



Impacto de la ganadería sobre la vegetación, emisiones y captura de carbono en el Chaco Boliviano



Carmelo Peralta-Rivero ^a

Miguel Ángel Beltrán-Santoyo ^b

Néstor Cuellar-Álvarez ^a

Gregorio Álvarez-Fuentes ^{b*}

^a Centro de Investigación y Promoción del Campesinado. Claudio Peñaranda No. 2706. Zona Sopocachi. 5854. La Paz, Bolivia.

^b Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Instituto de Investigaciones en Zonas Desérticas. San Luis Potosí, México.

*Autor de correspondencia: gregorio.alvarez@uaslp.mx

Resumen:

El ecosistema de la región del Chaco de Bolivia se encuentra en una situación frágil para realizar actividades productivas, una de las causas es el sobrepastoreo, que limita su desarrollo sustentable. El objetivo fue evaluar el impacto ambiental de la ganadería semi intensiva (GSI) y extensiva (GE) en el municipio de Macharetí, en el Chaco, Bolivia. La evaluación se realizó utilizando dieciséis indicadores ambientales en ambos sistemas de producción ganadera, fueron comparados mediante un análisis de varianza para un diseño completamente al azar y pruebas de medias múltiple ($P \leq 0.05$). La GSI tiene una mayor población bovina y mayor producción de leche, debido a un mejor manejo, también tiene mayor cantidad de especies vegetales; sin embargo, comparte con la GE el 90 % de ellas; la GSI muestra impacto ambiental menor, donde la generación de gases de efecto invernadero y degradación de la vegetación nativa y del suelo también es menor. En general la GSI presenta mayor cantidad de carbono (71.1 t C/ha) en sus distintos reservorios en comparación con la GE (60.7 t C/ha) ($P < 0.05$). El tipo de manejo de la ganadería es un factor determinante

en la regeneración de la vegetación natural de las especies forrajeras, sobre todo por el tipo de pastoreo que se realiza en esta región.

Palabras clave: Producción animal, Sobrecarga animal, Metano, Captura de carbono.

Recibido: 02/10/2023

Aceptado: 07/05/2025

Introducción

La deforestación para ampliar la frontera agrícola y pecuaria es la causa más importante de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) del sector agropecuario global, la ganadería emite 320 millones de toneladas anuales de metano, que representan 11 % de las emisiones de GEI globales^(1,2,3). La producción bovina origina impactos ambientales por la emisión de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) con diferente potencial de calentamiento, además con efectos negativos en los recursos naturales como el agua, el suelo, los bosques y la biodiversidad, contribuyendo al cambio climático (CC)^(4,5). Para 2050 se estima que la producción mundial de carne de bovino se duplicará, por lo que es importante reducir al menos a la mitad los impactos de los sistemas de producción, dado que los países de mayor demanda están agotando su capacidad de producción, la presión estará sobre países en desarrollo⁽⁶⁾, donde para 2025 existirá una relación de dos bovinos por habitante en estos países, donde los rumiantes son los mayores emisores de metano por fermentación entérica, tal es el caso de Bolivia donde la ganadería localizada en las zonas de tierras bajas, concentra la mayor población bovina del país^(7,8). En esta zona entre 2000 y 2010 se han deforestado 0.94 millones de hectáreas para la siembra de pastos para la ganadería⁽⁹⁾. Una de las zonas importantes de producción bovina es la región del Chaco, la cual tiene una extensión aproximada de 13.5 millones de hectáreas⁽¹⁰⁾, alberga 11.6 % del ganado bovino en Bolivia⁽¹¹⁾. Uno de los problemas ocasionados por la ganadería en esta región está relacionado con la capacidad de carga animal⁽¹²⁾, por lo que es fundamental replantear el modelo de producción con base en información técnica-científica que contribuya al diseño e implementación de un manejo sustentable de la ganadería. En tal sentido, el objetivo del presente estudio fue evaluar el impacto ambiental sobre la vegetación, emisiones de GEI y captura de carbono por parte de la ganadería semi intensiva (GSI) y extensiva (GE) en dos áreas del municipio de Macharetí, en la región del Chaco en Bolivia.

Material y métodos

La investigación se realizó en la región del Chaco de Bolivia, en el municipio de Macharetí, en dos sistemas de manejo de producción bovina. El primero, desarrolla una ganadería semi-intensiva (GSI), localizado dentro de los predios de la Asociación Comunitaria Zona Macharetí (20°51'32" S; 62°21'29" O) y el segundo, es una ganadería extensiva (GE), que se ubica en el predio de la propiedad privada "Los Mistoles" (20°45'50" S; 62°29'2" O)⁽¹³⁾.

La llanura del Chaco, tiene un clima xerofítico seco a semiárido, con periodos secos de hasta 8 meses, la precipitación de 782 mm y temperatura de 20 °C promedio anual y en algunos meses del año se registran temperaturas máximas de 48 °C y mínimas de -1 °C⁽¹⁴⁾. La vegetación predominante son matorrales xerofitos densos a ralos adaptados a la baja precipitación, mayormente con especies espinosas y de baja altura⁽¹³⁾.

La evaluación del impacto ambiental se basó en el análisis de 16 indicadores ambientales (Cuadro 1). Tres indicadores relacionados a las emisiones GEI del ganado; siete referentes a la vegetación y sumideros de carbono y seis sobre el impacto en el suelo⁽⁷⁾.

