

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ambiente y Desarrollo
Ingeniería en Ambiente y Desarrollo



Proyecto Especial de Graduación
Propuesta de mitigación de gases de efecto invernadero en la Hacienda
Flores, Victoria, Yoro, basada en un diagnóstico con sistema MRV

Estudiante

Xochilh Abigail Alvarenga Martínez

Asesores

Marco Granadino, M.Sc.

Diego Obando, Mtr.

Honduras, agosto 2025

Autoridades

KEITH L. ANDREWS

Rector i.a.

ANA MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

VICTORIA CORTÉS MATAMOROS

Directora del Departamento de Ambiente y Desarrollo

JULIO NAVARRO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros.....	5
Índice de Figuras	6
Índice de Anexos.....	7
Resumen	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Metodología.....	12
Ubicación del Estudio.....	12
Caracterización de los Sectores de la Hacienda.....	13
Caracterización del Hato Ganadero	14
Caracterización de la Dieta	14
Árboles en Potreros	15
Cuantificación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero Mediante Sistema MRV	15
Formulación de la Estrategia de Mitigación en los Tres Sectores de la Hacienda.....	17
Resultados.....	19
Caracterización integral de la Hacienda Flores.....	19
Caracterización del Sector Santa Lucía	19
Caracterización del Sector Platanares	25
Caracterización del Sector La Lima	30
Cuantificación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero Mediante Sistema MRV	34
Emisiones por Fermentación Entérica en Santa Lucía	34
Emisiones de Estiércol en Santa Lucía	35
Emisiones de Metano	36
Emisiones Indirectas e Directas en Santa Lucía	37

Emisiones Generadas en Platanares.....	38
Emisiones Fermentación Entérica en Platanares.....	38
Emisiones Estiércol en Platanares.....	40
Emisiones de Metano en Platanares.....	41
Emisiones Generadas en La Lima.....	41
Emisiones Fermentación Entérica en la Lima	41
Emisiones Estiércol	42
Emisiones Metano	43
Cuadro Comparativo entre las Tres Secciones	43
Formulación de la estrategia de mitigación.....	45
Propuesta de Mitigación en Santa Lucía.....	45
Propuesta de Mitigación en Platanares	47
Propuesta de Mitigación en La Lima.....	48
Conclusiones	52
Recomendaciones.....	53
Referencias.....	54
Anexos.....	57

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Características de cada sector de la hacienda.....	13
Cuadro 2 Descripción de las secciones del Formulario estándar para recolección de información en campo de fincas con mediciones MRV	16
Cuadro 3 Dieta brindada en el hato de Santa Lucía.....	25
Cuadro 4 Emisiones de CO ₂ e Producto de la Fermentación Entérica en Santa Lucía.....	35
Cuadro 5 Emisiones por CO ₂ e Producto de la categoría generadas por estiércol en Santa Lucía.....	36
Cuadro 6 Emisiones de CO ₂ e Producto de la Generación Metano en Santa Lucía en CO ₂ e	37
Cuadro 7 Emisiones indirectas y directas en Santa Lucía	38
Cuadro 8 Emisiones por fermentación entérica en Platanares	39
Cuadro 9 Emisiones de CO ₂ e Producto del estiércol en Platanares	40
Cuadro 10 Emisiones de CO ₂ e Producto del metano en Platanares.....	41
Cuadro 11 Emisiones de CO ₂ e Producto de la fermentación entérica en La Lima	42
Cuadro 12 Emisiones de CO ₂ e Producto del estiércol en La Lima	43
Cuadro 13 Emisiones de CO ₂ e Producto del Metano en La Lima	43
Cuadro 14 Cuadro comparativo de los GEI generadas en las tres secciones de la Hacienda	44
Cuadro 15 Actividades a realizar en las tres secciones: Santa Lucía, Platanares y La Lima	50

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de ubicación de la Hacienda Flores, Victoria, Yoro. 2025.....	12
Figura 2 Mapa de sector Santa Lucía	20
Figura 3 Mapa de ubicación de la sección de Platanares de la Hacienda Flores.....	27
Figura 4 Mapa del sector La Lima	31

Índice de Anexos

Anexo A Encuesta para la recolección de datos	57
Anexo B Ecuaciones en base al capítulo 10 del IPCC	58
Anexo C Cuadro específico de las Actividades a realizar en los sectores de la hacienda	60

Resumen

La ganadería en Honduras, además de ser un pilar para la seguridad alimentaria y aportar el 13% del PIB agropecuario, es una fuente significativa de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), especialmente metano proveniente de la fermentación entérica y el manejo del estiércol. El presente estudio tuvo como objetivo cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la Hacienda Flores, ubicada en Victoria, Yoro, Honduras, y proponer estrategias de mitigación adaptadas a cada unidad productiva evaluada. Se aplicó un sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) adaptado al sector ganadero para estimar las emisiones de CO₂ equivalente (CO₂e), en tres unidades productivas: Santa Lucía (17.22 ha), Platanares (32.9 ha) y La Lima (17.43 ha), y Se incluyó el registro de las variables de carga animal, sistema de manejo, uso del suelo, alimentación y cobertura arbórea. Los resultados evidenciaron que La Lima presentó las mayores emisiones con 19.81 t CO₂e/año, asociadas principalmente a la fermentación entérica del hato de engorde, mientras que las diferencias entre unidades se vincularon a la densidad animal, el tipo de manejo y la cobertura arbórea. A partir de este diagnóstico, se priorizaron las fuentes de mayor contribución y se seleccionaron medidas de mitigación según su viabilidad técnica y potencial de reducción, agrupadas en cuatro categorías: estrategias nutricionales, sistemas silvopastoriles, manejo de estiércol mediante vermicompostaje y uso eficiente de recursos. La implementación de estas acciones permitirá reducir significativamente las emisiones, incrementar la sostenibilidad del sistema productivo y constituir un modelo replicable para otras explotaciones ganaderas en contextos similares.

Palabras clave: CO₂ equivalente, emisión de gases de efecto invernadero, estiércol, ganadería bovina

Abstract

Livestock production in Honduras, in addition to being a pillar for food security and contributing 13% of the agricultural GDP, constitutes a significant source of greenhouse gas (GHG) emissions, particularly methane originating from enteric fermentation and manure management. The present study aimed to quantify greenhouse gas (GHG) emissions at Hacienda Flores, located in Victoria, Yoro, Honduras, and to propose mitigation strategies adapted to each evaluated production unit. A Monitoring, Reporting, and Verification (MRV) system adapted to the livestock sector was applied to estimate carbon dioxide equivalent (CO₂e) emissions in three production units: Santa Lucía (17.22 ha), Platanares (32.9 ha), and La Lima (17.43 ha). The assessment included the recording of variables such as stocking rate, management system, land use, feeding regime, and tree cover. The results showed that La Lima presented the highest emissions, with 19.81 t CO₂e/year, mainly associated with enteric fermentation from the fattening herd, while differences among units were linked to animal density, type of management, and tree cover. Based on this diagnosis, the sources with the greatest contribution were prioritized, and mitigation measures were selected according to their technical feasibility and potential for reduction, grouped into four categories: nutritional strategies, silvopastoral systems, manure management through vermicomposting, and efficient resource utilization. The implementation of these actions will allow a significant reduction in emissions, increase the sustainability of the production system, and constitute a replicable model for other livestock operations in similar contexts.

Keywords: CO₂ equivalent, cattle farming, greenhouse gas emissions, manure

Introducción

El cambio climático es uno de los retos ambientales y socioeconómicos más relevantes de la actualidad, y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) resulta crucial para mitigarlo. Entre las actividades humanas, el sector agropecuario contribuye de forma significativa a estas emisiones, destacando la ganadería por su papel dual: es un sistema productivo clave para la seguridad alimentaria de más de 1 billón de personas en el mundo (Acosta y Díaz, 2014), pero también es una fuente importante de GEI, principalmente metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) (Gerber et al., 2013; Hristov et al., 2013).

El metano presenta un potencial de calentamiento global 25 veces mayor que el dióxido de carbono (CO₂) en un horizonte de 100 años (IPCC, 2013) y representa aproximadamente el 75% de las emisiones ganaderas en términos de CO₂ equivalente (CO₂e) (Herrera et al., 2012; Hristov et al., 2013). Estos gases provienen principalmente de la fermentación entérica y del manejo del estiércol, lo que convierte a la ganadería en un sector prioritario para las acciones de mitigación (Secretaría de agricultura y ganadería [SAG], 2023a). La actividad pecuaria se concentra en la región oriental (Olancho), la región meridional (Choluteca) y la costa atlántica (Yoro, Atlántida y Colón). La región Nor-Oriental es la más apta para la producción de ganado, con una densidad de 1.67 cabezas por hectárea de pasto y un 96% de pastos mejorados (Crespo, 2008; Ramírez, 2009). No obstante, el sector enfrenta retos como el manejo extensivo, la degradación de pastizales y la deforestación, los cuales contribuyen a que la ganadería sea responsable de alrededor del 9% de las emisiones nacionales de GEI (SAG, 2023b).

Frente a esta realidad, el sistema de Monitoreo, Reporte y Verificación (MRV) emerge como una herramienta fundamental para inventariar y sistematizar las emisiones del sector ganadero, aportando datos precisos y verificables que facilitan la toma de decisiones y la planificación de medidas (Henry y Eckard, 2009). El IPCC plantea tres niveles metodológicos para estimar emisiones: Nivel 1 (factores de emisión por defecto), Nivel 2 (factores y datos específicos nacionales o regionales)

y Nivel 3 (modelos avanzados y mediciones directas). Aunque el MRV no es en sí mismo una medida de mitigación, provee la base técnica para planificar estrategias efectivas. Asimismo, su fortalecimiento es crucial para mejorar la precisión de los inventarios nacionales y demostrar de forma transparente los esfuerzos de mitigación (Ibrahim, 2001).

