



ANÁLISIS DE CICLO DE VIDA DE TRES SISTEMAS GANADEROS TROPICALES EN CAMPECHE, MÉXICO: CASO DE ESTUDIO[†]

[LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THREE TROPICAL LIVESTOCK SYSTEMS IN CAMPECHE, MEXICO: CASE OF STUDY]

Maribel Molina-Rivera¹, Rafael Olea-Pérez^{1,*}, Francisco Aurelio Galindo-Maldonado¹ and Carlos Manuel Arriaga-Jordán²

¹Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, UNAM. Avenida Universidad 3000, Coyoacán, Ciudad de México, México. Email: perol@unam.mx

²Instituto de Ciencias Agropecuarias y Rurales, UAEM. Carretera Toluca-Atacomulco Km 14.5, Toluca, Estado de México, México.

*Corresponding author

RESUMEN

La ganadería en Campeche se desarrolla en pastizales, acahuales y recientemente se ha fomentado en silvopastoreo. Estos sistemas de pastoreo fueron evaluados para determinar su papel en la reducción de emisiones gases de efecto invernadero (eGEI) en la ganadería tropical. El estudio se realizó utilizando un análisis de ciclo de vida (ACV) “de puerta a puerta” en producciones vaca-becerros (UPPc) y doble propósito (UPPd). La unidad funcional fue un kilogramo de peso vivo ajustado por contenido de proteína (kgPV-eq). Las eGEI no fueron diferentes entre los sistemas de pastoreo debido a sus similitudes en productividad y origen de la materia seca en la dieta. Sin embargo, al comparar las eGEI de las UPPc con las UPPdp, estas fueron diferentes ($P < 0.01$), debido a que las UPPdp tienen mayor productividad por hectárea con respecto a las UPPc. Algo similar ocurrió al evaluar el Uso de Suelo para el cual las UPPdp necesitaron menor superficie en comparación con las UPPc, ya que la producción láctea aumentó casi al doble la producción total en unidades funcionales. En este estudio la productividad tuvo influencia en la reducción de eGEI, no así el sistema de pastoreo. El ACV fue útil para evaluar objetivamente los sistemas ganaderos en Campeche y detectar los puntos de oportunidad para reducir las eGEI y mejorar la productividad.

Palabras clave: Análisis de ciclo de vida; gases de efecto invernadero; uso de suelo; silvopastoril; acahual; pastoreo.

SUMMARY

The cattle raising is mainly developed in pastures and secondary forest (named: acahuales) in Campeche, and recently silvopastoral systems have been also fostered in this region. These grazing systems were evaluated to determine their role to reduce greenhouse gas emissions (eGEI) in tropical livestock systems. The study was carried out using a “door to door” life-cycle assessment (LCA) of cow-calve (UPPc) and dual-purpose (UPPd) units. The functional unit was one kilogram of live weight adjusted for protein content (kgPV-eq). The eGEI were not different among grazing systems due to their similarities in productivity and the origin of dry matter in diet. However, when eGEI of the UPPc and UPPdp were compared, these were different ($P < 0.01$), due to productivity per hectare of UPPdp was greater than the UPPc. Something similar occurred for land use, where the UPPdp needed less area than the UPPc, since milk almost twofold the total functional unit production. In this study, productivity had a great influence on the reduction of eGEI, but the grazing system did not make difference. The LCA was useful to objectively evaluate the livestock systems in Campeche and detect key points on eGEI reduction and farm productivity.

Keywords: Life cycle assessment; greenhouse gases; land use; silvopastoral; secondary forest; grazing.

INTRODUCCIÓN

La ganadería tropical en México se desarrolla bajo el sistema de pastoreo extensivo en monocultivo (Mn). De acuerdo con la encuesta nacional agropecuaria 2014, el 49.42 % de los bovinos en México se producen bajo este sistema (INEGI, 2014a). El Mn se caracteriza por la utilización de grandes extensiones de terreno con gramíneas introducidas como fuente

principal de alimento para el ganado (López-Vigoa *et al.*, 2017).

Sin embargo, la transformación del uso de suelo de selva tropical en pastizales ha generado alteraciones en el ecosistema y no se ha conseguido tener buena productividad. Se estima que anualmente el cambio de uso de suelo de selvas tropicales es aproximadamente de 140 mil hectáreas (ha), de las

[†] Submitted December 12, 2018 – Accepted March 12, 2019. This work is licensed under a CC-BY 4.0 International License. ISSN: 1870-0462

cuales la mayor parte es destinada a la ganadería (SEMARNAT, 2008).

Las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (eGEI) en México durante el 2015 fueron de 682,959.101 Gg de CO₂-eq de las cuales se estima que el 10 % (70,567.60 Gg de CO₂-eq) fue generada por la industria agropecuaria y de estas últimas, el 87 % (61,721.93 Gg de CO₂-eq) fue emitido únicamente por los bovinos (INECC, 2015). Siendo el tercer sector productivo de importancia para establecer estrategias de reducción de eGEI. Por otro lado, la conservación de tierras forestales y la conversión de tierras con otros usos en tierras forestales generó una emisión negativa de GEI de -139,970.12 Gg de CO₂-eq en el mismo año (INECC, 2015). Algo similar ha sido reportado en los sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi), en donde las eGEI pueden ser negativas (Naranjo *et al.*, 2012) o reducidas significativamente (Harrison *et al.*, 2015, Rivera *et al.*, 2016) al mantener el ecosistema natural con poca transformación, el establecimiento de cultivos forestales, maderables o frutales y potencialmente se puede aumentar la fertilidad del suelo por la asociación con leguminosas forrajeras (Bacab *et al.*, 2013, López-Vigoa *et al.*, 2017) además mejora la calidad del alimento disponible para el ganado en la época seca y reduce el gasto de alimentación en comparación con el Mn. Ya que cuando escasea el forraje se debe comprar algún tipo de alimento o suplemento para compensar el bajo aporte de nutrientes de la dieta, sobre todo si el pastoreo se basa en monocultivo de gramíneas (López-Vigoa *et al.*, 2017) y especialmente durante la época de secas en donde puede haber pérdida de peso o venta de animales flacos. Otra opción ha sido el pastoreo en acahuales, también llamado sistemas de baja intensidad o “monte” (Mt), que son áreas de selva secundaria en sucesión del sistema agrícola tradicional tumba-rosa-quema. Al respecto se ha observado que en época de secas la calidad de las especies forrajeras disponibles en los acahuales no es suficiente para incrementar la ganancia diaria de peso del ganado, pero su consumo al menos evita la pérdida de peso de este, además la diversidad de especies consumidas es mayor que en otros sistemas llegando a 53 especies de calidad forrajera variada; mayoritariamente leguminosas (Sosa-Rubio *et al.*, 2006). Con frecuencia existe la concepción que estas áreas de vegetación secundaria no poseen valor o son malezas, sin embargo, estas áreas tienen una gran diversidad de especies vegetales comestibles y forrajeras.

Los sistemas de producción que contemplan la utilización diversificada de especies forrajeras y no forrajeras como parte fundamental de la producción animal, como los SSPi y Mt aportan más beneficios al medio ambiente, a la biodiversidad, el bienestar

animal y la salud de los animales que aquellos basados en Mn (Galindo *et al.*, 2017). Además tienen el potencial de reducir las emisiones de metano provenientes de la digestión de los rumiantes (Molina *et al.*, 2016) por la presencia de taninos en las especies forrajeras de los acahuales y en la leucaena (*L. leucocephala*), leguminosa altamente utilizada en los SSPi.

Campeche, es un estado insertado en un ecosistema predominantemente selvático, el cual ha tenido cambios de uso de suelo principalmente a causa de la industria agropecuaria en los años setenta cuando el gobierno federal incentivó a los ejidatarios a desmontar las selvas para establecer áreas agrícolas y ganaderas “modernas” que causaron la pérdida del 25 % de los ecosistemas naturales del estado y casi la mitad de las áreas desmontadas se convirtieron en acahuales al dejar de utilizarlas como áreas productivas (Cortina-Villar *et al.*, 1999). Actualmente la pérdida de ecosistemas continúa a un ritmo acelerado: en el 2016 Campeche perdió 54,700 ha (22 % del total deforestado en México ese mismo año; Beauregard, 2017). Sin embargo, algunos ganaderos han comenzado a adoptar sistemas de producción amigables con el ambiente como el SSPi, pero es incierto el grado de adopción y hay poca información para evaluar su efectividad en la ganadería y los efectos ambientales. El objetivo del presente trabajo es comparar los sistemas de pastoreo Mn, SSPi y Mt en el estado de Campeche para determinar si hay diferencias entre cada sistema con respecto a las eGEI y la eficiencia productiva.

Para conocer el impacto ambiental de estos sistemas de pastoreo se pueden usar diferentes herramientas (Astier *et al.*, 2008, Vilain, 2008, FAO, 2014, Molina-Rivera *et al.*, 2018); sin embargo el análisis de ciclo de vida (ACV) es una metodología estandarizada internacionalmente (ISO, 2006b, 2006a) que facilita la comparación objetiva de estos sistemas de pastoreo con la finalidad de identificar y cuantificar los impactos ambientales que cada uno genera en las diferentes fases del manejo de los nutrientes, ya sea en el ganado o en su disposición ambiental, para establecer medidas correctivas de los procesos y mejorar la eficiencia y optimización de los recursos (IHOBE, 2009).

