillage Research*, 82(2), 121–145
- Havlík P, Valin H, Mosnier A, Obersteiner M, Baker JS, Herrero M, Rufino MC & Schmid E. 2013. Crop productivity and the global livestock sector: Implications for land use change and greenhouse gas emissions. *Amer. J. Agr. Econ.* 95(2): 442–448
- Hernández L. comp. 2001. *Historia ambiental de la Ganadería en México, México y Francia: Instituto de Ecología, A.C., L' Institut de Recherche pour le Développement.*
- Herrero M, Thornton PK, Notenbaert AM, Wood S, Msangi S, Freeman HA, Bossio D, Dixon J, Peters M, van de Steeg J, Lynam J, Parthasarathy Rao P, Macmillan S, Gerard B, McDermott J, Seré C & Rosegrant M. 2010. Smart Investments in Sustainable Food Production: Revisiting Mixed Crop-Livestock Systems. *Science* 327: 822-825
- Herrero M, Havlík P, Valin H, Notenbaert A, Rufino MC, Thornton PK & Obersteiner M. 2013. Biomass use, production, feed efficiencies, and greenhouse gas emissions from global livestock systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110 (52): 20888-20893
- Herrero M, Henderson B, Havlík P, Thornton PK, Conant RT, Smith P, Wirsenius S, Hristov AN, Gerber P, Gill M, Butterbach-Bahl K, Valin H, Garnett T & Stehfest E. 2016. Greenhouse gas mitigation potentials in the livestock sector. *Nature Climate Change* 6: 452- 461
- Hoffmann O & Skerritt D. 1992. Enquête sur une figure peu connue du monde rural: le ranchers du Mexique. *Cahiers du Sciences Humaines*, 28 (4): 665-684
- Houghton RA & Nassikas AA. 2017. Global and regional fluxes of carbon from land use and land cover change 1850–2015. *Global Biogeochem. Cycles* 31:1- 17
- INEGI. 2014. Anuario estadístico y geográfico de Veracruz de Ignacio de la Llave 2014
- INEGI. 2016. Actualización del Marco Censal Agropecuario 2016. Tomado de <http://www.beta.inegi.org.mx/proyectos/agro/amca/>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014: Urban areas. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 535-612
- IUSS Working Group, WRB. 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, actualización 2015. Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos. *Informes sobre recursos mundiales de suelos* 106. FAO, Roma
- Juárez-Hernández J, Bolaños ED & Reinoso M. 2004. Contenido de proteína por unidad de materia seca acumulada en pastos tropicales. *Época de nortes Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 38 (4):423-430
- Lehmann J & Schroth G. 2002. *Trees, crops and soil fertility: concepts and research methods*. College of Agriculture and Life Sciences, Department of Crop and Soil Sciences, Cornell University, 909 Bradfield Hall, Ithaca, NY 14853, USA

- Leibovici D & Sabatier R. 1998. A singular value decomposition of a k -way array for a principal component analysis of multiway data, PTA- k . *North-Holland*, University of Greenwich
- Luisoni LH. 2010. Ajuste de carga animal: Aspectos teóricos y recomendaciones prácticas. INTA EEA Reconquista. Centro Regional Santa Fe
- Machovina B, Feeley KJ & Ripple WJ. 2015. Biodiversity conservation: The key is reducing meat consumption. *Science of the Total Environment* 536: 419- 431
- Mahecha L. 2002. El silvopastoreo: una alternativa de producción que disminuye el impacto ambiental de la ganadería bovina. *Rev Col Cienc Pec* 15(2)
- Millennium Ecosystem Assessment, 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC
- Moreno OF & Molina RD. 2007. Manual Técnico: Buenas Prácticas Agropecuarias -BPA- en la Producción de Ganado de Doble Propósito Bajo Confinamiento, con Caña Panelera como Parte de la Dieta. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación - FAO
- Mosquera O, Buurman P, Ramírez BL & Amezquita MC. 2012. Carbon stocks and dynamics under improved tropical pasture and silvopastoral systems in Colombian Amazonia. *Geoderma* 189–190, 81–86
- Murgueitio RE, Chará JD, Solarte AJ, Uribe F, Zapata C & Rivera JE. 2013. Agroforestería Pecuaria y Sistemas Silvopastoriles Intensivos (SSPi) para la adaptación ganadera al cambio climático con sostenibilidad. *Rev Colomb Cienc Pecu* 26:313-316
- Murgueitio RE, Chará OJ, Barahona RR, Cuartas CC & Naranjo RJ. 2014. Los sistemas Silvopastoriles Intensivos (sspi), herramienta de mitigación y adaptación al cambio climático. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 17: 501 – 507
- Myrbeck A, Stenberg M, Arvidsson J & Rydberg T. 2012. Effects of autumn tillage of clay soil on mineral N content, spring cereal yield and soil structure over time. *European Journal of Agronomy* 37, 96-104.
- Nardone A, Ronchi, B, Lacetera N, Ranieri MS & Bernabucci U. 2010. Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livestock Science* 130: 57–69
- Olsson P, Galaz V & Bonstra WJ. 2014. Sustainability transformations: a resilience perspective. *Ecology and Society* 19 (4): 1
- Opio C, Gerber P, Mottet A, Falcucci A, Tempio G, MacLeod M, Vellinga T, Henderson B & Steinfeld H. 2013. Greenhouse gas emissions from ruminant supply chains – A global life cycle assessment. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome
- Pagiola S, Elías Ramírez E, Gobbi J, de Haan C, Ibrahim M, Murgueitio E & Ruíz JP. 2007. Paying for the environmental services of silvopastoral practices in Nicaragua. *Ecological Economics* 64, 374–385
- Pelling M, O’Brien K & Matyas D. 2015. Adaptation and transformation. *Climatic Change* 133: 113–127
- Pereira J, Fangueiro D, Misselbrook TH, Chadwick DR, Coutinho J, Trindade H. 2011. Ammonia and greenhouse gas emissions from slatted and solid floors in dairy cattle houses: A scale model study. *Biosystems Engineering*, San Diego 109:2, p.148-157
- Poppy GM, Chiotha S, Eigenbrod F, Harvey CA, Honza’k M, Hudson MD, Jarvis A, Madise NJ, Schreckenberg K, Shackleton CM, Villa F & Dawson TP. 2014 Food security in a perfect storm: using the ecosystem services framework to increase understanding. *Phil. Trans. R. Soc. B* 369: 20120288
- Rask KJ & Rask N. 2011. Economic development and food production-consumption balance: A growing global challenge. *Food Policy* 36: 186–196
- Redman CL. 2014. Should sustainability and resilience be combined or remain distinct pursuits? *Ecology and Society* 19 (2): 37
- Rivera HA, Güereca LP & Rubio LMS. 2016. Environmental impact of beef production in Mexico through life cycle assessment. *Resources, Conservation and Recycling* 109: 44–53