Además de su valor técnico, la implementación de MRV y prácticas sostenibles puede abrir acceso a beneficios económicos y a mecanismos de mercado, como los mercados de carbono, y apoyar la planificación estratégica y la medición del impacto de políticas públicas (Benaouda et al., 2017; Castillo García, 2023). Estos elementos hacen que la medición y la validación de las emisiones en fincas piloto sean relevantes tanto para actores privados como para autoridades que buscan cumplir compromisos climáticos y mejorar la trazabilidad ambiental del sector.

En este contexto, la Hacienda Flores, ubicada en Victoria, Yoro, se presenta como un caso de estudio representativo por la diversidad de sus unidades productivas y por su potencial para aplicar un MRV operacional bajo condiciones reales. La presente investigación tiene como objetivo general aplicar un sistema MRV para cuantificar las emisiones de CO₂e en la Hacienda Flores y, con base en los resultados, diseñar estrategias de mitigación adaptadas a las particularidades de cada sección. Se establecen como objetivos específicos: i) caracterizar de forma integral la Hacienda Flores, considerando los diferentes manejos productivos implementados en tres secciones representativas de la finca, ii) cuantificar las emisiones de Gases de efecto invernadero utilizando un sistema MRV; y, iii) formular una estrategia de mitigación orientada a la reducción de las emisiones generadas por las actividades ganaderas, priorizando las fuentes de mayor contribución identificadas.

Metodología

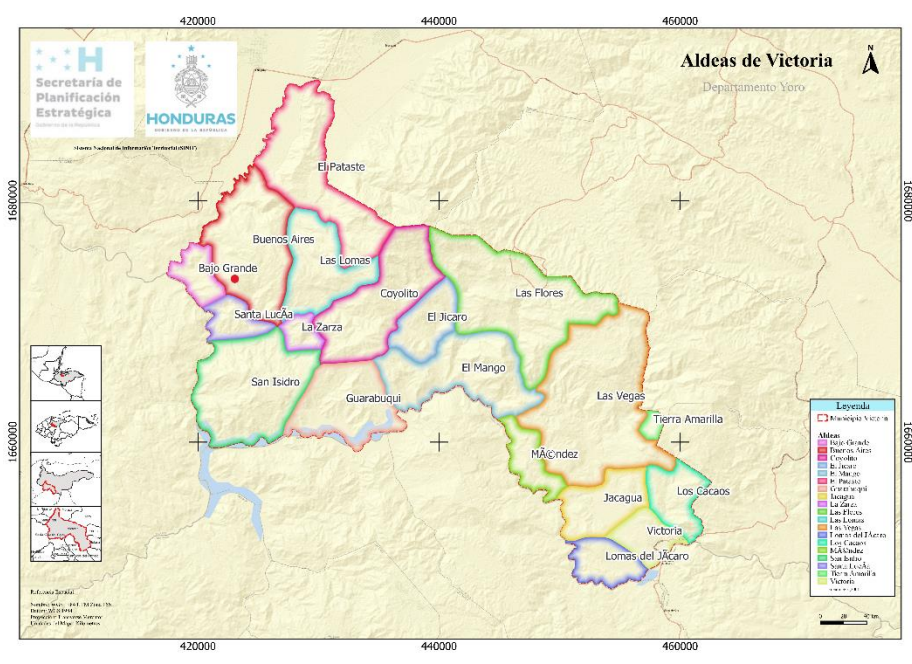
Ubicación del Estudio

El estudio se desarrolló en la Hacienda Flores, una finca ganadera ubicada en el municipio de Victoria, departamento de Yoro, Honduras. Esta zona presenta características climáticas propias del trópico húmedo, encontrándose a una altitud promedio de 500 msnm.

La región donde se sitúa la hacienda experimenta condiciones ambientales que resultan determinantes para las actividades productivas que allí se realizan. Con precipitaciones anuales que oscilan entre 1,500 y 2,000 mm y una temperatura promedio de 28 °C, estos factores climáticos ejercen una influencia directa tanto en los procesos biológicos naturales como en el rendimiento de las actividades agrícolas y ganaderas que caracterizan a esta propiedad.

Figura 1

Mapa de ubicación de la Hacienda Flores, Victoria, Yoro. 2025



Nota. Tomado de (Sistema Nacional De Información Territorial De Honduras, 2024)

Caracterización de los Sectores de la Hacienda

La caracterización de la Hacienda Flores se desarrolló mediante el análisis integral de tres unidades productivas denominadas Santa Lucía, Platanares y La Lima, evaluando sistemáticamente sus características físicas y sistemas de manejo ganadero específicos. El proceso metodológico incluyó el registro de variables fundamentales como la superficie destinada a pastoreo, la composición del hato por categorías productivas, el peso promedio de los animales y la identificación de especies arbóreas y forrajeras presentes en cada unidad. La clasificación del inventario ganadero se estableció según criterios de estadio productivo y sexo, definiendo las siguientes categorías: vacas en producción, vacas secas, novillas mayores a 2 años, novillas de 1 a 2 años, terneras, toros, machos mayores a 2 años, machos de 1 a 2 años y terneros.

La recolección de información complementaria sobre superficie de pasturas y composición de especies arbóreas se realizó a través de recorridos sistemáticos de campo y observación directa y consulta de registros históricos de la finca hacia los empleados y dueños de la finca. Las unidades de medida estandarizadas empleadas fueron hectáreas (ha) para cuantificar superficies y kilogramos (kg) para determinar el peso animal. La selección estratégica de estas variables se fundamentó en su relevancia directa para la estimación precisa de emisiones de gases de efecto invernadero, considerando que factores como el peso vivo, la categoría animal y la disponibilidad de forraje constituyen determinantes clave en el consumo de materia seca, la digestibilidad de la dieta, la generación de metano entérico y las prácticas de manejo del estiércol. En el Cuadro 1, se presenta un resumen de las características de cada sector de la hacienda.

Cuadro 1

Características de cada sector de la hacienda

Sector	Área (ha)	Sistema de producción o características
Santa Lucía	17.22	Sistema de producción semiestabulado que incluye infraestructura adecuada, como corrales, comederos, bebederos y áreas específicas para la carga y descarga de ganado. Maneja una población de 150 cabezas de ganado e incorpora prácticas sostenibles, destacando la reforestación como medida para mitigar impactos ambientales.

Sector	Área (ha)	Sistema de producción o características
Platanares	32.9	Sistema de pastoreo que dispone de corrales, bebederos, saladeros y una zona destinada para la carga y descarga de ganado. Maneja un hato de 80 cabezas y cuenta con una laguna para la recolección de agua, así como un área de bosque que contribuye a la conservación ambiental. Implementa técnicas sostenibles, incluyendo la reforestación, para reducir el impacto de las actividades ganaderas.
La Lima	17.43	Sistema de pastoreo que cuenta con bebederos, saladeros, corrales y un área de bosque destinada a la conservación ambiental. Maneja 40 cabezas de ganado e implementa técnicas sostenibles, destacando la reforestación como estrategia para mitigar el impacto de las actividades ganaderas.

Caracterización del Hato Ganadero

Cada sector de la Hacienda Flores cuenta con ganado bovino distribuido en distintas fases de su ciclo productivo, que van desde vacas reproductoras hasta terneros en etapa de crecimiento, incluyendo novillas y machos jóvenes en desarrollo. Esta clasificación en categorías etarias y funcionales no solo responde a criterios espaciales, sino que constituye la base para un manejo integral y diferenciado de los animales.

La caracterización del hato se realizó organizando los animales en grupos según su edad, sexo y estado reproductivo, con categorías como: vacas en producción, vacas secas, novillas mayores a 2 años, novillas de 1 a 2 años, terneras, toros, machos mayores a 2 años, machos de 1 a 2 años y terneros. Para cada grupo, se realizó un pesaje individual utilizando báscula ganadera, con el fin de obtener el peso vivo promedio de cada categoría.

Este procedimiento permitió obtener datos relevantes para la planificación del manejo nutricional y sanitario, adaptando los protocolos a las necesidades específicas de cada grupo. Además, la clasificación facilita la organización del control sanitario, permitiendo aplicar tratamientos preventivos o curativos adecuados a las características fisiológicas de cada categoría.

Caracterización de la Dieta

Se registraron los datos relativos a la dieta suplementaria proporcionada al ganado en la finca Santa Lucía, documentando el tipo y cantidad de ingredientes empleados, la proporción de cada componente dentro de la mezcla, el porcentaje de materia seca (MS) correspondiente a cada insumo

y la contribución de MS que aporta cada elemento. Asimismo, se documentó el consumo diario de materia seca por animal y el porcentaje de consumo de MS en relación con el peso vivo de los animales.

Árboles en Potreros

La presencia de árboles dentro de los terrenos de pastoreo ya sea de manera natural o a través de plantaciones, con el objetivo de mejorar la eficiencia y sostenibilidad del sistema ganadero. Estos elementos arbóreos cumplen diversas funciones dentro del ecosistema productivo, proporcionando beneficios tanto para los animales como para el entorno y la eficiencia del sistema en general. Con la colaboración del propietario de la finca, se llevó a cabo la identificación de las especies arbóreas presentes en los potreros, junto con la determinación de la superficie aproximada (expresada en hectáreas) en la cual se encuentran distribuidas dentro de cada sección de la hacienda.

