

Balance de GEI de la intensificación agrícola y la producción de bioenergía en la región de la Orinoquia, Colombia*

GHG Balance of Agricultural Intensification & Bioenergy Production in the Orinoquia Region, Colombia

CITACIÓN: Ramírez-Contreras, N. E., Munar-Flórez, D., Hilst, F.v.d., Espinosa, J. C., Ocampo-Durán, Á., Ruíz-Delgado, J., Molina-López, D. L., Wicke, B., García-Núñez J. A. & Faaij, A. P. C. Balance de GEI de la intensificación agrícola y la producción de bioenergía en la región de la Orinoquia, Colombia (Traductor Arenas, C.). *Palmas*, 42(3), 24-61.

PALABRAS CLAVE: Cambio del uso del suelo, Biomasa, Ganado, Intensificación sostenible, Biocombustibles, Bioelectricidad, Aceite de palma, Caña de azúcar, Acacia.

KEYWORDS: Land-use change, Biomass, Cattle, Sustainable intensification, Biofuels, Bioelectricity, Palm oil, Sugarcane, Acacia.

Nota del editor: MDPI se mantiene neutral con respecto a las reclamaciones jurisdiccionales en los mapas publicados y las afiliaciones institucionales.

Derechos de autor: © 2021 de los autores. Licenciatario MDPI, Basel, Switzerland. Este artículo es de acceso abierto bajo los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Attribution (CC BY) (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

* Traducido del original GHG Balance of Agricultural Intensification & Bioenergy Production in the Orinoquia Region, Colombia publicado en la revista *Land* 2021, 10, 289. <https://doi.org/10.3390/land10030289>

RAMÍREZ C. NIDIA E.

Instituto de Investigación de Sostenibilidad Energética, facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Groningen
Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma
n.e.ramirez.contreras@rug.nl;
nramirez@cenipalma.org

MUNAR F. DAVID

Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma

HILST FLOOR VAN DER

Instituto Copérnico de Desarrollo Sostenible, Universidad de Utrecht

ESPINOSA JUAN C.

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma

OCAMPO D. ÁLVARO

Grupo de Investigación sobre Producción Tropical Sostenible, Universidad de los Llanos

RUÍZ D. JONATHAN

Federación Nacional de Cultivadores de Palma de Aceite, Fedepalma

MOLINA L. DIEGO L.

Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma

WICKE BIRKA

Instituto Copérnico de Desarrollo Sostenible, Universidad de Utrecht

GARCÍA NÚÑEZ JESÚS A.

Corporación Centro de Investigación en Palma de Aceite, Cenipalma

FAAIJ ANDRÉ P. C.

Instituto de Investigación de Sostenibilidad Energética, Facultad de Ciencias e Ingeniería, Universidad de Groningen
TNO Energy Transition
Editor Académico Marta Debolini

Resumen

La expansión de los cultivos energéticos puede aumentar la demanda de tierra y generar desplazamientos de cultivos alimentarios, afectando las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente a través de cambios del uso del suelo (LUC por sus siglas en inglés). El aumento de la productividad agrícola podría compensar esto. Nuestro estudio tiene como objetivo evaluar las emisiones regionales combinadas de GEI causadas por el aumento de los rendimientos agrícolas para la producción de cultivos alimentarios y carne de vacuno, y utilizar las tierras excedentarias generadas para la producción de biomasa con el fin de reemplazar los combustibles fósiles en la región de la Orinoquia en Colombia para el año 2030. Los resultados muestran que las tierras excedentarias para la producción de biomasa se obtienen únicamente cuando se aplican medidas drásticas para aumentar la productividad agrícola. En el escenario medio y alto, podrían generarse 0,6 y 2,4 Mha de tierras excedentarias, respectivamente. Esta intensificación da como resultado una reducción en las emisiones de GEI de hasta el 83 % en el sector agrícola en la Orinoquia, que en gran medida se debe al aumento de la productividad de la producción ganadera y a la mejora de las pasturas degradadas. El potencial de biocombustible de las tierras excedentarias se proyecta en 36 a 368 PJ por año, con un bajo riesgo de causar LUC indirecto. Esto resulta en la reducción de las emisiones de GEI de más del 100 % en comparación con su equivalente de combustibles fósiles. Una perspectiva integrada del uso del suelo agrícola permite la producción sostenible de alimentos y bioenergía.

Abstract

Energy crop expansion can increase land demand and generate displacement of food crops, which impacts greenhouse gas (GHG) emissions mainly through land-use change (LUC). Increased agricultural productivity could compensate for this. Our study aims to evaluate the regional combined GHG emissions of increasing agricultural yields for food crop and beef production and using the generated surplus land for biomass production to replace fossil fuels in the Orinoquia region of Colombia until 2030. The results show that surplus land for biomass production is obtained only when strong measures are applied to increase agricultural productivity. In the medium and high scenario, a land surplus of 0.6 and 2.4 Mha, respectively, could be generated. Such intensification results in up to 83% emission reduction in Orinoquia's agricultural sector, largely coming from increasing productivity of cattle production and improving degraded pastures. Biofuel potential from the surplus land is projected at 36 to 368 PJ per year, with a low risk of causing indirect LUC, and results in GHG emission reductions of more than 100% compared to its fossil fuel equivalent. An integrated perspective of the agricultural land use enables sustainable production of both food and bioenergy.

Introducción

Con base en la necesidad de reducir el consumo de combustibles fósiles y las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), la producción de bioenergía ha aumentado en las últimas décadas y se prevé que seguirá creciendo [1]. Sin embargo, la expansión de la producción de cultivos energéticos podría aumentar la demanda de tierras y, por consiguiente, las emisiones de GEI debido al cambio directo e indirecto

del uso del suelo ((I) LUC, por sus siglas en inglés) [2]. Para minimizar estos efectos, los criterios de sostenibilidad de la Directiva sobre Fuentes de Energía Renovables (RED II) exigen biocombustibles de bajo riesgo de ILUC y ahorros mínimos de emisiones de GEI en comparación con el equivalente en combustibles fósiles [2]. Se considera que los biocombustibles tienen un riesgo bajo de ILUC cuando los cultivos energéticos se siembran en tierras excedentarias que pueden ponerse a disposición gracias a la implementación

de medidas para aumentar aún más los rendimientos de la producción agrícola en comparación con un escenario sin cambios [3]. La producción de cultivos energéticos en tierras excedentarias obtenidas a través de la intensificación agrícola reduce el riesgo de emisiones de GEI relacionadas con LUC e ILUC [4-6].

Durante la última década, Colombia ha estado promoviendo el desarrollo de un sector sostenible de biomasa y bioenergía [7]. El uso eficiente del suelo agrícola ha sido un objetivo importante de desarrollo, ya que su uso actual tiene baja productividad y existe un riesgo potencial de que el sector agrícola continúe desarrollándose de manera ineficiente [8-10]. Recientemente, el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) delimitó la frontera agrícola, indicando qué tierras podrían ser utilizadas para actividades agrícolas con el objetivo de evitar la expansión de la producción hacia áreas protegidas [11]. La Orinoquia es una de las regiones con mayor superficie disponible dentro de la frontera agrícola [12]. Actualmente, el 55 % del área en la región se utiliza para la ganadería extensiva, el 5 % para la producción agrícola, el 1,3 % del área es superficie de agua, el 0,04 % se utiliza para la producción forestal y el 38,6 % para otros usos (por ejemplo, extracción de petróleo, áreas urbanas, vegetación nativa, etc.) [13]. En teoría, la zona de la frontera agrícola podría utilizarse para la expansión agrícola con el fin de suplir el aumento previsto de la demanda de productos agrícolas y producir cultivos energéticos. Sin embargo, dado que la tierra dentro de esta frontera agrícola se compone principalmente de vegetación natural, es muy probable que esto genere una alta emisión de gases de efecto invernadero relacionada con el LUC y otros impactos ambientales negativos. Esto hace necesaria la intensificación agrícola para aumentar la producción de forma sostenible y producir cultivos energéticos de bajo riesgo de ILUC.

Teniendo en cuenta el ineficiente uso actual de la tierra agrícola de la región, existe un potencial significativo para intensificar la producción agrícola, especialmente la del sistema extensivo de producción ganadera, que podría conducir a menores requerimientos de tierra. La tierra disponible podría utilizarse para otros usos, como cultivos energéticos [14-17]. No obstante, la intensificación de la agricultura también podría dar lugar a emisiones adicionales de GEI

dependiendo de los insumos y las prácticas de manejo [5]. Varios estudios sobre el cambio del uso del suelo en la región de la Orinoquia han reportado variables en las reservas de carbono debido a la conversión del suelo [18-20] y otros estudios han reportado emisiones de GEI causados por la producción agrícola [18, 21, 22]. Sin embargo, aún se desconocen los impactos conjuntos de las emisiones de GEI generadas por (i) aumentos en los rendimientos agrícolas de los cultivos alimentarios y la producción de carne de vacuno, y (ii) la producción de biocombustibles en las tierras excedentarias generadas por la intensificación.

El objetivo de este estudio es evaluar el balance de GEI para varios niveles de intensificación agrícola y el uso de las tierras excedentarias generadas para la producción de biomasa con el fin de reemplazar los combustibles fósiles en la región de la Orinoquia en Colombia. El análisis se centra en la evolución hasta el año 2030. El balance de GEI se evalúa para tres escenarios de intensificación agrícola y un escenario de referencia, en combinación con tres rutas de producción de bioenergía: etanol de caña de azúcar, biodiésel de palma de aceite y producción de electricidad a partir de acacia.

2. Materiales y métodos

2.1. Área de estudio

La región de la Orinoquia en Colombia incluye a los departamentos de Arauca, Casanare, Meta y Vichada. Esta abarca alrededor de 25,4 Mha [23], de los cuales alrededor de 9,9 Mha (es decir, 39 %) son áreas prohibidas para actividades agrícolas (bosques nativos, parques nacionales, áreas indígenas, áreas de patrimonio arqueológico, etc.) [12]. Se considera que aproximadamente 15,5 Mha (el 61 %) se encuentran dentro de la frontera agrícola, de los cuales 7 Mha se utilizan para la producción agrícola (10 % de tierras de cultivos y 90 % de pasturas) [24] y 8,5 Mha, que son sabanas inundadas y matorrales, están disponibles para la producción agrícola [24]. El pastoreo extensivo de ganado (0,6 unidades animales ha⁻¹, en el cual la unidad animal equivale a 450 kg de peso vivo) [15] ocupa alrededor de 6,2 Mha [25] y es una de las principales actividades económicas de la región [13, 15, 26]. Actualmente, cerca de 0,6 Mha se utilizan como tierras

de cultivo. Los dominantes en términos de superficie cultivada son la palma de aceite (33 %), el arroz (32 %), el plátano (14 %), el maíz (10 %), la soya (7 %) y la yuca (3 %) [24].

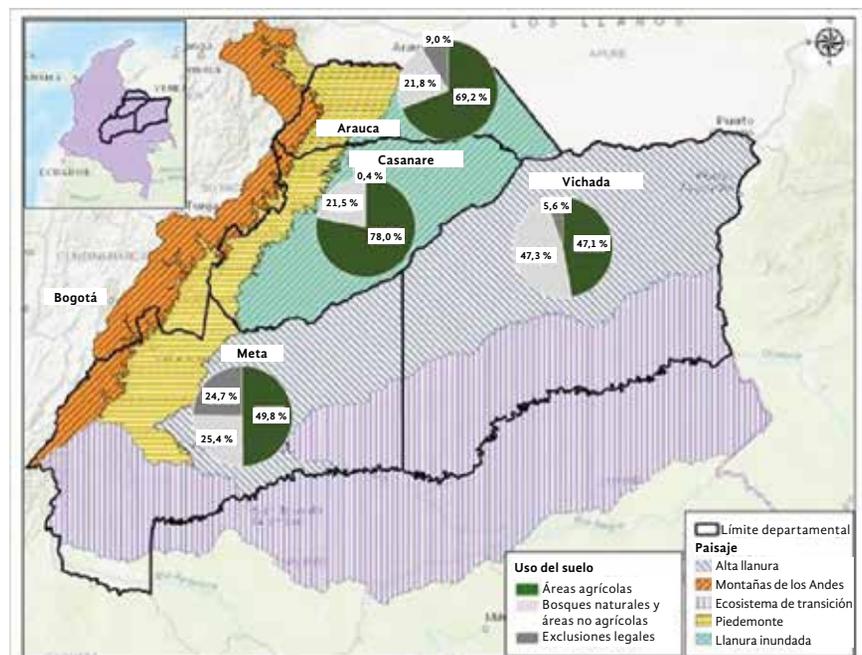
La región de la Orinoquia incluye cinco subregiones: montañas de los Andes, piedemonte, llanuras inundadas, llanura alta y una región de ecosistemas de transición (Figura 1). Esta última es la zona de transición entre las sabanas y el Amazonas. Tanto la región del ecosistema de transición como la de las montañas de los Andes son parte de los 9,9 Mha de áreas prohibidas para actividades agrícolas. Las subregiones de la llanura inundada, el piedemonte y la llanura alta se encuentran dentro de la frontera agrícola y, por lo tanto, se incluyen en este estudio. A pesar de que la llanura inundada permanece anegada la mayor parte del año (+/- 8 meses) [21, 27], esta zona se ha utilizado por décadas para la producción ganadera extensiva a pequeña escala [21]. Según la Unidad de Planificación Rural Agropecuaria de Colombia (UPRA), esta zona tiene una baja aptitud para la producción de cultivos, pero tiene el potencial de continuar con la producción de ganado [28] a pequeña escala [21]. Actualmente, las subregiones del piedemonte y las llanuras altas, denominadas en lo sucesivo “zona de piedemonte y llanuras altas”, se utilizan principalmente para la producción ganadera extensiva a gran escala [10]. Esta área tiene

el mayor potencial para aumentar la productividad ganadera y generar posibles tierras excedentarias y adecuadas para la producción agrícola [13]. La Tabla A6 del Apéndice B muestra la distribución de la tierra (en Mha) y la idoneidad de la tierra para la producción agrícola y ganadera de las tres subregiones.

2.2. Enfoque general

El balance neto de GEI de la región de la Orinoquia para 2030 se calcula teniendo en cuenta (i) la intensificación agrícola de la producción de cultivos alimentarios y carne de vacuno y (ii) la bioenergía de los cultivos energéticos producidos en las tierras excedentarias generadas. En primer lugar, determinamos la producción agrícola a 2030 (Sección 2.3). Dado que la mayoría de los cultivos producidos en la región están destinados al consumo humano, en este estudio se les denomina cultivos alimentarios. Además, como la mayor parte de la producción ganadera de la región se dedica a la producción de carne de vacuno, en este estudio solo se incluye esa producción. Después, evaluamos cómo la productividad agrícola puede evolucionar a 2030 y calculamos el excedente (o escasez) de tierras resultante (Sección 2.4). Nuestro análisis se realiza para cuatro escenarios; además de un escenario de referencia, que supone un

Figura 1. Ubicación de las subregiones y departamentos de la región de Orinoquia en Colombia. Los gráficos circulares muestran la composición del uso actual del suelo en cada departamento. Basado en información de [12, 27-29]



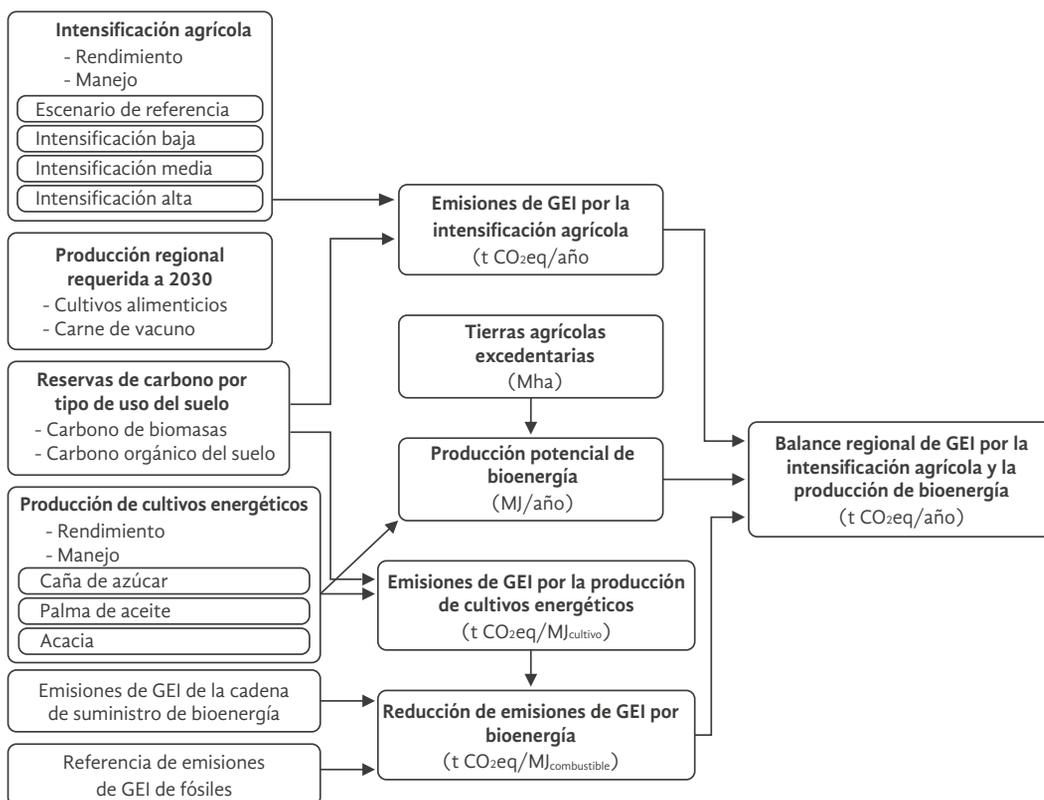
desarrollo sin cambios en la intensificación agrícola, en los cuales se incluyen tres escenarios (bajo, medio y alto). Luego, determinamos las emisiones de GEI de la producción e intensificación agrícola (Sección 2.5), de las cadenas de suministro de bioenergía y sus cadenas de combustibles fósiles de referencia (Sección 2.6) y del cambio del uso del suelo (Sección 2.7). Se consideran tres rutas de producción de biomasa (bioetanol de caña de azúcar, biodiésel de aceite de palma y madera de acacia para bioelectricidad), únicamente suponiendo una producción en tierras excedentarias. Obsérvese que cada cultivo energético se analiza individualmente, lo que significa que cada uno se siembra en el 100 % de las tierras liberadas en cada escenario (es decir, en cada escenario solo se siembra palma de aceite, caña de azúcar o acacia en las tierras excedentarias). No consideramos la posibilidad de sembrar los tres cultivos energéticos al mismo tiempo en la misma zona. Combinando las emisiones de GEI

de la intensificación agrícola, la producción de bioenergía y el LUC, se estima el balance global de GEI de la región para cada escenario y cada cultivo energético. La Figura 2 presenta una visión general de los principales pasos de nuestro enfoque.