MATERIALES Y MÉTODOS

Área de estudio

El trabajo se realizó en Campeche, México en el 2017. Campeche es un estado que se ubica al sureste de México entre los paralelos 17°49'01" y 20°51'37" N y 89°05'20" y 92°28'21" O; el clima, en el 92 % del estado, se clasifica como cálido subhúmedo (Aw), presenta una temperatura media anual de 26.0° C y

precipitación con rango de 1,200 a 2,000 mm (SMN, 2017). Campeche destina alrededor del 26 % de su territorio a la ganadería en pastoreo (Tabla 1); cuenta con 448,086 cabezas de bovinos que son principalmente cruza de razas especializadas con ganado criollo (Tabla 2). Las características generales de la producción bovina en este estado se resumen en la Tabla 2.

Para realizar el muestreo se consultaron los datos censales del estado de Campeche por municipio y con los metadatos se determinaron sus principales zonas ganaderas de acuerdo con la distribución de la carga de bovinos; tomando como baja carga la zona centro (municipio de Escárcega), carga mediana, zona norte (municipio de Hopelchén) y carga alta, zona sur (municipio de Candelaria). En donde se pretendía evaluar los tres principales sistemas de pastoreo: Mn, Mt y SSPi; los dos primeros por ser los sistemas de pastoreo más utilizados (Tabla 1) y el SSPi por ser un sistema que en los últimos años ha sido fomentado para mejorar la productividad ganadera y como estrategia de mitigación del cambio climático (Mendoza-Vega y Molina-Rosales, 2012; Galindo et al., 2017).

Sistemas de pastoreo bajo estudio

Sistema de pastoreo extensivo en Monocultivo (Mn). Tener al menos 10 años de haber realizado el cambio en el uso de suelo a Mn, con la implantación de al menos el 70% de la superficie de pastoreo con pastos introducidos y con control de maleza nativa para mantener el Mn, donde los principales forrajes fueran pastos tropicales como: brizanta (*Brachiaria brizantha*), tanzania (*Panicum maximum* cv. Tanzania) y otros adaptados regionalmente. Donde los arbustos y árboles fueran escasos o en su caso sólo participaran en cercas perimetrales; por lo que la altura de pastoreo en general fuera de 60 cm o menos.

En cada región de Campeche se visitaron unidades de producción pecuaria (UPP) donde los propietarios estuvieron dispuestos a participar para la caracterización de sus unidades. Después de la entrevista se encontró que ninguno de los entrevistados utilizaba exclusivamente un sólo sistema de pastoreo, por lo que se establecieron los siguientes criterios mínimos en cada sistema de pastoreo para poder seleccionar las UPP.

Sistema de pastoreo en acahual, sistemas de pastoreo de baja intensidad o “monte” (Mt). UPP donde el pastoreo fuera principalmente en vegetación nativa, pero podía tener superficies de pastos introducidos siempre y cuando estas no fuesen mayores al acahual.

La vegetación nativa, incluía ramas de árboles jóvenes, arbustos y acahuals producto de la

recuperación de la selva después del manejo tradicional agrícola de tumba-rosa-quema, donde la vegetación nativa tuviera 10 o más años de ser la principal fuente de materia seca (MS) durante el año. Ampliando el horizonte de pastoreo hasta 1.20 m de altura. Donde la superficie de pastizales introducidos fueran fracciones dispersas distribuidas entre el Mt.

Tabla 1. Distribución de uso de suelo de Campeche, México.

Uso de suelo	Superficie (ha)	%
Selva ¹	323989	61.27
Ganadería	1478330	25.70
Pastizales	627 828	42.46
Acahuals, selvas y sabanas	850 502	57.53
Agricultura	230 818	4.01
Otros ²	517 563	9.00

¹Áreas de vegetación natural conservada, puede ser selva primaria o secundaria.

²Otros usos de suelo incluyen: matorrales, superficies de descanso, acahuals sin uso aparente, cuerpos de agua, infraestructura y asentamientos humanos.

Fuente: Villalobos-Zapata y Mendoza-Vega, (2010).

Tabla 2. Características de la ganadería bovina de Campeche, México.

Característica	Cantidad
Área estatal destinada para pastoreo (%)	26.73
Bovinos producidos en pastoreo continuo (%)	71.19
Bovinos producidos en pastoreo controlado (% ¹)	20.05
Bovinos producidos en corral (%)	1.93
Bovinos producidos en corral y pastoreo (%)	5.41
Características Raciales	
Bovinos criollos (%)	9.77
Bovinos de razas especializadas (%)	9.95
Bovinos cruza de criollos con otras razas (%)	78.85
Vacas para cría de becerros (%)	48.35
Vacas para producción de leche (%)	2.42
Vacas para doble propósito (%)	8.73
Edad promedio al primer parto (meses)	30.72
Fertilidad a parto (%)	51.17
Relación hembra:macho (hembras)	11.95
Mortalidad al año (%)	13.93
Edad promedio al destete (meses)	6.68
Carga animal (cabezas ha ⁻¹)	0.5

¹Pastoreo controlado: división de la superficie para pastoreo en potreros de tamaño adecuado a la carga ganadera que puede soportar de acuerdo con las características y épocas de crecimiento de las principales especies de valor forrajero del pastizal y adecuando a esto los períodos que los animales permanecen en cada potrero. Fuente: INEGI (2012; 2014b; 2016), Díaz-Castillo et al. (2014).

Sistema silvopastoril (Sp). Se buscó que las UPP tuvieran de 15 a 20 años de haber hecho el cambio de uso de suelo a Mn, y de entre 5 a 7 años de haber introducido leguminosas forrajeras, ya sea como bancos de proteína (superficies sembradas con alta densidad de leguminosas para corte y para suplementar al ganado en comederos) o en potreros de pastoreo con densidades de al menos 5,000 plantas ha^{-1} . Donde la leucaena (*L. leucocephala*) fue la principal leguminosa forrajera establecida para mejorar la calidad de la MS ofrecida al ganado. Por lo que la altura de pastoreo dependía de la combinación de forrajes, partiendo del 1.20 m de altura en los predios que contenían leucaena a 60 cm o menos en aquellos que sólo había pastizal.

Con la información de las entrevistas iniciales y los criterios descritos para Mn, Mt y Sp se seleccionaron las UPP cuyos propietarios manifestaron podían cumplir con estos criterios y aceptaran participar y compartir la información a detalle. Se tuvo una UPP de cada sistema de pastoreo por región para reducir el efecto ambiental local, quedando la distribución de las UPP como se detalla en la Figura 1.

Unidades de Producción Pecuaria

Se evaluaron tres UPP con distinto sistema de producción pecuario en cada región de Campeche, en total nueve UPP, las cuales cumplían con los criterios por sistema descritos en la sección anterior. Todas la UPP se dedicaban a la producción de becerros al destete (UPPc), vendiendo a esta edad principalmente a los machos y manteniendo a las hembras para su

crecimiento y descartándolas a diferentes edades para dejar sólo las hembras de reemplazo. En cada sistema de pastoreo había una UPP que también tenía producción de bajas cantidades de leche, lo que se denomina doble propósito (UPPd). El 100 % de ellas realizaban como manejo reproductivo la monta natural y el manejo de excretas era por deposición en las praderas. En ninguna UPP se reportó la adición de fertilizantes orgánicos ni inorgánicos diferentes a las deyecciones depositadas por los animales durante el pastoreo. Todas las UPP tenían ganado cruzado en donde fenotípicamente las razas predominantes eran: Brahaman, Beefmaster, Pardo Suizo, Holstein, Cebú, Simbrah, Criollo, Sardo Negro y Gyr.

Análisis de Ciclo de Vida

Como se estableció previamente el ACV se utiliza para estimar los contaminantes ambientales emitidos durante un proceso productivo, donde en forma estandarizada y objetiva (ISO, 2006b, 2006a) se contabilizan los efectos del flujo de los recursos y las emisiones que le son atribuidas a la producción del bien o servicio, en este caso la producción de becerros en pastoreo.

El ACV consiste en cuatro etapas que están relacionadas entre sí, iniciando por establecer los objetivos y alcances de la evaluación, para conocer lo más preciso posible los límites temporales y espaciales del análisis, así como definir la Unidad Funcional (UF) o unidades en las que se expresarán las cargas ambientales.