Esta caracterización de la cobertura arbórea permite comprender mejor la contribución de estos componentes al equilibrio del agroecosistema, facilitando la evaluación de su impacto en aspectos como el bienestar animal, la conservación del suelo, la regulación del microclima y la captura de carbono dentro del sistema silvopastoril.

Cuantificación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero Mediante Sistema MRV

Para garantizar la precisión y confiabilidad en el cálculo de las emisiones de GEI en la Hacienda se empleó la plataforma de agricultura familiar y cambio climático, sistema que a partir de 2024 incorporó un submódulo especializado de MRV para ganadería. Esta herramienta tecnológica representa un avance significativo en la medición de impactos ambientales a nivel de finca, permitiendo el registro sistemático y estandarizado de los datos provenientes de los tres sectores productivos de la Hacienda. La aplicación fue desarrollada por MAF-Ganadería-Hn, quienes además brindaron acompañamiento técnico para su implementación, capacitación en el uso adecuado del sistema y apoyo en la interpretación de los resultados generados, fortaleciendo así la capacidad local para la gestión climáticamente inteligente de la producción ganadera.

El proceso de recolección de información siguió rigurosamente los parámetros y variables establecidas conforme al *Formulario estándar para recolección de información en campo de fincas con mediciones MRV* (Anexo A), asegurando la consistencia y comparabilidad de los datos obtenidos. Este proceso tuvo una duración de 1 semana e incluyó entrevistas directas tanto al dueño de la hacienda como a los trabajadores, lo que permitió obtener información precisa y contextualizada sobre las prácticas productivas y de manejo, esto esta mostrado en el Cuadro 2. La plataforma integra algoritmos de procesamiento automático que analizan toda la información recopilada, aplicando los factores de emisión específicos para cada tipo de actividad ganadera y las metodologías de cálculo validadas por organismos internacionales reconocidos.

Cuadro 2

Descripción de las secciones del Formulario estándar para recolección de información en campo de fincas con mediciones MRV

Categoría	Descripción
Información de la finca	Información personal sobre el productor, nombre de la finca, fecha y periodo de evaluación. Además de dar el nombre del encargado de la encuesta y un número de identificación.
Composición del hato	Cantidad, peso promedio, rendimiento (kg/leche/día) y cantidad de alimentación diaria (concentrado/animal/día) para cada categorización del hato en la finca (terneras, novillos, vacas en producción, etc).
Pastos y forrajes	Área total de la finca, del pastoreo, con pastos de corte, de cobertura de bosque, en hectáreas. Además de incluir preguntas relevantes, como tipo de pastos, fertilización etc.

La plataforma no solo proporciona datos cuantitativos precisos, sino que también genera reportes automatizados que incluyen análisis de tendencias, identificación de principales fuentes de emisión y recomendaciones preliminares para la reducción del impacto ambiental. Las ecuaciones empleadas por la plataforma están alineadas con las metodologías establecidas en el Capítulo 10 del IPCC (2006), correspondiente al sector de Agricultura, Silvicultura y Otros Usos de la Tierra (AFOLU,

por sus siglas en inglés) (Anexo B). Este proceso integral de medición y análisis facilitó significativamente la toma de decisiones fundamentada en evidencia científica, proporcionando una base sólida para el desarrollo e implementación de estrategias de gestión ambiental sostenible en la propiedad.

Los resultados se expresan en términos de CO₂-e, unidad de medida que permite cuantificar y comparar el potencial de calentamiento global de diferentes gases de efecto invernadero. Esta estandarización facilita la interpretación de los datos y su posterior uso en la formulación de estrategias de mitigación (International Rice Research Institute [IRRI], 2014; Steininger et al., 2014).

Formulación de la Estrategia de Mitigación en los Tres Sectores de la Hacienda

Para la revisión bibliográfica se consultaron diversas fuentes académicas, incluyendo las bases de datos “Scopus” y “SpringerLink”, editoriales especializadas como MDPI y Elsevier, y el motor de búsqueda “Google Scholar”. La búsqueda se estructuró en dos etapas: primero se realizó una exploración amplia con términos como *bajas emisiones metano*, *bajas emisiones en ganado de carne* y *reducción en fermentación entérica* para identificar los tratamientos más efectivos reportados en la literatura. Posteriormente se efectuó una búsqueda más específica enfocada en los tratamientos prometedores, utilizando términos como *vermicompostaje*, *sistemas silvopastoriles en pastoreo intensivo* y *reformulación de dietas para bajas emisiones*.

Durante el proceso de selección se identificaron inicialmente 20 documentos relevantes, que incluyeron tesis, artículos científicos y publicaciones especializadas. De estos, se descartaron 13 por no cumplir con los criterios de relevancia temática, rigor metodológico o aplicabilidad al contexto de estudio. La propuesta de mitigación se basó en una revisión exhaustiva de fuentes reconocidas, incorporando las directrices del IPCC (Capítulo 10 AFOLU), las experiencias de NAMA (Acciones Nacionalmente Apropriadas de Mitigación) en países tropicales como Costa Rica, Colombia y México, así como publicaciones de la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura

(FAO), Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza (CATIE) y Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) sobre sistemas silvopastoriles y nutrición bovina en zonas tropicales.

Para desarrollar las estrategias de mitigación se integraron los resultados de cuantificación obtenidos en Hacienda Flores con las observaciones de campo, lo que permitió identificar prácticas compatibles con el manejo actual. Se clasificaron las estrategias según las fuentes de emisión: fermentación entérica, manejo de estiércol y emisiones indirectas. La priorización se realizó considerando el potencial de reducción de emisiones, la factibilidad técnica y los beneficios sociales y ambientales. Con base en el análisis cuantitativo, se identificó el sector con mayores emisiones para enfocar allí las propuestas principales. Para cada estrategia se definió la medida específica, su respaldo científico, los requerimientos de implementación, la reducción estimada y el cronograma correspondiente.

Esta propuesta, fundamentada en evidencia científica y adaptada al contexto local, busca equilibrar la reducción de emisiones con la productividad y sostenibilidad económica del sistema, facilitando su aplicación y posible replicación en sistemas ganaderos similares.

Resultados

Caracterización integral de la Hacienda Flores

Caracterización del Sector Santa Lucía

La Hacienda Santa Lucía abarca una extensión de 17.22 ha y funciona bajo un sistema de producción semiestabulado que combina de manera estratégica el manejo en instalaciones controladas con el pastoreo en áreas abiertas. La parte de alimento consumida en los corrales es racionada y representa una mezcla de materia que poseen las condiciones adecuadas para que los animales obtengan el desarrollo óptimo (Figura 2). La parte de alimento que consumen en los pastizales no se controla.

El sistema de alimentación implementado en esta unidad productiva presenta características diferenciadas según el área donde se encuentren los animales. Durante los períodos de estabulación, el ganado recibe raciones controladas compuestas por una mezcla balanceada de materias primas que han sido seleccionadas para proporcionar las condiciones nutricionales óptimas que favorezcan el desarrollo adecuado de los animales. Por el contrario, durante las fases de pastoreo, el consumo de forraje no está sujeto a control directo, permitiendo que los animales seleccionen libremente los recursos disponibles en los pastizales.

La infraestructura de la finca ha sido diseñada para facilitar el manejo eficiente del hato ganadero e incluye instalaciones especializadas que optimizan las operaciones diarias. Entre estas se encuentran corrales funcionales para el encierro seguro de los animales, comederos estratégicamente ubicados para la distribución controlada de alimento, bebederos adecuadamente distribuidos que garantizan el acceso constante al agua, y un área específicamente acondicionada para las actividades de carga y descarga de ganado. Complementariamente, la finca cuenta con una laguna de almacenamiento de agua que permite optimizar el aprovechamiento del recurso hídrico a lo largo de todo el ciclo anual, asegurando el suministro durante períodos de menor disponibilidad.

La operación de Santa Lucía requiere una fuerza laboral de ocho personas empleadas de forma permanente, cifra que se incrementa con la contratación de personal temporal durante aproximadamente 15 días al año para atender actividades estacionales específicas. Esta estructura de personal refleja una operación de intensidad media que permite mantener un manejo adecuado del sistema productivo.

Figura 2

Mapa de sector Santa Lucía



Caracterización del Hato Ganadero

El hato ganadero de Santa Lucía comprende un total de 199 cabezas de ganado bovino, organizadas en categorías productivas que facilitan la implementación de estrategias de manejo diferenciadas según las necesidades específicas de cada grupo etario y funcional. La composición del rebaño incluye 25 vacas en etapa productiva, de las cuales cinco se encuentran en período de lactancia activa y 20 en fase de producción sin lactancia, complementadas por tres vacas secas en período de descanso reproductivo. El componente destinado al engorde está representado por 80 vacas, constituyendo el grupo más numeroso dentro del sistema productivo.

La estructura poblacional se completa con animales en diferentes etapas de desarrollo: cinco novillas de 1 a 2 años en proceso de crecimiento, 30 terneras hembras, y 49 machos distribuidos en tres categorías según su edad: tres toros reproductores, siete machos mayores de 2 años, seis machos entre 1 y 2 años, y 40 terneros. Esta diversificación por categorías permite optimizar el aprovechamiento de los recursos disponibles y facilita la planificación de las actividades productivas a mediano y largo plazo.