2.3. Producción agrícola en 2030

La producción de alimentos en la región de la Orinoquia en 2030 se calcula según la Ecuación (1). La producción de alimentos se estima a nivel nacional, multiplicando la población nacional estimada en 2030 por el consumo per cápita, la tasa de autosuficiencia (SSR por sus siglas en inglés) y las pérdidas de alimentos de cada producto alimentario. La producción nacional de alimentos se multiplica por el aporte de la región de la Orinoquia de cada producto alimentario. Se espera que el consumo per cápita de productos alimentarios en Colombia aumente de aquí al 2030 [1, 30].

Figura 2. Enfoque metodológico para evaluar el balance de GEI de la intensificación agrícola y el uso de las tierras excedentarias generadas para producir bioenergía y reemplazar a los combustibles fósiles



En línea con los estudios del MADR, (2016) y Younis *et al.* (2020), se asume que la SSR, las pérdidas de alimentos y la contribución relativa de la región de la Orinoquia a la producción nacional de alimentos se mantienen estables hasta 2030. La proyección de la demanda de tierra para la agricultura en 2030 se basa en la cantidad de tierra en uso en 2018 (cultivos y ganado). Para los datos de entrada, véase la Tabla A1 en el Apéndice A.

Ecuación 1

$$\text{AlimentoPro}_i = \text{Pob} * \text{Con}_i * \text{SSR}_i * P_{i, \text{orq}} * (100 \%) + \text{Pérdida}_i$$

donde: AlimentoPro_i = producción de alimentos en la Orinoquia (t año^{-1}); i = producto alimentario (arroz, maíz, soya, yuca, plátano, aceite de palma y carne de vacuno); Pob = población nacional; Con_i = consumo per cápita del producto alimentario i ($\text{kg persona}^{-1} \text{año}^{-1}$); SSR_i = tasa de autosuficiencia del producto alimentario i (%); $P_{i, \text{orq}}$ = Aporte de la Orinoquia a la producción nacional por cada producto alimentario i (%); Pérdida_i = pérdidas de alimentos en la cadena de suministro del producto alimentario i (%).

Después de calcular la producción por producto alimentario en 2030, evaluamos la tierra necesaria para producir alimentos en 2030 para cada escenario, dividiendo la producción por los rendimientos relacionados con cada escenario. Ecuación (2).

Ecuación 2

$$\text{TierraD}_i = \text{AlimentoPro}_i / \text{Rendimiento}_{i\text{Escenario}}$$

donde: TierraD_i = demanda de tierra para la producción de alimentos (ha); AlimentoPro_i = producción de alimentos de la Orinoquia (t año^{-1}); $\text{Rendimiento}_{i\text{Escenario}}$ = rendimiento del producto alimentario i para cada escenario (referencia, bajo, medio y alto) ($\text{t ha}^{-1} \text{año}^{-1}$).

2.4. Intensificación agrícola (cultivos alimentarios y ganado)

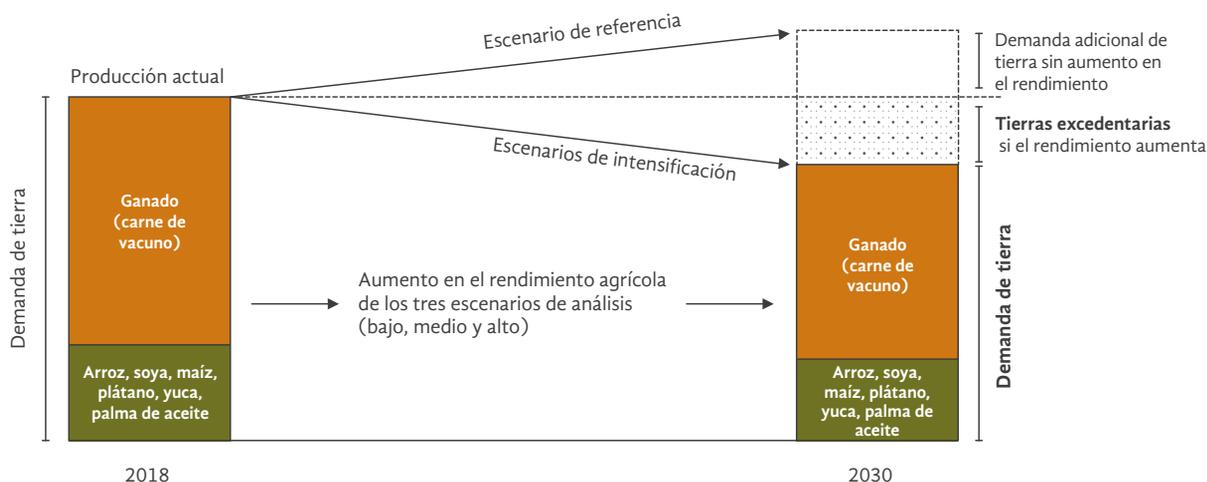
Aumentar la productividad agrícola en la región podría generar tierras excedentarias si este crecimiento supera el incremento de la demanda de productos agrícolas. La Figura 3 muestra cómo se determinan las tierras excedentarias, es decir, la diferencia entre la demanda actual de tierra y la demanda futura de tierras, proyectada según los distintos niveles de intensificación agrícola (Tabla 1). Los escenarios de intensificación asumen mejores prácticas agrícolas, tales como el uso

eficiente de los fertilizantes y la reducción del consumo de combustibles fósiles. Antes de describir las características clave de las prácticas agrícolas mejoradas y los rendimientos resultantes, primero resumimos los escenarios. El Apéndice B contiene información adicional sobre los escenarios. El escenario de referencia sigue las condiciones de la agricultura convencional (es decir, prácticas ineficientes en la aplicación de fertilizantes y el manejo del suelo). Para el escenario de baja intensificación, se asumen prácticas agrícolas convencionales con un aumento del rendimiento de los cultivos basado en ciertas mejoras en la aplicación de fertilizantes. En el escenario de intensificación media, se asume la mejora de algunas prácticas agrícolas, como la fertilización de los cultivos y el manejo del ganado (el ganado se alimenta con pastos mejorados y sorgo forrajero). Para el escenario de alta, se asume una intensificación sostenible con la aplicación de fertilizantes de acuerdo con las necesidades y mejora del suelo y la mejora de la calidad de la alimentación del ganado (Apéndice B).

2.4.1 Producción de cultivos alimentarios

Según la UPRA (2019), el uso actual de fertilizantes en Colombia es inadecuado, ya que no se aplican con base en un análisis de suelos o los requerimientos de nutrientes de las plantas. Esto puede llevar a déficits o excesos de fertilizantes y afecta los rendimientos de los cultivos [31]. Para lograr los requerimientos de nutrición de los cultivos, en este estudio se consideran las cantidades de los tres nutrientes principales: nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K), aportados por cada fertilizante y en cada escenario. La cantidad de nutrientes (kg ha^{-1}) aplicada a cada cultivo está basada en la literatura y se relaciona con el rendimiento (Tabla A2 del apéndice B). Otro factor importante en la intensificación del rendimiento agrícola es la mecanización de los cultivos [5]. En Colombia esta se utiliza sobre todo para preparar el suelo y durante la cosecha, mientras que las demás tareas también se pueden realizar manualmente [31]. El arroz es el cultivo que usa más máquinas/equipos en Colombia [31]. En la región de la Orinoquia, el arroz se cultiva en condiciones de secano (arroz de secano), lo que significa que este cultivo recibe agua principalmente de la lluvia. Por lo tanto, no requiere una mecanización relacionada

Figura 3. Tierra excedentaria proyectada para 2030 debido a la intensificación de la producción de carne de vacuno y cultivos alimentarios



con el riego [31]. Aunque, actualmente se utiliza la mecanización en la agricultura, no hay suficientes datos históricos disponibles sobre el consumo de combustibles fósiles en relación con cada cultivo en Colombia. Por lo tanto, el uso de diésel en el escenario de referencia está basado en la literatura, tal como se muestra en la Tabla A2 del Apéndice B. Para los escenarios de intensificación, y con base en el estudio de Brinkman *et al.* (2018) [32], se asumió que el consumo de diésel se reduciría hasta sumar un 10 % en el escenario alto, en comparación con el escenario de referencia (Tabla A2 del apéndice B).

Se analizaron los datos de los rendimientos agrícolas en la región de la Orinoquia durante el periodo 2012-2018 para establecer los niveles de rendimiento de los cultivos para cada escenario. Estos se encuentran en el percentil 50 de los niveles de rendimiento reportados en la región de la Orinoquia durante el periodo 2012-2018. El escenario bajo se fija en el percentil 65, el medio en el 80 y el alto en el 95 de los niveles de rendimiento de la región de la Orinoquia durante el periodo 2012-2018. Así, por ejemplo, el rendimiento del cultivo de arroz es de $4,97 \text{ t ha}^{-1}$ año⁻¹ para el escenario de referencia y, para los escenarios de intensificación, el rendimiento del cultivo es de $5,06$; $5,26$; y $5,96 \text{ t ha}^{-1}$ año⁻¹ para los escenarios bajo, medio y alto, respectivamente. La Tabla 1 muestra las previsiones de rendimiento de todos los cultivos alimentarios.

2.4.2 Producción de carne de vacuno

Se pueden implementar varias mejoras para aumentar la productividad del ganado, incluyendo la fertilización de las pasturas, la mejora de los pastos, una mayor calidad de los piensos y la rotación de las pasturas [21, 33-36]. Actualmente, la producción ganadera de la región se realiza bajo un sistema extensivo. Teniendo en cuenta que en este sistema (i) las pasturas no reciben fertilización en ningún momento de su vida y (ii) el suelo de la región es bajo en nutrientes [37], suponemos que los suelos de la producción ganadera actual están degradados. Dado que todos los escenarios futuros incluyen la producción de ganado en estos suelos degradados, asumimos que el utilizado para el ganado está degradado en todos los escenarios futuros. Sin embargo, a medida que se aplican mejores prácticas para aumentar la productividad, el crecimiento del rendimiento de la carne de vacuno incluye la mejora de los sistemas de producción de ganado con el uso de pasturas mejoradas (fertilizadas) y sistemas silvopastoriles, como se describe a continuación.

Para los escenarios de referencia y bajo se asume el actual sistema de producción extensiva de la zona del piedemonte y llanuras altas, en el que la alimentación animal se basa en pasturas con bajos niveles de nutrientes (por ejemplo, *Trachypogon vestitus*) [10, 37, 38]. Para los escenarios medio y alto, se asume una mejor calidad de la alimentación del ganado (Apéndice B),

utilizando pasturas mejoradas (por ejemplo, *Bracharia decumbens*) y sorgo forrajero para el escenario medio [29]. Por otra parte, una mezcla de praderas mejoradas (por ejemplo, *Brachiaria decumbens*), plantas forrajeras (por ejemplo, hierbas leguminosas y arbustos/árboles) y sorgo forrajero mejoran la calidad de la alimentación de los animales en el escenario alto (se ha considerado que el uso de un sistema de pastoreo silvopastoril es adecuado para el desarrollo sostenible de la producción ganadera [33]). Se consideró que es necesario cultivar el sorgo forrajero en el suelo utilizado para la producción ganadera. Este uso del suelo se incluye como emisiones de piensos en las emisiones totales de GEI causadas por la producción ganadera. En el Apéndice B se describen las características de los sistemas de producción para los escenarios de referencia e intensificación. Los aumentos proyectados en la productividad del ganado para los escenarios de intensificación son acordes con los tres niveles proyectados de aumento en la productividad del plan estratégico ganadero colombiano de la Federación Nacional de Ganaderos [15, 39]. Consideramos que estos aumentos son realistas dado el gran rango de la productividad actual, en el que algunas granjas tradicionales alcanzan una densidad animal

de 1,5-1,8 cabezas por hectárea, mientras que en fincas con sistemas mejorados se logran densidades de 3 a 4 cabezas por hectárea [40]. La Tabla 1 muestra los rendimientos resultantes.

2.5. Emisiones de GEI asociadas a la producción agrícola

Se calcularon las emisiones de GEI causadas por la producción agrícola para cada escenario, tomando un límite del sistema de la cuna a la puerta. Las de todos los sistemas de cultivo se expresan en kg CO₂eq t⁻¹ de producto, que corresponde a toneladas de arroz, de maíz, de soya, de plátano, de yuca y de racimos de fruta fresca de palma de aceite. Respecto a la producción de carne de vacuno, las emisiones se expresan en kg CO₂eq t⁻¹ de carne de vacuno. Las emisiones incluyen las relacionadas con el LUC (Sección 2.7) y con la siembra de cultivos (anuales y perennes) y la producción de carne de vacuno. Las emisiones de GEI relacionadas con la producción de cultivos incluyen las de la producción y aplicación de fertilizantes y el uso de combustible diésel. Además, dado que uno de los cultivos anuales es el arroz, las emisiones de metano (CH₄) de la producción

Tabla 1. Niveles de rendimiento y densidad de ganado para los escenarios de referencia y de intensificación agrícola.

Características	Escenarios 2030				Fuentes de los datos	
	Referencia	Bajo	Medio	Alto		
Rendimiento de los cultivos alimentarios (t ha ⁻¹ año ⁻¹) ^a	Arroz	4,97	5,06	5,26	5,96	[24, 27, 41]
	Maíz	5,50	6,00	6,00	7,00	
	Palma de aceite (aceite crudo de palma)	2,41	2,62	2,96	3,30	
	Plátano	13,00	16,00	18,00	22,45	
	Soya	2,50	2,53	2,80	3,00	
	Yuca	14,00	15,00	18,00	20,74	
Productividad del ganado (AU ha ⁻¹) ^b	Ganado	0,6	1,0	1.5	2.0	[15, 39]

^a El aumento del rendimiento de los cultivos alimentarios está basado en el análisis de los datos históricos de la producción agrícola en toda la región de la Orinoquia para el periodo 2012-2018. Escenario de referencia: percentil 50 del nivel de rendimiento; escenario bajo: percentil 65 del nivel de rendimiento; escenario medio: percentil 80 del nivel de rendimiento; escenario alto: percentil 95 del nivel de rendimiento; ^b AU = unidad animal. Una AU es equivalente a 450 kg de peso vivo [42].

arrocera se incluyen en las ecuaciones A3 y A4 del Apéndice B. La tasa de aplicación de fertilizantes está relacionada con el rendimiento y los requerimientos de nutrientes de cada cultivo, como se muestra en la Tabla A2 del Apéndice B. Por ejemplo, se asume que, en un escenario sostenible como el alto, el fertilizante se aplica de acuerdo con los requerimientos del suelo. Además, para mejorar la fertilización de los cultivos, asumimos un aumento en la eficiencia del uso de fertilizantes nitrogenados, que incluye tanto el uso de buenas prácticas agrícolas como el de fertilizantes nitrogenados de liberación lenta (Apéndice B). Las emisiones de la fertilización incluyen la producción del fertilizante y las emisiones directas o indirectas de N_2O por la aplicación de fertilizantes. Para el uso de combustible diésel, asumimos que el uso de combustibles fósiles por parte de la maquinaria disminuye a medida que los rendimientos agrícolas aumentan debido a la mayor eficiencia de las operaciones por tonelada de producción. Las Tablas A2 y A3 del Apéndice B muestran el uso de diésel por cultivo y por escenario, los factores de emisión de fertilizantes y la aplicación de fertilizantes.

Las emisiones de GEI causadas por la producción de carne de vacuno incluyen las de la producción de piensos (CO_2 y N_2O directo/indirecto; estas se calculan del mismo modo que las de los cultivos alimentarios), la fermentación entérica (CH_4) y el manejo del estiércol (CH_4 y N_2O directo/indirecto). Las emisiones se calcularon siguiendo las Directrices de refinamiento del IPCC 2019 (es decir, ecuaciones 10.21, 10.22, 10.30, 11.1 y 11.5) [43]. Nótese que, para todos los escenarios de este estudio se estima que toda la producción ganadera se ejecuta en un sistema de pastoreo. Por lo tanto, siguiendo el método 2019 del IPCC, corresponde al sistema de gestión de estiércol PCP (pasto/corral/potrero), donde no hay manejo del estiércol [43]. Asumimos que el aumento en la productividad de la carne de vacuno está relacionado con una mejor calidad/cantidad del suministro de piensos (ingesta de materia seca). Esto se debe al cambio de pasturas con bajos niveles de nutrientes a unas que proporcionan un mayor contenido de nutrientes a través de los sistemas integrados de árboles y forraje. Este forraje mejorado optimiza la digestibilidad de la materia seca y aumenta el valor

nutricional del alimento en términos de proteína y minerales totales [33, 44].