Cuadro 1: Evaluación ambiental de sistemas de manejo ganaderos criterios e indicadores para los dos sistemas de manejo ganadero

Criterios de evaluación	Indicadores
Impacto por emisiones GEI del ganado	Emisiones de CH ₄ del ganado por fermentación entérica. Emisiones de CH ₄ por manejo de heces.
Impacto sobre la vegetación y sumideros de carbono	Capacidad de carga animal. Carbono orgánico del suelo, Carbono de hojarasca, necromasa de las raíces y biomasa aérea. Regeneración natural de la vegetación.
Impacto sobre el recurso suelo	pH Contenido de agua Densidad aparente Porosidad Espacios de poros ocupados por agua Contenido de agua en volumen

Impacto por emisiones gases de efecto invernadero del ganado

La evaluación sobre emisiones de metano (CH₄) se ajustó de acuerdo con Beltrán *et al*⁽⁵⁾ en función del tamaño del hato, vacas en producción y vacas secas, producción promedio de leche, porcentaje de proteína y grasa en leche, peso vivo, consumo de materia seca (CMS) y

manejo de heces. Para calcular el factor de emisión de CH₄ entérico y del manejo de las heces, la eficiencia de aprovechamiento del alimento, se definió como litros de leche producidos por kilo de materia seca (MS) y otras fuentes de alimento ingeridas por día. La intensidad de emisión de CH₄ se calculó como la cantidad emitida de CH₄ entérico y el CH₄ por el manejo de las heces por litro de leche⁽¹⁵⁾, para lo cual la producción de leche por año se ajustó a los días de lactancia.

El CMS (kg vaca⁻¹ día⁻¹) y de energía total (ET) (Mcal vaca⁻¹ día⁻¹) se calculó con el software del National Research Council⁽¹⁶⁾. La emisión de CH₄ se determinó de acuerdo con el Panel Intergubernamental del Cambio Climático IPCC⁽²⁾, la ecuación (1) se utilizó para la emisión de CH₄ por fermentación entérica, la ecuación (2) para la emisión de CH₄ por el manejo de las heces, y la ecuación (3) para estimar la cantidad de sólidos volátiles excretados⁽¹⁷⁾.

(1)...Factor de emisión de metano entérico kg vaca⁻¹ año⁻¹ (FE_{eCH_4})

$$FE_{eCH_4} = EB \times \frac{Ym}{100} \times \frac{365}{55.65}$$

Donde, EB= ingesta de energía total, MJ d⁻¹ vaca⁻¹; Ym= factor de conversión en CH₄, porcentaje de la energía total del alimento convertida en CH₄ de 6.5 % ± 1 %; 55.65 es el contenido de energía del CH₄ en MJ kg.

(2)...Factor de emisión de CH₄ por manejo de heces kg por vaca por año (FE_{hCH_4}).

$$FE_{hCH_4} = (SV \times 365) \times \left[(B_0 \times 0.67 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}) \times \frac{\sum MCF_{S,F}}{100} \times S \right]$$

Donde, SV= sólidos volátiles excretados por día; B₀= capacidad máxima de producción de CH₄ de las heces, 0.188 m³ CH₄/SV; 0.67: factor de conversión de m³ de CH₄ a kg de CH₄, MCF_{S,k}= factor de conversión de CH₄ para cada sistema de manejo de heces (S) por región climática (k), =1.5 %; MS_(S,k)= fracción de las heces manejadas en el sistema (S) en la región climática (k), sin dimensión = 0.1.

(3)...Sólidos volátiles excretados por día (SV)

$$SV = EB \times (0.5 + (0.04 \times EB)) \times \frac{0.92}{18.45}$$

Donde: EB= energía total (MJ d⁻¹ vaca⁻¹).

El peso vivo de los bovinos se calculó con una cinta bovinométrica, el peso vivo se reporta de manera directa (99 % de efectividad)^(18,19).

Impacto sobre la vegetación y sumideros de carbono

Para evaluar la salud ecológica de la vegetación y su regeneración natural se muestrearon 30 parcelas de 5 × 5 m por sistema de manejo ganadero. Se midió altura y diámetro normal (DN) de árboles y arbustos (altura >20 cm) con una forcípula forestal (Haglöf Mantax Blue, Gerny), así como de individuos de la categoría fustal (altura entre 10 a 19.9 cm), latizal (altura entre 5 a 9.9 cm) y brinzal (altura < 5 cm).

La medición del carbono en los diferentes reservorios de los sistemas de manejo, se realizó según el diseño de las parcelas de muestreo en árboles y arbustos (10 × 100 m; Fustales 10 × 10 m; Latizales 5 × 5 m y Brinzales; la medición de la necromasa se realizó en parcelas de 5 × 5 m, la toma de muestras de hojarasca y de suelo en las parcelas de 1×1 m con el fin de calcular la cantidad de carbono. Para determinar la cantidad de carbono en la vegetación del sotobosque se muestrearon 100 sitios de 1 m² para cada sistema de manejo ganadero.

Para determinar el carbono de la biomasa aérea (BA), se utilizaron ecuaciones alométricas para especies arbóreas y arbustivas de clima seco (<1,500 mm año⁻¹)⁽²⁰⁾.

$$BA = 34.4703 - 8.0671DN + 0.6589DN^2$$

Donde, BA= biomasa aérea; DN= diámetro normal a 1.30 m.