- Roberson E. 1996. Impacts of Livestock Grazing on Soils, 2–22. Retrieved from <https://www.cnps.org/cnps/archive/letters/soils.pdf>
- Roy NR, Finck A, Blair GJ & Tandon HLS. 2006. Plant nutrition for food security. A guide for integrated nutrient management. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin 16
- Ruiz HFL, Rodríguez CEG, Pinzón J, Anzola VHJ & Castro LF. 2015. Establecimiento y evaluación del guinea Panicum máximum cv. Massai en la hacienda Guachicono del Bordo, Patía (Cauca). Revista Ciencia Animal, (9), 125-154
- Sachs JD. 2001. Tropical Underdevelopment. National Bureau of Economic Research. Working Paper 8119
- Sánchez SN & Garduño LR. 2008. Algunas consideraciones acerca de los sistemas de clasificación climática. ContactoS 68, 5–10
- Sattari SZ, Bouwman AF, Martínez RR, Beusen AHW & van Ittersum MK. 2016. Negative global phosphorus budgets challenge sustainable intensification of grasslands. Nature communications
- Saucedo MP. 1984. Historia de la ganadería en México. Tomo 1. México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- Schneider UA, Havlik P, Schmid E, Valin H, Mosnier A, Obersteiner M, Bottcher H, Skalský R, Balkovic J, Sauer T & Fritz S. 2011. Impacts of population growth, economic development, and technical change on global food production and consumption. Agricultural Systems 104: 204–215
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2009. Consultado 29-08-2017 en http://infosiap.siap.gob.mx/repoAvance_siap_gb/pecAvanceEdo.jsp
- Silveira ML, Vendramini JMB, Silva HM & Azenha M. 2012. Nutrient Cycling in Grazed Pastures. UF/IFAS Extension, 1–3
- Simpson LB. 1952. Exploitation of land in Central Mexico in the Sixteenth Century. Ibero-Americana
- Solorio-Sánchez FJ, Bacab-Pérez H, Castillo-Caamal JB, Ramírez-Avilés L & Casanova-Lugo F. 2009. Potencial de los sistemas silvopastoriles en México. II Congreso sobre sistemas silvopastoriles intensivos
- Sosa REE, Cabrera TEJ & Pérez RD. El uso de vegetación secundaria (acahuales) para la alimentación de bovinos y ovinos en Quintana Roo. Folleto Técnico. SAGARPA
- *State of the Tropics. 2014. State of the Tropics 2014 report.* James Cook University, Cairns, Australia
- Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M & Haan C. 2009. La larga sombra del ganado. Problemas ambientales y opciones (Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy)
- Steinfeld H & Wassenaar T. 2007. The Role of Livestock Production in Carbon and Nitrogen Cycles. Annual Review of Environment and Resources 32(1), 271–294
- Swain HM, Boughton EH, Bohlen PJ & Lollis LO. 2013. Trade-Offs Among Ecosystem Services and Disservices on a Florida Ranch. Society for Range Management 35(5):75–87
- Thornton PK. 2010. Livestock production: recent trends, future prospects. Phil. Trans. R. Soc. B. 365 (1554): 2853 - 2867
- Tilman D, Balzerb C, Hillc J & Befort BL. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. PNAS 108(50): 20260- 20264
- Tucker CM, Eakin H & Castellanos EJ. 2010. Perceptions of risk and adaptation: Coffee producers, market shocks, and extreme weather in Central America and Mexico. Global Environmental Change 20: 23–32
- Udo HMJ, Aklilku HA, Phong LT, Bosma RH, Budistria IGS, Patil BR, Samdup T & Bebe BO. Impact of intensification of different types of livestock production in smallholder crop-livestock systems. Livestock science 139 (1-2) 22-29

- United Nations (UN), Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2015. World Population Prospects: The 2015 Revision, Key Findings and Advance
- United Nations (UN). 2015. Consultado 29-08-2017 en <http://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/Tables>. Working Paper No. ESA/P/WP.241.
- USDA. 2011. Carbon to Nitrogen Ratios in Cropping Systems. Natural Resources Conservation Service. East National Technology Support Center, Greensboro, NC, in cooperation with North Dakota NRCS
- Uwizeye A, Gerber PJ, Schulte RPO & de Boer IJM. 2016. A comprehensive framework to assess the sustainability of nutrient use in global livestock supply chains. *Journal of Cleaner Production* 129: 647-658
- Valles-De la Mora B, Castillo-Gallegos E, Ocaña-Zavaleta E & Jarillo-Rodríguez J. 2014. *Cratylia argentea*: Un arbusto forrajero potencial en Sistemas Silvopastoriles. Rendimiento y calidad de accesiones según las edades de rebrote y estaciones climáticas. *Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente*
- Vendramini JMB, Dubeux Jr JCB. & Silveira ML. 2014. Nutrient cycling in tropical pasture ecosystems. *Rev. Bras. Ciênc. Agrár. Recife* 9 (2): 308-315
- Villa-Herrera A, Nava-Tablada ME, López-Ortiz S, Vargas-López S, Ortega-Jimenez E & López FG. 2009. Utilización del Guácimo (*Guazuma ulmifolia* Lam.) como fuente de forraje en la ganadería bovina extensiva del trópico mexicano. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 10(2): 253-261
- Villalobos L & Arce J. 2014. Evaluación agronómica y nutricional del pasto Estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) en la zona de monteverde, puntarenas, Costa Rica. II. Valor nutricional. *Agronomía Costarricense* 38(1): 133-145
- Watanabe MDB & Ortega E. 2011. Ecosystem services and biogeochemical cycles on a global scale: Valuation of water, carbon and nitrogen processes. *Environmental Science and Policy* 14(6) 594–604
- Wirsenius S, Azar C & Berndes G. 2010. How much land is needed for global food production under scenarios of dietary changes and livestock productivity increases in 2030? *Agricultural Systems* 103: 621-638
- Zagal E & Córdova C. 2005. Soil Organic Matter Quality Indicators in a Cultivated Andisol. *Agric. Téc.* 65:..2