Además, la producción ganadera sostenible también incluye un mayor bienestar de los animales (manejo de enfermedades) y un mejor manejo de las pasturas, los forrajes y la calidad del suelo. Uno de los sistemas de producción ganadera sostenible sugerido para Colombia es el denominado sistema silvopastoril, que podría contribuir a mejorar las condiciones del suelo y a aumentar las reservas de C [13, 33]. La Tabla A4 del Apéndice B presenta los datos de entrada para calcular las emisiones de GEI causadas por la producción de carne de vacuno para todos los escenarios. Teniendo en cuenta que la metodología del IPCC 2019 refinó algunos de los datos por defecto según los sistemas de alta y baja productividad del ganado [43], asumimos el uso de estos datos predeterminados (cuando están disponibles) para aplicarlos a los escenarios de acuerdo con las mejores prácticas relacionadas (Tabla A4 del Apéndice B).

2.6. Emisiones de GEI asociadas con cultivos energéticos

Se asume que los cultivos energéticos se siembran, de uno en uno, en las tierras excedentarias obtenidas de la intensificación agrícola descrita en la Sección 2.4. La cantidad de cultivos energéticos que puede producirse depende de la cantidad de tierras excedentarias generadas en cada escenario y del rendimiento de los cultivos energéticos (Tabla A7 del Apéndice C). Dado que solo se obtienen grandes cantidades de tierras excedentarias en los escenarios medio y alto, el cultivo energético se evalúa únicamente para estos dos escenarios. Las emisiones de GEI causadas por estos cultivos incluyen las emisiones relacionadas con el cultivo (fertilización y consumo de combustibles fósiles) y con el LUC. Las emisiones de la fertilización incluyen la producción del fertilizante y las emisiones directas o indirectas de N_2O de la aplicación de fertilizantes (Tabla A7). El cálculo de las emisiones de GEI de los cultivos energéticos sigue la misma lógica que el de los cultivos alimentarios (Sección 2.5). Las Tablas A3 y A7 de los Apéndices B y C muestran todos los datos de entrada y las emisiones de factores para calcular las emisiones de GEI de la siembra de cultivos energéticos.

2.7. Emisiones de GEI relacionadas con el cambio del uso del suelo

La expansión y la reducción de las tierras agrícolas y el uso de las excedentarias para cultivos energéticos provocan cambios en las reservas de C. Se calcularon estos cambios para cinco posibilidades diferentes de LUC en la región de la Orinoquia de la siguiente manera: teniendo en cuenta que, para los escenarios de referencia y bajo, el aumento de la demanda de tierras agrícolas requiere el uso de la vegetación natural (matorral) y que el bosque está excluido para su uso agrícola, las conversiones de uso del suelo para estos dos escenarios son (a) de matorral a suelos de cultivo para la producción de cultivos alimentarios y (b) de matorral a pasturas degradadas para la producción ganadera (es decir, pasturas con bajos niveles de nutrientes). Nótese que, en consonancia con Rincón Castillo *et al.* (2012) y Rodríguez Borray *et al.* (2019), asumimos que la tierra actualmente utilizada para la producción ganadera extensiva está degradada. Las conversiones de uso del suelo consideradas en los escenarios de intensificación media y alta son (c) de tierras de cultivo a tierras de cultivo alimentario y (d) de pasturas degradadas a pasturas manejadas para la producción ganadera (carne de vacuno). En los escenarios de intensificación, todas las tierras exceden-

tarias proceden de zonas de producción ganadera (es decir, pasturas con bajos niveles de nutrientes). Por lo tanto, la conversión del uso del suelo considerada para la producción de cultivos energéticos es (e) de pasturas degradadas a cultivos energéticos (caña de azúcar, palma de aceite y acacia). Las emisiones de GEI causadas por los cambios en las reservas de C que se deben a los cultivos alimentarios de LUC fueron calculadas utilizando la ecuación (3).

Ecuación 3

$$E_{LULUC} = \Delta CS * 44/12 * 1/20 * 1/PE_{LULUC} = CS_R * 44/12 * 1/20 * 1/P - (CS_A * 44/12 * 1/20 * 1/P)$$

donde, E_{LULUC} = emisiones de GEI del cambio en las reservas de C debido al LUC ($t\ CO_2eq\ t^{-1}$ producto agrícola); $\Delta CS = CS_R - CS_A$ (CS_R = reservas de carbono asociadas al uso previo del suelo ($t\ C\ ha^{-1}$); CS_A = reservas de carbono asociadas al uso nuevo del suelo ($t\ C\ ha^{-1}$); P = productividad del cultivo ($t\ ha^{-1}\ año^{-1}$). Se asume un periodo de amortización de 20 años. Se utiliza el factor 44/12 para convertir el carbono en CO_2 .

Cada uso del suelo tiene reservas de carbono diferentes. La Tabla 2 presenta las reservas totales de carbono, incluidas la biomasa superficial y subterránea y el carbono orgánico del suelo (COS) para cada tipo de uso del suelo. El tiempo a considerar para los cambios en las reservas de C fue de 20 años, según [43].

Tabla 2. Reservas de carbono, incluyendo biomasa superficial y subterránea y COS para diversos tipos de uso de la tierra en la región de la Orinoquia, con base en Castanheira *et al.* (2014), a menos que se indique lo contrario.

Tipo de uso del suelo	Reservas de carbono totales ($t\ C\ ha^{-1}$)
Tierra de cultivos	33
Matorrales	126
Pasturas degradadas para la producción de ganado	50
Pasturas manejadas para la producción de ganado (escenario medio/alto)	86/105
Palma de aceite (escenario bajo/medio/alto) ^a	113/121/129
Caña de azúcar (escenario medio/alto) ^b	62/65
Acacia (escenario medio/alto) ^c	85/90

Nótese que, en este estudio, los cultivos energéticos solo se siembran en las tierras excedentarias del escenario medio y alto. Las reservas de C para cultivos energéticos en el escenario medio corresponden al promedio entre las reservas de carbono de los escenarios bajo y alto. ^a Datos para el escenario bajo de [45]. Nótese que, en este estudio, la palma de aceite se utiliza tanto como cultivo alimentario como energético. ^b Valor alto de las reservas de C de [46]. El valor bajo de las reservas de C (59,3) se tomó de [47]. ^c Datos de [48]. El valor bajo de las reservas de C corresponde a $80\ t\ C\ ha^{-1}$.

2.8. GEI total de las cadenas de suministro de bioenergía

Las emisiones totales de GEI del bioetanol de caña de azúcar, del biodiésel de aceite de palma y de la bioelectricidad producida con madera de acacia incluyen las emisiones de GEI del cultivo energético, del LUC, de la planta de conversión (etapa de producción industrial) y de la combustión (es decir, a la conversión del biocombustible en energía térmica, eléctrica o mecánica). Para este estudio, se asume que la planta de conversión de cada cadena bioenergética incluye las siguientes etapas:

- Para el bioetanol, la planta de conversión incluye el transporte de la caña, el proceso de molienda y la planta de etanol [49].
- Para el biodiésel, la planta de conversión incluye la planta de beneficio de aceite de palma, el refinado físico (refinado, blanqueado y desodorizado), la transesterificación, la esterificación del ácido graso libre (AGL), la purificación del BD, la purificación de la glicerina (USP) y la recuperación del metanol [22].
- Para la bioelectricidad, la planta de conversión incluye el aserradero y la fábrica de pellets [50]. Para la producción de bioelectricidad, se asumió un sistema de cogeneración de calor y electricidad. Para el cálculo se utilizó el factor de emisiones de combustión estacionaria del IPCC (2019, vol. 2, cap. 2).

La Tabla A8 del Apéndice D muestra los datos y los factores de emisión de las tres cadenas de suministro. Nótese que para las tres cadenas de suministro de bioenergía se ha asumido que tanto las emisiones en la planta de conversión como las derivadas del uso de la bioenergía (combustión) no varían entre los escenarios, ya que este estudio se centra en la fase de cultivo. Las emisiones de la combustión de la biomasa incluyen emisiones de metano (CH_4) y de óxido nítrico (N_2O), pero las biogénicas de CO_2 de la biomasa de los cultivos se consideran neutras en cuanto al carbono.

Las emisiones de GEI causadas por los cambios en las reservas de C que se deben a los cultivos energéticos de LUC se calcularon utilizando la Ecuación 3. Las emisiones netas de GEI de la cadena de suministro por bioenergía se calcularon utilizando la Ecuación 4.

Ecuación 4

$$\text{Neto}_{\text{GEI}} = F_{\text{C}} + \text{LUC} + \text{CCS} + F + B_{\text{PE}} + B_{\text{U}}$$

donde, F_{C} = emisiones por el consumo de combustibles fósiles; LUC = emisiones por el cambio en el uso del suelo; CCS = secuestro de las reservas de carbono de los cultivos; F = emisiones de fertilizantes (producción y aplicación); B_{PE} = emisiones de bioenergía por fase de producción industrial; B_{U} = emisiones de bioenergía por uso (combustión/quema).

Comparando las emisiones de GEI de las rutas de producción de bioenergía con las emisiones de los sistemas fósiles de referencia (gasolina, diésel y carbón; Tabla A8 del Apéndice D), evaluamos el potencial de ahorro de emisiones de la bioenergía. En consecuencia, analizamos si los niveles de reducción de GEI de la bioenergía cumplen con los requisitos RED II de ahorro de GEI.

3. Resultados

3.1. Intensificación agrícola

En el escenario de referencia, la demanda total de tierra calculada para la producción de alimentos en la región de la Orinoquia en 2030 es de 13,8 Mha, de las cuales cerca del 90 % se destinan a la producción de carne de vacuno bajo un sistema de pastoreo extensivo (Figura 4). Aunque sigue estando dentro de la zona de frontera agrícola de 15,5 Mha, esto es algo más del doble de la superficie que actualmente se utiliza para la agricultura (6,8 Mha) debido al aumento previsto de la demanda. En comparación con el escenario de referencia, el uso de las tierras agrícolas disminuye un 38 % en el escenario bajo, un 58 % en el medio y un 70 % en el alto. En el medio y alto, las tierras destinadas a la producción de ganado incluyen las designadas al cultivo de sorgo forrajero para la producción de carne de vacuno mejorada (491.000 y 496.000 hectáreas, respectivamente).

En ninguno de los escenarios de intensificación se observaron tierras excedentarias obtenidas de los cultivos alimentarios. La obtención de tierras excedentarias por la intensificación agrícola solo es posible gracias a la mejora de la productividad del ganado. No se observaron tierras excedentarias en el escenario de baja intensificación. En el escenario medio es posible

obtener 0,6 Mha de tierras excedentarias. En el alto quedan disponibles alrededor de 2,4 Mha de tierras excedentarias, lo que corresponde al 39 % de la superficie actualmente utilizada para el pastoreo de ganado (es decir, 6,2 Mha).

La Tabla 3 presenta la cantidad de cultivos energéticos y bioenergía que se pueden producir en tierras excedentarias en los escenarios medio y alto. Los mayores potenciales bioenergéticos se obtienen cuando la tierra excedentaria se utiliza para producir bioetanol a partir de la caña de azúcar o biodiésel de la palma de aceite. Esto se debe a la relación relativamente

más alta en la eficiencia de conversión asumida (MJ de biocombustible por kg de materia prima) de la caña de azúcar y la palma de aceite en comparación con la acacia (es decir, una tonelada de RFF de palma de aceite produce 0,22 t de biodiésel con un valor calorífico de 37.000 MJ t⁻¹ de biodiésel, mientras que una tonelada de caña de azúcar produce 0,07 t de bioetanol con un valor calorífico de 27 000 MJ t⁻¹ de bioetanol). En el escenario alto, el potencial bioenergético es de 3,8 a 5,4 veces mayor que en el medio debido a la mayor disponibilidad de tierras y a los altos niveles de rendimiento de los cultivos energéticos.

Figura 4. Requerimiento total de tierra en la región de la Orinoquia para satisfacer la demanda de cultivos alimentarios y carne de vacuno para todos los escenarios en 2030, en comparación con la superficie agrícola en 2018

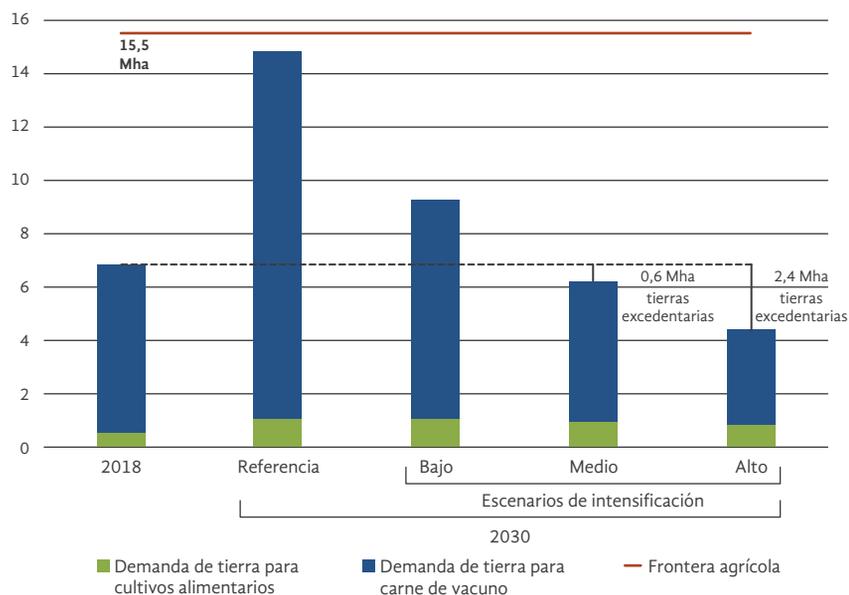


Tabla 3. Potencial de cultivos energéticos y bioenergía en tierras excedentarias en la región de la Orinoquia en 2030, según el escenario de intensificación medio y alto.

		Escenario medio	Escenario alto
Caña de azúcar	Mt caña de azúcar año ⁻¹	52	201
Bioetanol	PJ año ⁻¹	96	368
Palma de aceite	Mt RFF año ⁻¹	10	44
Biodiésel	PJ año ⁻¹	82	349
Acacia	Mt madera año ⁻¹	10	46
Bioelectricidad	PJ año ⁻¹	36	162

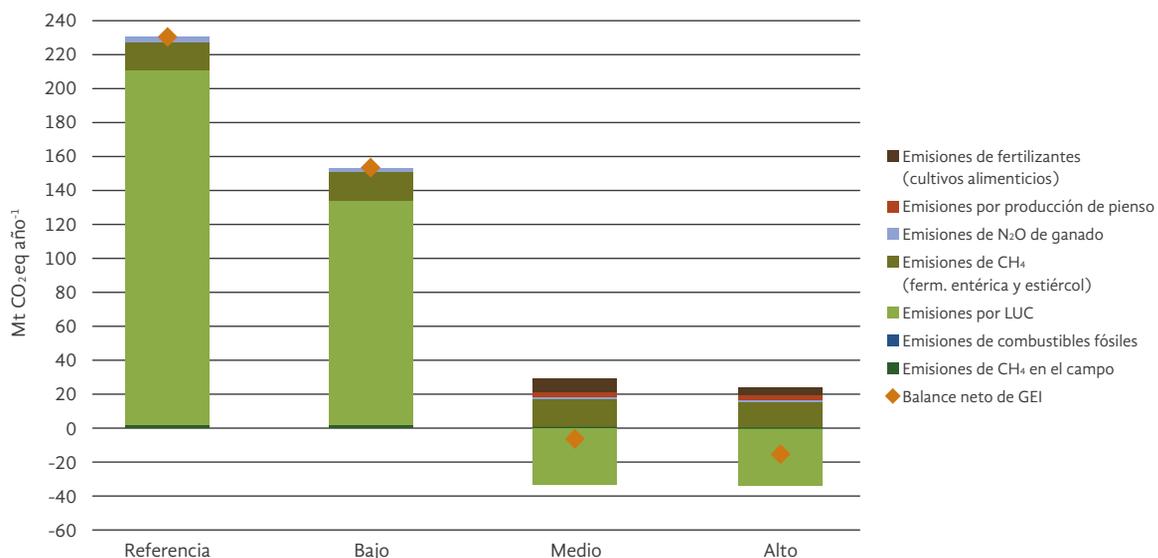
3.2. Emisiones de GEI asociadas a la intensificación agrícola

La Figura 5 muestra las emisiones anuales de GEI causadas por la intensificación agrícola (cultivos alimentarios y ganado) para todos los escenarios en 2030. Las emisiones por LUC son el resultado de los cambios en las reservas de C debido al cambio del uso de la tierra. El valor de las “emisiones por LUC” en la figura tiene en cuenta tanto las emisiones por LUC como las reservas de C de los cultivos alimentarios y la producción de pasturas para el ganado. En el escenario de referencia, la mayor fuente de emisión de GEI es el LUC, que representa alrededor del 90 % del total de las emisiones de GEI de la producción agrícola (cultivos alimentarios y carne de vacuno). La expansión de la producción de carne de vacuno es la principal causa de las emisiones relacionadas con el LUC (318 Mt de CO₂eq año⁻¹) debido a la conversión de matorrales en pasturas degradadas (es decir, pastos con bajos niveles de nutrientes). En lo que respecta a los cultivos alimentarios en el escenario de referencia, la mayor contribución a las emisiones por el LUC está relacionada con la expansión del arroz y la palma de aceite (8,9 y 5,8 Mt CO₂eq año⁻¹, respectivamente) debido a la conversión de matorrales en tierras de cultivo.

En los escenarios de intensificación agrícola, las emisiones relacionadas con el LUC son menores que en el escenario de referencia, pero el de baja intensificación requirió la conversión de matorrales en pasturas degradadas para satisfacer la demanda de carne de vacuno. Por lo tanto, las emisiones relacionadas con el LUC en el escenario bajo son mucho más elevadas que en los escenarios medio y alto (191; 48; y 33 Mt CO₂eq año⁻¹, respectivamente). En los escenarios medio y alto, no se convierten tierras naturales en tierras agrícolas y las pasturas degradadas se mejoran para convertirlas en pasturas manejadas (fertilizadas). Además, el almacenamiento de carbono en las pasturas manejadas aumentará la productividad y, por tanto, también las reservas de C de esos suelos. Las emisiones de la producción de piensos, es decir, del sorgo forrajero, solo se indican para los escenarios medio y alto (3,4 y 2,9 Mt CO₂eq año⁻¹, respectivamente), ya que en estos se asume que la calidad de la alimentación animal mejoró. Estas emisiones de los piensos incluyen todas las relacionadas con el cultivo de sorgo forrajero.