Para la biomasa de las raíces (BR), se empleó la fórmula para especies de madera dura, característica de las especies en las áreas evaluadas de la región Chaco:

$$BR = e^{0.359} BA^{0.639}$$

Donde, e= base del logaritmo; BA= biomasa aérea.

Para establecer el carbono de la biomasa aérea y subterránea se asume un valor de 0.5^(2,20).

Para determinar el carbono de la hojarasca se recolectaron 30 muestras de 500 g, por sistema y se enviaron al Centro de Investigación Agrícola Tropical (CIAT), con el fin de determinar la cantidad de carbono de mediante la combustión húmeda del carbono (Walkley –Black)⁽²¹⁾.

Para la cantidad de carbono de la necromasa o materia orgánica muerta presente en los sistemas de manejo, se utilizó la metodología y ecuaciones empleadas por Espinoza, *et al*^(22,23).

$$V = \pi^2 \times \sum \frac{D^2}{200}$$

Donde, V= volumen en m³ 183; π =3.1416; D= diámetro de la pieza de la necromasa (metros).

La biomasa se calculó según la fórmula de Espinoza *et al*⁽²²⁾:

$$BM_{nm} = V \times \frac{P}{40}$$

Donde, BM_{nm} = biomasa de la necromasa grande (t); V= volumen en m³; p= densidad del tronco (t/m³) en el que se utilizaron promedios de 0.2 para troncos de densidad baja; 0.4 para troncos de densidad media y 0.6 para aquellos de densidad alta.

La necromasa se calculó asumiendo que el carbono compone el 50 % de la biomasa, y extrapolando los datos para determinar la cantidad de carbono en necromasa por hectárea.

El carbono del suelo se calculó a partir de 30 muestras por cada sistema de manejo. Para ello se utilizaron cilindros de 5 cm de diámetro y 20 cm de largo (392.7 cm³) para obtener muestras desde una profundidad de 0 a 20 cm, las cuales se depositaron en bolsas de plástico herméticas y se identificaron⁽²⁴⁾. Los cálculos de los reservorios de almacenamiento de carbono de ambos sistemas fueron sumados y extrapolados a unidades de hectáreas para posteriormente determinar toneladas de carbono por hectárea (t C/ha).

Finalmente, la carga animal se calculó por unidades animal por hectárea (UA/ha). Para ello se realizó un muestreo por transectos, para la GSI fueron 20 transectos lineales y se obtuvieron 200 muestras en seis potreros; para la GE se realizaron 10 transectos y se obtuvieron 100 muestras debido a que es un área homogénea sin divisiones. Cada uno midió 100 m lineales y la separación entre ellos fue de 200 m. En estos se recolectaron muestras de forrajes en un cuadrante de 1 m² cada 10 m de distancia⁽²⁵⁾. En cada cuadrante el forraje se cortó a una altura de 15 cm del suelo hasta una altura de 1.5 cm. En las muestras se incluyeron principalmente gramíneas, hierbas perennes y hojas de árboles y arbustos. Las muestras se pesaron en verde con una balanza (Amazonbasics, EK3211, USA), posteriormente se secaron en una estufa de aire forzado (Marca Ecoshel Mod. Fa-45b, México) para obtener el peso de la materia seca.

Impacto sobre el suelo

Se tomaron 30 muestras de suelo por sistema de manejo que fueron analizadas en el CIAT. El pH se determinó usando un potenciómetro (HANNA, México) para determinar el impacto de la compactación del suelo por la ganadería, según el cálculo de la densidad aparente del suelo, procedimiento desarrollado por García *et al*⁽²⁶⁾. Todas las muestras de suelo se pesaron en húmedo y posteriormente se secaron en un horno para obtener el peso seco. Para determinar el grado de compactación del suelo y otras variables en las áreas evaluadas se utilizaron las siguientes fórmulas⁽²⁷⁾.

Contenido de agua del suelo:

$$CAS_{g/g} = \text{peso húmedo} - \text{peso seco del suelo}$$

Densidad aparente del suelo:

$$DA_{g/cm^3} = \text{peso seco del suelo} / \text{volumen del suelo}$$

Porosidad de suelo:

$$PS_{(\%)} = 1 - (\text{densidad aparente del suelo} / 2.65)$$

Espacios de poros ocupados por agua:

$$EP_{(\%)} = \frac{\text{Contenido de agua en volumen} * 100}{\text{Porosidad del suelo}}$$

Contenido de agua en volumen:

$$CA_{g/cm^3} = \text{contenido de agua en el suelo } g/g * \text{densidad aparente}$$

Análisis estadístico

Con la información obtenida, a cada una de las variables de los GEI, Vegetación y Suelo, se les realizó una prueba de normalidad obteniendo $P > 0.47$ y $P > 0.32$ para Shapiro-Wilkings y Kolmogorov-Smirnov, respectivamente, mediante el Procedimiento UNIVARIATE, del paquete estadístico SAS 9.2⁽²⁸⁾, además se obtuvieron los estadísticos descriptivos; para comparar los dos sistemas de manejo se hizo un análisis de varianza para un diseño completamente al azar ($P \leq 0.05$), tomando como tratamiento a cada sistema de producción ganadero y una prueba de medias de Tukey ($P \leq 0.05$)⁽²⁹⁾.