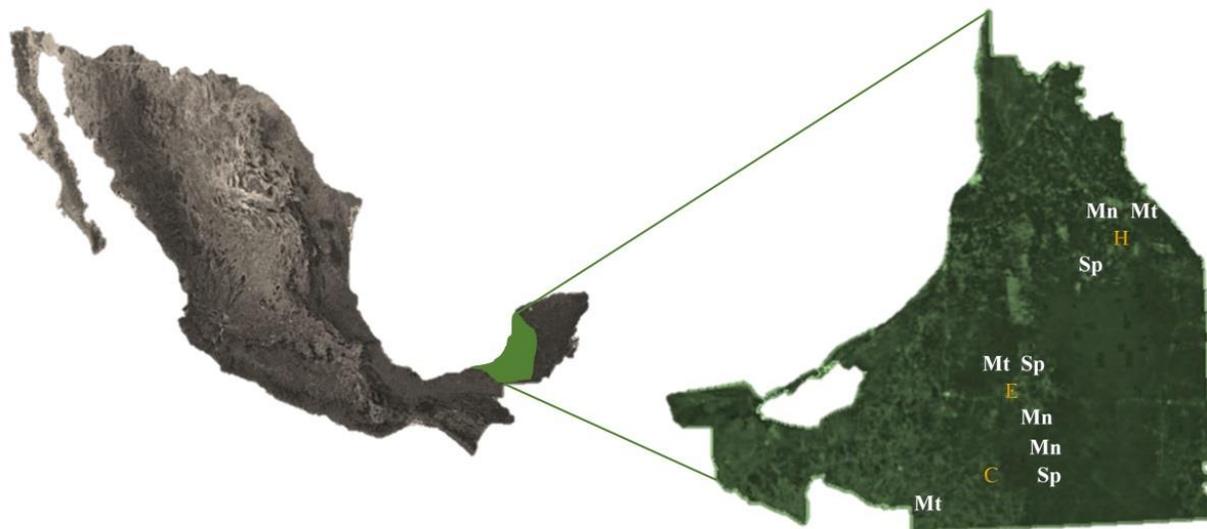


Figura 1. Distribución de las unidades de producción pecuaria muestreadas.

H, municipio de Hopelchén, zona norte; E, municipio de Escárcega, zona centro; C, municipio de Candelaria, zona sur; Mn, monocultivo; Sp, Silvopastoril; Mt, monte.

Fuente: Mapa Google Earth Pro, 2018.

La segunda etapa es el desarrollo del inventario del ciclo de vida, que en forma clara y detallada describe los procesos e información utilizada para desarrollar el flujo productivo y estimación de emisiones, esta etapa es la más extensa y puntual del análisis, así como la que consume la mayor cantidad de recursos y tiempo, pues la información debe ser auditada de acuerdo al presupuesto esperado. La tercera etapa es el análisis del impacto, donde se detallan los procesos para la estimación de emisiones en relación con la UF. La cuarta y última etapa es la interpretación del análisis, donde se exponen los resultados y su interpretación. A continuación, se desarrollan las primeras tres etapas y la última etapa se expone en las secciones de resultados y discusión.

Objetivo y alcance

Los límites del análisis se establecieron de “puerta a puerta”, es decir, desde la entrada de insumos para la producción vaca-becerro hasta la salida del producto como becerros y reproductores de desecho o leche vendidos a pie de potrero. No se incluyeron los medicamentos, agroquímicos, combustibles e instalaciones de manejo debido a que no fue posible coleccionar suficiente información por falta de registros y ser escasamente usados en las UPP. Se construyó la unidad funcional (UF) estandarizando los principales productos (peso vivo en pie y leche) con base en su contenido de proteína cruda para expresarse como kilogramo de peso en pie de ganado bovino vendido, ajustado a 18.75 % de proteína cruda (kgPV-eq). Para ello se consideró el contenido de PC en leche y se transformó a su equivalente en KgPV-eq para tener la UF final de cada UPP. Las categorías de impacto ambiental evaluadas fueron el potencial de calentamiento global o emisiones de gases de efecto invernadero expresado como kgCO₂-eq kgPV-eq⁻¹ y el uso del suelo expresado como m² kgPV-eq⁻¹.

Inventario de ACV

En esta etapa se recolectó la información de cada sistema de producción con un análisis retrospectivo correspondiente al año 2017. Se empleó inicialmente una encuesta participativa, seguido de entrevistas semiestructuradas en forma individual a propietarios y responsables del manejo mediante visitas repetidas a las UPP para establecer el flujo del movimiento de ganado, las entradas y salidas de insumos y los rendimientos de materia seca (rMS) de cada UPP durante todo el año. Con esta información se determinó la superficie de cada UPP y de esta, la cantidad de tierra destinada al pastoreo, al cultivo de forrajes y la reserva para la época de sequía; también se determinó la composición de la dieta, cantidad de

alimento ofrecido y el inventario animal. Además, se obtuvieron los parámetros productivos, reproductivos y el manejo de las excretas. Para corroborar o auditar los rMS de los cultivos y determinar los valores de PC de todos los ingredientes de las dietas ofrecidas en las UPP se realizó una revisión bibliográfica de investigaciones realizadas en regiones con condiciones similares al área de estudio (Tabla 3). Los datos de PC de los concentrados fueron obtenidos de las etiquetas de los productos.

Evaluación del impacto

En esta etapa, con la información obtenida en la fase anterior se estimaron los impactos del Potencial de Calentamiento Global y Uso de Suelo. El Potencial de Calentamiento Global (PCG) se estandarizó a eGEI en kgCO₂-eq, para ello se utilizaron los equivalentes de PCG a 100 años de: 1, 25 y 298 para CO₂, CH₄ y N₂O, respectivamente (IPCC, 2006). En el cálculo del PCG, se incluyeron las emisiones de metano de la fermentación entérica y del manejo de las excretas a nivel de potrero y por su deposición en las praderas.

El consumo de MS de los animales considerado para el cálculo de metano se obtuvo por etapa productiva: Para los sementales se usaron las tablas del NRC en requerimientos nutrimentales de reproductores para ganado cárnico (NRC, 1984) y para el resto de los animales del hato se calcularon con base a las siguientes fórmulas descritas en el NRC (1984):

Hembras reproductoras:

$$CDA = W^{0.75}(0.1462 EN_m - 0.0517 EN_m^2 - 0.0074)$$

Ganado en crecimiento y engorda:

$$CDA = W^{0.75}(0.1493 EN_m - 0.0460 EN_m^2 - 0.0196)$$

Donde: CDA: Consumo Diario de Alimento, kgMS; W: Peso vivo del bovino, kg; EN_m: Energía Neta de mantenimiento, Mcal/kg de la dieta

Para la estimación de metano, producto del manejo de las excretas se calculó con base en el Tier 2 del IPCC (2006). Las fuentes de óxidos nitrosos estuvieron relacionadas a las excreciones de nitrógeno vía estiércol y orina, en concordancia con las recomendaciones del IPCC, Tier 2 (IPCC, 2006). Es importante resaltar que la excreción de nitrógeno fue calculada como el total de nitrógeno remanente que no se convirtió en leche o carne y de acuerdo con los lineamientos del IPCC (2006). Los factores de emisión utilizados se presentan en la Tabla 4.

Tabla 3. Bibliografía para auditar el rendimiento de materia seca y proteína cruda de los ingredientes de las dietas ofrecidas en las unidades de producción pecuaria en Campeche, México.

Ingrediente	Referencia
Acahual	Carranza-Montaño <i>et al.</i> , 2003, Cecconello <i>et al.</i> , 2003.
<i>Andropogon gayanus</i>	Toledo <i>et al.</i> , 1989, Enríquez-Quiroz <i>et al.</i> , 2011.
<i>Brachiaria brizantha</i>	Paredes-Rincón, 2000, Bugarin <i>et al.</i> , 2009, Enríquez-Quiroz <i>et al.</i> , 2011, Durán-Martínez, 2014, Muñoz-González <i>et al.</i> , 2014.
<i>Brachiaria híbrido cv. Mulato</i>	Muñoz-González <i>et al.</i> , 2014.
<i>Brachiaria humidicola</i>	Cruz-López <i>et al.</i> , 2011, Enríquez-Quiroz <i>et al.</i> , 2011, Muñoz-González <i>et al.</i> , 2014.
Grama nativa ¹	Alonso-Díaz <i>et al.</i> , 2007, Muñoz-González <i>et al.</i> , 2014.
<i>Leucaena leucocephala</i>	García <i>et al.</i> , 2008, Bugarin <i>et al.</i> , 2009, Peters <i>et al.</i> , 2010, Petit-Aldana <i>et al.</i> , 2010, Cruz-López <i>et al.</i> , 2011, López <i>et al.</i> , 2015.
<i>Panicum maximum cv. Mombasa</i>	Rodríguez-Lopez, 2009, Cuartas <i>et al.</i> , 2015.
<i>Pennisetum purpureum (Cuba CT-169)</i>	Ramírez <i>et al.</i> , 2008.
<i>Sorghum spp.</i> ²	Reyes-Muro <i>et al.</i> , 2013.
<i>Panicum maximum cv. Tanzania</i>	Enríquez-Quiroz <i>et al.</i> , 2011, Cuartas <i>et al.</i> , 2015.
Varios ³	NRC, 1984, Obispo y Chicco, 1993, Rosales-Nieto <i>et al.</i> , 2007, Shimaya-Miyasaka, 2009.
<i>Zea mays</i> ⁴	NRC, 1984, Shimaya-Miyasaka, 2009, Reyes-Muro <i>et al.</i> , 2013, Yescas <i>et al.</i> , 2015.

¹Grama nativa, está integrada por forrajes de los géneros: *Paspalum*, *Axonopus*, *Cynodon*, *Desmodium*, *Calopogonium*.