Nótese que, en los escenarios de producción agrícola, los únicos dos cultivos que reportan almacenamiento neto de carbono son la palma de aceite y las pasturas. La palma de aceite, para producir aceite para el consumo humano, es el único cultivo alimentario

Figura 5. Emisiones netas de GEI asociadas a la intensificación agrícola (cultivos alimentarios y carne de vacuno) en la región de la Orinoquia para todos los escenarios en 2030



que reporta un secuestro neto de carbono como cultivo perenne (es decir, emisiones negativas por LUC), ya que el valor de reservas de C considera la biomasa de las frondas, el tronco y las raíces, la vegetación de cobertura y la materia orgánica asociada que permanece en la plantación después de la cosecha del RFF. En el caso de las pasturas, para producir carne de vacuno, el rendimiento de dicha producción está directamente relacionado con un mayor consumo de pasto por parte del ganado. Por ejemplo, en el escenario alto, el consumo total de pasto es mayor que en el escenario de referencia, pero la demanda de tierra para producir pasturas es menor en el escenario alto en comparación con el de referencia.

En los escenarios bajo, medio y alto, las emisiones totales (positivas) asociadas a la producción de cultivos alimentarios (fertilización, combustible fósil y emisiones de CH_4 en el campo) y a la producción de carne de vacuno (emisiones de CH_4 de la fermentación entérica y del estiércol, emisiones de N_2O) son menores en comparación con el de referencia. En los escenarios medio y alto, la reducción de las emisiones es el resultado de mejores prácticas de manejo, tales como una mayor eficiencia de los fertilizantes, la reducción del consumo de combustibles fósiles y la mejora de la calidad de la alimentación del ganado. En cuanto a la eficiencia de los fertilizantes, de aplicar urea en el escenario de referencia se pasa a aplicar fuentes de fertilizantes más eficientes para reducir las emisiones de NH_3 y N_2O por aplicación y volatilización, tal y como se describe en el Apéndice B. En cuanto a los combustibles fósiles, la reducción de las emisiones se da principalmente por la disminución del diésel utilizado por la maquinaria (es decir, mayor eficiencia).

En cuanto a la calidad de la alimentación del ganado se observa que sin cambios en esta, las emisiones de CH_4 procedentes de la fermentación entérica podrían aumentar a medida que crece el número de animales, como se observa entre la situación actual (2018) y el escenario de referencia (10,7 y 17,7 Mt $\text{CO}_2\text{eq año}^{-1}$, respectivamente). Sin embargo, con una alimentación de mayor calidad, el número de animales y sus emisiones de CH_4 por fermentación entérica se reducirían, mientras que la relación animal-carne de vacuno aumentaría, como se observa en los escenarios medio y alto (15,3 y 13,7 Mt $\text{CO}_2\text{eq año}^{-1}$, respectivamente). Cuando la producción agrícola se intensifica de forma

sostenible (es decir, el escenario alto), se produce una reducción de las emisiones positivas del 83 % en comparación con el escenario de referencia.

3.3. Emisiones de GEI asociadas a la producción de bioenergía

Las emisiones netas de GEI de la producción de bioenergía y las emisiones reducidas en comparación con su equivalente en combustibles fósiles para el escenario medio y alto en 2030 se muestran en la Figura 6. Para todas las cadenas de suministro de bioenergía, las emisiones netas de GEI son ligeramente más altas en el escenario alto que en el escenario medio, debido al uso de mejores prácticas agrícolas en la fase de cultivo. En todas las cadenas de suministro de bioenergía, las emisiones de GEI relacionadas con el LUC dominan el balance de GEI. Las emisiones negativas por el LUC (secuestro) varían entre las cadenas de suministro de bioenergía porque los cultivos energéticos arbóreos almacenan mucho más carbono que la vegetación original presente en la actualidad (es decir, pastos con pocos nutrientes). Las emisiones por LUC del cultivo de palma de aceite se comportan igual que las descritas en la Sección 3.2, intensificación agrícola.

Para ambos escenarios, las emisiones por la conversión de la biomasa en portadores de energía de las tres cadenas bioenergéticas son menores que las emisiones del cultivo, como se muestra en la Tabla 4. Las emisiones derivadas del uso de biocombustibles (es decir, las de N_2O y CH_4 por combustión) son iguales tanto para el biodiésel como para el bioetanol (0,3 g de $\text{CO}_2\text{eq MJ}^{-1}$ de biocombustible) y más elevadas para la bioelectricidad (es decir, la combustión de pellets de acacia) (1,9 g de $\text{CO}_2\text{eq MJ}^{-1}$ de bioelectricidad). Lógicamente, en el escenario alto se dispone de más tierras excedentes para la producción de bioenergía que en el escenario medio (2,4 y 0,6 Mha, respectivamente) y, en consecuencia, las emisiones relacionadas con cada sistema de producción de cultivos energéticos están en consonancia con la cantidad de materia prima producida (PJ de bioenergía año^{-1}). Por ejemplo, el escenario alto con producción de biodiésel presenta un balance neto de GEI más elevado (-82,5 g de $\text{CO}_2\text{eq MJ}^{-1}$ de biocombustible) que el escenario alto con producción de bioetanol (-6 g de $\text{CO}_2\text{eq MJ}^{-1}$ de biocombustible), como se muestra en la Figura 6a.

Figura 6. Emisiones netas de GEI de la producción de bioenergía y las emisiones reducidas en comparación con su equivalente en combustibles fósiles para el escenario medio y alto en 2030

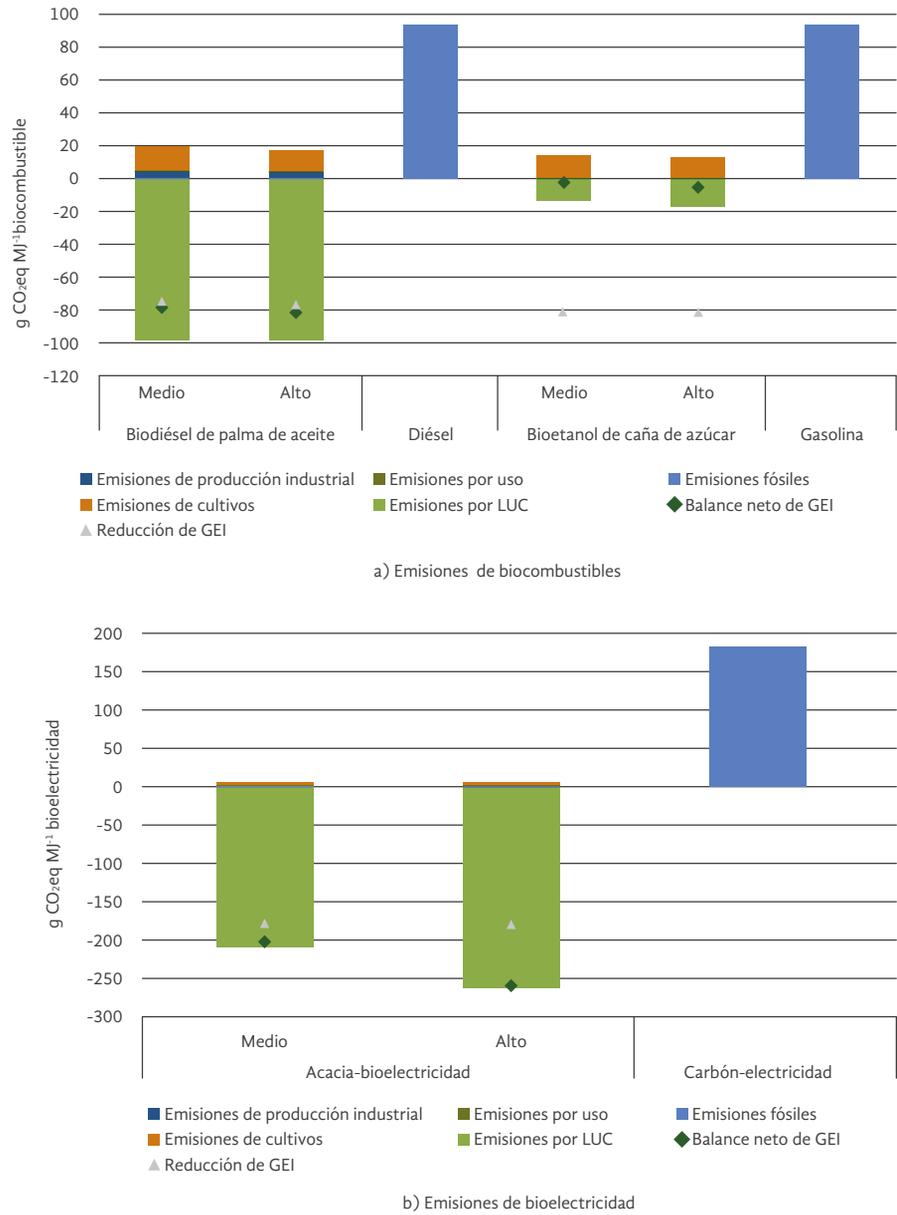


Tabla 4. Emisiones de la producción de bioenergía para el escenario de intensificación media y alta.

			Escenario medio	Escenario alto
Caña de azúcar	Etapa de cultivo	g CO ₂ eq MJ ⁻¹ de biocombustible	11,7	10,9
	Etapa industrial	g CO ₂ eq MJ ⁻¹ de biocombustible	0,2	0,2
Palma de aceite	Etapa de cultivo	g CO ₂ eq MJ ⁻¹ de biocombustible	14,6	12,0
	Etapa industrial	g CO ₂ eq MJ ⁻¹ de biocombustible	3,9	3,9
Acacia	Etapa de cultivo	g CO ₂ eq MJ ⁻¹ de bioelectricidad	27,6	23,9
	Etapa industrial	g CO ₂ eq MJ ⁻¹ de bioelectricidad	0,0007	0,0007

Las emisiones totales de GEI de la producción de biocombustibles y bioelectricidad, incluidas las emisiones relacionadas con el LUC, el cultivo (fertilización y uso de diésel), la conversión y el uso directo, se comparan con su homólogo fósil para calcular las emisiones reducidas (Figura 6). La producción de bioetanol, biodiésel y bioelectricidad logra una reducción de las emisiones de más del 100 % en comparación con su equivalente en combustibles fósiles. De este modo, cumplen con el requisito de ahorro de GEI de la RED II, que es del 65 % para los biocombustibles (es decir, bioetanol y biodiésel) y del 70 % para la bioelectricidad.

En este estudio no se calculan las emisiones resultantes de los biocombustibles de combustión en los motores de los vehículos, ya que las emisiones de CH₄ y N₂O dependen en gran medida de la eficiencia de la tecnología de origen, el control de emisiones y el sistema de combustión, que no son el objeto de esta investigación. No obstante, para identificar si la reducción de emisiones podría verse afectada por la combustión del biodiésel en un motor, se aplicó la eficiencia térmica al freno (BTE por sus siglas en inglés) del motor diésel computarizado reportado por Soly *et al.* (2021), a las emisiones de la cadena de biodiésel reportadas en nuestro estudio (la BTE se define como la relación de potencia de freno de un motor y la energía del combustible liberado durante el proceso de combustión [51]. Soly *et al.* (2021), encontraron una BTE de 25,3 % para diésel y de 25,6 % para biodiésel). Como resultado, las emisiones reducidas calculadas por el uso de biodiésel, reportadas en nuestro estudio, se ven afectadas hasta en un 1,3 %.

3.4. Balance regional de GEI de la intensificación agrícola y la producción de bioenergía

La Figura 7 muestra el balance de GEI en todo el ámbito regional, tanto para la intensificación agrícola como para la producción de bioenergía. El aumento de los rendimientos agrícolas, el uso de mejores prácticas agrícolas y el uso de tierras excedentarias para la producción de bioenergía llevan a una disminución de las emisiones netas de GEI en los escenarios medio y alto en comparación con el escenario de referencia, el escenario bajo y la situación actual (2018). Al comparar las emisiones netas del escenario de referencia

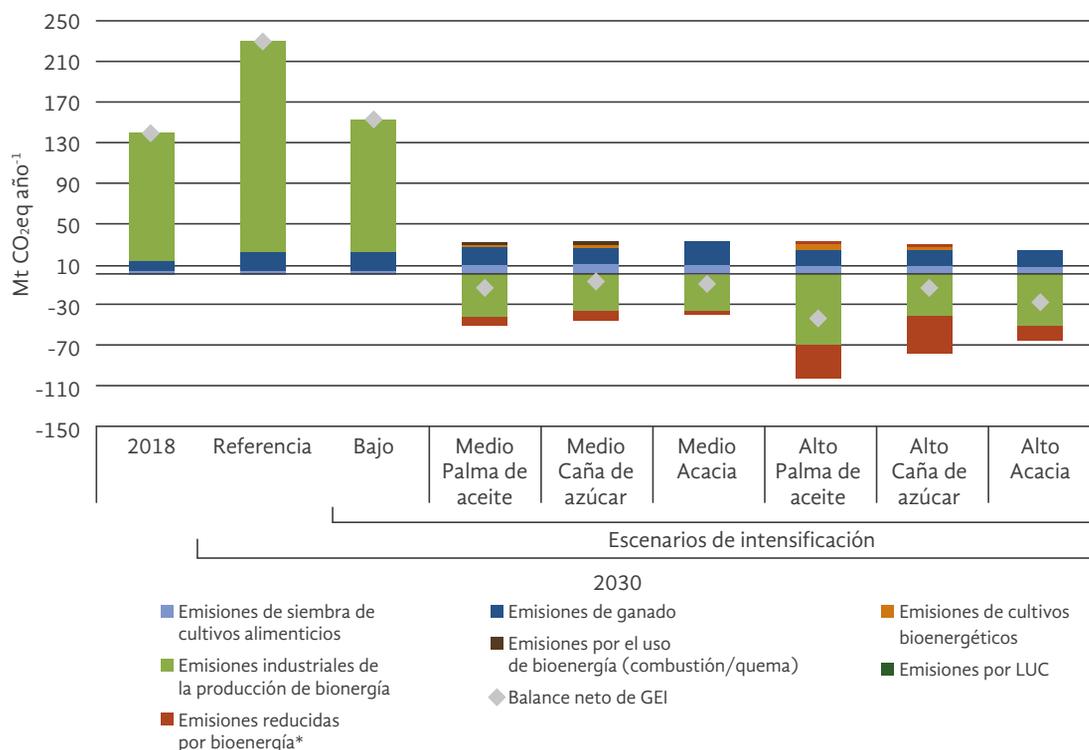
y el escenario bajo con las emisiones de la situación actual (2018), las emisiones del escenario bajo son ligeramente superiores a las de 2018 (153 y 141 Mt CO₂eq año⁻¹, respectivamente). No obstante, las emisiones del escenario de referencia (231 Mt CO₂eq año⁻¹) son 65 % superiores a las emisiones netas de 2018. En la Figura 7, los resultados muestran que es factible producir bioenergía en tierras excedentarias obtenidas de la intensificación agrícola (es decir, escenarios medio y alto), reducir las emisiones totales de la región y contribuir al aumento del secuestro de carbono con el uso de cualquiera de los tres cultivos energéticos planteados en este estudio.

Lógicamente, la reducción en las emisiones es mayor en el escenario alto en comparación con el escenario medio para todos los cultivos energéticos debido a las mayores cantidades de materia prima producida en las tierras excedentarias en el escenario alto. Además, se debe considerar que las emisiones por LUC (secuestro) se calculan durante un periodo de vida de 20 años para todos los cultivos, entonces el beneficio por el LUC solo se puede obtener durante ese periodo. Sin embargo, si se prolonga la vida útil de ese cultivo, podrían obtenerse más beneficios de las emisiones relacionadas con el LUC.

4. Discusión

En este estudio se calculó el balance de GEI de aumentar los rendimientos agrícolas para la producción de cultivos alimentarios y carne de vacuno y el uso de las tierras excedentarias generadas para producir biomasa y reemplazar los combustibles fósiles en una región clave de Colombia. Los resultados destacan que la intensificación sostenible es una medida clave para reducir las emisiones de GEI asociadas con la agricultura en la región y producir bioenergía de bajo riesgo de ILUC. Además, puesto que se proyecta que las tierras excedentarias provengan en gran medida de la mejora de las áreas de ganadería extensiva con bajas reservas de carbono y los cultivos bioenergéticos tienen mayores reservas de carbono, la producción de bioenergía contribuye al aumento de las reservas de carbono. Sin embargo, hay muchas incertidumbres relacionadas con las hipótesis y los datos utilizados para calcular el balance general de GEI, que afectan los resultados obtenidos, como se examina a continuación.