Resultados y discusión

Impacto por emisiones GEI del ganado

En el Cuadro 2 se describen las características de ambos sistemas de producción ganadera; el régimen de tenencia de la tierra es distinto, sin embargo, la superficie es similar, en la GSI debido a que la propiedad es colectiva existen mangas de manejo o potreros, por lo que tiene mayor población bovina, con menos vacas en producción, menor peso vivo (PV), pero mayor producción de leche por vaca, produciendo 53.3 % más leche total que en GE.

Cuadro: 2. Características de los sistemas de manejo de la ganadería extensiva (GE) y semi-intensiva (GSI)

Características	GE	GSI
Situación legal de la tierra	Propiedad privada	Propiedad colectiva
Área cubierta de vegetación, ha	500	533.6
Mangas de manejo o potreros	0	6
Tamaño del hato	182	200
Vacas en producción	60	50
PV vacas en producción, kg	348.6 ± 55.3 ^a	328.1 ± 51.2 ^a
Producción promedio, L por vaca/día ⁻¹	1.27 ± 0.32 ^b	2.86 ± 0.59 ^a
Producción total de leche, L	76.2 ^b	143.0 ^a

PV= peso vivo.

^{ab} Medias con la misma literal por fila son iguales ($P<0.05$).

La intensidad de emisión de CH₄ entérica fue mucho mayor ($70.8 \pm 22.5 \text{ g L}^{-1}$) para las vacas que se encuentran bajo el sistema de manejo GE ($P<0.05$). Esto también se debe a que el ganado que se encuentra en los potreros en la GSI, sobre todo en Yaguarenda de la comunidad Macharetí Central, que tienen un CMS superior ($8.20 \pm 0.01 \text{ kg vaca}^{-1} \text{ día}^{-1}$) al de la GE; tal diferencia se confirma con el consumo de energía bruta (EB) que también es superior ($P<0.05$) ($9.22 \pm 0.05 \text{ Mcal día}^{-1}$).

De esta manera, mientras mayor es el consumo de materia seca, la energía bruta obtenida se incrementa, por ello las vacas tendrán mayor energía para lactación, aumentando la producción de leche y disminuyendo emisión de CH₄ entérico y por heces (Cuadro 3). Esto permite inferir que el hato de la GSI emite menos cantidad de CH₄ con relación a la GE; de acuerdo con Beltrán *et al*⁽⁵⁾ en cuanto mayor CMS y mejor es la dieta del ganado, las emisiones disminuyen; también se confirma lo que reportan Bonilla y Lemus⁽³⁰⁾ en los sistemas de producción extensivos, que la producción es más baja debido a la baja calidad de la dieta que limita el consumo de MS, la tasa de pasaje y menor aporte de energía, lo que trae como consecuencia bajo rendimiento productivo e incremento en las emisiones de CH₄, patrón que se constató en la presente investigación. La IE de CH₄ entérico y heces por vaca g/L⁻¹, fue mayor ($P<0.05$) en la GE, debido a que la producción de leche por vaca por día es menor.

Cuadro 3: Consumo de materia (CMS), energía bruta consumida (EBC) y emisiones por parte de la ganadería extensiva (GE) y semi-intensiva (GSI)

Características	GE	GSI
CMS, kg por vaca ⁻¹ día ⁻¹	7.67 ± 0.12 ^b	7.9 ± 0.04 ^a
EBC, Mcal por vaca ⁻¹ día ⁻¹	8.67 ± 0.13 ^b	8.9 ± 0.07 ^a
FE entérico, kg por vaca ⁻¹ año ⁻¹	24.78 ± 0.37 ^a	26.45 ± 0.21 ^a
Sólidos volátiles, kg por vaca ⁻¹ día ⁻¹	1.52 ± 0.02 ^b	1.67 ± 0.01 ^a
FE heces, kg por vaca año ⁻¹	0.11 ± 0.001 ^b	0.12 ± 0.002 ^a
IE CH ₄ entérico y heces por vaca ⁻¹ g/L ⁻¹	70.75 ± 22.5 ^a	30.52 ± 1.56 ^b

CMS= consumo de materia seca; EBC= energía bruta consumida; FE= factor de emisión; IE= intensidad de emisión.

^{ab} Medias con la misma literal por fila son iguales ($P < 0.05$).

Esto refleja que el manejo de un sistema ganadero es fundamental para garantizar disponibilidad de alimento. Por ello es importante un calendario de manejo de las mangas o potreros para asegurar la alimentación del ganado durante todo el año, situación que no ocurre en la GE, y se puede apreciar en los indicadores de impacto ambiental sobre la vegetación descrito posteriormente. Además de que en la GE las vacas gastan más energía en la búsqueda de alimento.

Impacto sobre la vegetación y sumideros de carbono

En cuanto a la vegetación natural, se identificaron 17 especies en la GE y 19 especies en la GSI. Las especies tala (*Celtis sp.*) y chorimimi (*Maytenus scutioides* (Griseb) Lourteig & O'Donnell) solo se encontraron en la GSI en muy baja densidad; las demás especies crecen en ambas áreas indicando que ambos sistemas comparten más del 90 % el mismo tipo de vegetación.

Las especies más abundantes en ambos sistemas fueron choroque (*Salta triflora* (Griseb.) A.D. Sanchez), garrancho (*Acacia praecox* Griseb.), escayante (*Mimozyanthus carinatus* (Griseb.) Burkart), coca de cabra (*Anisocapparis speciosa* (Griseb.) y sacha sandía (*Capparis salicifolia* Griseb.), todas ellas en la categoría de brinzales y latizales, es decir, individuos con DAP < 10 cm y por lo general, este tipo de especies son importantes como forraje. Entre las especies dominantes del estrato arbóreo en ambos sistemas predomina el quebracho colorado (*Schinopsis balansae* Engl.) y quebracho blanco (*Aspidosperma quebracho-blanco* Schtdl.).