²Rastrojo de sorgo.

³Varios, incluye las referencias para bloques nutricionales, melaza, pollinaza y urea.

⁴Maíz, incluye las referencias para maíz en grano, rastrojo de maíz, maíz para ensilar, mazorca con y sin hoja.

Tabla 4. Factores de emisión utilizados en cada Unidad de Producción Pecuaria.

Gas	Fuente	Ecuación/Factor de emisión	Referencia
Metano	Fermentación entérica	$CH_{4Ent} = \sum EF_e * N / 10^6$ $EF_e = \frac{(GE * (Y_m / 100) * 365)}{55.65}$	IPCC, 2006
	Excretas en praderas	$CH_{4Est} = \sum (EF_m * N / 10^6)$ $EF_e = VS * 365 * [B_o * 0.67 * (MCF / 100) * MS]$ $VS = [GE * (1 - DE / 100) + (UE * GE)] * [(1 - CENIZA / 18.45)]$	IPCC, 2006
Óxidos nitrosos directos	Excretas en praderas	$N_2O_D = [(F_{PRP,SO} * EF_{3PRP,SO}) + (F_{PRP, CPP} * EF_{3PRP, CPP})] * (44 / 28)$ $F_{PRP, CPP} = N * N_{ex} * MS_{T, PRP}$ $N_{ex} = N_{consumido} * (1 - N_{retención})$ $EF_{2CG, TROP} = 16$ $EF_{3PRP, CPP} = 0.02$	IPCC, 2006
Óxidos nitrosos indirectos	Volatilización de excretas en pradera	$N_2O_{ATD} = ((F_{PRP} * Frac_{GASM}) * EF_4) * (44 / 28)$ $Frac_{GASM} = 0.2$ $EF_4 = 0.01 \text{ kg N}_2\text{O} - \text{N}$	IPCC, 2006
	Lixiviación de excretas en praderas	$N_2O_L = (F_{PRP} * Frac_L * EF_5) * (44 / 28)$ $Frac_L = 0.3$ $EF_5 = 0.0075 \text{ kg N}_2\text{O} - \text{N}$	IPCC, 2006

CH_{4Ent}, emisiones totales de metano de la fermentación entérica; EF_e, factor de emisión de metano para la fermentación entérica; N, número de cabezas de la categoría de ganado; GE, energía bruta; Y_m, factor de conversión de metano, porcentaje de la energía bruta en el alimento convertida en metano; DE, Digestibilidad; CH_{4Est}, emisiones del manejo de excretas para una población definida; EF_m, factor de emisión de metano del manejo del estiércol; VS, sólidos volátiles excretados diariamente para una categoría de ganado (= 0.04GE); B_o, capacidad máxima de producción de metano de las excretas por categoría de ganado (0.1); MCF, factores de conversión de metano para cada sistema de manejo de excretas (1.5%); MS, fracción de las excretas por categoría de ganado manejado utilizando el sistema de manejo de excretas (1); CENIZA, contenido de ceniza de las excretas

calculado como una fracción de la materia seca del alimento ingerido (0.08); UE, energía urinaria expresada como fracción de GE; N_2O_D , emisiones directas de N_2O ; $F_{PRP,SOP}$, superficie anual de los suelos orgánicos; $EF_{3PRP,SO}$, factor de emisión para las emisiones de N_2O de suelos orgánicos; $EF_{3PRP,CPP}$, factor de emisión para las emisiones de N_2O del N de la orina y el estiércol depositado en pasturas, prados y praderas; N_2O_{ATD} , cantidad anual de N_2O producido por deposición atmosférica de N volatilizado de suelos gestionados; $F_{PRP,CPP}$, cantidad anual de N de la orina y el estiércol depositado en pasturas, prados y praderas por animales en pastoreo; MS, fracción del total de la excreción de N de cada categoría de ganado que se deposita en las pasturas, prados y praderas; $Frac_{GASM}$, fracción de N de la orina y el estiércol depositado por animales de pastoreo que se volatilizan como NH_3 y NO_x ; N_{ex} , excreción promedio anual de nitrógeno por cabeza por categoría; $N_{consumido}$, ingesta anual de nitrógeno por cabeza de animal por categoría; $N_{retención}$, fracción de la ingesta anual de nitrógeno que se retiene por animal por categoría; EF_4 , factor de emisión para emisiones de N_2O resultante de la deposición atmosférica de N en superficie del suelo o agua; N_2O_L , cantidad de N_2O del estiércol que se lixivia; EF_5 , factor de emisión para emisiones de N_2O por lixiviación y escurrimiento; $Frac_L$, fracción de pérdidas de N del estiércol debido a escurrimiento y lixiviación.

Uso de Suelo

El Uso de Suelo, se consideró a la ocupación del suelo como un recurso, en el sentido de ser temporalmente no disponible para otros fines; considerando la productividad por hectárea y la necesidad de superficie por producto: $kgPV\text{-}eq\ ha^{-1}$ y $m^2\ kgPV\text{-}eq^{-1}$, respectivamente. El uso de suelo considerado fue sólo aquel que se utilizó para pastoreo continuo o como reserva forrajera para la época de sequía dentro de las UPP, no se consideró el suelo utilizado para la producción de cultivos forrajeros debido a que la superficie era muy pequeña dentro de las UPP y tampoco se consideró para la producción de alimento comprado.

Análisis estadístico

Se utilizó el programa *Statistical Package for the Social Sciences* (IBM®, SPSS® Statistics, Versión 21) utilizando el análisis de varianza (ANOVA) para determinar las diferencias entre eGEI, Uso de Suelo o productividad entre los tipos de sistemas de pastoreo (Mn, Sp y Mt). Adicionalmente se realizó un arreglo de las UPP con base en el tipo de producción, es decir, las UPPc y las UPPdp para evaluar los mismos parámetros.

RESULTADOS

En la Tabla 5 se presentan los principales parámetros que tuvieron los sistemas de pastoreo evaluados. Donde se aprecia que no hubo diferencia en el comportamiento productivo ni en los parámetros de desarrollo del rebaño entre los sistemas de pastoreo. En relación con la producción general de leche, carne y leche-carne ajustada al contenido de proteína cruda ($kgPV\text{-}eq\ a^{-1}$) pareciera ser diferente entre los sistemas productivos, pero al ajustar la producción a la superficie utilizada ($kgPV\text{-}eq\ ha^{-1}a^{-1}$) no hubo diferencias entre sistemas de pastoreo (Tabla 5, sección D).

Con relación a la composición de los potreros, pese a que los propietarios durante las entrevistas estimaban que las leguminosas para el Sp y el acahual en el Mt era la principal fuente de forraje, ni la MS ni la

superficie destinada a estos forrajes representó la principal fuente de MS, siendo las gramíneas el principal aporte, como se aprecia en la Tabla 6. Adicionalmente hubo una UPP (H-Mt) que después del análisis de la información no cumplió con los parámetros productivos básicos, pues la información fue insuficiente o contradictoria durante la entrevista, por lo que se decidió eliminarla del análisis.

Emisiones de gases de efecto invernadero

Las eGEI entre los sistemas de pastoreo no fueron diferentes (Tabla 7, sección A). En el caso de la fuente de emisión y tipo de GEI como se esperaba, el metano tuvo la mayor contribución con casi el 80 %, seguido por los óxidos nitrosos con 18 % y alrededor del 3 % por metano de las excretas (Tabla 8, sección A). Por otro lado, cuando se analizaron los datos por tipo de producción (UPPc y UPPdp) la productividad medida en $kgPV\text{-}eq\ ha^{-1}$ y las eGEI ($kgCO_2eq\ kgPV\text{-}eq^{-1}$) sí fueron diferentes ($P<0.05$). Donde las UPPdp fueron dos veces más productivas y tuvieron casi tres veces menos eGEI que las UPPc (Tabla 7, sección B). En este caso, la emisión de metano por fermentación entérica fue 56 % menor en las UPPdp con respecto a las UPPc; algo similar ocurrió con las emisiones de metano de las excretas y con los óxidos nitrosos de la UPPdp, en donde tuvieron 42 % y 80 % menor emisión que en las UPPc, respectivamente (Tabla 8, sección B).

Uso de Suelo

En los sistemas de pastoreo el Uso de Suelo no tuvo diferencias significativas para la producción de un $kgPV\text{-}eq$ (Tabla 7, sección A). Sin embargo, al realizar el análisis de los datos por tipo de producción se determinó que las UPPdp necesitaron casi la mitad de suelo que utilizaron las producciones en UPPc para producir una unidad de producto (Tabla 7, sección B).

DISCUSIÓN

Emisiones de gases de efecto invernadero

Los factores de emisión de metano por fermentación entérica utilizados en este estudio (Tabla 4) fueron

ajustados de acuerdo al peso corporal y contenido de energía en la dieta (ver consumo de MS en métodos) del ganado en las diferentes etapas productivas de acuerdo con las recomendaciones del IPCC, *Tier 2* (IPCC, 2006) obteniendo un valor promedio de $97.57 \pm 20.1 \text{ g } 288 \text{ kgPV}^{-1} \text{ día}^{-1}$, que al compararlo con la emisión de metano de $88.0 \text{ g } 288 \text{ kgPV}^{-1} \text{ día}^{-1}$ obtenido en cámaras de respiración de circuito abierto, para ganado en condiciones de trópico reportado por Ku-Vera *et al.* (2018), los valores promedio usados en este estudio quedan dentro del rango de 18.9 a $150.1 \text{ g } 288 \text{ kgPV}^{-1} \text{ día}^{-1}$ reportados en las cámaras de respiración.