Anexo

A1. Contenido gravimétrico de H₂O del suelo (g⁻¹ H₂O g⁻¹ suelo) (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	0.11 ± 0.01 ^A	0.17 ± 0.00 ^A	0.30 ± 0.02 ^A	0.30 ± 0.00 ^A	0.48 ± 0.03 ^A
Monte	0.09 ± 0.00 ^A	0.10 ± 0.02 ^B	0.25 ± 0.02 ^B	0.27 ± 0.01 ^A	0.41 ± 0.04 ^A
Silvopastoril	0.05 ± 0.01 ^B	0.11 ± 0.01 ^B	0.22 ± 0.00 ^B	nd	nd
Pastura	0.08 ± 0.00 ^A	0.15 ± 0.01 ^B	0.25 ± 0.01 ^B	0.30 ± 0.01 ^A	0.55 ± 0.01 ^A
Sistemas por	<i>H</i> = 10.2	<i>H</i> = 8.395	<i>F</i> = 4.022	<i>H</i> = 3.343	<i>F</i> = 2.819
Sitio	<i>p</i> = < 0.05	<i>p</i> = < 0.05	<i>p</i> = < 0.05	<i>p</i> = 0.188	<i>p</i> = 0.154
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	0.29 ± 0.01 ^A	0.28 ± 0.07 ^A	0.29 ± 0.00 ^A	0.53 ± 0.03 ^A	0.66 ± 0.02 ^A
Monte	0.32 ± 0.02 ^A	0.19 ± 0.00 ^A	0.33 ± 0.01 ^A	0.45 ± 0.01 ^B	0.54 ± 0.00 ^B
Silvopastoril	0.19 ± 0.01 ^B	0.12 ± 0.00 ^B	0.22 ± 0.00 ^B	nd	nd
Pastura	0.23 ± 0.00 ^B	0.29 ± 0.02 ^A	0.28 ± 0.02 ^A	0.44 ± 0.02 ^B	0.61 ± 0.02 ^A
Sistemas por	<i>F</i> = 8.065	<i>H</i> = 6.197	<i>H</i> = 9.703	<i>F</i> = 5.929	<i>H</i> = 6.469
Sitio	<i>p</i> = < 0.05				

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A2. Textura del suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=12 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios del porcentaje de contenido de arcillas. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Arena (%)	69.17 \pm 0.62 ^A	65.09 \pm 1.21 ^A	72.45 \pm 0.62 ^A	82.86 \pm 0.67 ^A	76.14 \pm 2.69 ^A
Limos (%)	13.67 \pm 0.71 ^A	16.55 \pm 1.00 ^A	13.00 \pm 0.36 ^A	8.71 \pm 0.36 ^A	12.57 \pm 1.67 ^A
Arcillas (%)	17.17 \pm 0.44 ^A	18.36 \pm 2.20 ^A	14.55 \pm 0.45 ^A	8.43 \pm 0.60 ^A	11.29 \pm 1.23 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 1.458$ $p= 0.255$	$H= 4.968$ $p= 0.174$	$F= 3.547$ $p= 0.923$	$F= 12.517$ $p= 0.66$	$H= 5.177$ $p= 0.075$

A3. Densidad (g^{-1} suelo cm^3) en el suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n = 2 \pm 1$ EE. . Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	0.82 ± 0.07^A	1.01 ± 0.07^A	1.0 ± 0.07^A	0.91 ± 0.12^A	1.02^A
Monte	0.80 ± 0.02^A	1.13 ± 0.10^A	0.87 ± 0.20^A	1.00 ± 0.14^A	0.88 ± 0.11^A
Silvopastoril	0.99 ± 0.09^A	1.03 ± 0.11^A	1.07 ± 0.11^A	nd	nd
Pastura	0.96 ± 0.01^A	1.13 ± 0.16^A	1.11 ± 0.08^A	1.05 ± 0.15^A	0.93 ± 0.12^A
Sistemas por	$F= 5.398$	$F= 0.318$	$F= 0.976$	$F= 0.873$	$F= 0.074$
Sitio	$p= 0.059$	$p= 0.592$	$p= 0.361$	$p= 0.402$	$p= 0.802$

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A4. Concentración de carbono orgánico del suelo ($\text{mg}^{-1} \text{COS g}^{-1} \text{suelo}$) (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1 \text{ EE}$. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	123.0 ± 9.35 ^A	133.5 ± 0.80 ^A	82.0 ± 2.56 ^A	80.0 ± 9.87 ^A	103.3 ± 0.89 ^A
Monte	160.1 ± 4.32 ^A	69.8 ± 2.88 ^B	68.6 ± 6.78 ^B	68.8 ± 8.37 ^A	113.1 ± 12.22 ^A
Silvopastoril	57.3 ± 2.53 ^B	48.0 ± 3.94 ^B	51.1 ± 3.63 ^C	nd	nd
Pastura	136.5 ± 8.88 ^A	43.9 ± 2.23 ^B	45.4 ± 1.44 ^C	77.3 ± 3.35 ^A	116.7 ± 3.06 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 0.324$ $p= < 0.05$	$F= 31.731$ $p= < 0.01$	$F= 70.29$ $p= < 0.001$	$F= 0.001$ $p= 0.975$	$F= 2.314$ $p= 0.189$
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	120.4 ± 6.44 ^A	135.1 ± 13.22 ^A	106.1 ± 10.37 ^A	112.5 ± 12.02 ^A	167.6 ± 4.79 ^A
Monte	163.5 ± 3.52 ^A	75.5 ± 2.17 ^B	112.3 ± 10.41 ^A	97.6 ± 2.91 ^A	151.7 ± 5.00 ^A
Silvopastoril	55.0 ± 5.81 ^B	93.1 ± 10.81 ^B	42.2 ± 2.59 ^B	nd	nd
Pastura	136.3 ± 2.46 ^A	81.0 ± 2.51 ^B	50.5 ± 4.42 ^B	102.1 ± 2.80 ^A	166.9 ± 2.98 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 0.291$ $p= < 0.05$	$F= 5.984$ $p= < 0.05$	$F= 16.677$ $p= < 0.01$	$F= 0.572$ $p= 0.474$	$F= 0.093$ $p= 0.769$

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A5. pH del suelo (H₂O) (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=12 \pm 1$ EE.

Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
<i>Estación seca</i>	6.36 ± 0.17	7.27 ± 0.29	5.06 ± 0.17	6.11 ± 0.30	5.66 ± 0.15
<i>Estación de lluvias</i>	6.43 ± 0.06	7.03 ± 0.29	5.37 ± 0.20	6.08 ± 0.18	5.93 ± 0.06

A5.1. pH (H₂O) en el suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. . Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	6.8 ± 0.12 ^A	7.9 ± 0.03 ^A	5.4 ± 0.28 ^A	6.7 ± 0.15 ^A	5.5 ± 0.20 ^B
Monte	6.1 ± 0.16 ^B	7.4 ± 0.27 ^A	5.3 ± 0.19 ^A	6.1 ± 0.39 ^A	6.0 ± 0.08 ^A
Silvopastoril	6.5 ± 0.03 ^A	6.0 ± 0.30 ^B	4.8 ± 0.11 ^B	nd	nd
Pastura	6.1 ± 0.13 ^B	7.9 ± 0.26 ^A	4.8 ± 0.05 ^B	5.6 ± 0.20 ^B	5.5 ± 0.29 ^B
Sistemas por Sitio	$F= 3.479$ $p= < 0.05$	$F= 0.115$ $p= < 0.05$	$F= 10.18$ $p= < 0.05$	$F= 9.199$ $p= < 0.05$	$H= 3.928$ $p= < 0.05$
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	6.4 ± 0.05 ^A	7.1 ± 0.07 ^B	5.8 ± 0.21 ^A	6.4 ± 0.10 ^A	6.0 ± 0.12 ^A
Monte	6.4 ± 0.13 ^A	6.9 ± 0.03 ^B	5.2 ± 0.05 ^B	5.9 ± 0.04 ^B	6.0 ± 0.05 ^A
Silvopastoril	6.6 ± 0.18 ^A	6.4 ± 0.02 ^B	5.5 ± 0.03 ^B	nd	nd
Pastura	6.3 ± 0.01 ^A	7.8 ± 0.03 ^A	4.9 ± 0.05 ^B	5.9 ± 0.10 ^B	5.8 ± 0.08 ^A
Sistemas por Sitio	$H= 4.001$ $p= 0.261$	$H= 9.409$ $p= < 0.05$	$F= 11.91$ $p= < 0.01$	$F= 7.325$ $p= < 0.05$	$F= 3.406$ $p= 0.107$

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A6. Concentración de nitrógeno total ($\text{mg}^{-1} \text{N g}^{-1}$ suelo) en el suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	4.20 ± 0.31 ^A	4.05 ± 0.00 ^A	3.05 ± 0.25 ^A	2.18 ± 0.07 ^A	2.70 ± 0.30 ^A
Monte	4.00 ± 0.25 ^A	1.80 ± 0.00 ^B	3.00 ± 0.00 ^A	2.55 ± 0.15 ^A	3.38 ± 0.38 ^A
Silvopastoril	2.35 ± 0.10 ^B	1.80 ± 0.00 ^B	2.80 ± 0.30 ^A	nd	nd
Pastura	3.60 ± 0.09 ^A	2.25 ± 0.61 ^B	2.80 ± 0.10 ^A	2.70 ± 0.17 ^A	3.50 ± 0.13 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 3.258$ $p= < 0.05$	$H= 6.074$ $p= < 0.05$	$H= 1.327$ $p= 0.723$	$F= 4.901$ $p= 0.078$	$F= 3.835$ $p= 0.107$
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	4.47 ± 0.93 ^A	4.05 ± 1.74 ^A	3.45 ± 0.17 ^A	2.64 ± 0.41 ^A	3.60 ± 0.23 ^A
Monte	4.58 ± 0.13 ^A	1.80 ± 0.12 ^A	3.24 ± 0.23 ^A	2.46 ± 0.08 ^A	4.11 ± 0.79 ^A
Silvopastoril	2.14 ± 0.14 ^B	1.54 ± 0.04 ^A	1.91 ± 0.09 ^B	nd	nd
Pastura	3.38 ± 0.25 ^A	2.59 ± 0.15 ^A	1.96 ± 0.16 ^B	1.98 ± 0.11 ^A	3.25 ± 0.28 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 3.265$ $p= < 0.05$	$H= 4.076$ $p= 0.253$	$F= 29.984$ $p= < 0.001$	$F= 4.410$ $p= 0.073$	$F= 0.487$ $p= 0.507$

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A7. Relación carbono orgánico: nitrógeno total del suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	29.4 ± 2.13 ^A	33.0 ± 0.20 ^A	27.3 ± 2.86 ^A	36.7 ± 3.27 ^A	38.8 ± 4.64 ^A
Monte	40.3 ± 2.18 ^A	38.8 ± 1.60 ^A	22.9 ± 2.26 ^A	27.3 ± 4.89 ^A	33.5 ± 0.11 ^A
Silvopastoril	24.4 ± 1.00 ^B	26.7 ± 2.19 ^B	18.4 ± 0.94 ^B	nd	nd
Pastura	38.1 ± 3.36 ^A	21.8 ± 4.29 ^B	16.3 ± 0.98 ^B	28.9 ± 2.32 ^A	33.4 ± 1.42 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 0.251$ $p= < 0.05$	$F= 9.207$ $p= < 0.05$	$F= 25.13$ $p= < 0.001$	$F= 1.339$ $p= 0.299$	$F= 1.720$ $p= 0.247$
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	28.5 ± 3.74 ^A	52.1 ± 25.53 ^A	30.6 ± 1.49 ^A	43.6 ± 5.31 ^A	46.7 ± 1.68 ^A
Monte	35.8 ± 1.59 ^A	42.4 ± 3.70 ^A	34.9 ± 3.38 ^A	39.8 ± 2.12 ^A	40.1 ± 8.37 ^A
Silvopastoril	25.6 ± 1.12 ^B	60.2 ± 5.61 ^A	22.0 ± 0.51 ^B	nd	nd
Pastura	40.8 ± 3.06 ^A	31.4 ± 1.47 ^A	25.7 ± 0.76 ^B	51.9 ± 4.01 ^A	52.4 ± 5.88 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 2.181$ $p= < 0.05$	$H= 4.560$ $p= 0.206$	$F= 4.441$ $p= < 0.05$	$F= 2.723$ $p= 0.142$	$F= 0.779$ $p= 0.406$