Figura 7. Balance de GEI de la intensificación agrícola (cultivos alimentarios y carne de vacuno) y producción de bioenergía en 2030 para todos los escenarios. Se asume que los cultivos energéticos solo se cultivan en tierras excedentarias obtenidas en el escenario medio y alto. Nótese que las emisiones de bioenergía reducidas no incluyen las emisiones por el LUC



Se necesitan mediciones de las reservas de carbono específicas de cada región. Dependiendo del tipo de suelo y de sus reservas iniciales de carbono, las variaciones de estas últimas pueden afectar en mayor o menor medida a las emisiones relacionadas con el cambio del uso del suelo. Se ha informado que las tierras de la sabana de la Orinoquia tienen una reserva de carbono de alrededor de 126 t C ha⁻¹ [18]. Si esta tierra se convierte en un cultivo con un bajo contenido de carbono, se producen altas emisiones de GEI. Sin embargo, debido a la falta de mediciones de campo, existe una gran incertidumbre sobre las reservas de carbono de los diversos usos de la tierra en la región [18-20, 52, 53]. Por ejemplo, un estudio realizado en la llanura alta de la Orinoquia mostró que las reservas de carbono no cambiaron con la conversión de las pasturas manejadas en plantaciones de palma de aceite [19]. El estudio también puso de manifiesto que la conversión de pastizales (es decir, pasturas degradadas) en cultivos energéticos perennes podría beneficiar el almacenamiento de carbono del ecosistema (tanto del suelo

como de las reservas de carbono de la biomasa) [19]. Así, la conversión de tierras excedentarias de pasturas degradadas (es decir, pasturas con bajos niveles de nutrientes) a cultivos energéticos podría generar una mayor retención de carbono en el suelo y en la biomasa que su conversión a pasturas mejoradas. Un requisito clave para lograr la sostenibilidad de los cultivos energéticos es evitar los impactos negativos que su expansión podría generar en la región [19, 27, 52]. En primer lugar, la reducción de los riesgos del ILUC de los cultivos energéticos requiere una intensificación sostenible de la producción agrícola actual. En segundo lugar, la producción sostenible de cultivos energéticos no solo tiene que ver con el secuestro de carbono, sino también con la biodiversidad y la disponibilidad de agua. En tercer lugar, la conversión de la sabana primaria provoca un aumento considerable de las emisiones relacionadas con el LUC, por lo que debe evitarse su uso para la producción de cultivos bioenergéticos debido a las elevadas emisiones indirectas de GEI que podría provocar.

Aumentar la productividad actual del ganado es fundamental para reducir la futura demanda de tierras agrícolas y las emisiones asociadas de GEI. Aumentar la productividad del ganado requiere de un conjunto de mejoras en el manejo (es decir, la cantidad de alimento suministrado, el tipo y la calidad del forraje) [29, 40, 54]. La aplicación de esas mejoras con el tiempo sigue siendo un tema clave para la investigación ulterior y dependerá de las medidas de apoyo al sector. En la región de la Orinoquia, el aumento de la demanda de tierras conllevó al incremento de las emisiones por LUC, ya que los matorrales (sabanas naturales) se convirtieron en pastizales. Por lo tanto, un crecimiento sostenible de la productividad del ganado reduciría la demanda de tierras, aumentaría la cantidad de carne de vacuno producida y disminuiría las emisiones relacionadas con el LUC. Además, la mejora de la alimentación del ganado también contribuiría a la reducción de las emisiones de GEI [29,54].

Para garantizar bajas emisiones relacionadas con el LUC se requiere un conocimiento más profundo sobre la ubicación futura de las tierras excedentarias. En este estudio no se tuvo en cuenta la ubicación de las zonas agrícolas de la región. Solo la cantidad de tierra utilizada para producir tanto cultivos alimentarios como ganado. Por lo tanto, no es posible identificar espacialmente las zonas en las que se encuentran las tierras excedentarias para el cultivo energético. Al igual que se requieren mediciones específicas de las reservas de carbono en la región, también es necesario establecer la ubicación de las zonas agrícolas actuales, en particular las que cuentan con un sistema de producción ganadera extensiva. De este modo, la incertidumbre de las emisiones relacionadas con el LUC podría reducirse y facilitar la aplicación de medidas de intensificación agrícola. Otro punto clave para reducir la incertidumbre de las emisiones en la producción ganadera está relacionado con la calidad de los datos de emisiones de los diferentes niveles de manejo del ganado. En este estudio, utilizamos los factores actualizados por el IPCC en el refinamiento de 2019, que incluyó datos para América Latina. Sin embargo, la identificación de factores de emisión nacionales y regionales podría contribuir a establecer resultados más precisos de las emisiones de la producción ganadera.

5. Conclusiones

En este estudio se analizó el balance total de GEI del futuro uso de la tierra agrícola en la región de la Orinoquia para diferentes escenarios de intensificación y utilizando las tierras excedentarias generadas para cultivos energéticos. La necesidad total de tierra en la Orinoquia para satisfacer la demanda de cultivos alimentarios y de carne de vacuno en 2030 muestra un incremento de algo más del doble en el escenario de referencia respecto a la demanda de tierra en 2018. La mayor demanda en el escenario de referencia es para la producción de carne de vacuno en sistemas de pastoreo extensivo, ocupando más del 90 % de la superficie agrícola. Aunque la demanda en el escenario de referencia está dentro de las tierras agrícolas disponibles (frontera agrícola) de la región, requiere la conversión de matorrales en pastos y provoca grandes cantidades de emisiones relacionadas con el LUC.

En el escenario de intensificación media y alta, se necesita menos superficie para producir la misma cantidad de alimentos en comparación con 2018 debido al aumento de la productividad agrícola. Este es clave para liberar entre 10 % y 38 % de la superficie actual de producción de ganado con el fin de producir materias primas bioenergéticas. Los escenarios de intensificación agrícola media y alta dan lugar a una disminución de las emisiones relacionadas con el LUC en comparación con el escenario de referencia, ya que no se convierte la vegetación natural (matorral) y se mejoran las pasturas degradadas para utilizarlos como pasturas manejadas. La aplicación de mejores prácticas agrícolas al intensificar la producción agrícola puede reducir hasta un 83 % de las emisiones positivas de GEI del escenario de referencia.

La producción potencial de bioenergía en las tierras excedentarias obtenidas se proyecta entre 36 y 368 PJ al año y se considera como un LUC de bajo riesgo porque el uso de estas tierras, minimiza las preocupaciones relacionadas con la competencia por la tierra y los efectos de desplazamiento. Como se espera que las zonas ganaderas que generaron tierras excedentarias estén compuestas en gran parte por pasturas degradadas, la conversión de estos últimos en cultivos energéticos puede dar lugar a un importante secuestro de carbono. Además, la producción de bioenergía (biodiésel, bioetanol o bioelectricidad),

como las opciones bioenergéticas evaluadas, supone una reducción de más del 100 % de las emisiones de GEI en comparación con su equivalente fósil (diésel, gasolina y carbón, respectivamente), cumpliendo los requisitos de ahorro de GEI de RED II. Nuestro estudio se centró únicamente en las emisiones de GEI, pero la intensificación sostenible de los cultivos y la producción de ganado, así como la producción de materias primas para la bioenergía, también requiere de la evaluación de otros impactos ambientales y socioeconómicos de la intensificación agrícola y la producción de bioenergía. Esto se abordará en el trabajo de seguimiento que están llevando a cabo Ramírez-Contreras *et al.* (2021) [55].

Aportes de los autores: conceptualización, N. E. R.-C. y A. P. C. F.; metodología, N. E. R.-C., A. P. C. F. y F. v. d. H.; *software*, N. E. R.-C. y D. M.-F.; validación, F. v. d. H., B. W. y A. P. C. F.; análisis formal, N. E. R.-C., D. M.-F. y F. v. H. d.; investigación, N. E. R.-C. y D. M.-F.; recursos, N. E. R.-C., J. C. E., J. R.-D., D. L. M.-L., y Á. O.-D.; curación de datos, N. E. R.-C. y D. M.-F.; redacción-preparación del proyecto

original, N. E. R.-C.; escritura-revisión y edición, N. E. R.-C., F. v. d. H., y B. W.; visualización, N. E. R.-C., y F. v. d. H.; supervisión, A. P. C. F., F. v. d. H., B. W. y J. A. G.-N.; administración de proyectos, A. P. C. F. y J. A. G.-N.; adquisición de fondos, A. P. C. F. y J. A. G.-N. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito.

Financiación: esta investigación fue financiada por el programa bilateral “Hacia una colaboración científica y de innovación a largo plazo entre Colombia y los Países Bajos en la valorización de la biomasa” (RVOTF13COPP7B). Además, el apoyo financiero del Fondo de Fomento Palmero (FFP), administrado por Fedepalma.

Declaración de la Junta de Revisión Institucional: no aplica.

Declaración de consentimiento informado: no aplica.

Declaración de disponibilidad de datos: no aplica.

Conflicto de intereses: los autores declaran que no hay conflicto de intereses.

Apéndice A. Parámetros para el cálculo de la demanda de tierras agrícolas

Tabla A1. Insumos de datos para la estimación de la producción alimentaria requerida en la región de la Orinoquia, Colombia, en 2030.

	Consumo per cápita ^a (kg/persona/año)		SSR ^b (%)	Pérdidas de alimento ^b (%)	Aporte ^c de la región de la Orinoquia a la producción nacional (%)	Uso del suelo en la región (ha) 2018 ^c
	2018	2030				
Población de Colombia ^d	48.258.494	55.678.083				
Arroz	42,2	42,2	90	28	50	176.391
Aceite de palma (APC)	33,3	35,0	106	19	40	178.227
Maíz	30,2	31,0	33	28	50	57.387
Plátano	53,6	68,0	102	55	30	78.673
Soya	35,7	37,5	23	19	90	37.340
Yuca	38,5	38,5	99	40	30	18.912
Carne de vacuno	18,9	24,0	105	22	.	6.239.309

^aDatos de consumo per cápita de [1, 17, 30, 56, 57]; ^bBasado en datos de 17 y 30. SSR relaciona la producción interna de alimentos con las importaciones y exportaciones de productos alimenticios. Por lo tanto, los valores de SSR superiores al 100 % indican grandes cantidades de exportación, mientras que los valores de SSR inferiores al 100 % expresan grandes cantidades de importación. La proyección del consumo de alimentos se basa en el supuesto de que Colombia sigue la tendencia general de América Latina para 2030 [30]. Se asume que la SSR, las pérdidas de alimentos y el aporte de la Orinoquia a la producción nacional de alimentos son iguales en 2030 que en 2018. ^cDatos de [24]. ^dDatos de [58].

Apéndice B. Parámetros para el cálculo de las emisiones de GEI asociadas a la intensificación agrícola

- **Niveles de intensificación agrícola.** La producción agrícola en la región de la Orinoquia requiere una intensificación sostenible para reducir las emisiones de GEI y al mismo tiempo aumentar la producción de alimentos (cultivos alimentarios y carne de vacuno). El uso eficiente de los fertilizantes, la reducción del consumo de combustibles fósiles y del impacto del LUC son algunas de las mejores prácticas agrícolas conocidas por su potencial para reducir las emisiones de GEI. Véanse los datos de entrada para los cultivos alimentarios en la Tabla A2 y los datos de entrada para la producción de ganado en la Tabla A4. Los niveles de intensificación se basan en el estudio por 5nd que se muestra a continuación:

- » **Prácticas agrícolas convencionales**

- » **Para los cultivos:** se refiere a la producción tradicional en la zona de piedemonte y llanuras altas, donde las prácticas agrícolas no mejoran lo suficiente para aumentar el rendimiento de los cultivos (es decir, se aplica fertilizante sin incluir los requisitos de suelo; no se realiza ninguna corrección del suelo). Mejoras del suelo o corrección del suelo significa adaptarlo para establecer o mantener un cultivo. En la región de la Orinoquia, el principal factor limitante para los suelos es la acidez; entonces, se añade cal u otro producto para mejorar las deficiencias químicas [29, 59, 60]. En general, las medidas correctivas se aplican antes de las actividades de siembra, por lo que el análisis previo del suelo es esencial para detectar estos problemas y formular aplicaciones correctivas adecuadas [31].
- » **Para la producción de carne de vacuno:** se trata del sistema de producción de ganado extensivo que se utiliza actual-

mente en la zona del piedemonte y llanura alta, en la que los animales se alimentan únicamente de pastos naturales con bajo contenido en nutrientes. Esta pradera no ha recibido fertilización.

- » **Intensificación intermedia**

- » **Para los cultivos:** permite aumentar los rendimientos de los cultivos con la mejora de algunas prácticas agrícolas (es decir, el fertilizante se aplica de acuerdo con los requisitos del suelo, pero no se hace ninguna corrección del suelo; no se hace un acondicionamiento adecuado del suelo).
- » **Para la producción de carne de vacuno:** se trata de un sistema mejorado de producción extensiva. El ganado se alimenta con pastos mejorados (por ejemplo, *Brachiaria decumbens*) y sorgo forrajero (el fertilizante se utiliza para pastos mejorados y sorgo forrajero). Este último se utiliza principalmente durante la temporada seca para completar la alimentación del ganado.

- » **Intensificación sostenible**

- » **Para los cultivos:** esta vía utiliza mejores prácticas agrícolas para aumentar el rendimiento de los cultivos (es decir, se aplican fertilizantes según las necesidades del suelo; se corrige el suelo; se utilizan hierbas/leguminosas; se realiza siembra directa).
- » **Para la producción de carne de vacuno:** el aumento de la productividad de los animales se consigue gracias a la mejora de la calidad de los piensos suministrados, ya que estos se basan en hierbas mejoradas (por ejemplo, *Brachiaria decumbens*) y sorgo forrajero. El forraje se utiliza para abastecer las necesidades en la temporada seca (se utiliza fertilizante para los pastos mejorados y el sorgo forrajero). Se asume que para este escenario sostenible el sistema de pastoreo es silvopastoril o agrosilvopastoril.

- **Fertilización.** El uso de fertilizantes nitrogenados causa emisiones de GEI [61]. La urea (N) del fertilizante nitrogenado libera óxido nitroso (N₂O) y amoníaco (NH₃) durante su aplicación. Alrededor del 25 % de la urea aplicada a un cultivo se volatiliza en forma de NH₃, del cual aproximadamente el 1-2 % se convierte posteriormente en N₂O. La reducción de las emisiones de NH₃ y N₂O depende del aumento de la eficiencia en el uso de los fertilizantes nitrogenados, que incluye tanto la aplicación de buenas prácticas agrícolas como la utilización de fertilizantes nitrogenados de liberación lenta [62]. Por lo tanto, asumimos que, para reducir las emisiones por aplicación y volatilización de fertilizantes, en el escenario alto se utilizan fuentes de fertilizantes más eficientes. A continuación, se indican las fuentes de nutrientes utilizadas por escenario:

- » **Escenario de referencia, bajo y medio:** urea, como; DAP (fosfato diamónico) y KCl (sal de potasio).
- » **Escenario alto:** abono nitrogenado de liberación controlada, como N; TSP (superfosfato triple), y KCl (sal de potasio).

- **Factores de emisión (FE).** Las Tablas A2 y A3 muestran los datos de entrada y los factores de emisión asociados a la producción de cultivos. Solo se consideró la fertilización química. No se consideró la fertilización orgánica. Los FE de producción de fertilizantes se tomaron de la base de datos Ecoinvent, versión 3.0.1.0. Para todos los cultivos, los cálculos de las emisiones incluyen las emisiones por LUC durante veinte años siguiendo las directrices del IPCC 2019 (Ecuación 2.1 del IPCC para calcular los cambios anuales de las reservas de C; Ecuación 2.5 para las emisiones por LUC; Ecuaciones 11.1; 11.9 y 11.10 para las emisiones de N₂O) [43]. Las emisiones de N₂O del suelo manejado se calcularon con base en la metodología del IPCC (las Ecuaciones del IPCC para las emisiones de N₂O son las ecuaciones 11.1; 11.9 y 11.10) [43] y siguiendo las Ecuaciones A1 y A2. El factor de emisión de la producción de diésel y

de la combustión de diésel por uso se asume basado en las directrices del IPCC [43].

Ecuación A1

$$N_2O_{\text{Directo}} = F_{SN} * FE_1 * 44/28$$

Ecuación A2

$$N_2O_{\text{Indirecto}} = (((F_{SN} * \text{Frac}_{\text{GASF}}) * FE_4) + ((F_{SN} * \text{Frac}_{\text{LIXIVIACIÓN}}) * FE_5)) * 44/28$$

donde: F_{SN} = cantidad de fertilizante de N sintético aplicado anualmente (kg N t⁻¹). FE₁ = factores de emisión de N₂O de los aportes de N [kg N₂O-N (kg de aporte de N)⁻¹]. Frac_{GASF} = fracción de N del fertilizante sintético que se volatiliza como NH₃ y NO_x [(kg de N volatilizado (kg de N aplicado)⁻¹]. Frac_{LIXIVIACIÓN} = fracción de todo el N añadido a/mineralizado en los suelos manejados en regiones donde se produce lixiviación/escorrentía que se pierde por lixiviación y escorrentía [kg N (kg de adiciones de N)⁻¹]. FE₄ = factor de emisión para las emisiones de N₂O procedentes de la deposición atmosférica de N en suelos y superficies de agua [kg N-N₂O (kg NH₃-N + NO_x-N volatilizado)⁻¹]. FE₅ = factor de emisión de N₂O por lixiviación y escorrentía de N [kg N₂O-N (kg N lixiviado y escorrentía)⁻¹]. 44/28 = conversión de las emisiones de N₂O-N en emisiones de N₂O a efectos de información.

Para calcular las emisiones de CH₄ del cultivo de arroz de secano se utilizó el enfoque de nivel 1 del IPCC 2019, véase la Ecuación A3 (eq. 5.1 del capítulo 5 de [43]). El factor de emisión (es decir, el factor de emisión diario, kg CH₄ ha⁻¹ día⁻¹) se calcula mediante la Ecuación A4 (eq. 5.2 del capítulo 5 de [43]).

Ecuación A3

$$CH_{4\text{arroz}} = FE_i * t_i * A_i * 10^{-6}$$

Ecuación A4

$$FE_i = FE_c * SF_w * SF_p * SF_o$$

donde, CH_{4arroz} = emisiones anuales de metano procedentes del cultivo de arroz, Gg CH₄ año⁻¹. FE_i = factor de emisión diario para la condición i, kg CH₄ ha⁻¹ día⁻¹. t_i = periodo de cultivo del arroz para la condición i, día. A_i = superficie de arroz cosechada anualmente para la condición i, ha año⁻¹. i = tipo de arroz. FE_c = factor de emisión de referencia (1,27). SF_w = factor de escala para tener en cuenta las diferencias en el régimen hídrico durante el periodo de cultivo (0,45, valor tomado de la Tabla 5.12 del capítulo 5 correspondiente a “los periodos de sequía se producen durante cada temporada de cultivo”). SF_p = factor de escala para tener en cuenta las diferencias en el régimen hídrico en la pretemporada antes del periodo de cultivo (1,22, valor tomado de la Tabla 5.13 del capítulo 5).