En la categoría de árboles se encontraron las siguientes especies: *Caesalpinia paraguariensis*, *Cercidium praecox*, *Zyziphus mistol* Griseb, *Aspidosperma quebracho-blanco*, *Schinopsis balansae*, *Schinopsis cornuta*, *Celtis tala*, *Ceiba insignis* (Kunth) P.E. Gibbs & Semir; en la categoría de arbustos: *Maytenus scutioides*, *Salta triflora* (Griseb.),

Anisocapparis speciosa, *Mimozyanthus carinatus* (Griseb.) Burkart, *Acacia praecox*, *Achatocaraus praecox*, *Bougainvillea infesta*, *Capparis retusa*, *Capparis salicifolia*, *Morrenia brachystephana*, *Stetsonia coryne* (Salm-Dyck); en la categoría de herbáceas: *Sida rodrigoii*, *Sida cordifolia* L., *Abutilon indicum* (L.) Sweet, *Solanum chacoense* Bitter, y en la categoría de gramíneas: *Setaria lachnea* y *Leptochloa mucronata*.

Para las categorías “brinzales y latizales” el número de especies es similar en ambos sistemas de manejo (8 especies), la abundancia de individuos es distinta (4,250 vs 5,333 brinzales y 907 vs 1,307 latizales respectivamente por sistema de producción) ($P < 0.05$), lo que indica que el tipo de ganadería es un factor determinante en la regeneración de la vegetación natural de las especies forrajeras, sobre todo por el manejo del pastoreo realizado en ambos sistemas. Sin embargo, las categorías de fustales, así como para árboles y arbustos no existen diferencias estadísticas ($P > 0.05$) entre los sistemas de manejo, razón por la cual el problema se encuentra en las categorías de regeneración natural. Este escenario de alteración en la estructura poblacional es característico cuando la vegetación se ve presionada y va cambiando la densidad poblacional de las especies⁽³¹⁾.

De esta manera, con los resultados se puede inferir que el tipo de manejo ganadero permite o limita la regeneración natural, la cual a su vez es un indicador de la salud ecológica de la vegetación nativa; en la GE tienen deficiencias debido a que no se realizan prácticas de manejo para asegurar la regeneración natural, tal como lo indican Ureña y Villagra⁽¹²⁾ que para asegurar la regeneración natural de la vegetación en el Chaco Boliviano, es indispensable realizar el manejo de los agostaderos a través de prácticas de monte diferido, aplicando un plan de control del pastoreo de los animales por medio de alambradas, de manera que la vegetación sea utilizada racionalmente, aspecto que influye en el aumento de la vegetación forrajera. También se recomiendan crear algunas áreas de exclusión con alambradas antes de la época de lluvia para permitir que las plantas produzcan semillas y garantice la regeneración natural⁽³²⁾.

La cuantificación del carbono en los diferentes reservorios indica que existe una diferencia muy marcada entre ambas ganaderías, en general la GSI presenta mayor cantidad de carbono (71.1 t C/ha) en sus distintos reservorios en comparación con la GE (60.7 t C/ha) ($P < 0.05$). El mayor reservorio de carbono en ambos sistemas fue en la vegetación aérea y el suelo, después las raíces y la necromasa, la hojarasca fue la categoría con menor carbono capturado. Dentro de las categorías, los árboles y arbustos fueron donde se encontró más acumulación de carbono, siendo mayor ($P < 0.05$) en la GSI que, en GE, sin embargo, en el suelo en la GE la acumulación de carbono fue mayor ($P < 0.05$) que en la GSI (Cuadro 4). La diferencia es mayor en los reservorios de carbono en la necromasa, asimismo, cuando se compara la disponibilidad de carbono para cada categoría entre ambos sistemas de manejo, en todas a excepción de la categoría suelo, el carbono disponible es mayor en la GSI ($P < 0.05$), debido a una menor cantidad de vegetación aérea en cada una de sus categorías en la GE; otra

categoría donde se almacena gran cantidad de carbono es en los árboles y arbustos siendo mayor en GSI ($P<0.05$), esto es debido a la mayor abundancia de individuos.

Cuadro 4: Reservorios de carbono por categoría en la ganadería extensiva (GE) y semi-intensiva (GSI) en el Chaco Boliviano

Reservorios de carbono	Categorías	GE (t C/ha)	GSI (t C/ha)
Vegetación aérea	Árboles y arbustos	19.7	20.9
	Fustales	2.6 ^b	3.8 ^a
	Latizales	5.4 ^b	7.0 ^a
	Sotobosque*	0.05 ^b	0.34 ^a
Raíces	Árboles y arbustos	2.29	2.58
	Fustales	0.93 ^b	1.16 ^a
	Latizales	3.2 ^b	4.3 ^a
Suelo		24.2 ^a	23.7 ^b
Hojarasca		0.07 ^a	0.22 ^b
Necromasa		2.2 ^b	7.2 ^a
Total		60.7 ^b	71.1 ^a

* Incluye a brinzales y plántulas menores, así como gramíneas y especies herbáceas de diferentes especies.