Además, las eGEI por unidad funcional de los sistemas de pastoreo, pese a no ser diferentes entre ellos (Tabla 7, sección A), fueron similares a los encontrados por Becoña *et al.* (2014) en donde

evaluaron 20 sistemas de producción de becerros en pastoreo en Uruguay con eGEI promedio de $20.8 \pm 5.4 \text{ kgCO}_2\text{-eq kgPV}^{-1}$, este autor reporta un rango de 11.4 a $32.2 \text{ kgCO}_2\text{-eq kgPV}^{-1}$ debido a la productividad de las UPP analizadas, donde las UPP que dieron dietas con mayor contenido de PC tuvieron una tasa de fertilidad mayor y por lo tanto más becerros al destete que las UPP a las que se les dio menor contenido de PC en la dieta (13.7 % vs. 9.4 % de PC y 95 % vs. 46 % de becerros al destete, respectivamente). Pese a que en Campeche se esperaba encontrar una diferencia entre sistemas de pastoreo esto no sucedió, ya que el rango entre los sistemas de pastoreo fue de 16.02 a $19.5 \text{ kgCO}_2\text{-eq kgPV}^{-1}$. Esta cercanía entre valores se debió a que la productividad entre sistemas de pastoreo no fue diferente (Tabla 7, sección A), ya que el consumo de PC y carga animal fue similar entre los sistemas (Tabla 5, sección A y C).

Tabla 5. Características de los sistemas productivos.

Ítem	Unidades de medición	Mn Prom±DE	Sp Prom±DE	Mt Prom±DE	Prom±DE
A. Hato					
Vacas	Cabezas año ⁻¹	68.3±10.4	26.0±15.1	55.0±7.1	49.1±22.4
Relación hembra:macho	Hembras	30.8±10.1	19.3±9.0	22.5±3.5	24.4±9.2
Becerras al destete ¹	%	49.8±2.0	53.2±3.6	61.0±1.4	53.9±5.2
Becerras vendidos al destete	%	56.5±24.8	62.5±23.8	73.6±9.9	63.0±20.1
Intervalo entre partos	Días	498.6±10.0	470.1±21.0	463.4±5.3	479.2±20.7
Edad al primer parto	Meses	37.3±4.2	40.0±5.3	40.5 ±6.4	39.1±4.6
Carga animal	UA ha ⁻¹	1.3±0.5	1.1±0.1	1.3±0.1	1.2±0.3
B. Ganancia Diaria de Peso					
Lactantes	kg	0.798±0.168	0.730±0.092	0.696±0.005	0.747±0.112
Crecimiento ²	kg	0.248±0.116	0.106±0.013	0.248±0.022	0.207±0.097
Desarrollo ³	kg	0.267±0.028	0.082±0.051	0.253±0.030	0.210±0.092
Reemplazos ⁴	kg	0.199±0.072	0.233±0.058	0.133±0.122	0.190±0.081
Reemplazos ⁵	kg	—	0.225±0.056	0.073±—	0.206±0.060
C. Nutrientes de la dieta					
	% PC	7.0±1.5	7.3±0.8	7.6±0.9	7.3±1.0
D. Productividad					
P. leche*	L ha ⁻¹ a ⁻¹	314.0	470.6	555.5	446.7±122.5
P. carne*	kgPV-eq ha ⁻¹ a ⁻¹	109.4±58.1	117.7±49.8	101.7±3.4	110.6±41.5
P. carne y leche*	kgPV-eq ha ⁻¹ a ⁻¹	128.9±51.7	147.0±100.5	153.6±76.7	141.9±67.9
P. leche*	kgPV-eq a ⁻¹	8910.848	4744.305	8399.155	2756±3993.9
P. carne*	kgPV-eq a ⁻¹	8940.8±2574.4	5134.8±3950.8	9803.2±1935.7	7729.2±3410.5
P. carne y leche*	kgPV-eq a ⁻¹	11911.1±7667.8	6716.2±6606.1	14002.8±4003.4	10486.0±6484.8

Mn, monocultivo; Mt, monte; Sp, silvopastoril; UA, unidad animal de 450 kg; PC, proteína cruda; P., producción; kgPV-eq, kg de peso vivo ajustado a 18.75 % de PC; a, año.

*Leche ajustada a 3.5 % de PC; Carne ajustada a 18.75 % de PC; Carne y leche ajustada a 18.75 % PC.

¹Se refiere al porcentaje de becerros destetados entre el total de hembras del hato; ² del destete hasta 1 año de vida; ³ de 1 año hasta 2 años de vida; ⁴ de 2 años hasta 3 años de vida; ⁵ más de 3 años de vida.

Tabla 6. Composición de la dieta ofrecida por fuente de alimento.

Ítem	Unidades de medición	Mn	Sp	Mt	Prom±DE
		Prom±DE	Prom±DE	Prom±DE	
A. Proporción de MS de la dieta ofrecida por fuente de alimento					
Leguminosas ¹	%MS		3.4±1.9		3.4±1.9
Acahual	%MS			3.8±3.6	3.8±3.6
Gramíneas ²	%MS	98.8±1.3	93.5±3.1	91.1±1.1	94.9±3.9
Suplementos y aditivos ³	%MS	1.2±1.3	3.6±1.4	5.1±2.5	3.1±2.2
B. Proporción de la superficie destinada al pastoreo por fuente de alimento					
Leguminosas ¹	%		13.9±9.7		11.8±13.3
Acahual	%			15.0±15.5	15.0±15.5
Gramíneas ²	%	100±0.0	86.8±9.8	85.0±15.5	91.3±10.7

Mn, monocultivo; Mt, monte; Sp, silvopastoril; MS, materia seca; ha, hectárea.

¹Leguminosas, se refiere a: *L. leucocephala* y árboles y arbustos utilizados en el Sp.

²Gramia nativa conformada por gramíneas de los géneros: *Paspalum*, *Axonopus*, *Cynodon*, *Desmodium*, *Calopogonium*. Grama introducida está conformada por los siguientes pastos: Llanero (*Andropogon gayanus*), brizanta (*Brachiaria brizantha*), mulato (*Brachiaria híbrido* cv. Mulato), humidícola (*Brachiaria humidicola*), mombasa (*Panicum maximum* cv. Mombasa), *Pennisetum purpureum* (Cuba CT-169) y tanzania (*Panicum maximum* cv. Tanzania).

³Suplementos y aditivos incluye: bloques nutricionales, concentrado para ganado lechero, maíz en grano, mazorca con y sin hoja, melaza, pollinaza y urea.

Tabla 7. Gases de efecto invernadero, productividad de unidades ganaderas y Uso de Suelo por sistema de pastoreo y tipo de producción de ganado.

Ítem	Gases de Efecto Invernadero	Productividad	Uso de Suelo
	(kgCO ₂ -eq kgPV-eq ⁻¹) Prom±DE	(kgPV-eq ha ⁻¹) Prom±DE	(m ² kgPV-eq ⁻¹) Prom±DE
A. Sistemas de pastoreo			
Mn	19.5±10.5 ^a	129.0±51.7 ^a	88.4±41.4 ^a
Sp	17.2±8.7 ^a	147.0±100.5 ^a	87.6±42.9 ^a
Mt	16.0±10.2 ^a	153.6±76.7 ^a	74.4±37.2 ^a
Promedio	17.7±8.4	141.9±67.9	84.6±35.4
B. Tipo de producción			
Carne	23.1±5.4 ^a	105.6±40.7 ^{a*}	103.5±29.1 ^a
Doble propósito	8.9±1.4 ^b	202.4±63.5 ^{b*}	53.2±18.1 ^b

Mn, monocultivo; Mt, monte; Sp, silvopastoril; PV-eq, peso vivo ajustado a 18.75 % de proteína cruda.

Productividad, se refiere a la suma de la producción de peso vivo y leche.

^{a,b} Literales diferentes en la misma columna y sección tienen P<0.05

^{a,b} Literales diferentes y con asterisco en la misma columna y sección tienen P<0.01

Tabla 8. Emisiones de gases de efecto invernadero por fuente de emisión, sistemas de pastoreo y tipo de producción de ganado en kgCO₂-eq kgPV-eq⁻¹.

Fuente de emisión	Metano		Óxidos nitrosos
	Fermentación entérica	Excretas	Excretas
	Prom±DE (%)	Prom±DE (%)	Prom±DE (%)
A. Sistema de pastoreo			
Mn	15.6±8.1	0.6±0.2	3.4±2.2
Sp	13.4±6.4	0.5±0.2	3.3±2.3
Mt	12.3±6.6	0.8±0.4	2.9±2.2
Promedio	14.0±6.2 (78.3)	0.6±0.2 (3.5)	3.2±2.1 (18.2)
B. Tipo de producción			
Carne	17.7±3.9 (76.8)	0.7±0.2 (3.1)	4.6±0.9 (20.1)
Doble propósito	7.7±1.2 (85.0)	0.4±0.1 (4.8)	0.9±0.4 (10.2)

Mn, monocultivo; Mt, monte; Sp, silvopastoril; PV-eq, peso vivo ajustado a 18.75 % de proteína cruda.