- **Producción de carne de vacuno.** En este estudio, diferenciamos tres categorías de ganado basado en la clasificación del PICC, 2019: ganado en crecimiento, otro ganado maduro y ganado maduro de doble propósito. Se asume que la composición de la manada se mantiene constante a lo largo del tiempo y es la misma para todos los escenarios. La descripción de cada categoría es la siguiente:
 - » **Ganado en crecimiento:** incluye los terneros antes del destete y el ganado en crecimiento/engorde. Se estima que el 18 % de los animales de la manada corresponden a esta categoría [57].
 - » **Otro ganado maduro:** incluye a los machos destinados a la producción de carne, a la cría y al tiro. Se estima que el 28 % de los animales de la manada corresponden a esta categoría [57].
 - » **Ganado maduro de doble propósito:** incluye las vacas utilizadas para producir el ganado para carne de vacuno, también producen leche para la cría del ganado en crecimiento y otros fines. Se estima que el 54 % de los animales de la manada corresponden a esta categoría [57].

El sistema de producción de ganado (es decir, pastoreo extensivo, pastoreo extensivo mejorado y pastoreo silvopastoril) varía según los escenarios, como se describe en la Sección 3.3 sobre la intensificación agrícola. Cuando el IPCC, 2019 no exige la división de las categorías de ganado o cuando no hay valores específicos para una categoría de ganado concreta, consideramos el valor más cercano que se asemeja a los que se pueden informar (véanse las notas a pie de página de las tablas). Datos de entrada en la Tabla A4.

Tabla A2. Datos de entrada para la etapa de cultivos alimentarios en los escenarios de referencia e intensificación.

Escenarios ^a	Cultivo alimentario	Nutriente (kg ha ⁻¹)			Uso de diésel (litros t ⁻¹) ^d
		N ^b	P ₂ O ₅	K ₂ O	
Referencia	Arroz	110	36	157	25,10
	Maíz	121	50	126	2,73
	Palma de aceite ^c	78	24	163	4,92
	Plátano	47	6	65	8,33
	Soya	200	46	99	16,20
	Yuca	56	14	53	1,96
Bajo	Arroz	140	46	200	24,26
	Maíz	165	69	172	2,64
	Palma de aceite	108	33	224	4,76
	Plátano	72	10	100	8,05
	Soya	253	58	126	15,66
	Yuca	75	18	71	1,89

Continúa

Escenarios ^a	Cultivo alimentario	Nutriente (kg ha ⁻¹)			Uso de diésel (litros t ⁻¹) ^d
		N ^b	P ₂ O ₅	K ₂ O	
Medio	Arroz	123	40	175	23,45
	Maíz	143	59	148	2,55
	Palma de aceite	92	28	190	4,60
	Plátano	65	9	90	7,78
	Soya	240	55	119	15,14
	Yuca	81	19	75	1,83
Alto	Arroz	138	45	196	22,67
	Maíz	165	69	172	2,46
	Palma de aceite	104	32	214	4,44
	Plátano	90	12	125	7,52
	Soya	243	56	121	14,63
	Yuca	89	21	83	1,77

^a Para todos los escenarios, los datos de fertilización de cada cultivo se han calculado a partir de la información de [63]. ^b La cantidad anual de fertilizante sintético N aplicado a los cultivos también corresponde al valor de F_{SN} en la Ecuación A1 y la Ecuación A2. ^c Para el cultivo de palma de aceite, la cantidad de fertilizante se expresa por tonelada de racimos de fruta fresca (RFF). ^d El consumo de gasóleo para el escenario de referencia se basa en la literatura de la siguiente manera: datos para el arroz tomados de [64]; para el maíz de [65]; para la palma de aceite de [22]; para el plátano de [66]; para la soya de [67]; para la yuca de [68]. Para los escenarios de intensificación, se supuso que el consumo de diésel disminuiría desde el escenario de referencia hasta alcanzar una reducción de hasta el 10 % en el escenario alto. Esta reducción se está considerando con base en el estudio de [32].

Tabla A3. Factores de emisión para todo tipo de cultivos (alimentarios, energéticos y de piensos) en la fase de cultivo, en los escenarios de referencia y de intensificación.

• Factores de emisión de la producción de fertilizantes	Unidad	FE
Urea como N (0,46 %) ^a		3,38
Sulfato de amonio (SAM) como N (0,21 % N) ^a		2,79
Fosfato diamónico (DAP) como P ₂ O ₅ ^a	kg CO ₂ eq/kg Fertilizante	1,61
Cloruro de potasio como K ₂ O ^a		0,53
Superfosfato triple (TSP) ^b		0,34
Abono nitrogenado de liberación controlada como N (0,46 % N) ^c		2,79

Continúa

• Factores de emisión de N ₂ O de campo ^d	Unidad	FE
F _{SN} (cantidad anual de fertilizante-N aplicado)	kg N ha ⁻¹	Corresponde a los valores enumerados en la columna para nutriente de N
Frac _{GASF} (fracción de fertilizante sintético de N que se volatiliza como NH ₃ y NO _x)	kg N volatilizado (kg de N aplicados) ⁻¹	0,11
Frac _{LIXIVIADO} (fracción de todo el N añadido a/mineralizado en suelos manejados en regiones donde se produce lixiviación/escorrentía que se pierde por lixiviación y escorrentía)	kg N (kg de adiciones de N) ⁻¹	0,24
FE ₁	kg N ₂ O-N (kg N) ⁻¹	0,01
FE ₄	kg N ₂ O-N (kg NH ₃ -N + NO _x -N volatilizado) ⁻¹	0,01
FE ₅	kg N ₂ O-N (kg N lixiviado/escorrentía) ⁻¹	0,011
• Factores de emisión de combustibles fósiles ^e	Unidad	FE
Producción de diésel	kg CO ₂ /kg de diésel	0,569
	kg CO ₂ /kg de diésel	3,188
Quema de diésel	kg CH ₄ /kg de diésel	0,00045
	kg CH ₄ /kg de diésel	0,00008

^a Los factores de emisión para la producción de fertilizantes se tomaron de la base de datos de Ecoinvent, versión 3.0.1.0. ^b Datos de [64]. ^c Se ha asumido que el fertilizante nitrogenado de liberación controlada como N (0,46 % N) reporta un factor de emisión de producción más bajo en comparación con la urea. Por lo tanto, se aplica el factor de emisión de los fertilizantes nitrogenados más bajos (SAM). ^d Los factores de emisión para el cálculo de las emisiones de N₂O (directas/indirectas) resultantes de la fertilización con N se tomaron de [43]. ^e El factor de emisión de los combustibles fósiles se tomó de [43].

Tabla A4. Valores de entrada para el cálculo de las emisiones de GEI de la producción de carne de vacuno en los escenarios de referencia y de intensificación.

Datos de entrada	Unidad	Escenarios 2030			
		Referencia	Bajo ^p	Medio ^q	Alto ^q
Densidad animal ^a	AU ha ⁻¹	0,6	1,0	1,5	2,0
Población animal ^b	Cabezas de ganado	9.331.160	9.064.783	8.317.333	7.110.636
Subcategorías de ganado ^c					
Ganado en crecimiento	Cabezas	1.662.006	1.614.561	1.481.430	1.266.501
Otro ganado maduro (carne de vacuno)	Cabezas	2.638.502	2.563.181	2.351.830	2.010.621

Continúa

Datos de entrada	Unidad	Escenarios 2030			
		Referencia	Bajo ^p	Medio ^q	Alto ^q
Ganado maduro de doble propósito	Cabezas	5.030.652	4.887.042	4.484.074	3.833.515
Factor de extracción de carne de vacuno ^d	%	52,5	52,5	53,0	53,0
Tasa de extracción ^e	%	17,5	17,5	18,2	20,0
PTA (peso típico del animal) ^f					
Ganado de cría	kg animal ⁻¹	144	144	200	220
Otro ganado maduro	kg animal ⁻¹	350	380	425	485
Ganado maduro de doble propósito	kg animal ⁻¹	380	383	388	399
Ingesta diaria total de materia seca (DMI) ^f					
Ganado en crecimiento	kg día ⁻¹ animal ⁻¹	4,7	4,7	6,2	6,5
Otro ganado maduro		8,6	9,0	9,7	10,5
Ganado maduro de doble propósito		8,8	8,8	8,9	9,1
Datos para estimar la ingesta de pienso					
Estimación de la concentración de energía neta en la dieta del alimento (Ne _{mf}) ^g	MJ kg ⁻¹ materia seca ⁻¹	4,5	4,5	6,0	7,0
Ingesta de energía bruta (GE) ^h					
Ganado en crecimiento	MJ kg ⁻¹ materia seca ⁻¹	86,4	86,4	114,0	119,8
Otro ganado maduro		159,3	166,9	178,3	193,5
Ganado maduro de doble propósito		162,1	162,9	164,3	167,3
Emisiones de metano (CH₄) por fermentación entérica					
Factor de conversión de CH ₄ (Y _m) ⁱ	%	7	7	6,3	6,3
Emisiones de metano (CH₄) procedentes del manejo de estiércol					
Tasa de excreción de sólidos volátiles ^j (VS _{TP})	kg vs. (1.000 kg de masa animal) ⁻¹ día ⁻¹	8,6	8,6	8,5	8,1

Continúa

Datos de entrada	Unidad	Escenarios 2030			
		Referencia	Bajo ^p	Medio ^q	Alto ^q
Fracción del total anual vs. para cada especie/categoría de ganado T que se maneja en el sistema de gestión del estiércol S en el país, para el sistema de productividad P, sistemas de gestión de residuos animales (AWMS) ^k	Sin medida	0,92	0,92	0,92	0,92
Factor de emisión para CH ₄ directo (FE) ^l	g CH ₄ kg VS ⁻¹	0,6	0,6	0,6	0,6
Emisiones de N₂O procedentes del manejo del estiércol					
Tasa de excreción de nitrógeno (N _{tasa}) ^m	kg N (1.000 kg de masa animal) ⁻¹ día ⁻¹	0,29	0,29	0,31	0,36
Excreción anual de N (N _{ex}) ⁿ					
Ganado en crecimiento	kg N animal ⁻¹ año ⁻¹	15,24	15,24	22,63	28,91
Otro ganado maduro		37,05	40,22	48,09	63,73
Ganado maduro de doble propósito		40,22	40,54	43,90	52,43
FE ₃ para estimar las emisiones directas de N ₂ O de suelos manejados ^o	kg N ₂ O-N (kg N) ⁻¹	0,006	0,006	0,006	0,006

^a Datos de [15,39]. ^b Los datos de la población animal se calcularon teniendo en cuenta la necesidad de carne de vacuno por año, la unidad animal por ha, el factor de extracción de carne de vacuno y la tasa de extracción por escenario. ^c La población de vacuno se clasificó en tres subcategorías principales según [43] y se consideró la cuota de cada categoría según la información extraída de [57]. ^d Es el porcentaje de carne de vacuno en canal con respecto al peso del animal vivo. Datos de [39,57]. ^e Corresponde al porcentaje de la cantidad anual de ganado vacuno sacrificado, datos de [39,57]. ^f Cálculos propios basados en el peso vivo de los animales por categorías y su relación con la ingesta diaria de materia seca. ^g Considerando que en la Tabla 10.8a del capítulo 10 del IPCC, 2019, se puede seleccionar la calidad de la dieta, asumimos una dieta de baja calidad en el escenario de referencia y bajo, de calidad moderada para el escenario medio y de alta calidad para el escenario alto. A continuación, se seleccionan los valores medios por defecto de la Tabla 10.8a [43]. ^h La GE se ha calculado multiplicando el valor de la DMI por el valor por defecto de 18,45 MJ kg⁻¹ de materia seca [43]. ⁱ El valor de Y_m de 7,0 se aplica en el escenario de referencia y en el escenario bajo, asumiendo la categoría de animales no lecheros y las dietas de no engorde (pastos de baja calidad). El valor de Y_m de 6,3 se aplica en el escenario medio y alto asumiendo dietas de alta calidad de forraje [43]. ^j Valores por defecto para la tasa de excreción de sólidos volátiles de la Tabla 10.13A del capítulo 10 para la región de América Latina de [43]. Para el escenario de referencia y bajo, se seleccionó “PS bajo para otro ganado”. Para el escenario medio, se seleccionó “valor medio para otro ganado”. Para el escenario alto, se seleccionó “PS alto para otro ganado”. ^k Valores por defecto en el capítulo 10 de [43]. ^l Valores por defecto en el capítulo 10 de [43]. Factor de emisión de metano para todos los animales de baja y alta productividad en un sistema de gestión de pastos, praderas y estiércol. ^m Valores por defecto de la Tabla 10.19 del capítulo 10 para la región de América Latina de [43]. Para el escenario de referencia y bajo, se seleccionó “PS bajo para otro ganado”. Para el escenario medio, se seleccionó “valor medio para otro ganado”. Para el escenario alto, se seleccionó “PS alto para otro ganado”. ⁿ Calculado con la ecuación 10, 30 [43]. ^o Valor por defecto para climas húmedos de la tabla 11,1 del capítulo 11 de [43].

(a) Emisiones de la producción de piensos (CO₂, N₂O)

Se asume que durante la temporada seca el sorgo forrajero se consume como parte de la alimentación animal bajo los escenarios medio y alto. Las emisiones de este se calculan como las de los cultivos alimentarios. El rendimiento del sorgo en grano es de 4,8 y 5,16 t ha⁻¹ año⁻¹ para el escenario medio y alto, respectivamente [24]. El rendimiento de toda la planta, es decir, el grano, las hojas y los tallos, se estimó en 55,5 t ha⁻¹ año⁻¹ [69]. Las emisiones de LUC proceden de pastizales degradados a tierras de cultivo anuales. Datos de entrada en la Tabla A5.

Tabla A5. Datos de entrada del sorgo forrajero para los escenarios medio y alto.

Escenario	Nutriente (kg ha ⁻¹) ^a			Uso de diésel ^b (litros t ⁻¹)
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
Medio	90	83	23	5,43
Alto	97	89	24	5,25

^a Base de datos de [69]. ^b Datos de uso de diésel de [70].

(b) Emisiones de metano de fermentación entérica

Las emisiones de metano procedentes de la fermentación entérica de la producción ganadera se calculan según el enfoque de nivel 2 de las directrices del IPCC (2019). Véase la Ecuación A5 (Ecuación 10.20 del IPCC 2019):

Ecuación A5

$$\text{Total CH}_{4\text{Entérico}} = \sum_{i,p} E_{i,p}$$

donde, Total CH_{4Entérico} = emisiones totales de metano de la fermentación entérica en g CH₄ año⁻¹. E_{i,p} = emisiones de metano por categoría de ganado i por sistema de producción P.

Las emisiones de metano procedentes de la fermentación entérica por categoría de ganado y por sistema de producción se calculan según la Ecuación A6 (ecuación 10.21 del IPCC 2019).

Ecuación A6

$$E = \frac{\text{GE} \cdot \frac{Y_m}{100} \cdot 365}{55,65}$$

donde, E = Emisión de metano, kg CH₄ cabeza⁻¹ año⁻¹. GE = ingesta de energía bruta, MJ cabeza⁻¹ día⁻¹. Y_m = factor de conversión de metano, % de la energía bruta del alimento convertida en metano. El factor 55,65 (MJ/kg CH₄) es el contenido energético del metano.

Para calcular la ingesta energética bruta por cabeza y día (GE), se multiplica la ingesta de materia seca (DMI) por el contenido energético por defecto de los piensos del IPCC (2019) (Ecuación A7).

Ecuación A7

$$\text{GE} = \text{DMI} \cdot 18,45$$

donde, GE = ingesta de energía bruta, MJ cabeza⁻¹ día⁻¹. DMI = ingesta de materia seca kg cabeza⁻¹ día⁻¹; 18,45 = valor por defecto para convertir el consumo de alimento de masa a energía [43].

La DMI por cabeza y día varía según las categorías de ganado y el sistema de producción y está relacionada con el peso corporal vivo y la dieta del ganado (Ecuación A8) para el “ganado en crecimiento” (Ecuaciones 10.18 del IPCC 2019). Para otros bovinos maduros y de doble propósito, asumimos el uso de la Ecuación A9 (ecuación 10.18A del IPCC 2019).

Ecuación A8

$$\text{DMI} = \text{BW}^{0,75} \cdot \left[\frac{(0,0582 \cdot \text{NE}_{\text{mf}} - 0,00266 \cdot \text{NE}_{\text{mf}}^2 - 0,0869)}{0,239 \cdot \text{NE}_{\text{mf}}} \right]$$

donde, DMI = ingesta de materia seca, kg día⁻¹. BW = peso corporal vivo, kg. NE_{mf} = concentración de energía neta dietética estimada del alimento con valores por defecto en la Tabla 10.8a del capítulo 10, IPCC, 2019 en MJ kg⁻¹ DM⁻¹.

Ecuación 9

$$\text{DMI} = 3,83 + 0,0143 \cdot \text{BW} \cdot 0,96 \text{ (otro ganado maduro)}$$

$$\text{DMI} = 3,184 + 0,01536 \cdot \text{BW} \cdot 0,96 \text{ (ganado de doble propósito)}$$

donde, DMI = ingesta de materia seca, kg día⁻¹. BW = peso corporal vivo, kg.

(c) Emisiones de metano procedentes del manejo del estiércol

Para todos los escenarios, se estima que la producción de ganado se realiza en un sistema de pastoreo en el que el estiércol se deposita en los pastos. Según el método del IPCC 2019, corresponde al sistema de gestión del estiércol pasto/corral/potrero (PRP) [43]. En este sistema, para estimar el CH₄ producido por el estiércol depositado en las pasturas, su gestión incluye tanto el estiércol como la orina. Cuando el estiércol se deposita en pasturas, pastizales o praderas se produce menos CH₄, ya que tiende a descomponerse en condiciones aeróbicas. Las emisiones de metano procedentes de la gestión del estiércol varían según el tipo de ganado, el sistema de producción y el de gestión del estiércol. Considerando que, en este estudio, los escenarios se elevan bajo cuatro niveles de productividad (Sección 3.3), aplicamos el enfoque de Nivel 1a del IPCC 2019 para estimar las emisiones de CH₄ del estiércol, (Ecuaciones A10) y A11) (Eq. 10.22 y Eq. 10.22A del capítulo 10 de [43]).