^{ab} Medias con la misma literal por fila son similares estadísticamente ($P<0.05$).

La cantidad de carbono capturada en la GSI concuerda con lo reportado por Baccini *et al*⁽³²⁾, para la región septentrional del Chaco 68 t C/ha, en caso de GE se encuentra por debajo de este promedio de carbono capturado; sin embargo, en ambos sistemas están por debajo a lo que reportan Pérez *et al*⁽³³⁾ quienes mencionan que el carbono capturado en el suelo de los agostaderos es igual o inferior a lo que se captura en la producción de maíz, donde la labranza del terreno libera el carbono capturado; en la ganadería extensiva el sobrepastoreo y pisoteo permiten que se capture muy poco carbono. La diferencia entre el carbono almacenado por los sistemas ganaderos es un factor importante por considerar para realizar prácticas de mitigación y adaptación al cambio climático, más aún cuando en la región Chaco hasta el año 2016 se perdieron al menos 875,674 ha, de las cuales 151,815 fueron deforestadas entre 2012 y 2016⁽³⁴⁾. Por otro lado, existe diferencia en la disponibilidad de biomasa forrajera entre ambos sistemas, lo que se ve reflejado en la capacidad de carga animal. Para la GE, la disponibilidad en promedio de 330 kg de materia seca por hectárea, la capacidad de carga animal es de 14 ha por UA por año, esto significa que en 500 ha tiene la capacidad de alimentar tan solo a 36 UA, no obstante, al momento de la medición se estimó 151 UA resultado de 182 cabezas de ganado de diferentes categorías. Por otro lado, en la GSI se tiene una carga animal promedio de 5.7 ha por UA, según la disponibilidad promedio de 891 kg de MS por hectárea al año. La GSI de 533.6 ha según el análisis realizado indica que podría alimentar hasta 94.3 UA al año, no obstante, éstas albergaban 155 UA al momento del inventario.

En relación con la capacidad de carga animal en la GSI cuenta con una mayor disponibilidad de biomasa de 561 kg más de materia seca por hectárea, como alimento para el ganado, situación también reportada para otras áreas del Chaco^(12,32). No obstante, la GSI debe aumentar el área de manejo para garantizar la mejor alimentación de su hato, situación que no sucede para la GE, cuya extensión no respondería a la demanda alimenticia de su hato de 182 cabezas de ganado.

Esta situación, se repite en casi toda la GE en la región del Chaco de Bolivia, ya que pocas áreas de la región del Chaco de Bolivia la superficie con vocación ganadera aún es levemente mayor a la carga animal (5 ha/UA), y en el resto, la actividad ejerce presión sobre la vegetación en la región del Chaco y otras áreas que no tendrían vocación ganadera.

Impacto sobre el suelo

El pH y la densidad aparente del suelo son similares en ambos sistemas; en las demás variables existe diferencia estadística ($P<0.05$) presentando mejores condiciones en GSI (Cuadro 5), debido al manejo con una menor carga animal, compactando menos el suelo; dando como resultado mejor drenaje y más aireado, relacionado con mayor abundancia de vegetación como brinzales y latizales, lo que propicia mayor producción de biomasa necesaria para mantener la materia orgánica del suelo que regula y sostiene la estructura, calidad y funcionamiento de éste.

Cuadro 5: Comparación de las características físico químicas del suelo entre los sistemas de manejo de ganadería semi intensiva (GSI) y extensiva (GE)

Indicador	GSI	GE
pH	6.6	6.5
Contenido de agua, g	6.87 ^a	5.07 ^b
Densidad aparente, g/cm ³	1.46 ^a	1.49 ^a
Espacios de poros ocupados por agua, %	45.1 ^a	43.7 ^b
Contenido de agua en volumen, %	14.8 ^a	11.6 ^b
Porosidad, g/cm ³	9.9 ^a	7.56 ^b

^{ab} Medias con la misma literal por fila son similares ($P<0.05$).

Los suelos con escasas coberturas vegetales, por lo general sufren degradación hídrica o eólica que, combinada con las prácticas ganaderas, aceleran la pérdida de materia orgánica. Al respecto, autores^(26,35) indican que la materia orgánica no es una propiedad del suelo, sin embargo, ésta tiene una marcada influencia sobre sus propiedades físicas, sobre todo en la actividad biológica, por lo que la cobertura vegetal es muy importante, ya que en un suelo con escaso contenido de materia orgánica, tiene menos carbono y, la degradación biológica es mayor afectando la calidad y fertilidad de éste. En la GE, esta situación podría ser más

perjudicial a medida que desarrolle sus actividades ganaderas sin regular la carga animal y mejore las prácticas de manejo, ya que el pastoreo produce una disminución en la tasa neta anual de acumulación de C, debido al pisoteo excesivo⁽³⁶⁾.

Finalmente, es importante mencionar que el daño de las propiedades físicas del suelo junto con las pérdidas de nutrientes, constituyen un “costo oculto” para los sistemas de producción, y en muchos casos ya se están haciendo “visibles y tangibles” sobre todo en el de GE, lo cual hace difícil sostener los niveles productivos.