Sin embargo, las eGEI de este trabajo fueron mayores a las encontradas por Beauchemin *et al.* (2010), ellos tuvieron 10.4 kgCO₂-eq kgPV⁻¹, es decir, casi la mitad de lo encontrado para los sistemas de pastoreo en Campeche. Debido a que en el estudio de Beauchemin *et al.* (2010) la alimentación y la productividad fue mejor, ellos tuvieron pastos de alta calidad con 12.1 % PC, tasa de becerros al destete de 85 %, ganancia diaria de peso de los becerros en lactancia (GDPI) de 0.934 kg día⁻¹ y edad de las vaquillas al primer parto de 24 meses; mientras que en este estudio los sistemas de pastoreo tuvieron un promedio de 7.3 %, 63 %, 0.747 kg día⁻¹ y 39.4 meses para PC, tasa de becerros al destete, GDPI y edad al primer parto, respectivamente. Según Beauchemin *et al.* (2010) al mejorar la tasa de becerros al destete y la GDPI hay mayor productividad y por lo tanto mayor dilución de las eGEI por kgPV-eq. En el estudio de Campeche, estos parámetros no fueron diferentes entre los sistemas de pastoreo. (Tabla 5, secciones A - D). Sin embargo, al agrupar las UPP por productividad, es decir, las UPPc y UPPdp sí se encontró diferencia para las eGEI, ya que al convertir la producción láctea en su equivalente de kgPV (como se explica en la sección de material y métodos) la productividad fue mayor en las UPPdp. Que al igual que en los resultados de Beauchemin *et al.* (2010) y Becoña *et al.* (2014) una mayor producción marcó la diferencia en eGEI entre los tipos de UPP, sólo que en este caso la productividad se vio modificada por la producción láctea y no por la GDP o la tasa de becerros al destete.

Esta tendencia de emitir menor cantidad de GEI al producir becerros y leche en la misma UPP ha sido también observada cuando se desagrega la producción del becerro y el periodo de ceba en los sistemas de engorda de bovinos, donde las eGEI son menores cuando los animales provienen de sistemas lecheros (*dairy beef*) que cuando sólo son de sistemas vaca-becerro las eGEI se diluyen debido a la extracción

mayor de producto por hectárea en la producción del becerro y no en la engorda propiamente dicha (Ogino *et al.*, 2016, Buratti *et al.*, 2017, Tichenor *et al.*, 2017). Lo que concuerda con lo encontrado en este trabajo, en donde las UPPdp emitieron 61 % menos GEI por UF debido a que su producción total fue mayor, en donde la producción láctea aportó el 42 % de los kgPV-eq vendidos. Reforzando los hallazgos de varios autores (Becoña *et al.*, 2014, Ruviano *et al.*, 2015, Barretto-de Figueiredo *et al.*, 2017, Buratti *et al.*, 2017) que mencionan que al incrementar la cantidad de producto las eGEI por UF son menores debido al incremento de la productividad y por lo tanto los productos provenientes de UPP. En este caso las UPP tuvieron el mismo comportamiento, es decir, los sistemas más eficientes sin importar el sistema de pastoreo tienen una huella de carbono menor por unidad de producto (Figura 2).

Otra razón de que los sistemas de pastoreo se comportaron de forma muy similar fue debido a que para todos los sistemas la principal fuente de alimento fue el pastoreo de gramíneas, representando al menos un 92% de MS en todos los sistemas (Tabla 6, sección A); mientras que el pastoreo de leguminosas (*leucaena*, árboles y arbustos) en el Sp sólo representó el 3.4 % y el acahual en el Mt no fue mayor al 4 %. Además, la superficie de las UPP destinadas al cultivo de leguminosas y acahual fue solamente de 12 % y 15 %, respectivamente (Tabla 6, sección B).

Como se puede apreciar, la superficie dedicada al forraje alternativo fue escasa al igual que la proporción de la dieta que representa el alimento producido y extraído de esas superficies. Este aporte de MS por los forrajes alternativos son muy inferiores a los reportados por Bacab-Pérez y Solorio-Sánchez (2011) que mencionan que en UPPdp en Michoacán, México el consumo de *L. leucocephala* representa del 30 % al 37 % de la dieta;

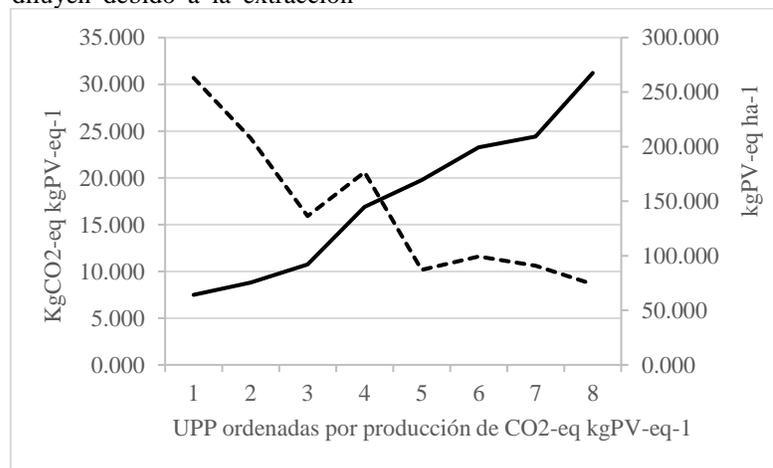


Figura 2. Relación de emisiones de gases de efecto invernadero (—, eje primario) y productividad (---, eje secundario).

De igual forma Pinto-Ruiz *et al.* (2014) mencionan que en producciones de bovino silvopastoril en el trópico mexicano, el porcentaje de la dieta representada por leguminosas fue del 27 % en época de lluvias, incrementándose al 52 % en época de secas. Por lo que se puede asumir que las UPP evaluadas en Campeche no han adoptado totalmente los sistemas alternativos de pastoreo y sigue siendo el pasto introducido su principal fuente de MS, a pesar de que en el estado más de la mitad de la superficie destinada a la ganadería es acahual (Tabla 1), el cual tiene la capacidad de mejorar la calidad de la dieta y los parámetros productivos, de la misma forma que sucede con los sistemas silvopastoriles y el consumo de leguminosas forrajeras (Sosa-Rubio *et al.*, 2006). Por lo que tienen el potencial de reducir las eGEI siempre y cuando los sistemas de pastoreo se manejen con eficiencia (Harrison *et al.*, 2015, Becoña, *et al.*, 2014, Rivera, 2016).

Uso de Suelo

En este estudio el Uso de Suelo fue menor en las UPPdp (Tabla 7, sección B) que en las UPPc. Esto concuerda con lo encontrado por Tichenor *et al.* (2017) en donde muestran que el Uso de Suelo en sistemas de producción *dairy beef*, es 86 % menor que en aquellos sistemas que sólo producen carne debido a que del sistema se extrae mayor cantidad de producto, como en el caso de las UPPdp de Campeche que tuvieron una disminución significativa del Uso de Suelo (48%) al compararlas con las UPPc, ya que en las primeras hubo mayor extracción de producto por hectárea (Tabla 7, sección B). Por otro lado, Dick *et al.* (2015) mencionan que en su estudio el Uso de Suelo fue menor en los sistemas de pastoreo con manejo eficiente al compararlos con aquellos con menor manejo (sistemas intensivos vs. sistemas extensivos), disminuyendo 91 % la necesidad de tierra por unidad de producto, debido al uso eficiente de los forrajes para pastoreo que a su vez mejoraron la calidad de la dieta y la GDPI; sin embargo, en este trabajo la calidad de las dietas y la GDPI fue similar en todos los sistemas por lo que esto no explicaría las diferencias de Uso de Suelo entre la UPPdp y UPPc, así la diferencia de Uso de Suelo estuvo dado por la productividad.

CONCLUSIONES

El uso del ACV en la evaluación de los sistemas ganaderos en Campeche, permitió determinar que el uso de leguminosas en el Sp y acahual en el Mt no tuvo influencia en la reducción de eGEI en comparación con el Mn, al menos a la escala de adopción que se ha tenido de estos sistemas silvopastoriles. Por ello, para que las eGEI pudieran tener alguna reducción y se mejorara la productividad del silvopastoreo las leguminosas nativas o

introducidas deberían tener una participación mayor en la alimentación del ganado. Por otra parte, cuando el ACV se usó para comparar las UPP que sólo producen becerros con las que adicionalmente producen leche, se encontró que cuando se extrae más producto en las UPP hay una reducción de eGEI importante. Además, el factor de emisión de metano entérico usado en el ACV fue muy similar al determinado por cámaras de respiración abierta, por lo que la caracterización del uso del tipo y calidad de los insumos usados en las UPP facilita que el ACV sea una buena metodología para determinar la carga ambiental de UPP ganaderas. Así, pese a que fue limitado el acceso a información detallada de las UPP y que el ACV en si mismo demanda gran cantidad de tiempo y recursos, la realización del ACV en zonas de Campeche con diferente densidad ganadera permitió caracterizar las eGEI, el Uso de Suelo y la Productividad en UPP bajo diferentes sistemas de pastoreo y tipo de producción.

