



ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA PARA LA PRODUCCIÓN DE LECHE BOVINA EN UN SISTEMA SILVOPASTORIL INTENSIVO Y UN SISTEMA CONVENCIONAL EN COLOMBIA

[LIFE CYCLE ASSESSMENT FOR THE PRODUCTION OF CATTLE MILK IN AN INTENSIVE SILVOPASTORAL SYSTEM AND A CONVENTIONAL SYSTEM IN COLOMBIA]

Julián Esteban Rivera^{1*}, Julián Chará¹ and Rolando Barahona²

¹Centro para la Investigación en Sistemas Sostenibles de Producción Agropecuaria – CIPAV. Carrera 25 No 6-62 Cali, Colombia.

Email: jerivera@fun.cipav.org.co

²Departamento de Producción Animal, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia, AA 1779, Sede Medellín, Colombia

*Corresponding author

RESUMEN¹

Los sistemas bovinos actuales tienen el reto de mejorar su eficiencia para suplir la mayor demanda de productos pecuarios a la vez que reducen las emisiones por sistema y unidad de producto. Con el objetivo de estimar el impacto ambiental en dos sistemas de producción de leche, se llevó a cabo un análisis de ciclo de vida (ACV) en un sistema silvopastoril intensivo (SSPi) y en un sistema intensivo convencional (SC) en Colombia. Se siguió la estructura ISO 14044 con cuatro unidades funcionales (UF); los impactos estimados fueron uso del suelo (US), uso de energía no renovable (UENR) y emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El SSPi emitió menores cantidades de GEI para producir un kg de leche corregido por grasa y proteína (LCGP; 2.05 vs. 2.34 kg de CO₂-eq, respectivamente). Con relación a UENR, el SSPi requirió sólo 63% de energía para producir un kg de LCGP que el SC (3.64 vs. 5.81 kg Mj⁻¹), mientras que en el uso del suelo, el SC fue más eficiente en todas las UF. Los SSPi generan menores cargas ambientales por unidad de producto, al emitir menores cantidades de GEI y tener menor UENR, perfilando estos sistemas más sustentable.

Palabras clave: Animales en pastoreo; cambio climático; energía no renovable; gases de efecto invernadero; leucaena; mitigación.

SUMMARY

Currently, cattle systems have the challenge of improving their efficiency in order to satisfy the growing demand of livestock products while at the same time reducing their emissions. In order to estimate the main environmental impacts of bovine milk production and identify mitigation alternatives, a life cycle analysis (LCA) was conducted to compare an intensive silvopastoral systems (ISS) and a conventional system (CS) in Colombia. The structure of ISO 14044 was followed, with four functional units (FU); the estimated environmental impacts were: land use (LU), use of non-renewable energy (UNRE) and emissions of greenhouse gases (GHG). For all FU, the ISS had lower emissions of GHGs than the conventional system. To produce one kg of fat- and protein-corrected milk (FPCM) the ISS emitted 1 less GHG than the CS (2.05 vs. 2.34 kg CO₂-eq). Regarding the use of non-renewable energy, the ISS required only 63% of the energy used in the CS to produce one kg FPCM (3.64 vs. 5.81 kg Mj⁻¹) whilst for land use, the CS was more efficient in all UF compared to the ISS. We conclude that in ISS there are lower environmental impacts per unit of product, emitting less GHG and having lower UNRE.

Keywords: Climate change; grazing animals; greenhouse gases; leucaena; non-renewable energy; mitigation.

¹Submitted February 22, 2016 – Accepted October 21, 2016. This work is licensed under a [Creative Commons Attribution 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

INTRODUCCIÓN

La ganadería bovina bajo condiciones de pastoreo extensivo ha estado asociada con una alta generación de gases de efecto invernadero (GEI), degradación general de los recursos naturales y bajos parámetros productivos (Steinfeld *et al.*, 2006; Murgueitio *et al.*, 2011). Con emisiones estimadas en 7.1 gigatoneladas (GT) de dióxido de carbono equivalente (CO₂-eq) por año, que representan el 14.5% de las emisiones de GEI inducidas por el ser humano, la actividad agropecuaria incide de manera importante en el cambio climático (CC) (Gerber *et al.*, 2013). Eso hace necesario aumentar la adopción de sistemas productivos de menor impacto ambiental, sin afectar los aspectos productivos, sociales y económicos (Jarvis *et al.*, 2010; Murgueitio *et al.*, 2011). Entre los sistemas propuestos en años recientes se encuentran los sistemas silvopastoriles intensivos (SSPi) que son una modalidad de sistema agroforestal pecuario destinado a la producción de carne y leche así como madera, frutas y otros bienes asociados. El SSPi está conformado por varios estratos: En el estrato herbáceo se encuentran gramíneas forrajeras de alta productividad, así como leguminosas; el segundo es un estrato de arbustos en alta densidad (hasta 40 mil plantas ha⁻¹) destinado al ramoneo del ganado con especies como *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit., o *Tithonia diversifolia*. El tercer estrato está constituido por árboles en líneas (100 a 400 árboles adultos ha⁻¹) para producción de madera o frutas y palmas (Murgueitio *et al.* 2015).

Si bien se han estudiado algunos servicios ambientales que proveen estos sistemas (Chará *et al.*, 2015) y sus efectos en la reducción de emisión de metano (Molina *et al.*, 2016), existe poca información que permita analizar su efecto de manera integral y estudiar cómo estos modelos pueden contribuir a mejorar el uso de recursos locales, alcanzando mayor sustentabilidad y permitiendo suplir los requerimientos de los mercados y la sociedad mundial (Giraldo *et al.*, 2011; Rivera *et al.*, 2014; Rao *et al.*, 2015; Rudel *et al.*, 2015). Uno de los factores fundamentales a medir para determinar las potencialidades de algún sistema, es su impacto ambiental o su potencial de mitigación bajo condiciones específicas (IPCC 2007; Murgueitio *et al.*, 2011; Rivera *et al.*, 2014).

En los últimos años, ha aumentado el uso del análisis de ciclo de vida (ACV) para determinar diferentes impactos ambientales de los sistemas agropecuarios.

Con el uso del ACV, se pueden identificar, cuantificar y caracterizar los diferentes impactos ambientales negativos, al igual que cuantificar los recursos utilizados durante la generación de un producto, permitiendo establecer estrategias de mitigación enfocadas a mejorar dichos sistemas basadas en la optimización de los recursos locales y naturales (Murgueitio *et al.*, 2011; Rao *et al.*, 2015).

Con el objetivo de comparar dos sistemas bovinos orientados a la producción de leche en cuanto a sus emisiones de GEI, uso del suelo y uso de energía no renovable, e identificar alternativas de mitigación en el trópico, se llevó a cabo un ACV tanto en un sistema silvopastoril intensivo (SSPi) como en un sistema intensivo convencional (SC) bajo condiciones de Bosque Seco Tropical (bs – T) en el suroccidente de Colombia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sistemas bajo estudio

El ACV fue llevado a cabo en dos sistemas orientados a la producción de leche bovina: un Sistema Silvopastoril Intensivo (SSPi) con *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. cv. Cunningham y un sistema intensivo convencional (SC), cuyas principales características se presentan en la Tabla 1.