La actividad lechera de la finca se desarrolla mediante ordeño manual con una frecuencia de una vez por día, presentando marcadas variaciones estacionales en su rendimiento. Durante la época seca, la producción alcanza entre HNL 100 y 150 diarios, ordeñando un total de 22 vacas, mientras que en la época lluviosa la producción disminuye considerablemente a un rango de HNL 35 a 40 diarios, con apenas cinco vacas en ordeño. Esta fluctuación estacional refleja la influencia directa de las condiciones climáticas sobre la disponibilidad de forraje y el comportamiento reproductivo del hato.

El manejo de los desechos orgánicos generados por el ganado se realiza a través de un sistema de compostaje en pila seca al aire libre, proceso que permite la transformación de los residuos en abono orgánico de calidad. La producción anual de compost alcanza aproximadamente 200 qq, material que se aplica estratégicamente durante la temporada de verano en un área equivalente a 3 mz, contribuyendo así al mejoramiento de la fertilidad del suelo y al cierre de ciclos nutricionales dentro del sistema productivo.

Caracterización del Área de Pastura.

El área destinada a pastoreo en la Hacienda Santa Lucía presenta una configuración diversificada que combina diferentes tipos de pasturas y sistemas de manejo forrajero, abarcando un total de 8.69 ha distribuidas estratégicamente según las características topográficas y edáficas del terreno.

Las pasturas naturales ocupan la mayor extensión con 3 ha establecidas con pasto Mombaza (*Megathyrsus maximus*), una gramínea tropical de alta productividad que se desarrolla en áreas desprovistas de cobertura arbórea. Esta especie se caracteriza por su adaptabilidad a diferentes condiciones de suelo y su capacidad de producir forraje de buena calidad nutricional durante gran parte del año.

El componente de pasturas mejoradas sin árboles comprende 1 ha establecida con *Brachiaria* (*Brachiaria decumbens* STAPF), una gramínea reconocida por su resistencia al pisoteo y su capacidad de rebrote después del pastoreo. Adicionalmente, se cuenta con 0.69 ha de Cuba 22 (*Pennisetum purpureum* x *Pennisetum glaucum*), un híbrido de corte que representa una alternativa forrajera de alto valor nutricional y elevada producción de biomasa.

Los sistemas silvopastoriles están representados por 2 ha de pasturas mejoradas con árboles, establecidas con pasto Cayman (*Brachiaria* Híbrido CV), donde la integración de componentes arbóreos proporciona beneficios adicionales como sombra para el ganado, mejoramiento del microclima, y contribución a la sostenibilidad del sistema productivo.

Complementariamente, la finca destina 2 ha al establecimiento de bancos forrajeros de gramíneas, específicamente maíz y sorgo, cultivos que funcionan como reservas estratégicas de forraje para períodos de escasez o como suplemento nutricional durante épocas críticas del año. Esta diversificación forrajera permite optimizar el uso del recurso tierra y garantizar la disponibilidad de alimento para el ganado durante todo el ciclo productivo.

Árboles en el Área de Pastoreo y Bosques.

La Hacienda Santa Lucía ha desarrollado una estrategia integral de manejo forestal que combina objetivos productivos, ambientales y de conservación, integrando de manera armónica diferentes tipos de cobertura vegetal dentro del sistema ganadero. Esta aproximación multifuncional abarca un total de 13.39 ha distribuidas en diversos componentes forestales que contribuyen significativamente a la sostenibilidad del sistema productivo.

Las plantaciones forestales constituyen el componente más extenso con 7 ha destinadas al establecimiento de especies maderables y frutales de alto valor económico y ecológico. Entre las especies maderables se destacan la caoba (*Swietenia macrophylla*), teca (*Tectona grandis*), acacia amarilla (*Cassia siamea*) y cedro (*Cedrela odorata*), mientras que el componente frutal incluye aguacate (*Persea americana*), mango (*Mangifera indica*), cítricos como limón (*Citrus limon*) y naranja (*Citrus sinensis*), zapote (*Pouteria sapota*), y pimienta (*Pimenta dioica*). Esta diversificación de especies proporciona múltiples beneficios ecosistémicos, incluyendo la generación de sombra natural para el ganado, el mejoramiento del microclima local, la captura y almacenamiento de carbono atmosférico, y la diversificación de ingresos a través de la producción frutal y maderera.

La conservación de ecosistemas naturales se manifiesta a través de 5 ha de bosques secundarios en proceso de regeneración, donde predominan especies nativas como la caoba y diversas especies de guamiles (*Inga* spp.). Estos bosques desempeñan funciones ecológicas fundamentales al incrementar la biodiversidad local, proporcionar hábitat y refugio para la fauna silvestre, y contribuir a la conectividad ecológica del paisaje rural.

La protección de los recursos hídricos se garantiza mediante 1.39 ha de bosque ribereño establecido a lo largo de los cuerpos de agua presentes en la finca. Esta cobertura vegetal especializada incluye especies adaptadas a condiciones de humedad como sauces (*Salix* spp.), guayabas (*Psidium guajava*) y negrito (*Simarouba glauca*), las cuales cumplen funciones críticas en la protección de las fuentes hídricas, el control de la erosión de las riberas, la filtración de sedimentos y nutrientes, y el mantenimiento de la calidad del agua.

El sistema se complementa con la implementación de cercas vivas utilizando especies maderables como el encino (*Quercus* spp.), las cuales cumplen una doble función al servir como delimitación de potreros y simultáneamente proporcionar beneficios ecológicos adicionales como corredores biológicos, refugio para fauna menor, y contribución a la captura de carbono. Esta

estrategia de manejo forestal integral demuestra el compromiso de la finca con la producción sostenible y la conservación de los recursos naturales.

Caracterización de la Dieta.

El programa nutricional implementado en la Hacienda Santa Lucía se basa en una estrategia de alimentación balanceada que combina de manera estratégica concentrados comerciales con forrajes producidos en la finca, diseñada específicamente para satisfacer los requerimientos nutricionales del ganado de carne en sus diferentes etapas productivas.

La ración diaria total suministrada al hato alcanza 155 lb por grupo animal, de las cuales 113.25 lb corresponden a materia seca (MS), lo que representa aproximadamente el 73% de la ración total. Esta proporción de materia seca indica una dieta con un contenido de humedad del 27%, característica típica de sistemas que integran forrajes frescos con concentrados procesados.

El diseño de la dieta está específicamente orientado hacia la producción de carne, estableciendo un consumo promedio de 25.17 lb de materia seca por animal por día (Cuadro 3). Esta cantidad de consumo ha sido calculada considerando el peso vivo promedio del hato, que se estima en 800 lb por animal, lo que resulta en un consumo de materia seca equivalente al 3.15% del peso vivo.

Este porcentaje de consumo se sitúa dentro del rango óptimo recomendado por los estándares nutricionales para bovinos de carne en sistemas de producción moderada, donde el consumo de materia seca típicamente oscila entre 2.5 y 3.5% del peso vivo, dependiendo de factores como la calidad del forraje, las condiciones climáticas, el estado fisiológico de los animales y los objetivos productivos. El nivel de consumo registrado en Santa Lucía sugiere que la dieta proporciona un aporte nutricional adecuado para mantener los parámetros productivos esperados sin generar desperdicio de recursos alimenticios.

La formulación de esta dieta balanceada permite optimizar la conversión alimenticia y garantizar el suministro de nutrientes esenciales, contribuyendo así al mantenimiento de la condición corporal adecuada y al logro de los objetivos productivos establecidos para el sistema ganadero.

Cuadro 3

Dieta brindada en el hato de Santa Lucía

Materia	Lb	Porcentaje (%)	MS%	MS Lb
Maíz				
Maseca	29.5	29.50		
Pericarpio	20	20.0		
Gallinaza	26.75	26.75		
Salvado de trigo	10	10.00		
Coquito	0	0.0		
Churro/grasa	5	5.00		
Sal	1	1.00		
Melaza	5	5.00		
Carbonato de calcio	1	1.00		
NNP Encapsulado	0.75	0.75		
Minerales/núcleo	1	1.00		
Total materia	100.00	100	88.9	88.9
Heno	10		86.0	8.60
Ensilaje	45		35.0	15.75
Total heno-ensilaje	55.00			24.35
Total	155			113.25
Consumo MS animal/día				25.17
Peso promedio Lb				800
CMS% PV				3.15

Caracterización del Sector Platanares

El sector Platanares abarca una extensión de 32.9 ha y opera bajo un sistema de producción fundamentado en el pastoreo extensivo, modalidad que permite el aprovechamiento eficiente de las áreas de pastoreo disponibles mediante el movimiento controlado del ganado a través de diferentes potreros. Esta aproximación productiva se adapta particularmente bien a las características topográficas y climáticas de la zona, optimizando el uso de los recursos naturales disponibles.

La infraestructura desarrollada en este sector responde a las necesidades básicas del manejo ganadero extensivo, incluyendo corrales funcionales para el manejo y concentración temporal del ganado, bebederos estratégicamente distribuidos que garantizan el acceso permanente al agua en las

diferentes áreas de pastoreo, y saladeros ubicados en puntos estratégicos para el suministro de minerales esenciales. Complementariamente, se ha habilitado una zona específicamente acondicionada para las operaciones de carga y descarga de ganado, facilitando las actividades de comercialización y traslado de animales.