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A8. Concentración de amonio ($\mu\text{g}^{-1} \text{NH}_4 \text{g}^{-1}$ suelo) en el suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	13.21 \pm 2.89 ^A	24.90 \pm 8.91 ^B	119.35 \pm 8.69 ^A	117.67 \pm 3.83 ^A	140.15 \pm 4.22 ^B
Monte	14.52 \pm 2.34 ^A	10.02 \pm 3.89 ^B	92.27 \pm 16.21 ^B	106.13 \pm 1.65 ^A	107.18 \pm 28.11 ^B
Silvopastoril	19.85 \pm 4.45 ^A	12.48 \pm 1.50 ^B	75.98 \pm 3.08 ^B	nd	nd
Pastura	12.46 \pm 6.62 ^A	39.00 \pm 4.43 ^A	87.09 \pm 5.83 ^B	128.63 \pm 6.58 ^A	197.88 \pm 12.17 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 3.042$ $p= 0.115$	$F= 2.447$ $p= < 0.05$	$F= 7.649$ $p= < 0.05$	$F= 2.508$ $p= 0.174$	$F= 5.690$ $p= 0.062$
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	110.53 \pm 10.15 ^B	142.40 \pm 16.30 ^A	123.03 \pm 4.09 ^A	180.27 \pm 11.67 ^A	239.15 \pm 18.03 ^A
Monte	130.36 \pm 3.63 ^A	106.84 \pm 0.60 ^B	128.96 \pm 2.73 ^A	162.60 \pm 1.31 ^A	151.54 \pm 32.51 ^A
Silvopastoril	96.03 \pm 9.71 ^B	72.82 \pm 12.10 ^C	117.75 \pm 4.07 ^A	nd	nd
Pastura	116.17 \pm 3.32 ^A	50.76 \pm 12.77 ^C	119.83 \pm 3.40 ^A	155.38 \pm 13.04 ^A	211.32 \pm 2.64 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 0.146$ $p= < 0.05$	$F= 4.628$ $p= < 0.001$	$F= 1.680$ $p= 0.227$	$F= 2.874$ $p= 0.133$	$F= 0.065$ $p= 0.805$

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A9. Concentración de nitrógeno mineral ($\text{NH}_4 + \text{NO}_3$) ($\mu\text{g}^{-1} \text{N g}^{-1}$ suelo) del suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	42.84 ± 3.98 ^A	66.42 ± 14.12 ^A	192.48 ± 21.09 ^A	144.47 ± 1.53 ^A	237.21 ± 46.39 ^B
Monte	28.84 ± 7.10 ^A	31.14 ± 7.25 ^A	131.52 ± 28.03 ^A	121.48 ± 6.60 ^A	256.07 ± 1.40 ^B
Silvopastoril	49.85 ± 12.35 ^A	39.46 ± 8.46 ^A	147.08 ± 3.16 ^A	nd	nd
Pastura	36.31 ± 9.28 ^A	61.18 ± 1.86 ^A	129.48 ± 17.87 ^B	157.51 ± 15.66 ^A	331.29 ± 7.03 ^A
Sistemas por	<i>F</i> = 0.001	<i>F</i> = 0.179	<i>F</i> = 5.191	<i>F</i> = 1.130	<i>F</i> = 10.27
Sitio	<i>p</i> = 0.972	<i>p</i> = 0.681	<i>p</i> < 0.05	<i>p</i> = 0.336	<i>p</i> < 0.05
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	598.37 ± 40.92 ^A	464.73 ± 210.3 ^A	429.67 ± 3.24 ^A	831.35 ± 111.8 ^A	903.48 ± 54.60 ^A
Monte	431.52 ± 9.86 ^B	219.24 ± 9.78 ^B	327.34 ± 12.83 ^B	556.39 ± 20.43 ^B	905.99 ± 37.76 ^A
Silvopastoril	279.87 ± 15.53 ^C	93.07 ± 10.03 ^C	305.53 ± 18.96 ^B	nd	nd
Pastura	317.28 ± 17.13 ^C	409.43 ± 35.87 ^A	193.51 ± 8.35 ^C	499.31 ± 45.20 ^B	353.22 ± 70.67 ^B
Sistemas por	<i>F</i> = 29.89	<i>F</i> = 0.957	<i>F</i> = 73.84	<i>F</i> = 6.769	<i>F</i> = 30.81
Sitio	<i>p</i> < 0.001	<i>p</i> < 0.05	<i>p</i> < 0.001	<i>p</i> < 0.05	<i>p</i> < 0.001

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A10. Mineralización neta de nitrógeno ($\mu\text{g}^{-1} \text{N g}^{-1}$ suelo) del suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	516.1 \pm 105.0 ^A	408.3 ^A	555.9 \pm 226.4 ^A	717.5 ^A	1081.7 \pm 374.5 ^A
Monte	400.0 \pm 21.7 ^A	287.4 \pm 146.8 ^A	499.4 \pm 54.8 ^A	395.6 \pm 307.9 ^A	650.0 \pm 231.4 ^A
Silvopastoril	224.0 \pm 91.0 ^B	194.3 \pm 92.6 ^A	451.9 \pm 65.5 ^A	nd	nd
Pastura	209.3 \pm 126.0 ^B	320.9 \pm 22.1 ^A	276.4 \pm 53.0 ^A	305.6 \pm 55.4 ^A	855.2 \pm 385.0 ^A
Sistemas por Sitio	<i>F</i> = 7.894 <i>p</i> = < 0.05	<i>F</i> = 0.086 <i>p</i> = 0.775	<i>F</i> = 2.794 <i>p</i> = 0.128	<i>F</i> = 1.525 <i>p</i> = 0.284	<i>F</i> = 0.110 <i>p</i> = 0.756
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	104.6 \pm 51.7 ^B	323.1 \pm 189.4 ^A	386.9 \pm 107.8 ^A	1282.1 \pm 272.5 ^A	2067.3 \pm 65.9 ^A
Monte	820.5 \pm 42.5 ^A	260.6 \pm 46.4 ^A	509.9 \pm 171.0 ^A	835.5 \pm 74.3 ^A	995.8 \pm 236.1 ^B
Silvopastoril	153.0 \pm 35.1 ^B	167.8 \pm 58.2 ^A	604.2 \pm 181.6 ^A	nd	nd
Pastura	242.8 \pm 15.1 ^B	122.5 \pm 14.3 ^A	410.9 \pm 82.1 ^A	815.7 \pm 79.9 ^A	1426.4 \pm 93.1 ^B
Sistemas por Sitio	<i>F</i> = 0.902 <i>p</i> = < 0.05	<i>F</i> = 5.036 <i>p</i> = 0.055	<i>F</i> = 0.014 <i>p</i> = 0.908	<i>F</i> = 2.612 <i>p</i> = 0.150	<i>F</i> = 1.242 <i>p</i> = < 0.05