El SSPi evaluado se localizó en La Reserva Natural El Hatico a 3°38'39"N y 76°19'11"O, en el Valle del Cauca, Colombia. Este sistema se caracteriza por una alta densidad de arbustos de *L. leucocephala* (> 8000 arbustos ha⁻¹), asociada a *Cynodon plectostachyus* (K.Schum.) Pilg y árboles dispersos de porte mediano como *Leucaena*, *Prosopis juliflora* (Sw.) DC, *Guazuma ulmifolia* Lam. y *Phitecellobium dulce* (Roxb) Benth, y, en algunas zonas, árboles de alto porte como *Albizia saman* (Jacq.), F. Muell. y *Ceiba pentandra* (L.) Gaertn., entre otros. El sistema fue manejado bajo un pastoreo rotacional en franjas de aproximadamente 2000 m² ofrecidas diariamente mediante al uso de una cerca móvil eléctrica, con períodos de descanso de 43 días y periodos de ocupación de un día (Murgueitio *et al.*, 2011). Este SSPi era pastoreado por individuos de la raza criolla colombiana Lucerna, con pesos promedio de 426 kg, un número de partos de 2 a 5 y una producción media diaria de 10.8 l animal⁻¹. La capacidad de carga estuvo cercana a las 2.64 U.G.G y los individuos eran suplementados al momento del ordeño con salvado de arroz y germen de maíz.

Tabla 1. Aspectos técnicos y características generales de los sistemas evaluados

Ítem	Unidades	SSPi	SC
Tamaño del lote	Ha	118	15
Total de leche producida	l día ⁻¹	2160	1280
Promedio de producción de leche	l vaca ⁻¹ día ⁻¹	10.8	16
Leche exportada	l día ⁻¹	2116.8	1274
Grasa en la leche	%	3.70	3.80
Proteína en la leche	%	3.20	3.28
Días de lactancia	Días	312	305
Tasa de reemplazo	%	14%	10%
Tasa de descarte	%	14%	10%
Peso promedio Vacas Producción	Kg animal ⁻¹	426	520
Consumo de MS Vacas Producción	Kg MS vaca ⁻¹ día ⁻¹	14.1	16.12
Capacidad de carga	UGG ha ⁻¹	2.64	9.15
Consumo de cogollo de Caña	Kg MS vaca ⁻¹ día ⁻¹	0.00	2.10
Consumo de gluten de Maíz	Kg MS vaca ⁻¹ día ⁻¹	1.00	0.00
Consumo de salvado de Arroz	Kg MS vaca ⁻¹ día ⁻¹	3.00	0.00
Consumo de alimento balanceado	Kg MS vaca ⁻¹ día ⁻¹	0	6.5
Consumo de Forraje	Kg MS vaca ⁻¹ día ⁻¹	10.1	7.52
Fertilización (Urea - N)	Kg ha ⁻¹ año ⁻¹	0	279.8
Fertilización (Gallinaza)	Kg ha ⁻¹ año ⁻¹	0	2000
Fertilización (SAM)	Kg ha ⁻¹ año ⁻¹	0	608.3
Fertilización (DAP)	Kg ha ⁻¹ año ⁻¹	0	121.7
Fertilización (K ₂ SO ₄)	Kg ha ⁻¹ año ⁻¹	0	182.5
Consumo de sal mineralizada	Kg animal ⁻¹ año ⁻¹	32.85	40.15
Electricidad	KW finca ⁻¹ año ⁻¹	84417.4	25325.2
Diesel usado	l finca ⁻¹ año ⁻¹	2557.4	3192
Gasolina usada	l año ⁻¹	3473.2	0
Estructura del Hato			
Vacas en ordeño	Número	200	80
Vacas secas	Número	40	20
Novillas > 2 años	Número	41	0
Novillas 1-2 años	Número	20	14
Terneras 0-1 año	Número	20	18

MS: Materia seca; UGG: Unidad gran ganado= 450 kg de peso vivo; SSPi: Sistema silvopastoril intensivo; SC: Sistema convencional; SAM: Sulfato de Amonio; DAP: Fosfato de Amonio.

El SC evaluado estaba localizado en el predio El Trejito (3°39'34"N y 76°19'29"O) constituido por praderas de *C. plectostachyus* (K.Schum.) Pilg., manejadas en franjas diarias de aproximadamente 1500 m², las cuales fueron fertilizadas (Urea, SAM, DAP y sulfato de potasio a razón de 50, 50, 10 y 15 kg ha⁻¹) y regadas (8 mm cada 30 días) después de cada ocupación. El sistema pastoreaban animales de las razas Pardo Suizo y Braunvieh, con pesos aproximados a los 520 kg, una producción promedio de 16 l de leche animal⁻¹ día⁻¹ y que recibían suplementación al momento del ordeño con alimento balanceado comercial y cogollo de caña a razón de 4.5, 2 y 6 kg animal⁻¹ día⁻¹ respectivamente. La capacidad de carga en este sistema fue de 9.15 U.G.G.

Análisis del ciclo de vida

Para el análisis de ACV se usó la estructura metodológica descrita en las normas ISO 14040 y

14044 (ISO, 2006a, b). Las etapas fueron establecidas bajo los siguientes parámetros:

Objetivo y alcance. Los límites se establecieron de la “cuna a la puerta de la finca”, es decir hasta que la leche fue vendida al procesador. Se usaron cuatro unidades funcionales (UF): (1) kilogramo de leche corregida por grasa y proteína (LCGP); (2) kg de leche corregida por energía (LCE); (3) kg de proteína y (4) kg de grasa. Para la corrección de la leche por grasa y proteína se usó la ecuación descrita por Thomassen y de Boer (2005) y para la corrección de la leche por energía se usó la ecuación propuesta por Sjaunja *et al.* (1990). Las categorías de impacto ambiental evaluadas fueron el potencial de calentamiento global o emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), el uso de la tierra (US) y el uso de energía no renovable (UENR).

Inventario de ACV. En esta etapa se recolectó la información de cada sistema de producción con un análisis retrospectivo correspondiente al año 2014. Se empleó una encuesta para establecer la cantidad de materiales utilizados directamente en el predio durante todo el año, incluyendo el tipo y cantidad de fertilizante y el alimento balanceado; la intensidad del transporte de insumos y la capacidad de carga animal, entre otros aspectos (ver Tabla 1).

Evaluación de impacto. En esta etapa, toda la información obtenida en la fase anterior se tradujo en los impactos que se describen en la Tabla 2.

Potencial de calentamiento global - emisiones dentro del predio: Las fuentes de CH₄ estuvieron asociadas con la fermentación entérica, emisiones por excretas a nivel de potrero y emisiones por praderas producto de reacciones anaerobias en suelo. Estas emisiones dependen del consumo de materia seca (MS), el cual fue estimado mediante el modelo CNCPS (Fox *et al.*, 2000). El consumo además, fue corroborado en diferentes determinaciones llevadas a cabo en este mismo tipo de sistemas (Restrepo *et al.*, 2012; Cuartas *et al.*, 2015, Gaviria *et al.*, 2015). Adicionalmente para la estimación de CH₄ producto del estiércol depositado por lo animales en las praderas, la producción total por hectárea se calculó a partir de la digestibilidad de la materia seca (DMS) de las dietas ofrecidas (Rivera *et al.*, 2015). Las fuentes de N₂O estuvieron relacionadas con la fertilización con fuentes químicas y orgánicas y excreciones de N vía estiércol y orina, en concordancia con las

recomendaciones de Rivera (2015). Es importante resaltar que la excreción de N fue calculada a partir de la digestibilidad de la proteína cruda de las dietas ofrecidas en cada uno de los sistemas. Las fuentes de CO₂ incluyeron la quema de combustible fósil (IPCC, 2006) y la descomposición de la materia orgánica en las praderas (Rivera, 2015). Los factores de emisión utilizados se presentan en el Anexo I.

Potencial de calentamiento global - emisiones fuera del predio. Estas incluyeron los gases generados en la fabricación de los principales insumos utilizados en el proceso productivo empleando factores de emisión obtenidos de la base de datos de Ecoinvent (2010). Algunas fuentes no fueron incluidas en el análisis al generar una baja cantidad de emisiones o porque no fue posible contar con factores de emisión confiables. En Anexo II se muestran los factores de emisión utilizados fuera del predio.

Uso de energía no renovable. En estas estimaciones se utilizaron factores incluidos en diferentes estudios (Anexo III). Por ejemplo, transporte de fertilizantes y producción de otros forrajes, distribución de los insumos utilizados, quema de combustible durante la producción de los insumos, entre otros.