Ecuación 10

$$CH_4(\text{mm}) = \left[\sum_{T,S,P} (N_{(T,P)} \cdot VS_{(T,P)} \cdot AWMS_{(T,S,P)} \cdot FE_{(T,S,P)}) / 1.000 \right]$$

donde, CH₄ (mm) = emisiones de CH₄ procedentes del manejo del estiércol, en kg de CH₄ al año⁻¹. N_{T,P} = número de cabezas de ganado de la especie/categoría T, para el sistema de productividad P. VS_{T,P} = media anual frente a la excreción por cabeza de la especie/categoría T, para el sistema de productividad P, en kg frente al animal⁻¹ año⁻¹.

AWMS_{T,S,P} = fracción del total anual frente a cada especie/categoría de ganado T que se desarrolla en el sistema de gestión del estiércol S en el país, para el sistema de productividad P, adimensional. EF_{T,S,P} = factor de emisión para las emisiones directas de CH₄ procedentes de la gestión del estiércol por especie/categoría de animales T, en el sistema de manejo del estiércol S, para el sistema de productividad P, en g CH₄ kg VS⁻¹.

Valor vs. de excreción por cabeza por tipo de ganado y por sistema de producción se calcula de acuerdo con la Ecuación A11 (Ecuación 10.22A del IPCC 2019).

Ecuación A11

$$VS_{(T,P)} = (VS_{\text{tasa}(T,P)} \cdot \frac{TAM_{T,P}}{1.000}) \cdot 365$$

donde, VS_{T,P} = media anual vs. excreción por cabeza de la especie/categoría T, para el sistema de productividad P, en kg vs. animal⁻¹ año⁻¹. VS_{tasa(T,P)} = tasa de defecto vs. tasa de excreción, para el sistema de productividad P, kg vs. (1.000 kg de masa animal)⁻¹ día⁻¹. TAM_{T,P} = masa animal típica de la categoría de ganado T, para el sistema de productividad P, kg animal⁻¹.

(c) Emisiones directas de N₂O procedentes de la gestión del estiércol

Las emisiones directas de N₂O generadas por el estiércol en el sistema “pastos, praderas y pastizales” se recogen en el método del IPCC 2019, en la sección 11.2 del capítulo 11, en la categoría “Emisiones de N₂O procedentes de suelos manejados” [43]. Para la producción de ganado en todos los escenarios, las emisiones de N₂O se estiman utilizando las Ecuaciones A12 y A13 (Ecuación. 11.5 del capítulo 11 de IPCC, 2019) por enfoque de nivel 1.

Ecuación A12

$$N_2O - N_{PRP} = [(F_{PRP} \cdot EF_{3PRP})] \cdot 44/28$$

donde, N₂O-N_{PRP} = emisiones anuales directas de N₂O-N procedentes de los aportes de orina y estiércol a los suelos pastoreados, kg de N₂O-N al año⁻¹. F_{PRP} = cantidad anual de N en orina y estiércol depositada por el ganado que pasta en pasturas, praderas y potreros, en kg de N al año⁻¹. EF_{3PRP} = factor de emisión de N₂O procedente del N de la orina y el estiércol depositados por el ganado que pasta en pasturas, praderas y prados, kg de N₂O-N (kg de entrada de N)-1. 44/28 = conversión de las emisiones de N₂O-N en emisiones de N₂O a efectos de información.

Ecuación A13

$$F_{PRP} = \sum_T [(N_T \cdot Nex_T) \cdot MS_{T,PRP}]$$

donde, F_{PRP} = cantidad anual de N de orina y estiércol depositada por el ganado que pasta en pasturas, corrales y potreros, en kg de N por año⁻¹. N_T = número de cabezas de ganado de la especie/categoría T en kg N animal⁻¹ año⁻¹. Nex_T = excreción media anual de N por cabeza de la especie/categoría T en kg N animal⁻¹ año⁻¹. MS_{T,PRP} = fracción de la excreción total anual de N para cada categoría de ganado T que se deposita en las pasturas, praderas y potreros.

- **Cambios del uso de la tierra (LUC).** El LUC se consideró con base en las actuales condiciones regionales del área disponible dentro de la frontera agrícola y analizando los resultados de la demanda de tierra para los escenarios propuestos. Por lo tanto, dado que los escenarios de referencia y bajo proyectan un aumento de la demanda de tierras para la producción agrícola, es necesario convertir matorrales en tierras de cultivo para la producción de cultivos alimentarios. Por otro lado, las condiciones de producción de carne

de vacuno para estos dos escenarios corresponden a la producción de ganado extensivo. Teniendo en cuenta que este sistema de producción de ganado conduce a la degradación del suelo [10,13,20] y al uso de más tierra para satisfacer las necesidades futuras, se definió que la producción de carne de vacuno requiere la conversión de matorrales en pasturas degradadas. Para los escenarios medio y alto, se prevé que el aumento de la demanda de suelo no supere la demanda de suelo actual. Por lo tanto, para la producción de cultivos alimentarios, la conversión es de tierra de cultivo a tierra de cultivo. En el caso de la producción de carne de vacuno, se estima que el sistema de producción de ganado mejora, entonces la conversión de la tierra es de pasturas degradadas a sabanas manejadas, en la que la mejora de los pastos y la mezcla con forrajes, leguminosas y árboles permite la mejora del *stock* de carbono de todo el sistema de producción y beneficia el bienestar animal [33]. En las áreas aptas para la producción agrícola, ganadera, forestal, acuícola y pesquera fueron delimitadas recientemente [12]. Según la

UPRA [12], los terrenos adecuados se identificaron a partir de un análisis exhaustivo de los criterios físicos, ecosistémicos y socioeconómicos del territorio a nivel nacional. (1) Los criterios físicos incluyen la temperatura, las precipitaciones, la humedad del suelo, la disponibilidad de nutrientes, el grado de erosión, la textura del suelo, la pendiente del suelo y la susceptibilidad a los desprendimientos. (2) Los criterios de los ecosistemas incluyen la cobertura del suelo, la integridad ecológica, la amenaza de incendios y los ecosistemas estratégicos. (3) Los criterios socioeconómicos incluyen la infraestructura y la logística, el costo del suelo, los indicadores económicos y el mercado laboral [12]. Teniendo en cuenta esa delimitación, el cuadro A6 muestra la distribución de tierras que asumimos para este estudio. La zona más amplia para concentrar la intensificación de la tierra debería ser la planicie del piedemonte, ya que esta tiene la mayor superficie agrícola disponible (ha) de la región. Hasta la fecha, la zona de la llanura inundada se ha dedicado sobre todo a la producción de ganado y no a la de cultivos.

Tabla A6. Distribución e idoneidad de la tierra en la región de Orinoquia.

Características	Región de Orinoquia					
Superficie de toda la región ^a	25,4 Mha					
Superficie agrícola disponible ^b	15,5 Mha					
Paisaje regional	Llanura inundada 5,0 Mha		Piedemonte 2,8 Mha		Alta llanura 9,7 Mha	
Adecuación de las tierras ^c en la frontera agrícola	Cultivos +	Ganado +++	Cultivos ++	Ganado ++	Cultivos +++	Ganado ++

^a Área que abarca los límites de cuatro departamentos: Arauca, Casanare, Meta y Vichada [23]. ^b Datos oficiales del Gobierno Nacional que corresponden a las tierras disponibles para la producción agropecuaria en la región de la Orinoquia, también llamada frontera agrícola [23]. ^c De acuerdo con la zonificación de las áreas de producción dentro de la frontera agrícola realizada por [12,28], la aptitud de las tierras se clasifica así: la aptitud alta (+++) corresponde a las tierras con las mejores condiciones físicas, ecosistémicas y socioeconómicas para la producción agrícola o ganadera. Moderadamente adecuado (++) se refiere a zonas con limitaciones físicas, ecosistémicas o socioeconómicas moderadas que requieren inversiones en torno a la zona para una gestión óptima de la producción. La baja idoneidad (+) se relaciona con zonas con limitaciones importantes (físicas, ecosistémicas o socioeconómicas), que requieren grandes inversiones o el desarrollo de nuevas tecnologías para una producción óptima [12,28].

Además, teniendo en cuenta que la llanura inundada tiene un ecosistema sensible que podría verse afectado por la producción de cultivos a gran escala [27,28]. Entonces, consideramos que en la zona de la llanura inundada hay que centrarse, sobre todo en la producción ganadera, y solo en algunas pequeñas zonas producir cultivos anuales.

Apéndice C. Parámetros para el cálculo de las emisiones de GEI asociadas a los cultivos energéticos

Para determinar las emisiones de GEI de los cultivos energéticos se necesitan las siguientes características clave de la producción de estos cultivos: para la caña de azúcar, se asume que su producción es exclusiva; para la producción de bioetanol, se asume un ciclo de retoño de 7 años [49]. Actualmente, las plantaciones de palma de aceite en Colombia se utilizan para producir aceite de palma crudo (APC) tanto para uso alimentario como para biodiésel [71]. Sin embargo, se asume que toda la palma de aceite cultivada en tierras excedentarias se utiliza para producir biodiésel. Los datos de entrada (químicos, agua, combustible y electricidad) para la producción de biodiésel se basan en un estudio previo de [22]. Para el cultivo de

palma de aceite, se asume una vida útil de 25 años (5 años de establecimiento, 20 años de cobertura total del cultivo, 24 cosechas de RFF por año). Nótese que los subproductos de la producción de caña de azúcar y palma de aceite no se contabilizan en este análisis. La biomasa lignocelulósica evaluada es la acacia (*A. mangium*), que se cree se utilizará para producir bioelectricidad (cogeneración de calor y electricidad). Se asume una rotación de 10 años y una cosecha [72]. Datos e hipótesis (Tabla A7). *A. mangium* es una de las especies más destacadas dado su rápido crecimiento, su alta capacidad de adaptación a diferentes entornos, el potencial de recuperación de suelos degradados y la posibilidad de generar rápidos cambios en el paisaje [73-75]. Esta planta tiene una gran tolerancia a las condiciones de estrés hídrico (déficit o exceso) y a la deficiencia nutricional de los suelos. Por lo tanto, puede crecer en zonas tropicales con escasas precipitaciones, alta radiación solar y temperatura [74]. El uso de *A. mangium* de la región de la Orinoquia se estima para productos madereros tradicionales (tablones, pulpa de madera) y productos de madera para la industria química, cosmética y alimentaria, energía, biocombustibles de segunda generación, carbón vegetal, briquetas de carbón vegetal y carbón activado [17,76]. Sin embargo, se espera que el mayor uso sea la producción de electricidad [75].

Tabla A7. Datos e hipótesis sobre las emisiones de los cultivos energéticos. Estos cultivos solo crecen en las tierras excedentarias de los escenarios medio y alto de aumento del rendimiento agrícola.

Datos de entrada		Escenarios a 2030		
		Medio	Alto	
Rendimiento del cultivo (t ha ⁻¹ año ⁻¹) (base húmeda)	Caña de azúcar ^a	84,3	85,4	
	Palma de aceite ^b	16,6	18,4	
	Acacia ^c	16,5	19,3	
Fertilización ^d (kg ha ⁻¹)	N	48	49	
	Caña de azúcar	P	114	116
	K	116	118	

Datos de entrada		Escenarios a 2030		
		Medio	Alto	
Fertilización ^d (kg ha ⁻¹)	N	92	104	
	Palma de aceite	P	28	32
		K	190	214
		N	109	127
	Acacia	P	99	116
		K	52	61
Caña de azúcar		3,38	3,27	
Consumo de diésel ^e (l t ⁻¹)	Palma de aceite	4,60	4,44	
	Acacia	3,84	3,71	

^a Datos de rendimiento de [24,41]. La caña de azúcar se expresa en toneladas de caña por hectárea. Nótese su rendimiento cultivo no reporta gran variación entre escenarios porque los datos fueron tomados del único cultivo actual en la región con información de 2013-2018, en el que el escenario medio corresponde al percentil 80 de los datos del periodo, y el escenario alto corresponde al percentil 95. ^b Datos de rendimiento de [77]. El rendimiento de la palma de aceite se expresa en términos de racimos de fruta fresca (RFF) por hectárea. El aumento en los rendimientos sigue los datos regionales correspondientes al periodo 2012-2018, en el que el escenario medio corresponde al percentil 80 de los datos del periodo, y el escenario alto corresponde al percentil 95. ^c Los datos de rendimiento de [78] acacia se expresan en toneladas de madera por hectárea. ^d Para todos los escenarios, los datos de fertilización a cada cultivo energético se calcularon a partir de los datos de [63]. El uso de fertilizantes nitrogenados tiene implicaciones para las emisiones de GEI, como se describe en el Apéndice A. ^e El consumo de diésel para la palma de aceite se basa en datos de [22]. Consumo de diésel en la caña de azúcar a partir de [79]. El consumo de gasóleo en la plantación de acacias se toma de un sistema de cosecha forestal que trabaja en las tareas forestales tradicionales con motosierra, cabrestante y tractor a pie [80].

Apéndice D. Parámetros para el cálculo de las emisiones de GEI asociadas a los productos de bioenergía

Se calculan las emisiones asociadas a los tres productos bioenergéticos (bioetanol de caña de azúcar, biodiésel de palma de aceite y bioelectricidad de madera de acacia) (Tabla A8). En todos los casos, se incluye la etapa de cultivo, la planta de conversión y la etapa de quema de bioenergía (combustión) (es decir, el proceso de conversión del biocombustible en energía: calor, electricidad o energía mecánica).

- Para el bioetanol, la planta de conversión incluye el transporte de la caña, el proceso de molienda y la planta de etanol [49].
- Para el biodiésel, la planta de conversión incluye la planta de beneficio de aceite de palma, el refinado físico (refinado, blanqueado y desodorizado), la transesterificación, la esterificación del ácido graso libre (AGL), la purificación del BD, de la glicerina (USP) y la recuperación del metanol [22]. Para la bioelectricidad, la planta de conversión incluye el aserradero y la planta de pellets [50].

Tabla A8 . Datos de emisiones a lo largo del proceso de producción de etanol de caña de azúcar, biodiésel de palma de aceite y bioelectricidad de acacia.

Emisiones	Unidad	Bioetanol		Biodiésel		Electricidad	
		M	A	M	A	M	A
Emisiones del cultivo ^a	kg CO ₂ eq t ⁻¹ _{biocombustible}	-39,0	-143,0	-3.089,0	-3.207,4		
	kg CO ₂ eq MJ ⁻¹ _{electricidad}					-0,071	-0,084
Planta de conversión	kg CO ₂ eq t ⁻¹ _{biocombustible}	6,4 ^b		145,5 ^c		0,0114 ^g	
Combustión	kg CO ₂ eq t ⁻¹ _{biocombustible}	0,3 ^d		0,3 ^d			
	kg CO ₂ eq MJ ⁻¹ _{electricidad}					1,9 ^e	
Comparador de combustible fósil ^f	kg CO ₂ eq t ⁻¹ _{biocombustible}	94		94			
	kg CO ₂ eq MJ ⁻¹ _{electricidad}					183	
Emisiones totales	g CO ₂ eq MJ ⁻¹ _{biocombustible}	-2,1	-6,0	-79,3	-82,5		
	g CO ₂ eq MJ ⁻¹ _{electricidad}					-68,9	-82,1

^a Datos de la producción de cultivos energéticos en los escenarios medio (M) y alto (A) del presente estudio. ^b Datos de [49]. ^c Datos de [22]. ^d Datos calculados a partir del nivel 1, [43]. Incluye las emisiones de CH₄ y N₂O. ^e Datos calculados sobre la base de Nivel 1, [43]. Incluye las emisiones de CH₄ y N₂O. No se consideran las emisiones biogénicas de CO₂. ^f Datos de [2]. ^g Datos de [50].