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A11. Concentración de nitrógeno en biomasa microbiana ($\mu\text{g}^{-1} \text{N g}^{-1}$ suelo) del suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	12.75 ± 2.66 ^A	9.74 ± 3.20 ^A	21.24 ± 5.80 ^A	8.00 ± 0.34 ^A	23.85 ± 20.39 ^A
Monte	4.74 ± 1.67 ^A	7.74 ± 2.25 ^A	3.77 ± 0.52 ^B	5.55 ± 1.71 ^A	3.25 ± 1.72 ^A
Silvopastoril	10.90 ± 0.74 ^A	6.43 ± 2.96 ^A	17.91 ± 9.32 ^A	nd	nd
Pastura	11.83 ± 0.50 ^A	9.96 ± 1.74 ^A	5.25 ± 0.64 ^B	3.81 ± 1.54 ^A	2.07 ± 0.83 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 0.096$ $p= 0.762$	$F= 0.006$ $p= 0.939$	$F= 1.310$ $p= < 0.05$	$F= 4.480$ $p= 0.087$	$F= 3.146$ $p= 0.136$
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	21.39 ± 4.45 ^A	9.22 ± 1.26 ^A	30.54 ± 17.56 ^A	18.26 ± 2.10 ^A	34.58 ± 19.23 ^B
Monte	5.89 ± 2.20 ^B	6.62 ± 1.96 ^A	10.86 ± 1.61 ^B	16.44 ± 1.43 ^A	77.01 ± 34.46 ^A
Silvopastoril	20.95 ± 1.25 ^A	10.29 ± 5.95 ^A	10.96 ± 2.13 ^B	nd	nd
Pastura	10.46 ± 1.49 ^B	9.36 ± 2.32 ^A	4.94 ± 1.33 ^B	14.58 ± 1.88 ^A	81.75 ± 6.05 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 0.710$ $p= < 0.05$	$F= 0.031$ $p= 0.862$	$F= 10.689$ $p= < 0.01$	$F= 2.559$ $p= 0.153$	$F= 3.244$ $p= < 0.05$

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A12. Concentración de fósforo total ($\mu\text{g}^{-1} \text{P g}^{-1}$ suelo) del suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	276.0 \pm 75.00 ^A	208.5 \pm 7.50 ^A	224.0 \pm 116.46 ^A	420.0 \pm 0.00 ^A	277.5 \pm 7.50 ^B
Monte	336.0 \pm 39.69 ^A	546.0 \pm 54.08 ^A	238.5 \pm 112.50 ^A	397.5 \pm 37.50 ^A	285.0 \pm 60.00 ^B
Silvopastoril	301.0 \pm 36.06 ^A	176.0 \pm 5.00 ^A	301.0 \pm 101.49 ^A	nd	nd
Pastura	291.0 \pm 15.00 ^A	471.0 \pm 8.66 ^A	291.0 \pm 31.22 ^A	275.0 \pm 30.41 ^A	440.0 \pm 44.44 ^A
Sistemas por	$F= 0.002$	$F= 0.480$	$F= 0.503$	$H= 4.581$	$F= 9.166$
Sitio	$p= 0.960$	$p= 0.505$	$p= 0.496$	$p= 0.101$	$p= < 0.05$

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A13. Concentración de fósforo disponible ($\mu\text{g}^{-1} \text{PO}_4 \text{g}^{-1}$ suelo) del suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	11.18 ± 0.83 ^C	54.18 ± 10.56 ^B	1.12 ± 0.49 ^A	0.63 ± 0.57 ^A	1.68 ± 0.78 ^A
Monte	20.26 ± 1.88 ^A	314.36 ± 16.93 ^A	2.31 ± 0.81 ^A	0.06 ± 0.00 ^A	0.06 ± 0.00 ^A
Silvopastoril	16.24 ± 0.22 ^B	45.14 ± 4.34 ^B	0.98 ± 0.11 ^A	nd	nd
Pastura	23.20 ± 1.44 ^A	261.60 ± 18.41 ^A	3.72 ± 0.93 ^A	0.06 ± 0.00 ^A	0.88 ± 0.08 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 11.985$ $p= < 0.01$	$F= 0.540$ $p= < 0.01$	$F= 3.732$ $p= 0.085$	$H= 2.5$ $p= 0.286$	$H= 4.074$ $p= 0.130$
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	0.82 ± 0.13 ^B	34.98 ± 5.58 ^B	0.18 ± 0.07 ^B	1.92 ± 0.72 ^A	1.52 ± 0.47 ^A
Monte	2.24 ± 0.31 ^B	252.4 ± 26.60 ^A	0.44 ± 0.12 ^B	0.96 ± 0.09 ^A	2.22 ± 0.27 ^A
Silvopastoril	4.50 ± 0.47 ^B	18.96 ± 2.88 ^B	2.32 ± 1.15 ^A	nd	nd
Pastura	14.74 ± 10.79 ^A	0.26 ± 0.20 ^B	0.34 ± 0.11 ^B	89.68 ± 87.2 ^A	1.92 ± 0.03 ^A
Sistemas por Sitio	$H= 8.128$ $p= < 0.05$	$H= 9.452$ $p= < 0.05$	$H= 7.876$ $p= < 0.05$	$H= 5.535$ $p= 0.062$	$H= 1.815$ $p= 0.403$

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A14. Respiración basal del suelo ($\text{mg}^{-1} \text{CO}_2 \text{g}^{-1} \text{COS}$) (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	0.40 ± 0.10 ^A	0.39 ± 0.07 ^A	0.23 ± 0.11 ^B	0.41 ± 0.10 ^A	0.10 ± 0.13 ^A
Monte	0.30 ± 0.07 ^A	0.80 ± 0.16 ^A	0.44 ± 0.20 ^B	0.19 ± 0.15 ^A	0.38 ± 0.17 ^A
Silvopastoril	0.63 ± 0.20 ^A	0.65 ± 0.14 ^A	0.44 ± 0.09 ^B	nd	nd
Pastura	0.24 ± 0.14 ^A	0.98 ± 0.22 ^A	0.66 ± 0.15 ^A	0.49 ± 0.06 ^A	0.28 ± 0.03 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 0.038$ $p= 0.849$	$F= 3.579$ $p= 0.091$	$F= 6.139$ $p= < 0.05$	$F= 0.883$ $p= 0.390$	$F= 0.567$ $p= 0.485$
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	1.25 ± 0.11 ^A	0.58 ± 0.21 ^B	0.76 ± 0.15 ^B	0.38 ± 0.03 ^A	0.78 ± 0.17 ^A
Monte	1.09 ± 0.23 ^A	1.04 ± 0.22 ^A	1.12 ± 0.18 ^B	0.46 ± 0.08 ^A	0.74 ± 0.10 ^A
Silvopastoril	1.41 ± 0.30 ^A	1.13 ± 0.02 ^A	0.99 ± 0.06 ^B	nd	nd
Pastura	0.95 ± 0.23 ^A	1.23 ± 0.08 ^A	1.56 ± 0.47 ^A	0.62 ± 0.15 ^A	0.86 ± 0.06 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 0.300$ $p= 0.595$	$F= 6.23$ $p= < 0.05$	$F= 5.736$ $p= < 0.05$	$F= 3.309$ $p= 0.111$	$F= 0.415$ $p= 0.539$