Uso del suelo. En este impacto se calculó el suelo usado en la elaboración de insumos fuera de cada sistema productivo, especialmente de los alimentos. Además, se incluyó el área propiamente usada para el pastoreo de los animales. En el Anexo IV se presentan los factores usados para este fin.

Tabla 2. Impactos ambientales evaluados en ambos sistemas evaluados

Impacto medioambiental	Unidad	Contribución	Factor
Uso de suelo (US)*	m ² o ha	ocupación de suelo	1 en todos los casos
Uso de energía no renovable (UENR)	Mj	Consumo de energía no renovable	1
Potencial de calentamiento Global (PCG)	Kg CO ₂ - eq	CO ₂	1
		CH ₄	21
		N ₂ O	298

*El *uso de suelo* se refiere a la pérdida del suelo como un recurso, en el sentido de ser temporalmente no disponible para otros fines. El *uso de energía no renovable* es el agotamiento de recursos finitos de energía y se calcula utilizando los valores caloríficos propuestos en el método de la demanda de energía acumulada del SIMAPRO, y el *potencial de calentamiento global atmosférico o potencial de calentamiento global (PCG)* se entiende como el impacto asociado a las emisiones antropogénicas de GEI (Pré Consultores, 2008; O'Brien *et al.* 2012).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En todas las UF el SSPi emitió menores cantidades de GEI que el sistema tradicional. Particularmente, para producir un kg de LCGP, el SSPi emitió un 12.14% menos de GEI que el SC (2.05 vs 2.34 kg de CO₂-eq). A su vez, para producir un kg de LCE, un kg de proteína y un kg de grasa en el SSPi se emitió 12.51; 18.94 y 22.93% menos CO₂-eq, respectivamente que el sistema tradicional. Cabe destacar que la producción anual de leche fue de aproximadamente 730,000 y 467,200 para el SSPi y SC respectivamente. En la Tabla 3 se presentan las emisiones expresadas como kilogramos de CO₂-eq para cada una de las unidades funcionales evaluadas y en la Tabla 4a y 4b se muestra la distribución tanto a nivel de finca como fuera de esta de las emisiones en cada una de las fuentes evaluadas.

Tabla 3. Emisiones (kg de CO₂-eq) para cada una de las unidades funcionales evaluadas

	SSPi	SC
kg CO ₂ -eq kg de leche ⁻¹	1.61	1.87
kg CO ₂ -eq kg de leche (LCGP) ⁻¹	2.05	2.34
kg CO ₂ -eq kg de Grasa ⁻¹	42.3	54.9
kg CO ₂ -eq kg de Proteína ⁻¹	47.3	58.3
kg CO ₂ -eq kg de leche (LCE) ⁻¹	1.68	1.92

LCGP: Leche corregida por grasa y proteína; LCE: Leche corregida por energía; SSPi: Sistema silvopastoril intensivo; SC: Sistema convencional.

Se han reportado estudios de ACV en sistemas de producción bovinos bajo distintos escenarios (O'Brien *et al.*, 2012; Weiss y Leip, 2012; Rivera *et al.*, 2014), los que incluyen sistemas tradicionales bajo pastoreo, sistemas de lechería con propósitos orgánicos y sistemas con estabulación. Los resultados son muy variables debido a la variedad de condiciones productivas y en pocos estudios se han comparado las emisiones entre sistemas (O'Brien *et al.*, 2012).

Las emisiones de GEI por kg de leche corregida por grasa y proteína encontradas en este trabajo están dentro del rango (0.98 y 2.69 kg de CO₂-eq) descrito por Hagemann *et al.* (2012) para sistemas de lechería alrededor del mundo, en el cual los menores valores se presentaron en sistemas especializados en Europa y los mayores en sistemas en África. Esto depende del grado de tecnificación y manejo de los sistemas. Los valores encontrados son también cercanos a los reportados por Arsenault *et al.* (2009), O'Brien *et al.* (2012) y Flysjö *et al.* (2012).

Las emisiones promedio de CH₄ por fermentación entérica en los animales lactantes fueron 0.301 y 0.314 kg animal⁻¹ día⁻¹ para ambos sistemas. Mora (2001) estimó emisiones de 0.388; 0.463 y 0.470 kg de CH₄ animal⁻¹ día⁻¹ en fincas lecheras especializadas en Costa Rica con niveles bajos, medios y altos de uso de insumos, respectivamente. A su vez, Broucek (2014), señaló que las emisiones de CH₄ en ganado lechero varían con la dieta, la raza y el estado fisiológico del animal, mientras que Johnson y Johnson (1995) sugirieron que factores como el consumo y valor nutritivo del alimento, tipo de carbohidratos y la manipulación de microflora ruminal determinan la producción de CH₄.

La diferencia de emisiones totales entre sistemas se debió a las áreas ocupadas por cada sistema, ya que el SSPi tenía 118 ha bajo pastoreo y el SC solamente 15. A nivel de finca, el GEI de mayor importancia fue el CH₄, derivado básicamente de la fermentación entérica, que representó hasta el 84% de los gases para el SSPi y el 55% en el SC. Otra fuente importante de GEI fue la relacionada con N₂O, especialmente en el sistema convencional donde representaron aproximadamente el 40% de las emisiones. Así, dentro del predio, en el SSPi 84% provino de metano, 12% de N₂O y el restante 4% de CO₂. En cuanto al SC, dicha distribución fue de 55, 42 y 3% para CH₄, N₂O y CO₂, respectivamente. Esta diferencia entre sistemas obedeció a la alta tasa fertilización del SC, donde fuentes de N como urea, gallinaza, SAM y DAP fueron aplicadas a las praderas.

Las emisiones de CH₄ por fermentación entérica fueron 6.00 y 19.27 t de CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹ en SSPi y SC, respectivamente. Esto difiere de otros estudios ya que la calidad de la dieta y la carga animal afectan estas emisiones. En Brasil, Primavesi *et al.*, (2004) encontraron emisiones de este gas entre 1.7 a 3.09 t CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹ en praderas fertilizadas de *Megathyrsus maximus* y *Brachiaria decumbens* y de 1.38 a 1.52 t CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹ en praderas sin fertilizar. Esto resalta la influencia de la calidad de los forrajes en las emisiones, ya que gran parte de las diferencias en la eficiencia en el uso de los forrajes podrían deberse a diferencias en el contenido y degradabilidad de la fibra (Molina *et al.*, 2016). Los resultados del presente estudio fueron muy similares a los encontrados por Naranjo *et al.* (2012), quienes estimaron una emisión de 6.1 t de CO₂ -eq ha⁻¹ año⁻¹ en sistemas silvopastoriles intensivos orientados a la producción de carne.

Tabla 4a. Distribución de GEI en cada una de las fuentes de emisión dentro del predio y fuera de este.