Referencias

1. OECD-FAO. *OECD-FAO Agricultural Outlook 2019-2028. Special Focus: Latin America*; OECD: París, Francia, 2019.
2. European Parliament. Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council on the Promotion of the Use of Energy from Enewable Sources. *Off. J. Eur. Union* 2018, 82-209.
3. European Commission. *Commission Delegated Regulation (EU) 2019/807 of 13 March 2019 no. April 2009*; European Union: Brussels, Belgium, 2019; pp. 1-7.
4. de Souza, N. R. D.; Fracarolli, J. A.; Junqueira, T. L.; Chagas, M. F.; Cardoso, T. F.; Watanabe, M. D.; Cavalett, O.; Venzke Filho, S. P.; Dale, B. E.; Bonomi, A.; *et al.* Sugarcane Ethanol and Beef Cattle Integration in Brazil. *Biomass Bioenergy* 2019, 120, 448-457. [CrossRef]
5. Gerssen-Gondelach, S. J.; Wicke, B.; Faaij, A. P. C. GHG Emissions and Other Environmental Impacts of Indirect Land Use Change Mitigation. *GCB Bioenergy* 2016, 9, 725-742. [CrossRef]

6. Jimenez, C.; Faaij, A. P. C. *Palm Oil Biodiesel in Colombia, an Exploratory Study on Its Potential and Future Scenarios*. Tesis de maestría, Universidad de Utrecht, Utrecht, Países Bajos, 2012.
7. DNP and Enersinc. *Energy Supply Situation in Colombia*; Departamento Nacional de Planeación, DPN Colombia: Bogotá, Colombia, 2017; p. 165.
8. CIAT; CRECE. *Productividad de la tierra y rendimiento del sector agropecuario medido a través de los indicadores de crecimiento verde en el marco de la Misión de Crecimiento Verde en Colombia. Informe 1: Análisis General de Sistemas Productivos Claves y sus Indicadores*; Departamento Nacional de Planeación, DPN Colombia: Cali, Colombia, 2018; pp. 1-74.
9. DNP. *Política de Crecimiento Verde (Documento CONPES 3934)*; DNP: Bogotá, Colombia, 2018.
10. Rodríguez Borray, G.; Bautista Cubillos, R. *Comps. Adopción e impacto de los sistemas agropecuarios introducidos en la altillanura plana del Meta*; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia): Mosquera, Colombia, 2019.
11. MADR. *Resolución No 0261 de 2018-Frontera Agrícola*; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia: Bogotá, Colombia, 2018; p. 152.
12. UPRA. *Metodología para la identificación general de la frontera agrícola en Colombia*; UPRA: Bogotá, Colombia, 2018.
13. CIAT; Cormacarena. *Plan regional integral de cambio climático para la Orinoquia*; Publication No. 438; Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT): Cali, Colombia, 2017.
14. FAO. *Tackling Climate Change through Livestock-A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities*; FAO: Roma, Italia, 2013.
15. Fedegan. *Ganadería Colombiana-Hoja de Ruta 2018-2022*; Fedegan: Bogotá, Colombia, 2018.
16. Lerner, A. M.; Zuluaga, A. F.; Chará, J.; Etter, A.; Searchinger, T. Sustainable Cattle Ranching in Practice: Moving from Theory to Planning in Colombia's Livestock Sector. *Environ. Manag.* 2017, 60, 1-8. [CrossRef]
17. Younis, A.; Trujillo, Y.; Benders, R.; Faaij, A. *Regionalized Cost Supply Potential of Bioenergy Crops and Residues in Colombia: A Hybrid Statistical Balance and Land Suitability Allocation Scenario Analysis*; University of Groningen: Groningen, The Netherlands, 2020.
18. Castanheira, É. G.; Acevedo, H.; Freire, F. Greenhouse Gas Intensity of Palm Oil Produced in Colombia Addressing Alter-Native Land Use Change and Fertilization Scenarios. *Appl. Energy* 2014, 114, 958-967. [CrossRef]
19. Quezada, J. C.; Etter, A.; Ghazoul, J.; Buttler, A.; Guillaume, T. Carbon Neutral Expansion of Oil Palm Plantations in The Neotropics. *Sci. Adv.* 2019, 5, eaaw4418. [CrossRef] [PubMed]

20. Silva-Parra, A. Modelación de los stocks de carbono del suelo y las emisiones de dióxido de carbono (GEI) en sistemas productivos de la altillanura plana. *Orinoquia* 2018, 22, 158-171. [CrossRef]
21. Peñuela, L.; Ardila, A.; Rincón, S.; Cammaert, C. *Ganadería y conservación en la sabana inundable de la Orinoquia colombiana: modelo sui generis climáticamente inteligente. Proyecto: Planeación climáticamente inteligente en sabanas, a través de la incidencia política, ordenamiento y buenas prácticas sulu*; WWF Colombia-Fundación Horizonte Verde: Cumaral, Colombia, 2019.
22. Ramírez-Contreras, N. E.; Munar-Flórez, D. A.; García-Núñez, J. A.; Mosquera-Montoya, M.; Faaij, A. P. The GHG Emissions and Economic Performance of the Colombian Palm Oil Sector; Current Status and Long-Term Perspectives. *J. Clean. Prod.* 2020, 258, 120757. [CrossRef]
23. DANE. *Tercer censo nacional agropecuario: hay campo para todos-tomo 2*; DANE: Bogotá, Colombia, 2016.
24. Agronet. Estadísticas Agropecuarias. Ministerio de Agricultura y Desarrollo Sostenible Colombia. 2019. Recuperado de <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx> (consultado el 3 de junio de 2019).
25. MADR. *Anuario estadístico del sector agropecuario 2017*; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia: Bogotá, Colombia, 2018; p. 519.
26. Ramírez-Restrepo, C. A.; Vera, R. R.; Rao, I. M. Dynamics of Animal Performance, and Estimation of Carbon Footprint of Two Breeding Herds Grazing Native Neotropical Savannas in Eastern Colombia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2019, 281, 35-46. [CrossRef]
27. Rincón, S. A.; Suárez, C. F.; Romero-Ruiz, M. H.; Flantua, S. G. A.; Sarmiento, A.; Hernández, N.; Palacios Lozano, M. T.; Naranjo, L. G.; Usma, S. *Identifying Highly Biodiverse Savannas Based on the European Union Renewable Energy Directive (Sulu Map). Conceptual Background and Technical Guidance*; WWF Colombia: Bogotá, Colombia, 2014; p. 104.
28. UPRA. Zonificación de Aptitud Agropecuaria para Colombia. Sistema para la Planificación Rural Agropecuaria (SIPRA). 2018. Recuperado de <https://sipra.upra.gov.co/> (consultado el 1 de enero de 2019).
29. Rincón Castillo, A.; Jaramillo, C. A. *Establecimiento, manejo y utilización de recursos forrajeros en sistemas ganaderos de suelos ácidos*; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica): Villavicencio, Colombia, 2010; p. 252.
30. MADR. *Estrategia colombiana de siembra*; Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia: Bogotá, Colombia, 2016; pp. 1-55. 31.
31. UPRA. *Análisis situacional de cadena productiva del arroz en Colombia*; Unidad de Planeación Rural Agropecuaria (UPRA): Bogotá, Colombia, 2019; p. 124.

32. Brinkman, M. L. J.; van der Hilst, F.; Faaij, A. P. C.; Wicke, B. Low-ILUC-Risk Rapeseed Biodiesel: Potential and Indirect GHG Emission Effects in Eastern Romania. *Biofuels* 2021, 12, 171-186. [CrossRef]
33. Chará, J.; Reyes, E.; Peri, P.; Otte, J.; Arce, E.; Schneider, F. *Silvopastoral Systems and Their Contribution to Improved Resource Use and Sustainable Development Goals: Evidence from Latin America*; FAO, CIPAV and Agri Benchmark: Cali, Colombia, 2019.
34. DANE. *Ganadería bovina para la producción de carne en Colombia, Bajo las buenas prácticas ganaderas (BPG)*; Boletín Mensual 44: Bogotá, Colombia, 2016; pp. 1-88.
35. Etter, A.; Zuluaga, A. F. Áreas aptas para la actividad ganadera en Colombia: análisis espacial de los impactos ambientales y niveles de productividad de la ganadería. En *Biodiversidad 2017. Estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*; Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt: Bogotá, Colombia, 2017.
36. Tapasco, J.; Lecoq, J. F.; Ruden, A.; Rivas, J. S.; Ortiz, J. The Livestock Sector in Colombia: Toward a Program to Facilitate Large-Scale Adoption of Mitigation and Adaptation Practices. *Front. Sustain. Food Syst.* 2019, 3, 1-17. [CrossRef]
37. Rincón, Á.; Baquero, J.; Florez, H. *Manejo de la nutrición mineral en sistemas ganaderos de los Llanos Orientales de Colombia*; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia): Villavicencio, Colombia, 2012.
38. CIAT. *Agroecología y biodiversidad de las sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*; Publicación No. 322; CIAT: Cali, Colombia, 2001.
39. Fedegan. *Plan estratégico de la ganadería colombiana 2019*; Fedegan: Bogotá, Colombia, 2006; p. 286.
40. Fedegan. Número de vacas por hectárea se duplica en fincas tecnificadas. Fedegan Noticias. 2020. Recuperado de: <https://www.fedegan.org.co/noticias/numero-de-vacas-por-hectarea-se-duplica-en-fincas-tecnificadas> (consultado el 4 de junio de 2019).
41. DANE. Encuesta nacional de arroz mecanizado (ENAM), DANE. 2019. Recuperado de: <http://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/agropecuario/encuesta-de-arroz-mecanizado> (consultado el 14 de julio de 2019).
42. Fedegan. *Manejo de praderas y división de potreros*; Proyecto Ganadería Colombiana Sostenible: Bogotá, Colombia, 2018; p. 16.
43. IPCC. 2019. *Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*; Calvo Buendía, E.; Tanabe, K.; Kranjc, A.; Baasansuren, J.; Fukuda, M.; Ngarize, S.; Osako, A.; Pyrozhenko, Y.; Shermanau, P.; Federici, S.; Eds.; IPCC: Geneva, Switzerland, 2019.
44. Pérez-López, O.; Afanador-Téllez, G. Comportamiento agronómico y nutricional de genotipos de *Brachiaria* spp. manejados con fertilización nitrogenada, solos y asociados con *Pueraria phaseoloides*, en condiciones de altillanura colombiana. *Rev. Med. Vet. Zoot* 2017, 64, 52-77. [CrossRef]

45. Henson, I. E.; Ruiz, R.; Romero, H. M. The Greenhouse Gas Balance of the Oil Palm Industry in Colombia: A Preliminary Analysis. I. Carbon Sequestration and Carbon Offsets. *Agron. Colomb.* 2012, 30, 359-369.
46. Kerdan, I. G.; Giarola, S.; Jalil-Vega, F.; Hawkes, A. Carbon Sequestration Potential from Large-Scale Reforestation and Sugarcane Expansion on Abandoned Agricultural Lands in Brazil. *Polytechnica* 2019, 2, 9-25. [CrossRef]
47. Lisboa, C. C.; Butterbach-Bahl, K.; Mauder, M.; Kiese, R. Bioethanol Production from Sugarcane and Emissions of Green-House Gases-Known and Unknowns. *GCB Bioenergy* 2011, 3, 277-292. [Crossref]
48. Matsumura, N.; Nakama, E.; Sukandi, T.; Imanuddin, R. *Carbon Stock Estimates for Acacia Mangium Forests in Malaysia and Indonesia: Potential for Implementation of Afforestation and Reforestation CDM Projects*; JICA Carbon Fixing Forest Management in Indonesia: Yakarta, Indonesia, 2007; Volume 7, pp. 15-24. [CrossRef]
49. Mekonnen, M. M.; Romanelli, T. L.; Ray, C.; Hoekstra, A. Y.; Liska, A. J.; Neale, C. M. Water, Energy, and Carbon Footprints of Bioethanol from the U. S. and Brazil. *Environ. Sci. Technol.* 2018, 52, 14508-14518. [CrossRef] [PubMed]
50. Röder, M.; Whittaker, C.; Thornley, P. How Certain are Greenhouse Gas Reductions from Bioenergy? Life Cycle Assessment and Uncertainty Analysis of Wood Pellet-To-Electricity Supply Chains from Forest Residues. *Biomass Bioenergy* 2015, 79, 50-63. [CrossRef]
51. Peter, A. S.; Alias, M. P.; Iype, M. P.; Jolly, J.; Sankar, V.; Babu, K. J.; Baby, D. K. Optimization of Biodiesel Production by Transesterification of Palm Oil and Evaluation of Biodiesel Quality. *Mater. Today Proc.* 2021. [CrossRef]
52. Lavelle, P.; Rodríguez, N.; Arguello, O.; Bernal, J.; Botero, C.; Chaparro, P.; Gómez, Y.; Gutiérrez, A.; Hurtado, M. D. P.; Loaiza, S.; *et al.* Soil Ecosystem Services and Land Use in The Rapidly Changing Orinoco River Basin of Colombia. *Agric. Ecosyst. Environ.* 2014, 185, 106-117. [CrossRef]
53. Escribano, M.; Elghannam, A.; Mesias, F. J. Dairy Sheep Farms in Semi-Arid Rangelands: A Carbon Footprint Dilemma Between Intensification and Land-Based Grazing. *Land Use Policy* 2020, 95, 104600. [CrossRef]
54. Rincón Castillo, A.; Flórez Díaz, H.; Técnico, M. *Sistemas integrados: agrícola-gandero-forestal para el desarrollo de la Orinoquia colombiana*; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia): Villavicencio, Colombia, 2013.
55. Ramírez-Contreras, N. *Environmental Impacts and Economic Performance of Agricultural Intensification and Bioenergy Production in the Orinoquia Region*; University of Groningen: Groningen, The Netherlands, 2021.
56. Fedearroz. Consumo de arroz en Colombia. Estadísticas arroceras. 2019. Recuperado de www.fedearroz.com.co (consultado el 5 de septiembre de 2019).

57. Fedegan. Cifras de referencia del sector ganadero colombiano. Federación Colombiana de Ganaderos. 2019. Recuperado de <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/general> (consultado el 4 de junio de 2019).
58. DANE. *Proyecciones de población, por área. Departamento Administrativo Nacional de Estadística*; DANE: Bogotá, Colombia, 2019.
59. Amézquita, E.; Rao, I. M.; Rivera, M.; Corrales, I. I.; Bernal, J. H. *Sistemas agropastoriles: un enfoque integrado para el manejo sostenible de oxisoles de los Llanos Orientales de Colombia*; Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT); Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (MADR) de Colombia; Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica): Cali, Colombia, 2013; p. 223.
60. Fedearroz. *Dinámica del sector arrocero de los Llanos Orientales de Colombia, 1999-2011*, 1st ed.; Fedearroz: Bogotá, Colombia, 2011. 61. Woodbury, P.; Wightman, J. *Nitrogen Fertilizer Management & Greenhouse Gas Mitigation Opportunities*; Cornell University: New York, NY, USA, 2017; p. 10.
61. Wang, H.; Sarah, K.; Klaus, D. Use of Urease and Nitrification Inhibitors to Reduce Gaseous Nitrogen Emissions from Ferti-Lizers Containing Ammonium Nitrate and Urea. *Glob. Ecol. Conserv.* 2020, 22, e00933. [CrossRef]
62. IPNI. *Archivo agronómico no. 3. Requerimientos nutricionales de los cultivos*; IPNI: Canadá, 2002; pp. 3-6.
63. Alam, M. K.; Bell, R. W.; Biswas, W. K. Increases in Soil Sequestered Carbon Under Conservation Agriculture Cropping De-Crease the Estimated Greenhouse Gas Emissions of Wetland Rice Using Life Cycle Assessment. *J. Clean. Prod.* 2019, 224, 72-87. [CrossRef]
64. Yang, Q.; Chen, G. Greenhouse Gas Emissions of Corn-Ethanol Production in China. *Ecol. Model.* 2013, 252, 176-184. [CrossRef]
65. Jekayinfa, S.; Ola, F.; Afolayan, S.; Ogunwale, R. On-Farm Energy Analysis of Plantain Production in Nigeria. *Energy Sustain. Dev.* 2012, 16, 339-343. [CrossRef]
66. Castanheira, E. G.; Grisoli, R.; Coelho, S.; Da Silva, G. A.; Freire, F. Life-Cycle Assessment of Soybean-Based Biodiesel in Europe: Comparing Grain, Oil and Biodiesel Import from Brazil. *J. Clean. Prod.* 2015, 102, 188-201. [CrossRef]
67. Jiao, J.; Li, J.; Bai, Y. Uncertainty Analysis in the Life Cycle Assessment of Cassava Ethanol in China. *J. Clean. Prod.* 2019, 206, 438-451. [CrossRef]
68. Coblenz, W. K.; Phillips, J. M. 11-Grain Sorghum for Forage. En *Grain Sorghum Production Handbook*; University of Arkansas System/Division of Agriculture: Little Rock, AR, USA, 2004; pp. 63-68.
69. Maraseni, T.; Chen, G.; Banhazi, T.; Bundschuh, J.; Yusaf, T. An Assessment of Direct on-Farm Energy Use for High Value Grain Crops Grown under Different Farming Practices in Australia. *Energies* 2015, 8, 13033-13046. [CrossRef]

70. Fedepalma. *Anuario estadístico 2019. Principales cifras de la agroindustria de la palma de aceite en Colombia*; Fedepalma: Bogotá, Colombia, 2019.
71. MADR. *Resolución 0189 de 2019-Lineamientos de política para plantaciones forestales con fines comerciales. Colombia: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia*; MADR: Bogotá, Colombia, 2019; p. 225.
72. Caguasango, S. *Predicción de rendimientos para plantaciones de acacia mangium willd. En la altillanura plana a partir de variables biofísicas*; Univesidad Nacional de Colombia: Bogotá, Colombia, 2017.
73. Reyes, M. G.; Carmona, G. S. L.; Fernández, M. E. Aspectos fisiológicos y de aprovechamiento de *Acacia mangium Willd.* Una revisión. *Rev. Colomb. Cienc. Hortic.* 2018, 12, 244-253. [CrossRef]
74. Martínez, O. *Disponibilidad de madera de plantaciones forestales con fines comerciales en Colombia: análisis de prospectiva 2015-2047*; Modelo del Sector Forestal Colombiano; Unidad de Planificación Rural Agropecuaria de Colombia (UPRA): Bogotá, Colombia, 2018; p. 222.
75. Hegde, M.; Palanisamy, K.; Yi, J. S. *Acacia Mangium Willd-A Fast Growing Tree for Tropical Plantation.* *J. For. Environ. Sci.* 2013, 29, 1-14. [CrossRef]
76. Fedepalma. *Sispa: Sistema de Información Estadística del Sector Palmero de Colombia*; Sispa: Bogotá, Colombia, 2019.
77. Mendham, D. S.; White, D. A. A. Review of Nutrient, Water and Organic Matter Dynamics of Tropical Acacias on Mineral Soils for Improved Management in Southeast Asia. *Aust. For.* 2019, 82, 45-56. [CrossRef]
78. Tsiropoulos, I.; Faaij, A. P. C.; Seabra, J. E. A.; Lundquist, L.; Schenker, U.; Briois, J.-F.; Patel, M. K. Life Cycle Assessment of Sugarcane Ethanol Production in India in Comparison to Brazil. *Int. J. Life Cycle Assess.* 2014, 19, 1049-1067. [CrossRef]
79. Cerutti, A. K.; Calvo, A.; Bruun, S. Comparison of the Environmental Performance of Light Mechanization and Animal Traction Using a Modular LCA Approach. *J. Clean. Prod.* 2014, 64, 396-403. [CrossRef]