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A15. Concentración de carbono en biomasa microbiana ($\mu\text{g}^{-1} \text{C g}^{-1}$ suelo) en el suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	116.34 \pm 22.13 ^B	109.86 \pm 0.30 ^A	106.81 \pm 26.14 ^A	67.85 \pm 6.07 ^A	51.36 \pm 17.47 ^A
Monte	71.78 \pm 15.36 ^B	84.12 \pm 15.36 ^B	33.18 \pm 8.35 ^A	60.54 \pm 20.30 ^A	22.18 \pm 3.37 ^A
Silvopastoril	172.66 \pm 3.71 ^A	62.06 \pm 4.22 ^B	36.04 \pm 13.28 ^A	nd	nd
Pastura	166.55 \pm 8.82 ^A	62.59 \pm 12.54 ^B	55.47 \pm 5.03 ^A	62.03 \pm 4.86 ^A	28.85 \pm 3.48 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 6.093$ $p= < 0.05$	$F= 9.231$ $p= < 0.05$	$F= 3.113$ $p= 0.111$	$F= 0.109$ $p= 0.754$	$F= 1.283$ $p= 0.308$
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	165.12 \pm 30.53 ^A	103.82 \pm 13.57 ^A	67.38 \pm 4.50 ^A	53.20 \pm 9.94 ^A	152.05 \pm 113.28 ^A
Monte	82.99 \pm 32.52 ^A	60.72 \pm 2.50 ^A	75.37 \pm 14.30 ^A	58.45 \pm 1.16 ^A	265.59 \pm 15.45 ^A
Silvopastoril	164.03 \pm 23.46 ^A	93.74 \pm 26.7 ^A	98.63 \pm 4.15 ^A	nd	nd
Pastura	83.02 \pm 4.78 ^A	73.84 \pm 6.85 ^A	40.85 \pm 17.51 ^B	39.88 \pm 15.25 ^A	281.55 \pm 17.79 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 1.311$ $p= 0.278$	$F= 1.217$ $p= 0.295$	$F= 0.600$ $p= < 0.05$	$H= 1.155$ $p= 0.561$	$H= 0.8$ $p= 0.670$

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A16. Relación respiración basal del suelo: carbono en biomasa microbiana (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	3.93 ± 1.60 ^A	3.58 ± 0.63 ^B	2.94 ± 1.92 ^B	3.17 ± 3.56 ^A	5.93 ± 0.96 ^A
Monte	5.02 ± 1.98 ^A	9.39 ± 0.38 ^A	12.53 ± 2.82 ^A	18.92 ± 10.47 ^A	2.54 ± 1.65 ^A
Silvopastoril	3.61 ± 1.10 ^A	10.87 ± 2.76 ^A	15.04 ± 3.89 ^A	nd	nd
Pastura	1.47 ± 0.89 ^A	18.13 ± 6.10 ^A	11.65 ± 1.92 ^A	10.14 ± 1.37 ^A	8.08 ± 1.52 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 1.946$ $p= 0.181$	$F= 8.515$ $p= < 0.05$	$F= 4.487$ $p= < 0.05$	$F= 1.673$ $p= 0.252$	$F= 0.089$ $p= 0.780$
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	7.38 ± 1.04 ^A	6.77 ± 3.52 ^A	13.77 ± 1.77 ^B	7.66 ± 1.34 ^A	18.16 ± 16.17 ^A
Monte	14.13 ± 2.23 ^A	16.92 ± 3.02 ^A	20.93 ± 8.07 ^B	22.49 ± 14.22 ^A	3.24 ± 0.05 ^A
Silvopastoril	8.54 ± 1.82 ^A	17.16 ± 5.71 ^A	13.23 ± 1.91 ^B	nd	nd
Pastura	11.71 ± 3.41 ^A	17.08 ± 2.17 ^A	51.98 ± 34.03 ^A	11.47 ± 1.78 ^A	4.14 ± 1.03 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 1.658$ $p= 0.226$	$F= 2.513$ $p= 0.147$	$F= 6.118$ $p= < 0.05$	$F= 4.819$ $p= 0.064$	$H= 1.866$ $p= 0.393$

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A17. Concentración de nitrato ($\mu\text{g}^{-1} \text{NO}_3 \text{g}^{-1}$ suelo) del suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	29.63 \pm 3.77 ^A	41.52 \pm 5.21 ^A	73.13 \pm 15.48 ^A	26.80 \pm 5.36 ^A	97.06 \pm 42.16 ^A
Monte	14.32 \pm 9.43 ^A	21.12 \pm 3.37 ^A	39.26 \pm 11.82 ^A	15.35 \pm 4.95 ^A	148.89 \pm 29.51 ^A
Silvopastoril	30.01 \pm 11.12 ^A	26.98 \pm 8.49 ^A	71.10 \pm 1.66 ^A	nd	nd
Pastura	23.85 \pm 8.85 ^A	22.19 \pm 6.25 ^A	42.39 \pm 14.27 ^A	28.88 \pm 15.99 ^A	133.40 \pm 11.09 ^A
Sistemas por Sitio	<i>F</i> = 1.357 <i>p</i> = 0.273	<i>F</i> = 2.716 <i>p</i> = 0.133	<i>F</i> = 0.007 <i>p</i> = 0.931	<i>F</i> = 0.036 <i>p</i> = 0.855	<i>F</i> = 0.082 <i>p</i> = 0.786
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	487.84 \pm 50.80 ^A	322.33 \pm 194.03 ^A	306.64 \pm 0.85 ^A	651.08 \pm 100.20 ^A	664.33 \pm 41.17 ^A
Monte	301.16 \pm 6.69 ^B	112.40 \pm 10.30 ^A	198.37 \pm 10.37 ^B	393.79 \pm 20.21 ^B	754.44 \pm 51.80 ^A
Silvopastoril	183.85 \pm 15.34 ^B	20.25 \pm 2.07 ^B	187.77 \pm 17.89 ^B	nd	nd
Pastura	201.11 \pm 16.25 ^B	358.67 \pm 46.33 ^A	73.68 \pm 6.70 ^C	343.94 \pm 41.14 ^B	141.89 \pm 68.73 ^B
Sistemas por Sitio	<i>F</i> = 20.569 <i>p</i> = < 0.01	<i>F</i> = 1.433 <i>p</i> = < 0.05	<i>F</i> = 41.76 <i>p</i> = < 0.001	<i>F</i> = 7.343 <i>p</i> = < 0.05	<i>F</i> = 8.133 <i>p</i> = < 0.05