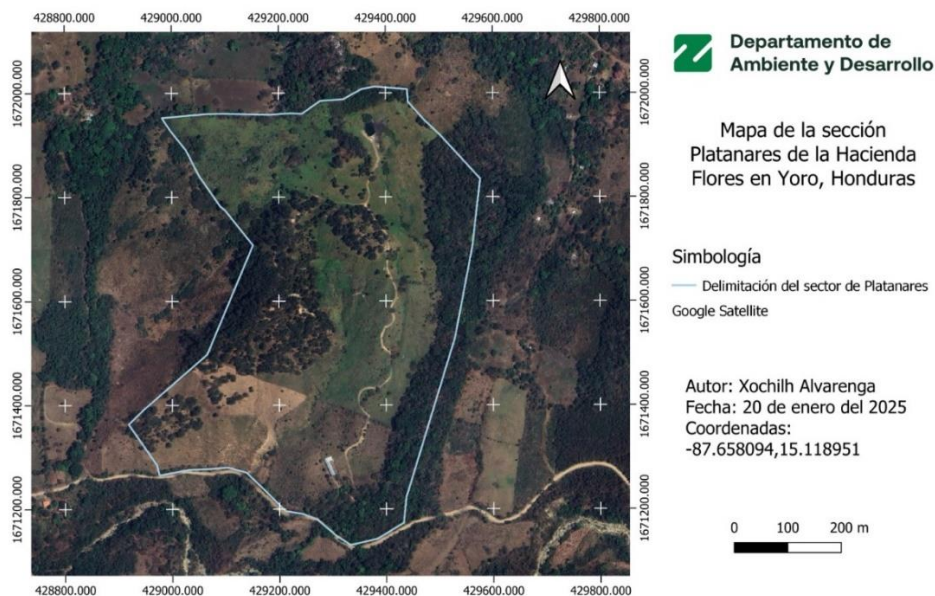
Una característica distintiva y estratégica de Platanares es la presencia de una laguna artificial que cumple funciones críticas dentro del sistema productivo. Esta infraestructura hídrica ha sido diseñada para la captación, almacenamiento y conservación de agua durante los períodos de mayor precipitación, constituyendo una reserva estratégica que fortalece significativamente la capacidad de la finca para mantener la operación durante las épocas secas. La disponibilidad de esta reserva hídrica no solo garantiza el suministro de agua para consumo animal, sino que también contribuye a la estabilidad del sistema productivo ante la variabilidad climática característica de la región.

La operación del sector Platanares se sustenta en una estructura laboral compacta pero eficiente, conformada por dos trabajadores permanentes que se encargan de las actividades diarias de manejo del ganado, mantenimiento de la infraestructura, y supervisión de las condiciones de los pastizales. Esta configuración de personal refleja la naturaleza menos intensiva del sistema extensivo, donde las actividades se concentran principalmente en el monitoreo y rotación del ganado entre potreros.

En la Figura 3 se presenta la distribución y las características territoriales correspondientes al sector Platanares, ilustrando la organización de sus componentes productivos y la integración de sus elementos dentro del sistema ganadero.

Figura 3

Mapa de ubicación de la sección de Platanares de la Hacienda Flores



Composición del Hato Ganadero.

El hato ganadero del sector Platanares presenta una composición homogénea y especializada, constituido exclusivamente por 55 machos bovinos en etapa de crecimiento, con edades comprendidas entre 1 y 2 años. Esta configuración refleja una estrategia productiva enfocada específicamente en el engorde de machos jóvenes, aprovechando su alta eficiencia de conversión alimenticia y su potencial de crecimiento durante esta fase crítica de desarrollo.

El peso promedio individual de los animales se estima en 500 lb, lo que representa un peso vivo total del hato de 17,500 lb. Este peso promedio es característico de animales en plena fase de crecimiento que han superado la etapa de destete y se encuentran en proceso de desarrollo hacia su peso de sacrificio óptimo. La uniformidad en el peso de los animales facilita considerablemente las actividades de manejo, ya que permite implementar estrategias nutricionales y sanitarias homogéneas para todo el grupo.

El sistema de manejo nutricional implementado en Platanares se fundamenta en un enfoque de engorde a pastoreo que aprovecha principalmente los recursos forrajeros disponibles en la finca. La base de la alimentación consiste en el pastoreo directo sobre las gramíneas establecidas en los diferentes potreros, complementado estratégicamente con bloques nutricionales que proporcionan nutrientes concentrados y energía adicional para optimizar las tasas de crecimiento.

La suplementación mineral se realiza mediante el suministro de sales minerales especializadas, las cuales corrigen las deficiencias nutricionales típicas de los suelos tropicales y garantizan el suministro de elementos esenciales como fósforo, calcio, magnesio, zinc y otros microelementos fundamentales para el crecimiento óptimo y la salud general de los animales. Esta estrategia de suplementación contribuye a maximizar el aprovechamiento de los forrajes consumidos y a mantener tasas de ganancia de peso adecuadas durante todo el período de engorde.

Caracterización del Área de Pastura.

El sector Platanares ha implementado un sistema silvopastoril que abarca 13.45 ha destinadas a pasturas mejoradas con integración arbórea, donde predomina el establecimiento de *Brachiaria decumbens* como especie forrajera principal. Esta gramínea tropical se caracteriza por su excelente adaptabilidad a diferentes condiciones edáficas, su resistencia al pisoteo del ganado, y su capacidad de mantener una producción forrajera consistente durante gran parte del año.

La configuración silvopastoril implementada en estas áreas representa un enfoque productivo innovador que trasciende el modelo tradicional de pastoreo, integrando de manera estratégica el componente arbóreo dentro del sistema ganadero. Esta integración proporciona múltiples beneficios sinérgicos que mejoran tanto la eficiencia productiva como la sostenibilidad ambiental de la operación.

Árboles en el Área de Pastoreo y Bosques.

El sector Platanares ha desarrollado una estrategia integral de conservación forestal que abarca un total de 6 ha distribuidas en dos componentes complementarios, cada uno con objetivos

específicos que contribuyen tanto a la diversificación productiva como a la preservación de los servicios ecosistémicos dentro del sistema ganadero.

Las plantaciones forestales constituyen el componente más extenso con 4 ha establecidas mediante el cultivo planificado de especies nativas de alto valor económico y ecológico. Entre estas especies se destacan el encino (*Quercus* spp.), reconocido por su madera dura y su longevidad; el nance (*Byrsonima crassifolia*), que además de proporcionar madera de calidad media ofrece frutos comestibles; el roble (*Tabebuia rosea*), apreciado por su madera de excelente calidad y su rápido crecimiento; y la caoba (*Swietenia macrophylla*), considerada una de las maderas tropicales más valiosas del mercado internacional.

Estas plantaciones cumplen una función dual dentro del sistema productivo, funcionando simultáneamente como una fuente potencial de ingresos a largo plazo a través del aprovechamiento maderero sostenible, y como hábitat diversificado que favorece el establecimiento y mantenimiento de la biodiversidad local. La presencia de estas especies arbóreas proporciona refugio, alimento y sitios de anidación para diversas especies de fauna silvestre, contribuyendo a la conservación de la conectividad ecológica del paisaje rural.

El componente de bosque secundario abarca 2 ha de vegetación en proceso de regeneración natural, donde predominan especies maderables que se han establecido espontáneamente tras el abandono de actividades agrícolas previas. Estos bosques en regeneración desempeñan funciones ecológicas críticas para el mantenimiento del equilibrio ambiental del entorno, actuando como reguladores del microclima local y contribuyendo a la estabilidad de los procesos hidrológicos.

Los servicios ambientales proporcionados por ambos componentes forestales incluyen la captura y almacenamiento de carbono atmosférico, contribuyendo a la mitigación del cambio climático; la protección y mejoramiento de la estructura del suelo mediante la reducción de procesos erosivos y el enriquecimiento con materia orgánica; la regulación del ciclo hidrológico a través de la

intercepción de precipitaciones y la recarga de acuíferos; y el mantenimiento de la calidad del aire mediante la filtración de partículas y la producción de oxígeno.

Caracterización del Sector La Lima

La Hacienda La Lima abarca una superficie de 17.43 ha y ha adoptado un modelo productivo basado en el sistema de pastoreo extensivo, compartiendo características operacionales similares con el sector Platanares, pero adaptándose a las particularidades específicas de su territorio y recursos disponibles. Esta modalidad de manejo permite el aprovechamiento óptimo del área disponible mediante la rotación controlada del ganado entre diferentes potreros, maximizando la utilización de los recursos forrajeros naturales.

La infraestructura desarrollada en La Lima responde a los requerimientos fundamentales del manejo ganadero extensivo, incorporando elementos esenciales que facilitan las operaciones diarias y garantizan el bienestar animal. El sistema incluye corrales funcionalmente diseñados para la concentración y manejo seguro del ganado durante actividades específicas como tratamientos sanitarios, pesajes o selección de animales. Los bebederos se encuentran estratégicamente distribuidos a lo largo del área de pastoreo, asegurando el acceso permanente al agua potable en todos los sectores donde se moviliza el ganado.

Los saladeros constituyen un componente crítico de la infraestructura, ubicados en puntos de fácil acceso para los animales y protegidos de las condiciones climáticas adversas. Estas instalaciones permiten el suministro controlado y continuo de sales minerales, garantizando que el ganado pueda acceder libremente a estos suplementos esenciales según sus necesidades fisiológicas.