Interno	SSPi	Total	LCGP asignados por fuente de emisión	LCE asignados por fuente de emisión	SC	Total	LCGP asignados por fuente de emisión	LCE asignados por fuente de emisión
	t CO ₂ -eq	%			t CO ₂ -eq	%		
Emisiones de CH₄								
Fermentación entérica	627.46	53.48%	306.598	372.934	272.68	31.32%	116.675	142.478
Excretas en potrero	22.14	1.89%	10.818	13.159	10.69	1.23%	4.574	5.586
Praderas	-0.81	-0.07%	-396	-481	4.7	0.54%	2.011	2.456
Quema de Gasolina	0.01	0.00%	5	6	0	0.00%	-	-
Quema de Diesel	0.01	0.00%	5	6	0.01	0.00%	4	5
Total (t CO₂-eq)	648.81				288.08			
Emisiones de N₂O								
Urea	0	0.00%	-	-	0	0.00%	-	-
Gallinaza	0	0.00%	-	-	0	0.00%	-	-
SAM	0	0.00%	-	-	0	0.00%	-	-
DAP	0	0.00%	-	-	0	0.00%	-	-
Excretas – Estiércol	55.58	4.74%	27.158	33.034	31.05	3.57%	13.286	16.224
Excretas - Orina	5.65	0.48%	2.761	3.358	33.57	3.86%	14.364	17.541
Praderas	193.76	16.51%	94.678	115.162	211.96	24.34%	90.694	110.751
Quema de Gasolina	0.2	0.02%	98	119	0	0.00%	-	-
Quema de Diesel	0.11	0.01%	54	65	0.13	0.01%	56	68
Total (t CO₂-eq)	255.3				276.71			
Emisiones de CO₂								
Quema de Diesel	6.73	0.57%	3.289	4.000	8.39	0.96%	3.590	4.384
Quema de Gasolina	8.3	0.71%	4.056	4.933	0	0.00%	-	-
Praderas	15.576	1.33%	7.611	9.258	4.14	0.48%	1.771	2.163
Total (t CO₂-eq)	30.606				12.53			
Total Interno (t CO₂-eq)	934.716				577.32			
Externo	SSPi	Total	LCGP asignados por fuente de emisión	LCE asignados por fuente de emisión	SC	Total	LCGP asignados por fuente de emisión	LCE asignados por fuente de emisión
	t CO ₂ -eq	%			t CO ₂ -eq	%		
Emisiones de CH₄								
Combustible	0.18	0.02%	88	107	0.1	0.01%	43	52
Urea	0	0.00%	-	-	0.02	0.00%	9	10
Alimento balanceado	0	0.00%	-	-	6.83	0.78%	2.922	3.569
Cogollo de Caña	0	0.00%	-	-	6.92	0.79%	2.961	3.616
Gluten de maíz	1.77	0.15%	865	1.052	0	0.00%	-	-
Salvado de arroz	6.96	0.59%	3.401	4.137	0	0.00%	-	-
SAM	0	0.00%	-	-	0.03	0.00%	13	16
DAP	0	0.00%	-	-	0	0.00%	-	-

K ₂ SO ₄	0	0.00%	-	-	0.01	0.00%	4	5
Total	8.91				13.91			
Emisiones de N₂O								
Urea	0	0.00%	-	-	2.5	0.29%	1.070	1.306
Alimento balanceado	0	0.00%	-	-	48.12	5.53%	20.590	25.143
Cogollo de Caña	0	0.00%	-	-	35.28	4.05%	15.096	18.434
Gluten de maíz	15.55	1.33%	7.598	9.242	0	0.00%	-	-
Salvado de arroz	53.33	4.55%	26.059	31.697	0	0.00%	-	-
SAM	0	0.00%	-	-	0.01	0.00%	4	5
DAP	0	0.00%	-	-	0.01	0.00%	4	5
K ₂ SO ₄	0	0.00%	-	-	0	0.00%	-	-
Total	68.88				85.92			
Emisiones de CO₂								
Electricidad	48.96	4.17%	23.924	29.100	14.69	1.69%	6.286	7.676
Combustible	1.93	0.16%	943	1.147	1.02	0.12%	436	533
Urea	0	0.00%	-	-	0.87	0.10%	372	455
Alimento balanceado	0	0.00%	-	-	154.83	17.78%	66.249	80.900
Cogollo de Caña	0	0.00%	-	-	18.29	2.10%	7.826	9.557
Consumo de gluten de maíz	18.63	1.59%	9.103	11.073	0	0.00%	-	-
Consumo de Salvado de arroz	88.95	7.58%	43.464	52.868	0	0.00%	-	-
SAM	0	0.00%	-	-	1.04	0.12%	445	543
DAP	0	0.00%	-	-	0.23	0.03%	98	120
K ₂ SO ₄	0	0.00%	-	-	0.26	0.03%	-	-
Total	158.47				191.23			
Transporte externo (t CO₂-eq)	2.38				3.59			
Total Externo (t CO₂-eq)	238.64				293.44			
Gran Total (t CO₂-eq)	1173.356				870.76			
Emisiones ha⁻¹ (t CO₂-eq)	7.92				38.49			
Litros producidos			573.342	697.389			372.582	454.980

SAM: Sulfato de Amonio; DAP: Fosfato diamónico; K₂SO₄: Sulfato de potasio. LCGP: Leche corregida por grasa y proteína; LCE: Leche corregida por energía; SSPi: Sistema silvopastoril intensivo; SC: Sistema convencional

Particularmente para óxido nitroso, según el IPCC (2006) el total de N excretado por Unidad Animal (U.A) en Suramérica se estima en 162 g de N día⁻¹. En el presente estudio, esta excreción fue de 196 y 218 g día⁻¹, respectivamente. Así, una U.A. ha⁻¹ puede producir 59.13 kg N ha⁻¹ año⁻¹ como excretas; es decir, en forma directa se pueden emitir 0.59 kg de N-N₂O o 0.93 kg N₂O ha⁻¹ año⁻¹ e indirectamente 0.5 de N-N₂O o 0.39 kg N₂O ha⁻¹ año⁻¹ (Naranjo *et al.*, 2012). En este estudio se estimó que las emisiones de N₂O por estiércol y orina en kg CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹ fueron de 1114 para el SSPi y 7059 para el SC,

resultados cercanos a los reportados por Naranjo *et al.*, (2012), especialmente en el SSPi.

Por otra parte, en lo referente a las emisiones generadas fuera de la finca, la distribución de los gases fue muy similar entre sistemas, encontrándose que el CO₂ fue el gas mayormente emitido, siendo 66% del total de CO₂-eq, seguido del N₂O con 29% y del CH₄ con 4%. La fuente de mayores emisiones en el SSPi fue la obtención de los suplementos alimenticios, específicamente el salvado de arroz. En el SC, las mayores emisiones se generaron también

por la fabricación del alimento balanceado, además de los fertilizantes, representando hasta 85% de las emisiones.

Al comparar las emisiones dentro y fuera del predio, se determinó que en el SSPi el 78.78% de estas se generaron a nivel de finca. En el SC, las emisiones internas y externas fueron 66.65 y 33.35%, respectivamente. Además, cabe resaltar que las emisiones por unidad de área (ha) fueron 39.25 y 7.98 t de CO₂-eq para el SC y SSPi, respectivamente. Los valores encontrados en este estudio del SSPi estuvieron muy cercanos a los reportados por Naranjo *et al.* (2012) quienes reportaron emisiones alrededor de 7.1 t de CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹ para un SSPi con leucaena, los cuales fueron superiores a los reportados por Primavesi *et al.* (2004) en Brasil (3.09 t CO₂-eq ha⁻¹ año⁻¹) en pasturas tradicionales. Estos valores demuestran que a mayor intensificación, mayores serán las emisiones por unidad de área al existir mayor capacidad de carga gracias la productividad de sus pasturas, a que los consumos son mayores y a una probable fertilización (Restrepo *et al.*, 2012; Rivera *et al.*, 2014).

Con relación al UENR, en la Tabla 5 se presentan los resultados para ambos escenarios. Como en el caso del potencial de calentamiento global (GEI), el SSPi tuvo menor requerimiento de energía no renovable para producir cada una de las UF. En general, el SSPi requirió sólo 63% de energía para producir un kg de leche corregido por grasa y proteína que la usada en el SC (3.64 vs 5.81 Mj kg de LCGP⁻¹). De igual manera, para producir un kg de grasa y proteína el SSPi usó en promedio 44% menos de energía que el SC. Esto ilustra la alta dependencia de insumos externos en el SC, ya que en la fabricación de estos se requiere gran cantidad de energía. Como se observa en la Tabla 5, en el SC, el uso de insumos como el alimento balanceado para suplementación (56.4%), elaboración de la urea (12%) y transformación de la energía eléctrica (13.3%) fueron los componentes con mayores requerimientos de energía. En el SSPi, los componentes de mayor contribución a la UENR fue la energía eléctrica (46%), el uso de salvado de arroz (27%) y gasolina (7.2%). Los resultados encontrados en este estudio se encuentran cercanos a los reportados por O'Brien *et al.* (2012), quienes encontraron un uso de energía en sistemas bajo pastoreo y en confinamiento entre 2.3 y 4.9 Mj por kg de LCGP⁻¹. Por su parte, autores como Thomassen *et al.* (2009) y Williams *et al.* (2006) reportaron un uso de energía por kg de LCE de 1.3 a 6.2 Mj. Además, en un estudio en Europa, de Vries y de Boer (2010) encontraron que se requieren entre 37 y 144 Mj kg⁻¹ para producir un kg de proteína.