AGRADECIMIENTOS

La realización de este trabajo fue posible gracias al financiamiento del Proyecto PAPIIT IV200715 y al apoyo del Programa de Maestría y Doctorado en Ciencias de la Producción y de la Salud Animal, FMVZ, UNAM. Además, los autores agradecen a los propietarios y trabajadores de las UPP por haber permitido la realización de los trabajos de campo en sus instalaciones, al Biólogo Eloy Victoria Chan de Pronatura Península de Yucatán A. C. por ser parte fundamental del contacto entre los productores y los investigadores, y a todas las personas que con su apoyo hicieron posible la redacción de este artículo.

REFERENCIAS

- Alonso-Díaz, M., Castillo-Galegos, E., Basurto-Camberos, H., Jarillo-Rodríguez, J., Valles-de la Mora, B, 2007. Respuesta productiva de una pastura de gramas nativas bajo pastoreo rotacional intensivo en clima cálido húmedo. *Avances en investigación agropecuaria*. 11:35–55. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=83711205%5CnAvances>
- Astier, M., Masera, O.R., Galván-Miyoshi, Y., 2008. Evaluación de sustentabilidad. Un enfoque dinámico. *Imag impressions*. España.
- Bacab-Pérez, H.M., Solorio-Sánchez, F.J., 2011. Oferta y consumo de forraje y producción de leche en ganado de doble propósito manejado en sistemas silvopastoriles en Tepalcatepec, Michoacán. *Tropical and subtropical agroecosystems*. 13:271–278. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93920>

- 942003
- Bacab, H.M., Madera, N.B., Solorio, F.J., Vera, F., Marrufo, D.F., 2013. Los sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala*: una opción para la ganadería tropical. Avances en investigación agropecuaria. 17:67–81.
- Barretto-de Figueiredo, E., Jayasundara, S., de Oliveira-Bordonal, R., Berchielli, T.T., Andrade-Reis, R., Wagner-Riddlem C., La Scala-Jr, Newton, 2017. Greenhouse gas balance and carbon footprint of beef cattle in three contrasting pasture-management systems in Brazil. Journal of cleaner production. 142:420–431. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.132>
- Beauchemin, K.A., Janzen, H.H., Little, S.M., McAlister, T.A., McGinn, S.M., 2010. Life cycle assessment of greenhouse gas emissions from beef production in western Canada: Acase study. Agricultural systems. 103:371–379. doi: DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.047>
- Beauregard, L.P., 2017. México perdió 25 000 hectáreas de bosques en 2016. https://elpais.com/internacional/2017/11/17/mexico/1510954314_007182.html. Consultado: 25 de mayo de 2018.
- Becoña, G., Astigarraga, L. y Picasso, V.D., 2014. Greenhouse gas emissions of beef cow-calf grazing systems in Uruguay. Sustainable agriculture research, 3:89–105. DOI: <http://dx.doi.org/10.5539/sar.v3n2p89>
- Bugarin, J., Lemus, C., Sangines, L., Aguirre, J., Ramos, A., Soca, M., Arce, J., 2009. Evaluación de dos especies de *Leucaena*, asociadas a *Brachiaria brizantha* y *Clitoria ternatea* en un sistema silvopastoril de Nayarit, México. II. Producción y composición bromatológica de la biomasa. Pastos y forrajes, 32:1–9.
- Buratti, C., Fantozzi, F., Barbanera, M., Lascaro, E., Chiorri, M., Cecchini, L. 2017. Carbon footprint of conventional and organic beef production systems: An Italian case study. Science of the total environment. 576:129–137. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.075>
- Carranza-Montaño, M.A., Sánchez-Velázquez, L.R., Pineda-López, M.R., Cuevas-Guzmán, R., 2003. Calidad y potencial forrajero de especies del bosque tropical caducifolio de la sierra de Manantlán, México. Agrociencia. 37: 203–210. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=30237211>
- Cecconello, G., Benezra, M., Obispo, N.E., 2003. Composición química y degradabilidad ruminal de los frutos de algunas especies forrajeras leñosas de un bosque seco tropical. Zootecnia tropical, 21:149–165. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.tmaid.2017.06.007>
- Cortina-Villar, S., Macario-Mendoza, P., Ogneva-Himmelberger, Y., 1999. Cambios en el uso del suelo y deforestación en el sur de los estados de Campeche y Quintana Roo, México. Investigaciones geográficas. Boletín del instituto de geografía de la UNAM. 38:41–56. <http://www.scielo.org.mx/pdf/igeo/n38/n38a5.pdf>.
- Cruz-López, P.I., Hernández-Garay, A., Enriquez-Quiroz, J.E., Mendoza-Pedroza, S.I., Quero-Carrillo, A.R., Joaquín-Torres, B.M., 2011. Desempeño agronómico de genotipos de *Brachiaria humidicola* (Rendle) Schweickert en el trópico húmedo de México. Revista fitotecnica mexicana, 34:123–131.
- Cuartas, C.A., Naranjo, J.F., Tarazona, A.M., Correa, G.A., Barahona-Rosales, R., 2015. Dry matter and nutrient intake and diet composition in *Leucaena leucocephala* based intensive silvopastoral systems. Tropical and subtropical agroecosystems. 18:303–311. DOI: <http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-2168.2000.01388.x>
- Díaz-Castillo, A., López-Sardiñas, Y., Castillo-Correa, E., Padilla-Corrales, C., Jordán-Vázquez, H., Martínez-Zubiaur, R.O., Ruíz-Vásquez, T.E., Díaz-Sánchez, M.F., Moo-Cruz, A.F., Gómez-Cruz, O., Alpide-Tovar, D., Arjona-Ruiz, M.R., Ortega-García, G., 2014. Caracterización de ranchos ganaderos de Campeche, México. Resultados de proyectos de transferencia de tecnologías. Avances en investigación Agropecuaria. 18:41–61. <http://www.uco.mx/reviaia/portal/pdf/2014/mayo/3.pdf>.
- Dick, M., Abreu-da Silva, M., Dewes, H., 2015. Life cycle assessment of beef cattle production in two typical grassland systems of southern Brazil. Journal of cleaner production. 96:426–434. doi:

- 10.1016/j.jclepro.2014.01.080.
- Durán-Martínez, E., 2014. Efecto de la época del año y de la edad en el contenido mineral en forrajes tropicales en Medellín, Veracruz. UNAM. México.
- Enríquez-Quiroz, J. F., Meléndez-Nava, F., Bolaños-Aguilar, E.D., Esqueda-Esquivel, V.A., INIFAP. 2011. Producción y manejo de forrajes tropicales. Alfa y Omega. México.
- FAO, 2014. Sustainability assessment of food agriculture systems. Guidelines. FAO, Roma.
- Galindo, F., Williams, D. Gonzáles-Reveles, C., Zarza, H., Ávila-Flores, R., Olea-Pérez, R., Suzán, G., 2017. Conservation and livestock production in tropical Mexico: The need for sustainable options. En: Aguirre, A. y Sukumar, R. (eds.) Tropical conservation. Perspectives on local and global priorities. Oxford University Press. pp. 399–404.
- García, D. *et al.* 2008 “Caracterización de diez cultivares forrajeros de *Leucaena leucocephala* basada en la composición química y la degradabilidad ruminal”, Revista MVZ Cordoba, 13(2), pp. 1295–1303.
- Harrison, M.T., McSweeney, C., Tomkins, N.W., Eckard, R.J., 2015. Improving greenhouse gas emissions intensities of subtropical and tropical beef farming systems using *Leucaena leucocephala*”. Agricultural systems. 136:138–146. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2015.03.003>.
- IHOBE, Sociedad pública de gestión ambiental, 2009. Análisis de ciclo de vida y huella de carbono. Dos maneras de medir el impacto ambiental de un producto. Bilbao
- INECC, 2015. Inventario nacional de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero <https://datos.gob.mx/busca/dataset/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero-inegycei/resource/10ff358d-be45-4075-8f7c-badfc6180a9a> 26 de mayo de 2018.
- INEGI, 2012. La ganadería bovina en los estados unidos mexicanos: Censo agropecuario 2007. Universidad de Guadalajara. México.
- INEGI, 2014a. Encuesta Nacional Agropecuaria 2014. Producción de ganado bovino. <https://www.inegi.org.mx/contenidos/programas/ena/2014/doc/minimonografia/prodbove na14.pdf>. 25 de mayo de 2018.
- INEGI, 2014b. Encuesta nacional agropecuaria 2014. Tabulados. <https://www.inegi.org.mx/programas/ena/2014/>. 30 de mayo de 2018.
- INEGI, 2016. Anuario estadístico y geográfico por entidad federativa 2016. INEGI. México. http://internet.contenidos.inegi.org.mx/contenidos/Productos/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/nueva_estruc/AGEPEF_2016/702825087357.pdf.
- IPCC, 2006. Emissions from livestock and manure management. En: IPCC. Guidelines for national greenhouse gas inventories, Volume 4: Agriculture, forestry and other land use. IGES. Japón.
- ISO, 2006a. Environmental management - LCA: Requirements and guidelines. ISO 14044. European Committee for Standardisation. Belgium.
- ISO, 2006b. Environmental management-LCA: Principles and framework. ISO 14040. European Committee for Standardisation. Belgium.
- Ku-Vera, J.C., Valencia-Salazar, S.S., Piñero-Vázquez, A.T., Molina-Botero, I.C., Arroyave-Jaramillo, J., Montoya-Flores, M.D., Lazos-Balbuena, F.J., Canul-Solís, J.R., Arceo-Castillo, J.I., Ramírez-Cancino, L., Escobar-Restrepo, C.S., Alayón-Gamboa, J.A., Jiménez-Ferrer, G., Zavala-Escalante, L.M., Castelán-Ortega, O.A., Quintana-Owen, P., Ayala-Burgos, A.J., Aguilar-Pérez, C.F., Solorio-Sánchez, F.J., 2018. Determination of methane yield in cattle fed tropical grasses as measured in open-circuit respiration chambers. Agricultural and Forest Meteorology. 258:3-7. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2018.01.008>
- López, O., Lamela, L., Montejo, I.L., Sánchez, T., 2015. Influencia de la suplementación con concentrado en la producción de leche de vacas holstein x cebú en silvopastoreo. Pastos y forrajes. 38:46–54. <http://payfo.ihatuey.cu/index.php/pasto/articloe/view/1826/2638>.
- López-Vigoa, O., Sánchez-Santana, T., Iglesias-Gómez, J.M., Lamela-López, L., Soca-Pérez, M., Arece-García, J., Milera-Rodríguez, M.C., 2017. Los sistemas silvopastoriles como alternativa para la producción animal sostenible en el contexto actual de la ganadería tropical. Pastos y forrajes. 40:83–95.
- Mendoza-Vega, J., Molina-Rosales, D.O., 2012.