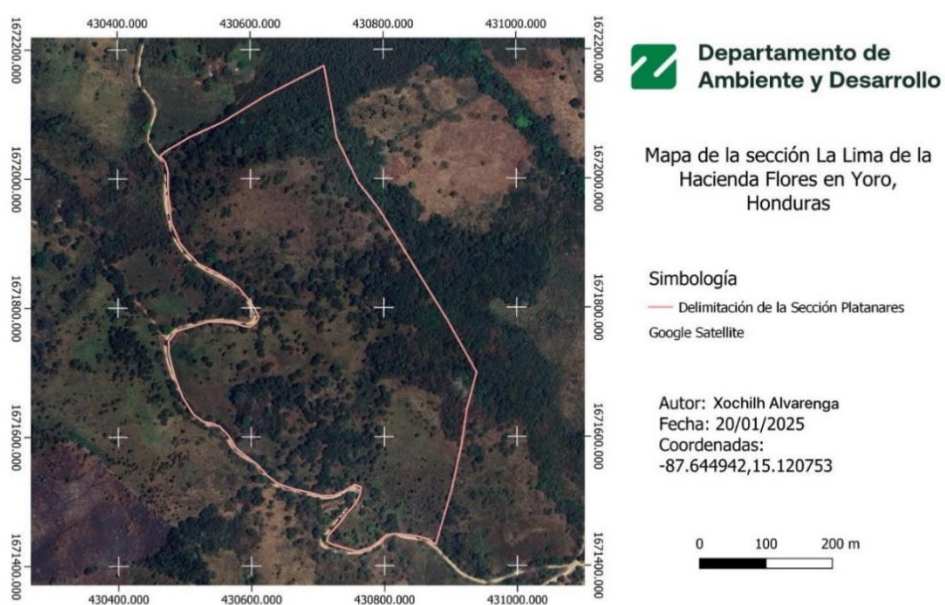
La estructura organizacional del sector se sustenta en una fuerza laboral permanente conformada por dos trabajadores especializados en las actividades de manejo extensivo. Este personal se encarga de la supervisión diaria del hato, el mantenimiento de la infraestructura, la rotación de potreros, y la implementación de las prácticas de manejo establecidas. La configuración de personal

refleja la naturaleza del sistema extensivo, donde las actividades se enfocan principalmente en el monitoreo y la supervisión general del ganado.

La Figura 4 presenta la configuración territorial del sector La Lima, ilustrando la distribución espacial de sus componentes productivos y la organización de sus elementos dentro del sistema ganadero integral.

Figura 4

Mapa del sector La Lima



Caracterización del Hato Ganadero del Sector La Lima.

El hato ganadero del sector La Lima presenta una composición altamente especializada y estratégicamente enfocada, constituido en su totalidad por 70 machos bovinos en etapa de crecimiento activo, con edades comprendidas entre 1 y 2 años. Esta configuración homogénea refleja una decisión productiva deliberada que aprovecha las características fisiológicas específicas de esta categoría animal, la cual se caracteriza por presentar las mayores tasas de ganancia de peso y la más eficiente conversión alimenticia dentro del ciclo productivo bovino.

El peso promedio individual de 500 lb por animal resulta en un peso vivo total del hato de 35,000 lb, cifra que representa el doble de la carga animal presente en el sector Platanares, evidenciando una mayor intensidad de uso del recurso forrajero disponible. Este peso promedio es característico de animales que han superado exitosamente la fase crítica del destete y se encuentran en pleno proceso de desarrollo hacia su peso objetivo de comercialización.

La concentración exclusiva en la categoría de engorde sugiere una estrategia productiva claramente orientada hacia la maximización de la ganancia de peso mediante el aprovechamiento intensivo de los recursos forrajeros disponibles en el sistema de pastoreo. Esta especialización permite implementar prácticas de manejo uniforme para todo el hato, facilitando la planificación nutricional, el seguimiento del desarrollo de los animales, y la toma de decisiones relacionadas con la comercialización.

El enfoque en machos jóvenes en pastoreo extensivo representa una estrategia económicamente viable que capitaliza la capacidad natural de crecimiento de estos animales durante su fase de mayor eficiencia biológica. Durante este período, los machos pueden convertir eficientemente el forraje consumido en ganancia de peso, aprovechando al máximo los recursos pastoriles disponibles y minimizando los costos de producción asociados con suplementación intensiva.

Esta concentración en una sola categoría productiva también simplifica significativamente las actividades de manejo diario, ya que todos los animales presentan requerimientos nutricionales y sanitarios similares, permitiendo implementar protocolos estandarizados que optimizan el uso del tiempo y los recursos laborales disponibles en el sector.

Caracterización del Área de Pastura.

El sector La Lima ha implementado una estrategia de manejo forrajero que combina de manera equilibrada pasturas naturales y mejoradas, abarcando un total de 12.4 ha distribuidas en dos

componentes complementarios que integran el componente arbóreo como elemento fundamental del sistema silvopastoril.

Las pasturas naturales con árboles ocupan 3.1 ha del sector, donde predomina el pasto Bombaza (*Megathyrus maximus*), una gramínea tropical de alta productividad que se ha establecido de manera espontánea y se caracteriza por su excelente adaptabilidad a las condiciones climáticas locales. Esta especie presenta una notable capacidad de producción de biomasa forrajera, manteniendo su calidad nutricional durante períodos prolongados y mostrando buena resistencia tanto al pastoreo intensivo como a las variaciones estacionales de precipitación.

El componente de pasturas mejoradas con árboles abarca 9.3 ha establecidas mediante la siembra planificada de especies forrajeras seleccionadas por su alto potencial productivo y calidad nutricional. La composición específica incluye *Brachiaria decumbens*, reconocida por su resistencia al pisoteo y su capacidad de rebrote; *Brachiaria* spp. en otras variedades que complementan la oferta forrajera; y pasto Tanzania (*Megathyrus maximus* cv. Tanzania), un cultivar mejorado que se distingue por su elevada producción de biomasa y su excelente digestibilidad.

La integración del componente arbóreo en ambos sistemas de pastoreo genera un equilibrio sinérgico entre productividad forrajera y sostenibilidad ambiental que trasciende los beneficios de los sistemas convencionales. Los árboles dispersos en los potreros proporcionan sombra natural que mejora el confort térmico del ganado, permitiendo que los animales mantengan comportamientos de pastoreo más prolongados durante las horas de mayor temperatura ambiental, lo que se traduce en un mejor aprovechamiento del forraje disponible.

Árboles en el Área de Pastoreo y Bosques.

El sector La Lima ha desarrollado un sistema integral de cobertura arbórea que abarca un total de 5 ha distribuidas estratégicamente en tres componentes forestales complementarios, cada uno con funciones específicas que contribuyen tanto a los objetivos productivos como a la conservación de los recursos naturales y la biodiversidad del sistema.

Las cercas vivas constituyen el componente más extenso con 2 ha establecidas principalmente con madriado (*Gliricidia sepium*), una especie leguminosa multipropósito que se caracteriza por su rápido crecimiento, su capacidad de fijación biológica de nitrógeno, y su adaptabilidad a diferentes condiciones edáficas. Estas cercas vivas cumplen una función multifuncional dentro del sistema productivo, sirviendo como elemento de delimitación natural de potreros que elimina la necesidad de cercas convencionales en extensas áreas, proporcionando sombra adicional para el ganado en las zonas de transición entre potreros, y funcionando como corredores biológicos que facilitan el movimiento de fauna menor y contribuyen significativamente a la conectividad ecológica del paisaje. Las plantaciones forestales ocupan 1 ha destinada al establecimiento planificado de especies de alto valor comercial y ecológico. La composición específica incluye ceiba (*Ceiba pentandra*), reconocida por su rápido crecimiento y madera liviana; eucalipto (*Eucalyptus* spp.), apreciado por su versatilidad de usos y rápida producción de biomasa; zaiba, cedro (*Cedrela odorata*), considerado una de las maderas tropicales más valiosas; y acacia amarilla (*Cassia siamea*), conocida por su resistencia y múltiples aplicaciones. Estas plantaciones están orientadas principalmente hacia el aprovechamiento maderero sostenible a mediano y largo plazo, representando una estrategia de diversificación económica que complementa los ingresos derivados de la actividad ganadera.

Cuantificación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero Mediante Sistema MRV

Emisiones por Fermentación Entérica en Santa Lucía

La evaluación de las emisiones de gases de efecto invernadero derivadas de la fermentación entérica en la Hacienda Santa Lucía revela patrones diferenciados según la categoría animal analizada. Los resultados se expresan tanto en términos absolutos como en intensidad por superficie, presentándose en el Cuadro 4 los valores correspondientes en toneladas de CO₂e por año (t CO₂e/año) y por hectárea (t CO₂e/ha/año).

Las vacas en producción representan la categoría con mayor impacto individual, generando 16.7 t CO₂e/año (0.21 t CO₂e/ha/año). En el segundo nivel de emisiones se encuentran las vacas secas

con 12.12 t CO₂e/año, seguidas por las novillas mayores de 2 años con 7.81 t CO₂e/año. Estas categorías, aunque no están en período productivo activo, mantienen emisiones considerables debido a su peso corporal y consumo de materia seca, características propias de animales adultos con sistemas digestivos completamente desarrollados.

Los terneros y Terneras presentan emisiones unitarias relativamente bajas debido a su menor tamaño corporal y requerimientos nutricionales reducidos. No obstante, su elevado número dentro del hato hace que su contribución total al inventario de emisiones sea significativa desde una perspectiva de manejo integral del sistema productivo.