Tabla 5. Uso de energía no renovable (Mj) para lograr cada una de las UF trabajadas

	SSPi	SC	Diferencia (SSPi vs SC)
kg de leche (LCGP) ⁻¹	3.64	5.81	62.65%
kg de leche (LCE) ⁻¹	2.99	4.76	62.82%
kg de Grasa ⁻¹	75.22	136.26	55.20%
kg de Proteína ⁻¹	84.06	144.77	58.06%

LCGP: Leche corregida por grasa y proteína; LCE: Leche corregida por energía; SSPi: Sistema silvopastoril intensivo; SC: Sistema convencional

En la Tabla 6 se presenta el uso interno (praderas) y total del suelo requerido en cada sistema para la obtención de materias primas usadas en sus procesos productivos, entendido como la pérdida de la tierra como recurso, al estar temporalmente disponible para otros fines. Mientras el SSPi necesitaría solo de 9.9 has adicionales equivalentes al 8% del área interna, para suplir los requerimientos que exige el sistema en cuanto alimentos, en el SC se necesitaría 34.4 has más de área equivalentes a 2.3 veces el área interna para producir los suplementos alimenticios. Este análisis permite conocer el área total requerida en el proceso productivo y muestra que si bien el SC es muy eficiente en uso del suelo por unidad de producto, necesita un área de soporte fuera del sistema de más del doble del área utilizada para el pastoreo, pues tiene una alta dependencia de insumos externos para mantener el nivel productivo por hectárea. La productividad por hectárea (incluyendo las áreas internas y externas) fue 4482.7 y 7531.1 kg de LCGP para el SSPi y SC, respectivamente.

El área necesaria para producir cada unidad funcional en los dos sistemas se presenta en la Tabla 10, mostrando que para todas las UF, el SC fue más eficiente en el uso del suelo. Así, para producir un LCGP, LCE, kg de grasa y kg de proteína el SC solo usó un 19.56; 64.26; 22.20 y 21.10% del área interna que el SSPi. Al considerar el área total, el SC siguió siendo más eficiente ya que para estas mismas unidades funcionales usó el 59.52; 70.72; 67.55 y 64.22% del área que el SSPi. Estos resultados se encuentran por encima de los reportados por O'Brien *et al.*, (2012), especialmente el SSPi, ya que estos autores encontraron un rango entre 0.93 a 1.72 m² para un kg de LCGP. Basset-Mens *et al.* (2009) reportaron que sistemas ganaderos en Nueva Zelanda requieren en promedio 1.2 m² para producir un kg de LCE. Además, Casey y Holden (2005) y Thomassen *et al.* (2009) encontraron un uso del suelo para esta misma unidad funcional entre 1.3 a 1.9 m² por kg de LCGP en Suecia y España.

Tabla 6. Área necesaria a nivel de finca y área total (m²) para producir cada UF

	SSPi		SC	
	Interno	Toda el área	Interno	Toda el área
Kg de LCGP	2.06	2.23	0.4	1.33
Kg de grasa	42.54	46.11	9.44	31.14
Kg de proteína	47.54	51.53	10.03	33.09
Kg de LCE	1.69	2.29	1.09	1.83

LCGP: Leche corregida por grasa y proteína; LCE: Leche corregida por energía; SSPi: Sistema silvopastoril intensivo; SC: Sistema convencional.

Por su parte, para la producción de un kg de proteína de Vries y de Boer (2010) reportaron que se requieren entre 33 a 59 m² en distintos sistemas en Europa. Es importante mencionar que se necesitan entre 47 a 64 m² para un kg de carne de cerdo, 42 a 52 m² para un kg de proteína de pollo, mientras que la producción de carne bovina requiere entre 144 a 258 m². Esto coincide con lo encontrado por Elferink y Nonhebel (2007) y Baumgartner *et al.* (2008).

Para el presente estudio vale la pena mencionar que si bien el SSPi requiere mayor área total por kg de UF, la mayor parte de esa área corresponde a un sistema arborizado conocido por su mayor aporte a la conservación de la biodiversidad, que requiere menor cantidad de agua para riego y que contribuye a incrementar la captura de carbono (Broom *et al.* 2013, Chará *et al.* 2015), mientras que el área necesaria en el SC se refiere a sistemas de producción de cereales y soya en monocultivo con alta demanda de riego y efectos sobre la biodiversidad (Gerber *et al.* 2013).

Finalmente cabe destacar que para el caso de esta investigación, buena parte de los factores e índices empleados fueron obtenidos a partir de estudios de emisiones entéricas y del suelo en los mismos sistemas que representan el 60% de las emisiones (Rivera, 2015; Rivera *et al.*, 2015; Molina *et al.* 2016), y los restantes fueron tomados de evaluaciones realizadas bajo condiciones parecidas a las de este estudio. Esto permite una mayor sensibilidad de los resultados para comparar los predios y sistemas en la región del estudio. Sin embargo, debe tenerse cuidado en la adecuada interpretación de los resultados y su aplicación en otras condiciones socioeconómicas y ambientales.

CONCLUSIONES

Los SSPi con leucaena generan 13 a 25% menos emisiones de GEI por unidad de producto frente a sistemas convencionales de alto uso de insumos, además de incrementar la productividad animal, gracias a la inclusión de leguminosas forrajeras, la oferta alta de nutrientes y la menor excreción de N. De igual forma, en estos sistemas existe un bajo uso

de energía no renovable que puede ser hasta 45% menor con relación a un sistema intensivo convencional. Fuera de las fincas, los impactos ambientales son importantes, llegando a ser hasta 35% en cuanto a GEI y más de un 80% en UENR. Finalmente, es necesario resaltar la importancia de continuar realizando estos estudios bajo condiciones particulares de la realidad productiva latinoamericana.

Agradecimientos

Los autores expresan sus agradecimientos al convenio: “Análisis de sistemas productivos en Colombia para la adaptación al cambio climático”, liderado por el Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia (MADR). Además, los autores agradecen a los predios Reserva Natural El Hatico y El Trejito por permitir la realización de estos trabajos de campo en sus instalaciones.