Conclusiones e implicaciones

La GSI tiene mejor manejo, y mayor producción de leche total con un menor número de vacas, debido a la mayor disponibilidad de materia seca y consumo de energía bruta por el ganado, y se disminuyó la emisión de CH₄ entérico y por heces. El impacto sobre la vegetación nativa es mayor en GE, ya que se identificó menor abundancia de individuos por especie, por lo tanto, menor captura de carbono por árboles y arbustos, que es uno de los mayores sumideros de carbono después del suelo, donde la captura de carbono fue similar. El tipo de ganadería es un factor determinante en la regeneración de la vegetación natural de las especies forrajeras de la vegetación nativa, sobre todo por el tipo de pastoreo que se realiza en los diferentes sistemas, lo que influye en las características fisicoquímicas del suelo, siendo en la GSI donde se encontraron las mejores condiciones.

Agradecimientos

A los productores de la Asociación Comunitaria Zona Macharetí y la propiedad privada la Mistoles, por permitirnos realizar el presente estudio y al Centro de Investigación y Promoción del Campesinado (CIPCA), Bolivia.

Conflicto de intereses

No existe conflicto de intereses.

Literatura citada:

1. Sauniois M, Stavert AR, Poulter B, Bousquet P, Canadel JG, Jackson RB, *et al.* The global methane budget 2000–2017. *Earth System Science Data* 2020;12(3):1561–1623. <https://doi.org/10.5194/essd-12-1561-2020>.
2. IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Refinement to the 2006 IPCC guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 2019. <https://www.ipcc.ch/report/2019-refinement-to-the-2006-ipcc-guidelines-for-national-greenhouse-gas-inventories/>.

3. Wolf J, Asrar G, West T. Revised methane emissions factors and spatially distributed annual carbon fluxes for global livestock. *Carbon Balance Management* 2017;12(1):16. doi:10.1186/s13021-017-0084-y.
4. Gerber PJ, Hristov AN, Henderson B, Makkar H, Oh J, Lee C, *et al.* Technical options for the mitigation of direct methane and nitrous oxide emissions from livestock: A review. *Animal* 2013;7(s2):220–234. <https://doi.org/10.1017/s1751731113000876>.
5. Beltrán SMA, Álvarez FG, Pinos RJM, Contreras SC. Emisión de metano en los sistemas de producción de leche bovina en el Valle de San Luis Potosí, México. *Agrociencia* 2016;50(3):297-305.
6. Steinfeld H, Gerber P, Wassenaar T, Castel V, Rosales M, Haan C. La larga sombra del ganado: Problemas ambientales y opciones. Rome FAO: 2009. <http://www.fao.org/3/a-a0701s.pdf>.
7. Peralta RC, Cuellar AN. La ganadería en la región del Chaco de Bolivia. Una evaluación de la sustentabilidad de los sistemas de manejo de ganadería semi-intensiva y extensiva. Centro de Investigación del Campesinado. Cuaderno de Investigación 85. Bolivia. 2018.
8. García E, Arana I, Paz O, Angulo W. Inventario de gases de efecto invernadero emitidos por la actividad agropecuaria boliviana. *J Cienc Tecnol Agr* 2012;2(3):351-370. https://www.researchgate.net/publication/264310265_Inventario_de_gases_de_efecto_invernadero_emitidos_por_la_actividad_agropecuaria_boliviana.
9. Müller R, Larrea ADM, Cuéllar S, Espinoza S. Causas directas de la deforestación reciente (2000-2010) y modelado de dos escenarios futuros en las tierras bajas de Bolivia. *Ecología en Bolivia* 2014;49,1:20-34. http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v49n1/v49n1_a03.pdf.
10. Rojas JC. Análisis de la situación agropecuaria en el Chaco Boliviano. CIPAC. Ed. Fundación Xavier Albó. Centro de Servicios Bibliográficos. 2018. <https://isbn.cloud/9789997432001/analisis-de-la-situacion-agropecuaria-en-el517-chaco-boliviano/>.
11. INE. Instituto Nacional de Estadística. Censo agropecuario 2018, Bolivia. Instituto Nacional de Estadística. La Paz. 2022. <https://www.ine.gob.bo/index.php/estadisticas-economicas/ganaderia-y-avicultura/ganaderia-cuadros-estadisticos/>.
12. Ureña R, Villagra R. Aportes para una ganadería comunitaria sostenible. Experiencias de comunidades Guaranís del Chaco Boliviano. CIPCA 2016. <https://cipca.org.bo/publicaciones-e-investigaciones/libros/aportes-para-una529-ganaderia-comunitaria-sostenible-experiencias-en-comunidades-guaranis-del-chaco-boliviano>.