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A18. Nitrificación neta ($\mu\text{g}^{-1} \text{N g}^{-1}$ suelo) del suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	513.8 ± 121.3 ^A	381.07 ^A	594.49 ± 244.4 ^A	814.03 ^A	801.98 ± 14.1 ^A
Monte	395.0 ± 23.4 ^A	275.55 ± 143.9 ^A	524.63 ± 23.6 ^A	423.80 ± 356.8 ^A	724.34 ± 266.9 ^A
Silvopastoril	198.4 ± 103.0 ^B	76.77 ± 14.3 ^A	337.39 ± 75.7 ^A	nd	nd
Pastura	211.0 ± 127.8 ^B	338.02 ± 18.2 ^A	248.71 ± 86.2 ^A	254.62 ± 43.1 ^A	576.56 ± 305.1 ^A
Sistemas por Sitio	<i>F</i> = 6.588 <i>p</i> = < 0.05	<i>F</i> = 0.022 <i>P</i> = 0.883	<i>F</i> = 4.374 <i>p</i> = 0.066	<i>F</i> = 2.512 <i>p</i> = 0.188	<i>F</i> = 0.637 <i>p</i> = 0.469
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	109.0 ± 29.5 ^B	147.9 ± 80.5 ^A	272.2 ± 68.5 ^A	704.4 ± 185.4 ^A	454.0 ± 229.5 ^A
Monte	323.1 ± 87.1 ^A	42.7 ± 6.1 ^A	295.7 ± 54.2 ^A	634.3 ± 22.4 ^A	523.1 ± 81.0 ^A
Silvopastoril	190.2 ± 27.0 ^B	9.4 ± 3.4 ^A	385.9 ± 136.2 ^A	nd	nd
Pastura	146.6 ± 22.0 ^B	136.3 ± 6.7 ^A	52.7 ± 14.1 ^B	585.2 ± 125.9 ^A	151.8 ± 100.8 ^A
Sistemas por Sitio	<i>F</i> = 0.181 <i>p</i> = < 0.05	<i>F</i> = 0.002 <i>p</i> = 0.960	<i>F</i> = 6.260 <i>p</i> = < 0.05	<i>F</i> = 0.451 <i>p</i> = 0.523	<i>F</i> = 2.644 <i>p</i> = 0.148

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A19. Relación nitrato: amonio del suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	2.62 ± 0.91 ^A	1.83 ± 0.44 ^A	0.61 ± 0.12 ^A	0.23 ± 0.05 ^A	0.68 ± 0.28 ^A
Monte	1.32 ± 1.02 ^A	2.48 ± 0.49 ^A	0.42 ± 0.06 ^A	0.14 ± 0.04 ^A	1.57 ± 0.69 ^A
Silvopastoril	1.61 ± 0.53 ^A	2.22 ± 0.70 ^A	0.94 ± 0.05 ^A	nd	nd
Pastura	1.11 ± 0.77 ^A	0.63 ± 0.26 ^A	0.48 ± 0.16 ^A	0.23 ± 0.05 ^A	0.69 ± 0.09 ^A
Sistemas por Sitio	$F= 1.357$ $p= 0.273$	$F= 2.716$ $p= 0.133$	$F= 0.007$ $p= 0.931$	$F= 0.036$ $p= 0.855$	$F= 0.082$ $p= 0.786$
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	4.59 ± 0.96 ^A	2.14 ± 1.12 ^A	2.50 ± 0.09 ^A	3.57 ± 0.31 ^A	2.79 ± 0.18 ^A
Monte	2.31 ± 0.04 ^B	1.05 ± 0.10 ^A	1.54 ± 0.05 ^B	2.42 ± 0.12 ^B	5.78 ± 1.88 ^A
Silvopastoril	1.97 ± 0.32 ^B	0.29 ± 0.08 ^A	1.60 ± 0.15 ^B	nd	nd
Pastura	1.73 ± 0.14 ^B	8.88 ± 3.62 ^A	0.61 ± 0.05 ^C	2.24 ± 0.28 ^B	0.67 ± 0.32 ^B
Sistemas por Sitio	$F= 20.56$ $p= < 0.01$	$F= 1.433$ $p= 0.265$	$F= 41.76$ $p= < 0.001$	$F= 7.343$ $p= < 0.05$	$F= 8.133$ $p= < 0.05$

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

A20. Relación carbono en biomasa microbiana: nitrógeno en biomasa microbiana del suelo (0-10 cm de profundidad) en Veracruz. Los valores son medias de $n=3 \pm 1$ EE. Y resultados del ANOVA para el efecto de los sistemas por sitio y entre sitios. Letras mayúsculas indican el resultado de la prueba Pos Hoc para los sistemas por sitio.

<i>Estación seca</i>					
Precipitación	Árido	Semiárido	Subhúmedo	Húmedo	Hiperhúmedo
Referencia	9.21 ± 0.20 ^B	12.64 ± 4.13 ^A	5.10 ± 0.14 ^A	8.46 ± 0.40 ^A	5.68 ± 4.13 ^A
Monte	16.49 ± 2.13 ^A	11.76 ± 2.16 ^A	9.29 ± 3.51 ^A	10.80 ± 0.33 ^A	8.68 ± 3.54 ^A
Silvopastoril	16.02 ± 1.34 ^A	18.14 ± 10.63 ^A	1.68 ± 0.32 ^B	nd	nd
Pastura	14.13 ± 0.92 ^A	7.36 ± 3.06 ^A	10.67 ± 0.56 ^A	23.09 ± 8.78 ^A	21.49 ± 9.65 ^A
Sistemas por	$F= 2.715$	$F= 1.105$	$F= 0.312$	$F= 4.746$	$F= 2.823$
Sitio	$p= < 0.05$	$p= 0.320$	$p= < 0.05$	$p= 0.081$	$p= 0.153$
<i>Estación de lluvias</i>					
Referencia	7.91 ± 1.00 ^A	11.50 ± 1.47 ^A	3.70 ± 1.36 ^B	2.87 ± 0.20 ^A	3.41 ± 0.91 ^A
Monte	14.31 ± 1.34 ^A	10.66 ± 2.55 ^A	6.92 ± 0.68 ^A	3.59 ± 0.22 ^A	4.68 ± 1.39 ^A
Silvopastoril	7.78 ± 0.74 ^A	11.43 ± 4.01 ^A	9.70 ± 1.81 ^A	nd	nd
Pastura	8.25 ± 1.20 ^A	8.60 ± 1.52 ^A	7.66 ± 2.66 ^A	2.62 ± 0.73 ^A	3.51 ± 0.48 ^A
Sistemas por	$F= 0.397$	$F= 0.994$	$F= 3.226$	$F= 0.386$	$F= 0.013$
Sitio	$p= 0.542$	$p= 0.342$	$p= < 0.05$	$p= 0.554$	$p= 0.912$

nd= no hay datos, al no disponer del sistema silvopastoril bajo estas condiciones de régimen de precipitación en Veracruz.