REFERENCIAS

- Arsenault, N., Tyedmers, P., Fredeen, A. 2009. Comparing the environmental impacts of pasture-based and confinement-based dairy systems in Nova Scotia (Canada) using life cycle assessment. *International Journal of Agricultural Sustainability*. 7: 19–41. DOI: <http://dx.doi.org/10.3763/ijas.2009.0356>
- Ballesteros, K., Sotelo K. 2103. Estimación de la Huella de Carbono para una hectárea cultivada con caña de azúcar desde una perspectiva orgánica, Tesis profesional. Universidad ICESI, Facultad de Ingeniería, departamento de Ingeniería Industrial. Cali, Colombia. pp 125. <http://hemeroteca.unad.edu.co/revista1/index.php/riaa/article/view/1260/1596>. Consulta: 13 de noviembre de 2015.
- Barber, A., Pellow, G., Barber. M. 2011. Carbon Footprint of New Zealand Arable Production – Wheat, Maize Silage, Maize Grain and Ryegrass Seed. Foundation for Arable

- Research, Ministry of Agriculture and Forestry. New Zealand. <http://www.fedfarm.org.nz/Files/2011-MPIGrainCarbon.pdf>. Consulta: 13 de noviembre de 2015.
- Basset-Mens, C., Ledgard, S., Boyes, M. 2009. Eco-efficiency of intensification scenarios for milk production in New Zealand. *Ecological Economics*. 68: 1615–1625. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.11.017>
- Baumgartner, D.U., de Baan, L., Nemecek, T. 2008. European grain legumes — environment-friendly animal feed? Life cycle assessment of pork, chicken meat, egg and milk production. Fedearl Department of Economic Affairs DEA. Agroscope Reckenholz-Tänikon Research Station ART, Zürich, Switzerland. <http://www.agroscope.admin.ch/.../index.htm?lang>. Consulta: 13 de noviembre de 2015.
- Broom, D.M., Galindo, F., Murgueitio, E. 2013. Sustainable, efficient livestock production with high biodiversity and good welfare for animals. *Proceedings of the Royal Society B*. 280: 2013-2025. DOI: [10.1098/rspb.2013.2025](https://doi.org/10.1098/rspb.2013.2025)
- Broucek, J. 2014. Production of Methane Emissions from Ruminant Husbandry: A Review. *Journal of Environmental Protection*. 5: 1482-1493. http://file.scirp.org/pdf/JEP_2014112614380312.pdf. Consulta: 21 de octubre de 2016.
- Casey, J.W., Holden, N.M. 2006. Quantification of GHG emissions from suckler-beef production in Ireland. *Agricultural Systems*. 90: 79–98. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2005.11.008>
- Chará, J., Camargo, J.C., Calle, Z., Bueno, L., Murgueitio, E., Arias, L., Dossman, M., Molina, C.H. 2015. Servicios ambientales de Sistemas Silvopastoriles Intensivos: mejora en propiedades del suelo y restauración ecológica. En: Montagnini, F., Somarriba, E., Murgueitio, E., Fassola, H., Eibl, B., (eds). *Sistemas Agroforestales. Funciones productivas, socioeconómicas y ambientales*. Cali, Colombia. CIPAV. 331 - 348.
- Cuartas, C., Naranjo, J.F., Tarazona, A., Correa, G., Barahona, R. 2015. Dry matter and nutrient intake and diet composition in *Leucaena leucocephala* – based intensive silvopastoral systems. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 18 (2015): 303 – 311. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=93944043006>. Consulta: 21 de octubre de 2016.
- Davis, J., Haglund, C. 1999. Life Cycle Inventory (LCI) of Fertiliser Production. Fertiliser Products Used in Sweden and Western Europe. SIK-Report No. 654. Chalmers University of Technology. Gothenburg, Sweden. 112 p.
- de Vries, M., de Boer, I.J.M. 2010. Comparing environmental impacts for livestock products: A review of life cycle assessments. *Livestock Science*. 128: 1–11. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2009.11.007>
- Ecoinvent. 2010. Ecoinvent Centre. Ecoinvent 2.0 database. Swiss centre for life cycle inventories, Dübendorf, Switzerland. <http://www.ecoinvent.ch>. Consulta: 13 de noviembre de 2015
- Ecocosts. 2012. Ecocosts 2012 V2 LCA data on products and services EI V3 Idemat. <http://www.ecocostsvalue.com/EVR/model/theory/subject/5-data.html>. Consulta: 13 de noviembre de 2015
- Elferink, E.V., Nonhebel, S. 2007. Variations in land requirements for meat production. *Journal of Cleaner Production*. 15: 1778–1786. DOI: [10.1016/j.jclepro.2006.04.003](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.04.003)
- Flysjö, A., Cederberg, C., Henriksson, M., Ledgard, S. 2012. The interaction between milk and beef production and emissions from land use change e critical considerations in life cycle assessment and carbon footprint studies of milk. *Journal of Cleaner Production*. 28: 134-142. DOI: [10.1016/j.jclepro.2011.11.046](https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.11.046)
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). 2010. Greenhouse Gas Emissions from the Dairy Sector A Life Cycle Assessment. Animal Production and Health Division. Publishing Policy and Support Branch, Office of Knowledge Exchange, Research and Extension, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, Italy. <http://www.fao.org/docrep/012/k7930e/k7930e00.pdf>. Consulta: 20 de octubre de 2016.
- Fox, D.G., Tylutki, T.P., Tedeschi, L.O., Van Amburgh, M.E., Chase, L.E., Pell, A.N., Overton, T.R., Russell, J.B. 2000. The Net

- Carbohydrate and Protein System for Evaluating Herd Nutrition and Nutrient Excretion: Model Documentation. Mimeo No. 213. Animal Science Department, Cornell University, Ithaca, NY. http://www.simpasio.palmira.unal.edu.co/documentos/1.4_CNCPS_Mimeo%20213.pdf. Consulta: 20 de octubre de 2016.
- Gaviria, X., Sossa, C.P., Chará, J., Barahona, R., Lopera, J.J., Córdoba, C.P., Montoya, C. 2012. Producción de Carne Bovina en Sistemas Silvopastoriles Intensivos en el Trópico Bajo Colombiano. VII Congreso de agroforestería. Belém do Pará, Brasil. USJR, CBPS, UFPA, CIPAV, CATIE. pp 661 – 665.
- Gaviria, X., Naranjo, J.F., Bolívar, D.M., Barahona, R. 2015. Consumo y digestibilidad en novillos cebuínos en un sistema silvopastoril intensivo. Archivos de Zootecnia. 245:21-27. <http://www.uco.es/ucopress/az/index.php/az/article/view/370/349>. Consulta: 20 de octubre de 2016.
- Gerber, P. J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., Tempio, G. 2013. Hacer frente al cambio climático a través de la ganadería – Evaluación global de las emisiones y las oportunidades de mitigación. Organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO), Roma. pp 154. <http://www.fao.org/3/a-i3437s.pdf>. Consulta: 20 de octubre de 2016.
- Giraldo, C., Escobar, F., Chará, J., Calle, Z. 2011. The Adoption of Silvopastoral Systems Promotes the Recovery of Ecological Processes Regulated by Dung Beetles in the Colombian Andes. Insect Conservation and Diversity. 4: 115-122. DOI: 10.1111/j.1752-4598.2010.00112.x
- Hagemann, M., Ndambi, A., Hemme, T., Latacz-Lohmann, U. 2012. Contribution of milk production to global greenhouse gas emissions. An estimation based on typical farms. Environmental Science and Pollution Research. 19:390–402. DOI: 10.1007/s11356-011-0571-8
- Hospido, A., Moreira, M.T., Feijoo, G. 2003. Simplified life cycle assessment of galician milk production. International Dairy Journal 13: 783–796. DOI: 10.1016/S0958-6946(03)00100-6
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, In: Eggleston, H.S., Buendia, L., Miwa, K., Ngar, T., Tanabe K. (eds). National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japan. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>. Consulta: 20 de octubre de 2016.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (IPCC). 2007. Climate Change 2007: Synthesis Report. In: Team, C.W., Pachauri, R. K., Reisinger, A. (Eds). Valencia, Spain. http://www.ipcc.ch/publications_and_data/publications_ipcc_fourth_assessment_report_synthesis_report.htm. Consulta: 13 de noviembre de 2015
- International Organisation for Standardisation (ISO). 2006a. Environmental Management – Life Cycle Assessment: Principles and Framework (ISO 14040). European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- International Organisation for Standardisation (ISO). 2006b. Environmental Management – Life Cycle Assessment: Requirements and Guidelines (ISO 14044). European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Jarvis, A., Touval, J.L., Castro, M., Sotomayor, L., Graham, G. 2010. Assessment of threats to ecosystems in South America. Journal for Nature Conservation. 18: 180–188. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jnc.2009.08.003>
- Johnson, K.A., Johnson, D.E. 1995. Methane emissions from cattle. Journal of Animal Science. 73: 2483-2492. <http://webpages.icav.up.pt/PTDC/CVT/098487/2008/Johnson,%201995.pdf>. Consulta: 20 de octubre de 2016.
- Molina, I., Angarita, E.A., Mayorga, O.L., Chará, J., Barahona, 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>
- Mora, V. 2001. Fijación, emisión y balance de gases de efecto invernadero en pasturas de monocultivo y en sistemas silvopastoriles de fincas lecheras intensivas de las zonas altas