Cuadro 4

Emisiones de CO₂e Producto de la Fermentación Entérica en Santa Lucía

Tipo de ganado	Fermentación entérica	
	t CO ₂ e/año	t CO ₂ e/ha/año
Vacas en producción	16.7	0.96
Vacas secas	12.12	0.70
Novillas > 2 años	7.81	0.45
Novillas 1 - 2 años	4.54	0.26
Terneras	1.15	0.06
Toros	1.91	0.11
Machos > 2 años	0.93	0.05
Machos 1 - 2 años	0.39	0.05
Terneros	1.3	0.01
Total	46.85	2.65

Emisiones de Estiércol en Santa Lucía

El manejo del estiércol constituye una fuente secundaria pero relevante de emisiones de gases de efecto invernadero en los sistemas ganaderos, fundamentalmente a través de los procesos bioquímicos que generan metano (CH₄) durante la descomposición anaerobia de la materia orgánica y óxido nitroso (N₂O) mediante los ciclos de nitrificación y desnitrificación del nitrógeno contenido en las excretas. En la Hacienda Santa Lucía, el inventario de emisiones anuales derivadas del manejo de

estiércol presenta valores considerablemente bajos en comparación con otras fuentes del sistema productivo, tal como se documenta en el Cuadro 5.

El análisis por categorías animales revela que las vacas en producción constituyen la principal fuente de emisiones relacionadas con el manejo de estiércol, registrando 0.62 t CO₂e/año. Esta contribución refleja tanto el mayor volumen de excretas producidas por animal debido a su elevado consumo de materia seca, como el contenido nutricional diferenciado de las mismas, particularmente en términos de nitrógeno excretable. Las vacas secas ocupan el segundo lugar con 0.10 t CO₂e/año, mientras que las novillas mayores de 2 años aportan 0.06 t CO₂e/año. Las categorías de menor edad y los machos reproductores presentan valores mínimos o prácticamente nulos, siendo proporcionales a su menor producción individual de excretas y su reducida representación numérica en el hato.

La notable reducción en las emisiones por manejo de estiércol se explica fundamentalmente por la implementación de un sistema de compostaje en pila seca al aire libre, una tecnología de tratamiento que favorece los procesos de descomposición aerobia sobre los anaerobios.

Cuadro 5

Emisiones por CO₂e Producto de la categoría generadas por estiércol en Santa Lucía

Tipo de ganado	Estiércol	
	t CO ₂ e/año	t CO ₂ e/ha/año
Vacas en producción	0.62	0.036
Vacas secas	0.1	0.006
Novillas > 2 años	0.06	0.003
Novillas 1-2 años	0.03	0.002
Terneras	0.01	0.001
Toros	0	0
Machos > 2 años	0	0
Machos 1-2 años	0.01	0.001
Terneros	0.02	0.001
Total	0.85	0.05

Emisiones de Metano

El presente apartado consolida las emisiones totales de metano (CH₄) generadas por el hato ganadero de la Hacienda Santa Lucía, integrando las contribuciones procedentes de las dos fuentes

principales identificadas en el sistema productivo: la fermentación entérica y el manejo de estiércol. La cuantificación se presenta desagregada en el Cuadro 6.

El análisis de las emisiones por unidad de superficie revela que ninguna categoría animal supera el umbral de 0.27 t CO₂e/ha/año, indicando una intensidad relativamente moderada en la generación de metano por hectárea utilizada. Esta métrica resulta fundamental para evaluar la eficiencia ambiental del sistema productivo, ya que permite comparar el impacto de las emisiones en relación con la superficie destinada a la actividad ganadera, independientemente de la densidad de carga animal implementada.

Cuadro 6

Emisiones de CO₂e Producto de la Generación Metano en Santa Lucía en CO₂e

Tipo de ganado	Metano	
	t CO ₂ e/año	t CO ₂ e/ha/año
Vacas en producción	17.32	1.01
Vacas secas	12.22	0.71
Novillas > 2 años	7.87	0.46
Novillas 1-2 años	4.57	0.27
Terneras	1.16	0.07
Toros	1.91	0.11
Machos > 2 años	0.93	0.05
Machos 1-2 años	0.4	0.02
Terneros	1.32	0.08
Total	47.7	2.78

Emisiones Indirectas e Directas en Santa Lucía

El inventario de gases de efecto invernadero de la Hacienda Santa Lucía incluye tanto emisiones directas como indirectas, conforme a los resultados obtenidos por medio de la aplicación utilizada. Las emisiones directas comprenden aquellas derivadas de las actividades propias de la finca, como el uso de fertilizantes sintéticos, agroquímicos y combustibles fósiles aplicados dentro del sistema productivo. Estas emisiones son consideradas directas bajo la metodología aplicada, dado que su impacto ocurre dentro de los límites operativos de la finca. Las emisiones indirectas, por su parte, derivan del ciclo de vida previo de los insumos agrícolas y energéticos empleados.

Estas emisiones comprenden los procesos de aplicación de fertilizantes sintéticos, agroquímicos y combustibles fósiles, siendo fundamentales para una evaluación integral de la huella de carbono del establecimiento. El Cuadro 7 presenta las emisiones anuales estimadas por tipo de insumo en toneladas de CO₂e (t CO₂e/año).

Los fertilizantes sintéticos constituyen la principal fuente de emisiones directas con 2.21 t CO₂e/año, debido a la intensidad energética de su síntesis industrial, particularmente los fertilizantes nitrogenados que requieren grandes cantidades de gas natural. Su aplicación recurrente en praderas y cultivos forrajeros amplifica su contribución al balance de emisiones. El consumo de gasolina representa la segunda fuente con 0.95 t CO₂e/año, atribuible a transporte interno y operación de maquinaria menor, mientras que los herbicidas aportan 0.28 t CO₂e/año. Varios insumos como abonos orgánicos compostados, leña y diésel no registraron emisiones bajo la metodología aplicada.

El total de emisiones indirectas asciende a 3.44 t CO₂e/año, cifra menor comparada con las emisiones directas del ganado, pero estratégicamente importante para identificar oportunidades de mitigación. Las estrategias de reducción incluyen la optimización del uso de fertilizantes sintéticos, implementación de fertilización de precisión, sustitución gradual por fuentes orgánicas y adopción de tecnologías energéticas de menor intensidad carbónica en las operaciones del sistema productivo.

Cuadro 7

Emisiones indirectas y directas en Santa Lucía

Descripción	t CO ₂ e/año
fertilizantes	2.21
herbicidas	0.28
abonos	0
Leña	0
Diesel	0
Gasolina	0.95
Total	3.44

Emisiones Generadas en Platanares

Emisiones Fermentación Entérica en Platanares

En la Hacienda Platanares, se estimaron las emisiones de metano (CH₄) derivadas del proceso de fermentación entérica del ganado bovino. Este proceso ocurre durante la digestión de los rumiantes, especialmente al fermentar fibras en el rumen, y representa una fuente importante de gases de efecto invernadero. En el Cuadro 8, se detallan las emisiones por categoría de ganado.

En este caso, la única categoría presente en la finca es la de machos de 1 a 2 años, los cuales generan un total de 11.6 t CO₂e/año, lo que representa una emisión de 0.32 t CO₂e/ha/año, considerando que la finca tiene una extensión de 32.9 ha. Esta categoría corresponde al grupo de engorde, y su nivel de emisiones es coherente con su peso corporal (500 lb promedio) y número total (35 animales).

La ausencia de otras categorías animales en el inventario obedece a la estrategia productiva específica implementada en la hacienda, la cual se enfoca exclusivamente en el sistema de engorde de machos jóvenes. Esta especialización elimina las emisiones asociadas a categorías reproductivas como vacas en producción, vacas secas, novillas de reemplazo, terneros lactantes y Toros reproductores, simplificando significativamente el perfil de emisiones del establecimiento y permitiendo un manejo más focalizado de las estrategias de mitigación orientadas específicamente hacia la optimización nutricional y de manejo de la categoría de engorde.

Cuadro 8

Emisiones por fermentación entérica en Platanares

Tipo de ganado	t CO ₂ e/año	t CO ₂ e/ha/año
Vacas en producción	0	0
Vacas secas	0	0
Novillas > 2 años	0	0
Novillas 1 - 2 años	0	0
Terneras	0	0
Toros	0	0
Machos > 2 años	0	0
Machos 1 - 2 años	11.6	0.35
Terneros	0	0

Emisiones Estiércol en Platanares

En la Hacienda Platanares, el manejo del estiércol se caracteriza por su deposición directa sobre las áreas de pastoreo durante el pastoreo libre del ganado. Esta modalidad operativa elimina la necesidad de sistemas de recolección, almacenamiento o tratamiento de excretas, contrastando marcadamente con instalaciones que requieren manejo activo de residuos orgánicos. La distribución natural del estiércol sobre amplias superficies favorece su rápida incorporación al suelo y minimiza la acumulación de materia orgánica que podría generar emisiones significativas de gases de efecto invernadero.

La categoría de machos de 1 a 2 años presente en la hacienda registra emisiones de 0.06 t CO₂e/año por manejo de estiércol, valor que refleja las condiciones particulares del sistema extensivo implementado. Esta cifra baja se debe principalmente a que las excretas se dispersan automáticamente durante el pastoreo, evitando concentraciones que favorezcan procesos fermentativos intensos. La exposición continua a factores ambientales como radiación solar, viento y precipitación acelera los procesos de secado y descomposición superficial, reduciendo el potencial de generación de metano típico de ambientes confinados. En el cuadro 9, se resumen los datos obtenidos para las emisiones por estiércol.

Cuadro 9

Emisiones de CO₂e Producto del estiércol en Platanares

Tipo de ganado	t CO ₂ e/año	t CO ₂ e/ha/año
Vacas en producción	0	0
Vacas secas	0	0
Novillas > 2 años	0	0
Novillas 1 - 2 años	0	0
Terneras	0	0
Toros	0	0
Machos > 2 años	0	0
Machos 1 - 2 años	0.06	0.001
Terneros	0	0

Emisiones de Metano en Platanares

Esta sección consolida las emisiones totales de metano generadas por el hato, integrando los aportes procedentes tanto de la fermentación entérica como del manejo de estiércol. El Cuadro 10 refleja la simplicidad estructural del sistema productivo, donde todas las emisiones se concentran en los machos de engorde de 1 a 2 años, única categoría presente en el establecimiento.