- Estrategia regional de la península de Yucatán para la reducción de emisiones por deforestación y degradación forestal. Ecosur Campeche. México. <http://www.semarnatcam.campeche.gob.mx/wp-content/uploads/2016/03/EPYREDDF.pdf>.
- Molina, I.C., Angarita, E.A., Mayorga, O.L., Chará, J., Barahona-Rosales, R., 2016. Effect of *Leucaena leucocephala* on methane production of Lucerna heifers fed a diet based on *Cynodon plectostachyus*. *Livestock science*. 185: 24–29. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2016.01.009>.
- Molina-Rivera, M., Olea-Pérez, R., Arriaga-Jordán, C.M., Próspero-Bernal, F., Galindo-Maldonado, F.A. 2018. Evaluación de la sustentabilidad en el sector agropecuario: un acercamiento a las metodologías. *Ganadería.com Pecuarios*. Mayo:1-4. <https://www.ganaderia.com/destacado/Evaluacion-de-la-sustentabilidad-en-el-sector-agropecuario%3A-un-acercamiento-a-las-metodologias>.
- Muñoz-González, J.C., Huerta-Bravo, M., Rangel-Santos, R., Lara-Bueno, A., de la Rosa-Arana, J.L., 2014. Evaluación mineral de forrajes del trópico húmedo mexicano. *Tropical and subtropical agroecosystems*. 17:285–287. doi: DOI: <http://dx.doi.org/10.1021/la0470535>.
- Naranjo, J.F., Cuarta, C.A., Murgueitio, E., Chará, J., Barahona, R., 2012. Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* en Colombia. *Livestock research for rural development*. 24:1–12.
- NRC. Subcommittee of beef nutrition, 1984. *Nutrient requirements of beef cattle*. 6° ed. National academic press. EEUU.
- Obispo, N.E., Chicco, C.F., 1993. Evaluación de la densidad de oferta de bloques multinutricionales en bovinos. *Zootecnia tropical*. 11:193–210.
- Ogino, A., Sommart, K., Subepang, S., Mitsumori, M., Hayashi, K., Yamashita, T., Tanaka, Y., 2016. Environmental impacts of extensive and intensive beef production systems in Thailand evaluated by life cycle assessment. *Journal of cleaner production*. 112: 22–31. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.110>.
- Paredes-Rincón, S., 2000. Investigación validación de praderas mixtas (gramíneas-leguminosas) para transferencia tecnológica en el trópico subhúmedo. UNAM. México.
- Peters, M., Franco, L.H., Schmidt, A., Hincapié, B., 2010. Especies forrajeras multipropósito: Opciones para productores del trópico americano. CIAT. Colombia. http://ciat-library.ciat.cgiar.org/Forrajes_Tropicales/pdf/Books/Especies_Forrajeras_MultipropositoTropicoAmericano.pdf.
- Petit-Aldana, J., Casanova-Lugo, F., Solorio-Sánchez, F., 2010. Rendimiento de forraje de *Leucaena leucocephala*, *Guazuma ulmifolia* y *Moringa oleifera* asociadas y en monocultivo en un banco de forraje. *Revista forestal venezolana*. 54:161–167. http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/32522/1/art4_judithpetit.pdf.
- Pinto-Ruiz, R., Ortega-Reyes, L., Gómez-Castro, H., Guevara-Hernández, F., Hernández-Sánchez, D., 2014. Comportamiento animal y características de la dieta de bovinos pastoreando estrella africana sola y asociada con árboles. *Revista mexicana de ciencias pecuarias*. 5:365–374.
- Ramírez, J L., Verdecia, D., Leonard, I., 2008. Rendimiento y caracterización química del Pennisetum Cuba CT 169 en un suelo pluvisol. *Revista electronica de veterinaria*. 9:1–10. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11517-010-0577-2>.
- Reyes-Muro, L., Camacho-Villa, T.C., Guevara-Hernández, F. (coords.), 2013. *Rastrojos. Manejo, uso y mercado en el centro sur de México*. INIFAP. México.
- Rivera, J.E., Chará, J., Barahona, R., 2016. Analisis de ciclo de vida para la producción de leche bovina en un sistema silvopastoril intensivo y un sistema convencional en Colombia. *Tropical and subtropical agroecosystems*. 19:237–251.
- Rodriguez-Lopez, M., 2009. Rendimiento y valor nutricional del pasto *Panicum maximum* cv. Mombaza a diferentes edades y alturas de corte. ITCR. Sede regional San Carlos. Costa Rica. http://bibliodigital.itcr.ac.cr/bitstream/handle/2238/3946/Rendimiento_y_valor_nutricional_del_pasto_Panicum_maximum_CV_mombaza_a_diferentes_edades_y_alturas_de_corte.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- Rosales-Nieto, C.A., Elizondo-Barrón, J., González-Reyna, A., Barrón-Contreras, J.L., 2007.

- Uso de pollinaza y gallinaza en la alimentación de rumiantes. Desplegable para productores N° 32. INIFAP. México. <http://biblioteca.inifap.gob.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/123456789/308/161.pdf?sequence=1>.
- Ruviaro, C.F., de Léis, C.M., Lampert, V.N., Jardim-Barcellos, J.O., Dewes, H., 2015. Carbon footprint in different beef production systems on a southern Brazilian farm: a case study. *Journal of cleaner production*. 96:435–443. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.01.037>.
- SEMARNAT, 2008. Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadísticas ambientales. México. http://apps1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_2008/index_informe_2008.html. 12 de junio de 2018.
- Shimaya-Miyasaka, A., 2009. Nutrición animal. 2° ed. Editorial Trillas S.A de C.V. México.
- SMN, 2017. Información climatológica por estado. Campeche. <http://smn.cna.gob.mx/es/informacion-climatologica-ver-estado?estado=camp>. Junio 14 de 2018.
- Sosa-Rubio, E.E., Cabrera-Torres, E.J., Pérez-Rodríguez, D., 2006. El uso de vegetación secundaria (acahuales) para la alimentación de bovinos y ovinos en Quintana Roo. INIFAP. México.
- Tichenor, N.E., Peters, C.J., Norris, G.A., Thoma, G., 2017. Life cycle environmental consequences of grass-fed and dairy beef production systems in the northeastern United States. *Journal of cleaner production*. 142:1619–1628. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.11.138>.
- Toledo, J.M., Vera, R., Lascano, C., Lenné, J.L., 1989. *Andropogon gayanus* Kunth: Un pasto para los suelos ácidos del trópico. CIAT. Colombia.
- Vilain, L., 2008. El método IDEA. 3° ed. Educagri Ediciones. Francia.
- Villalobos-Zapata, G.J., Mendoza-Vega, J., 2010. La biodiversidad en Campeche: estudio de estado. CONABIO. México. https://www.biodiversidad.gob.mx/region/EB/pdf/Biodiversidad_Campeche_baja.pdf.
- Yescas, C.P., Segura, M.A., Martínez, L., Álvarez, V.P., Montemayor, J.A., Orozco, J.A., 2015. Rendimiento y calidad de maíz forrajero (*Zea mays* L.) con diferentes niveles de riego por goteo subsuperficial y densidad de plantas. *Revista internacional de botánica experimental*. 84:272–279.