- de Costa Rica. Tesis para optar el título de maestría, Turrialba, Costa Rica, CATIE. pp 92
<http://www.sidalc.net/repdoc/A0263E/A0263E.PDF>. Consulta: 21 de octubre de 2016.
- Murgueitio, E., Calle, Z., Uribe, F., Calle, A., Solorio, B. 2011. Native trees and shrubs for the productive rehabilitation of tropical cattle ranching lands. *Forest Ecology and Management*. 261 (10): 1654–1663. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.027>
- Naranjo, J. F., Cuartas, 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*. Volume 24, Article #150. <http://www.lrrd.org/lrrd24/8/nara24150.htm>. Consulta: 13 de noviembre de 2015.
- Nemecek, T., Kägi, T. 2007. Life Cycle Inventories of Swiss and European agricultural production systems. Final report ecoinvent v2.0 No. 15a. Agroscope Reckenholz Taenikon research station ART, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Dübendorf, Switzerland. http://www.upe.poli.br/~cardim/PEC/Ecoinvent%20LCA/ecoinventReports/15_Agriculture.pdf. Consulta: 13 de noviembre de 2015.
- O'Brien, D., Shalloo, L., Patton, J., Buckley, F., Grainger, C., Wallace, M. 2012. A life cycle assessment of seasonal grass-based and confinement dairy farms. *Agricultural Systems* 107: 33–46. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2011.11.004>
- Pré Consultants. 2008. Simapro 7.0. Pré Consultants. Printerweg, Amersfoort, Netherlands. <http://www.pre.nl>. Consulta: 13 de noviembre de 2015.
- Primavesi, O., Frighetto, R.T., Pedreira, M.D.S., De Lima, M.A., Berchielli, T.T., Barbosa, P.F. 2004. Metano entérico de bovinos leiteiros em condições tropicais brasileiras. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. 39 (3): 227-283. <http://www.scielo.br/pdf/pab/v39n3/a11v39n3.pdf>. Consulta: 21 de octubre de 2016.
- Rao, I., Peters, M., Castro, A., Schultze-Kraft, R., White, D., Fisher, M., Miles, J., Lascano, L., Blümmel, M., Bungenstab, D., Tapasco, J., Hyman, G., Bolliger, A., Paul, B., van der Hoek, R., Maass, B., Tiemann, T., Cuchillo, M., Douxchamps, S., Villanueva, C., Rincón, A., Ayarza, M., Rosenstock, T., Subbarao, G., Arango, J., Cardoso, J., Worthington, M., Chirinda, N., Notenbaert, A., Jenet, A., Schmidt, A., Vivas, N., Lefroy, R., Fahrney, K., Guimarães, E., Tohme, J., Cook, S., Herrero, M., Chacón, M., Searchinger, T., Rudel, T. 2015. LivestockPlus –The sustainable intensification of forage-based agricultural systems to improve livelihoods and ecosystem services in the tropics. *Tropical Grasslands*. 3: 59–82. <http://www.tropicalgrasslands.info/index.php/tgft/article/view/262/164>. Consulta: 21 de octubre de 2016.
- Restrepo J.C., Rivera, J.E., Chará J., Barahona, R., Lopera J.J., Castaño, D.M., Ceballos O.A. 2012. Consumo de Forrajes, Producción y Calidad de Leche en Sistemas Silvopastoriles Intensivos en Bosque Seco Tropical (Valle del Cauca – Colombia). VII Congreso de agroforestería. Belém do Pará, Brasil. USJR, CBPS, UFPA, CIPAV, CATIE. pp 645 – 652.
- Rivera, J.E., Arenas, F.A., Rivera, R., Benavides, L.M., Sánchez, J., Barahona, R. 2014. Análisis de ciclo de vida en la producción de leche: comparación de dos hatos de lechería especializada. *Livestock Research for Rural Development*. Volume 26, Article #112. <http://www.lrrd.org/lrrd26/6/rive26112.htm>. Consulta: 13 de noviembre de 2015.
- Rivera, J.E., Molina, I.C., Donney's, G., Villegas, G., Chará, J., Barahona, R. 2015. Dinámica de fermentación y producción de metano en dietas de sistemas silvopastoriles intensivos con *L. leucocephala* y sistemas convencionales orientados a la producción de leche. *Livestock Research for Rural Development*. Volume 27, Article #76. <http://www.lrrd.org/lrrd27/4/rive27076.html>. Consulta: 13 de noviembre de 2015.
- Rivera, J.E. 2015. Análisis del ciclo de vida (ACV) en un sistema silvopastoril intensivo (SSPi) y un sistema intensivo convencional orientados a la producción de leche bajo condiciones de bs – T. Tesis para optar el título de magíster en Ciencias Agrarias, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. pp 129. <http://www.bdigital.unal.edu.co/49254/1/1017132998.2015.pdf>. Consulta: 21 de octubre de 2016.

- Rivera, J., Arenas, F., Córdoba, C., Cuartas, C., Naranjo, J., Murgueitio, R., Blanco, C. 2012. Degradabilidad *in vitro* de dietas ofrecidas en sistemas silvopastoriles intensivos, y simulaciones de ganancias de peso en el caribe seco Colombiano. VII Congreso de Agroforestería. Belém do Pará, Brasil. USJR, CBPS, UFPA, CIPAV, CATIE. pp 40 – 50.
- Rudel, T.K., Paul, B., White, D., Rao, I.M., Van Der Hoek, R., Castro, A., Boval, M., Lerner, A., Schneider, L., Peters, M. 2015. LivestockPlus: Forages, sustainable intensification, and food security in the tropics. *A Journal of the human environment*. 6: 120 – 128. DOI: 10.1007/s13280-015-0676-2
- Sjaunja, L.O., Baevre, L., Junkkarinen, L., Pedersen, J., Setälä, J. 1990. A Nordic proposal for an energy corrected milk (ECM) formula. In: Gaillon, P., Chabert, Y. (Eds.) European Association for Animal Production Publication, Performance Recording of Animals: State of the Art, 27th Biennial Session of the International Committee for Animal Recording. Centre for Agricultural Publishing and Documentation, Paris, France, pp 156–192.
- Sneath, R.W., Beline, F., Hilhorst, M.A., Peu, P. 2006. Monitoring GHG from manure stores on organic and conventional dairy farms. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 112: 122–128. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2005.08.020>
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., de Haan, C. 2006. *Livestock's Long Shadow, Environmental Issues and Options*. LEAD-FAO. Italy, Rome. pp 493. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/010/a0701e/a0701e.pdf>. Consulta: 13 de noviembre de 2015.
- Thomassen, M.A., de Boer, I.J.M. 2005. Evaluation of indicators to assess the environmental impact of dairy production systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 111: 185–199. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2005.06.013>
- Thomassen, M.A., Dolman, M.A., Van Calster, K.J., De Boer, I.J.M. 2009. Relating life cycle assessment indicators to gross value added for Dutch dairy farms. *Ecological Economics*. 68: 2278–2284. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolecon.2009.02.011>
- Thomassen, M.A., Van Calster, K.J., Smits, M.C.J., Iepema, G.L., de Boer, I.J.M. 2008. Life cycle assessment of conventional and organic milk production in the Netherlands. *Agricultural Systems* 96: 95–107. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2007.06.001>
- Weiss, F., Leip, A. 2012. Greenhouse gas emissions from the EU livestock sector: A life cycle assessment carried out with the CAPRI model. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 149: 124– 134. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.015>
- Williams, A.G., Audsley, E., Sandars, D.L. 2006. Determining the environmental burdens and resource use in the production of agricultural and horticultural commodities. Main report. Defra Research Project IS0205. Cranfield University and Defra, Bedford. UK. pp 66.
- Xua, X., Zhang, B., Liua, Y., Xue, Y., Di, B. 2013. Carbon footprints of rice production in five typical rice districts in China. *Acta Ecologica Sinica*. 33 (4): 227–232. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.chnaes.2013.05.010>

Anexos

Anexo I. Fuentes de emisión y factores de emisión utilizados en cada uno de los sistemas dentro de la finca.