13. IDRS. Instituto para el Desarrollo Rural de Sudamérica. Contribuciones para una agenda de gestión integral del agua. La Paz – Bolivia. Ed. PREVIEW GRÁFICA. 2017. https://www.sudamericarural.org/images/impresos/archivos/Machareti_para_una_agenda_de_gestion_integral_del_agua.pdf.
14. SENAMHI. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Bolivia. Atlas Climatológico de Bolivia. 2019. https://www.senamhi.gob.bo/agromet/investigaciones/AtlasClimatologicosBolivia_final.pdf.
15. Leslie M, Aspin M, Clark H. Greenhouse gas emissions from New Zealand agriculture: issues, perspectives and industry response. *Australian J Exper Agr* 2008;48(2):1-5. doi: 10.1071/EA07306.
16. NRC. National Research Council. Nutrient requirements of dairy cattle. National Research Council. National Academy Press. Washington, DC, USA. 2001. <https://nrc-nutrient-requirements-of-dairy-cattl.software.informer.com/>.
17. IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, Volumen 4: Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra. IPCC. (Intergovernmental Panel on Climate Change). IGES. (Institute for Global Environmental Strategies). Japón. 2006.
18. Mahecha L, Angulo J, Manrique LP. Predicción del peso vivo a través del perímetro torácico en la raza bovina Lucerna. *Rev Colomb Cienc Pecu* 2002;15:88-91. <https://www.redalyc.org/pdf/2950/295026068009.pdf>.
19. Aguirre L, Zhinin L. Métodos de pesaje de bovinos. CEDAMAZ. Ecuador 2010. https://www.researchgate.net/publication/216072790_metodos_de_pesaje_en_bovinos.
20. Gómez CH, Pinto RR, Guevara HF, González RA. Estimaciones de biomasa aérea y carbono almacenado en *Gliricidia sepium* (lam.) y *Leucaena leucocephala* (jacq.) y su aplicación en sistemas silvopastoriles. *ITEA-Inf Tec Econ Agrar* 2010;106(4):256-270. https://www.aida-itea.org/aida-itea/files/itea/revistas/2010/106-4/256_ITEA_106-4.pdf.
21. García J, Ballesteros M. Evaluación de parámetros de calidad para la determinación de carbono orgánico en suelos. *Rev Colomb Quim* 2005;34(2):201–209. <http://www.scielo.org.co/pdf/rcq/v34n2/v34n2a09.pdf>.
22. Espinoza DW, Krishnamurty L, Vásquez AA, Torres RA. Almacén de carbono en sistemas agroforestales con café. *Rev Chapingo Serie Cienc Forest Amb* 2012;18(1):57-70. <http://www.scielo.org.mx/pdf/rcscfa/v18n1/v18n1a6.pdf>.

23. Vos V, Vaca O, Cruz A. Sistemas agroforestales en la Amazonía Boliviana. Valoración de sus múltiples funciones. CIPCA. Bolivia 2015. <https://cipca.org.bo/publicaciones-e-investigaciones/cuadernos-de539investigacion/sistemas-agroforestales-en-la-amazonia-boliviana-una-valoracion-a-sus-multiples-funciones>.
24. Stolbovoy V, Montanarella L, Filippi N, Arwyn J, Gallego J, Grassi G. Soil sampling protocol to certify the changes of organic carbon stock in mineral soil of the European Union. 2nd ed. European Commission. Italy. 2007.
25. Esqueda C, Sosa E, Chávez A, Villanueva FJM, Royo M, Beltrán, S. Ajuste de carga animal en tierras de pastoreo, Manual de capacitación. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias, México. 2011. https://redgatro.fmvz.unam.mx/assets/ajustes_carga_animal.pdf.
26. García Y, Ramírez W, Sánchez S. Indicadores de la calidad de los suelos: una nueva manera de evaluar este recurso. *Pastos y Forrajes* 2012;35,(2):125-138. <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v35n2/pyf01212.pdf>.
27. USDA. Soil quality test kit guide. Soil Quality Institute, Agricultural Research Service, Natural Resources Conservation Service. USDA. Washington, DC.1999. https://efotg.sc.egov.usda.gov/references/public/WI/Soil_Quality_Test_Kit_Guide.pdf
28. SAS. SAS User's Guide: Statistics (version 9.2 ed.). Cary NC, USA: SAS Inst. Inc. 2001.
29. Steel RGD, Torrie JH, Dickey DA. Principles and procedures of statistics: A biometrical approach. 3ra ed. New York, USA: McGraw-Hill Book Co.; 1997.
30. Guariguata RM, García FC, Sheil D, Nasia R, Herrero JC, Cronkleton P, *et al.* Compatibility of timber and non-timber forest product management in natural tropical forests: Perspectives, challenges, and opportunities. *Forest Ecol Management* 2010;259(3):237-245. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.11.013>.
31. Torrico-Albino JC, Peralta-Rivero C, Pelletier E. Evaluación de la capacidad de resiliencia de sistemas de producción agroforestales, agricultura bajo riego y ganadería semi intensiva. *J Agr Sci Technol* 2017;1:37-48 <https://www.researchgate.net/publication/324174900>.
32. Baccini A, Goetz S, Walker W, Laporte N, Sun M, Sulla MD, *et al.* Estimated carbon dioxide emissions from tropical deforestation improved by carbon-density maps. *Nature Climate Change* 2012;2:182-193. <https://doi.org/10.1038/nclimate1354>.

33. Pérez IH, Rodríguez DI, García BR. Secuestro de carbono por el suelo y sus fracciones en agrosistemas tropicales de la región costa ecuatoriana. *Rev Universidad Sociedad* 2021;13(2):141-149.
34. ABT. Autoridad de Fiscalización y Control Social de Bosques y Tierras. Mapa de la superficie deforestada legal e ilegal del periodo 2011-2016 a nivel municipal y predial de los departamentos con mayor cobertura boscosa. Autoridad en Fiscalización y Control Social de Bosques y Tierra. Santa Cruz. Bolivia 2017. <http://abt.gob.bo/index.php?lang=es>.
35. Ingaramo OE, Indicadores físicos de la degradación de suelo [tesis doctoral]. La Coruña España: Universidade da Coruña; 2003.
36. Céspedes FF, Fernández J, Gobbi JA, Bernardis A. Reservorio de carbono en suelo y raíces de un pastizal y una pradera bajo pastoreo. *Rev Fitotec Mex* 2012;35(1):79–86.