Interno	Factor de emisión		Unidad	Referencia
	SSPi	SC		
Emisiones de CH₄				
Fermentación entérica	21.3	19.5	g de CH ₄ kg ⁻¹ de MSC	Rivera <i>et al.</i> (2015)
Excretas en potrero	6.3	6.3	g de CH ₄ m ³ día ⁻¹	Sneath <i>et al.</i> (2006)
Praderas	-326.7	14.924.4	g de CH ₄ ha ⁻¹ año ⁻¹	Rivera (2015)
Quema de Gasolina	0.12	0.12	g de CH ₄ lt ⁻¹	Ecoinvent (2010)
Quema de Diesel	0.14	0.14	g de CH ₄ lt ⁻¹	Ecoinvent (2010)

Emisiones de N₂O				
Urea	2.0%	2.0%	Del N aplicado	IPCC (2006)
Gallinaza	2.0%	2.0%	Del N aplicado	IPCC (2006)
SAM	2.0%	2.0%	Del N aplicado	IPCC (2006)
DAP	2.0%	2.0%	Del N aplicado	IPCC (2006)
Excretas – Estiércol	1.37%	1.77%	Del N excretado	Rivera (2015)
Excretas - Orina	0.3%	3.47%	Del N excretado	Rivera (2015)
Praderas	5510.4	47.417.9	g de N ₂ O ha ⁻¹ año ⁻¹	Rivera (2015)
Quema de Gasolina	0.19	0.19	g de N ₂ O l ⁻¹	Ecoinvent (2010)
Quema de Diesel	0.14	0.14	g de N ₂ O l ⁻¹	Ecoinvent (2010)
Emisiones de CO₂				
Quema de Diesel	2630	2630	g l-Usado ⁻¹	Nemecek y Kagi (2007)
Quema de Gasolina	2389	2389	g l-Usado ⁻¹	Nemecek y Kagi (2007)
Praderas	132	276	kg de CO ₂ ha ⁻¹ año ⁻¹	Rivera (2015)

SSPi: Sistema silvopastoril intensivo; SC: Sistema convencional

Anexo II. Fuentes de emisión y factores de emisión utilizados en cada uno de los sistemas fuera de la finca

Externo	Factor de emisión		Unidad	Referencia
	SSPi	SC		
Emisiones de CH₄				
Combustible (kg)	1.43	1.43	g l ⁻¹ de Combustible	Ecoinvent (2010)
Urea (KgN)	3.71	3.71	g Kg de N ⁻¹	Ecoinvent (2010)
Alimento balanceado (kg)	1.47	1.47	g kg ⁻¹	Ecoinvent (2010)
Cogollo de Caña (kg)	1.42	1.42	g kg ⁻¹	Ballesteros y Sotelo (2103)
Gluten de maíz (Kg)	1.05	1.05	g kg ⁻¹	Barber <i>et al.</i> (2011)
Salvado de arroz (Kg)	1.26	1.26	g kg ⁻¹	Xua <i>et al.</i> (2013)
SAM (Kg)	2.04	2.04	g kg ⁻¹	Ecocosts (2012)
DAP (Kg)	1.94	1.94	g kg ⁻¹	Davis y Haglund (1999)
K ₂ SO ₄ (Kg)	1.71	1.71	g kg ⁻¹	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)
Emisiones de N₂O				
Urea - (Kg -N)	0.03	0.03	g Kg ⁻¹ de N	Ecoinvent (2010)
Alimento balanceado (kg)	0.73	0.73	g kg ⁻¹	Ecoinvent (2010)
Cogollo de Caña (kg)	0.51	0.51	g kg ⁻¹	Ballesteros y Sotelo (2103)
Gluten de maíz (Kg)	0.65	0.65	g kg ⁻¹	Barber <i>et al.</i> (2011)
Salvado de arroz (Kg)	0.68	0.68	g kg ⁻¹	Xua <i>et al.</i> (2013)
SAM (kg)	0.033	0.033	g kg ⁻¹	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)
DAP (kg)	0.2	0.2	g kg ⁻¹	Davis y Haglund (1999)
K ₂ SO ₄ (kg)	0.0138	0.0138	g kg ⁻¹	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)
Emisiones de CO₂				
Electricidad (Kwh)	580.0	580.0	g kwh ⁻¹	Ecoinvent (2010)
Combustible (kg)	320.0	320.0	g kg ⁻¹	Ecoinvent (2010)
Urea (KgN)	3100.0	3100.0	g Kg ⁻¹ de N	Ecoinvent (2010)
Cal (kg)	820.0	820.0	g kg ⁻¹	Ecoinvent (2010)
Alimento balanceado (kg)	700.0	700.0	g kg ⁻¹	Ecoinvent (2010)
Cogollo de Caña (kg)	78.8	78.8	g kg ⁻¹	Ballesteros y Sotelo (2103)
Gluten de maíz (Kg)	232.0	232.0	g kg ⁻¹	Barber <i>et al.</i> (2011)
Salvado de arroz (Kg)	338.0	338.0	g kg ⁻¹	Xua <i>et al.</i> (2013)
SAM (kg)	1705.0	1705.0	g kg ⁻¹	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)
DAP (kg)	1884.0	1884.0	g kg ⁻¹	Davis y Haglund (1999)
K ₂ SO ₄ (kg)	1426.0	1426.0	g kg ⁻¹	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)
Transporte				
Transporte de insumos externos				Ecoinvent (2010)

MSI: Materia seca ingestada; SAM: Sulfato de Amonio; DAP: Fosfato diamónico; K₂SO₄: Sulfato de potasio. SSPi: Sistema silvopastoril intensivo; SC: Sistema convencional

Anexo III. Factores de energía no renovable utilizados para el análisis

Uso de Energía no Renovable (Mj)	Valor	Unidad	Referencia
Alimento balanceado (kg)	5.52	Mj	Ecoinvent (2010)
Diesel (kg)	44.61	Mj	Ecoinvent (2010)
Gasolina (kg)	43.5	Mj	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)
Urea (kg- N)	63.93	Mj	Ecoinvent (2010)
Electricidad (Kwh)	11.38	Mj	Ecoinvent (2010)
Quemas de Diesel (kg)	36.4	Mj	Ecoinvent (2010)
Quemas de Gasolina (kg)	32.4	Mj	Ecoinvent (2010)
Cogollo de Caña (kg)	0.6	Mj	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)
Gluten de maíz (kg)	1.02	Mj	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)
Salvado de arroz (kg)	2.178	Mj	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)
SAM (kg)	26.8	Mj	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)
DAP (kg)	27.9	Mj	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)
K ₂ SO ₄ (kg)	19	Mj	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)

SAM: Sulfato de Amonio; DAP: Fosfato diamónico; K₂SO₄: Sulfato de potasio.

Anexo IV. Factores de uso del suelo para la elaboración de insumos para los sistemas

Uso de suelo fuera de la finca (m²)	m² Kg de materia⁻¹	Referencia
Alimento balanceado	1.21	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)
Cogollo de Caña	0.44	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)
Gluten de maíz	0.25	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)
Salvado de arroz	0.3	Ecocosts (2012); Ecoinvent (2013)