El inventario total registra 11.66 t CO₂e/año, representando una intensidad de 0.36 t CO₂e/ha/año al distribuirse sobre la superficie de 32.9 ha de la propiedad. Esta cifra evidencia la concentración del impacto ambiental en una sola categoría productiva, característica distintiva de sistemas especializados en engorde. La magnitud obtenida resulta coherente con la carga animal presente y las condiciones nutricionales del pastoreo extensivo, donde factores como la calidad forrajera estacional y la eficiencia digestiva influyen directamente en la intensidad de las emisiones por unidad animal.

Cuadro 10

Emisiones de CO₂e Producto del metano en Platanares

Tipo de ganado	t CO ₂ e/año	t CO ₂ e/ha/año
Vacas en producción	0	0
Vacas secas	0	0
Novillas > 2 años	0	0
Novillas 1-2 años	0	0
Terneras	0	0
Toros	0	0
Machos > 2 años	0	0
Machos 1-2 años	11.66	0.35
Terneros	0	0

Emisiones Generadas en La Lima

Emisiones Fermentación Entérica en la Lima

Las estimaciones anuales para cada categoría animal se detallan en el Cuadro 11. La totalidad de las emisiones corresponde a los machos de 1 a 2 años, registrando 19.81 t CO₂e/año, lo que se traduce en una intensidad de 1.13 t CO₂e/ha/año sobre la superficie de 17.43 ha del establecimiento.

Esta densidad de emisiones resulta notablemente superior a la observada en otros sistemas evaluados, reflejando las particulares condiciones de manejo implementadas en la propiedad.

Cuadro 11

Emisiones de CO₂e Producto de la fermentación entérica en La Lima

Tipo de ganado	t CO ₂ e/año	t CO ₂ e/ha/año
Vacas en producción	0	0
Vacas secas	0	0
Novillas > 2 años	0	0
Novillas 1 - 2 años	0	0
Terneras	0	0
Toros	0	0
Machos > 2 años	0	0
Machos 1 - 2 años	19.8	1.13
Terneros	0	0

Emisiones Estiércol

Las emisiones por manejo de estiércol fueron mínimas en este sector. Según los datos disponibles, solo se registran 0.16 t CO₂e/años correspondientes a los machos de 1 a 2 años. Estas cifras, que se detallan en el Cuadro 12, indican que el sistema de manejo de residuos orgánicos en La Lima permite mantener bajo control esta fuente de emisiones.

Cuadro 12*Emisiones de CO₂e Producto del estiércol en La Lima*

Tipo de ganado	t CO ₂ e/año	t CO ₂ e/ha/año
Vacas en producción	0	0
Vacas secas	0	0
Novillas > 2 años	0	0
Novillas 1 - 2 años	0	0
Terneras	0	0
Toros	0	0
Machos > 2 años	0	0
Machos 1 - 2 años	0.16	0.009
Terneros	0	0

Emisiones Metano

El análisis de emisiones en Hacienda La Lima muestra un total de 19.97 t CO₂e/año provenientes de la fermentación entérica y el manejo de estiércol de los machos de 1 a 2 años. Al dividir esta cantidad entre el área de la finca, se obtiene una intensidad de 1.14 t CO₂e/ha/año, cifra que supera a las otras dos propiedades evaluadas según los datos de la Cuadro 13.

Cuadro 13*Emisiones de CO₂e Producto del Metano en La Lima*

Tipo de ganado	t CO ₂ e/año	t CO ₂ e/ha/año
Vacas en producción	0	0
Vacas secas	0	0
Novillas > 2 años	0	0
Novillas 1 - 2 años	0	0
Terneras	0	0
Toros	0	0
Machos > 2 años	0	0
Machos 1 - 2 años	19.97	1.14
Terneros	0	0

Cuadro Comparativo entre las Tres Secciones

El análisis de las emisiones de gases de efecto invernadero revela marcadas diferencias entre los tres sectores de la Hacienda Flores, estableciendo un gradiente claro de impacto ambiental. Santa

Lucía emerge como el sector de mayor contribución con 47.7 t CO₂e/año (2.77 t CO₂e/ha/año), contrastando significativamente con Platanares, que registra las menores emisiones con 11.66 t CO₂e/año (0.35 t CO₂e/ha/año), mientras que La Lima ocupa una posición intermedia con 19.97 t CO₂e/año (1.14 t CO₂e/ha/año).

Esta diferenciación en las emisiones responde a una combinación de factores estructurales y de manejo específicos de cada sector. Santa Lucía concentra la mayor carga animal, intensificando los procesos de fermentación entérica y producción de estiércol—las principales fuentes de metano en sistemas ganaderos—que se traducen en elevadas emisiones tanto absolutas como por unidad de superficie. En contraste, Platanares implementa un manejo más extensivo con menor densidad animal, lo que resulta en una reducción sustancial de ambos indicadores de emisión, mientras que La Lima mantiene un equilibrio intermedio entre carga animal y superficie de pastoreo. Adicionalmente, la cobertura arbórea actúa como sumidero de carbono que modera las emisiones netas en aquellos sectores con mayor presencia forestal, contribuyendo a explicar las variaciones observadas en el cuadro 14.

En consecuencia, el patrón de emisiones Santa Lucía > La Lima > Platanares orienta estratégicamente las acciones de mitigación hacia los sectores de mayor impacto, permitiendo una asignación eficiente de recursos y esfuerzos para la reducción de la huella de carbono de la hacienda.

Cuadro 14

Cuadro comparativo de los GEI generadas en las tres secciones de la Hacienda

Sector	Fermentación entérica		Estiércol		Metano	
	t CO ₂ e/año	t CO ₂ e/ha/año	t CO ₂ e/año	t CO ₂ e/ha/año	t CO ₂ e/año	t CO ₂ e/ha/año
Santa Lucía	46.85	2.65	0.85	0.05	47.7	2.77
Platanares	11.6	0.35	0.06	0.001	11.66	0.35
La Lima	19.8	1.13	0.16	0.009	19.97	1.14
Total	78.25	4.13	1.07	0.06	79.33	4.26

Formulación de la Estrategia de Mitigación

Propuesta de Mitigación en Santa Lucía

La implementación de un programa integral de mejoramiento alimentario en Santa Lucía contempla cuatro ejes estratégicos fundamentales, considerando que algunas de las estrategias de mitigación de metano producido por fermentación entérica más prometedoras se basan precisamente en modificar la composición de la dieta y se encuentran asociadas al uso de recursos alimenticios locales y de bajo costo, los cuales puedan producir una fermentación de tipo propiónica.

En primer lugar, la reformulación dietética orientada al incremento de la digestibilidad al integrar las especies forrajeras establecidas como Cayman y Cuba 22, reconocidas por su valor nutritivo superior, cuya maximización de potencial requiere la adopción de un manejo intensivo basado en cortes frecuentes o sistemas de rotación ajustados que garanticen el consumo de material vegetal en estado vegetativo, complementado con concentrados energético-proteicos para equilibrar los requerimientos nutricionales.

El segundo componente se enfoca en la reducción del contenido de fibra detergente neutra (FDN), manteniendo niveles óptimos entre 30 - 35% mediante análisis bromatológicos sistemáticos que orienten el diseño racional, meta que implica limitar el uso de henos excesivamente maduros, sustituyéndolos por forraje fresco o ensilajes de calidad controlada.

La tercera estrategia incorpora aditivos naturales con propiedades metanogénicas inhibitorias, incluyendo harinas de leguminosas arbóreas (Leucaena o Gliricidia), fuentes de taninos condensados y aceites esenciales (ajo, orégano). Existen también otras estrategias que favorecen una menor producción de metano, las cuales se basan en diferentes niveles de inclusión de plantas taníferas y saporíferas en la dieta de los rumiantes como se describe ampliamente en el estudio de (Ku-Vera et al., 2020), cuya administración se realizará mediante mezclas con concentrados o suplementos líquidos bajo supervisión técnica especializada.

Complementariamente, el fortalecimiento del sistema de pastoreo rotacional intensivo contempla la subdivisión de potreros en unidades de 0.5 - 1 ha con rotaciones cada 2 - 4 días, evitando el sobrepastoreo y manteniendo las pasturas mejoradas en su fase nutricional óptima, mientras que la integración de componentes arbóreos proporciona sombreado natural que mejora el confort térmico animal y la calidad forrajera, asegurando la disponibilidad de forraje verde durante todo el ciclo productivo y reduciendo los requerimientos de suplementación externa.

Aunque las emisiones derivadas del manejo de estiércol mantienen niveles relativamente bajos, el estiércol bovino constituye una fuente potencial de metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O) cuando los procesos de gestión no incorporan las mejores prácticas disponibles, por lo que la modernización del sistema actual de compostaje en pila seca al aire libre contempla la implementación del vermicompostaje como tecnología de bioconversión avanzada. Esta tecnología utiliza lombrices de la especie *Eisenia fetida*, que representan la mayor biomasa animal en la mayoría de los ecosistemas terrestres e influyen significativamente en las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo, acelerando la descomposición de la materia orgánica y el reciclado de nutrientes. Este sistema opera sin generar temperaturas elevadas ni condiciones anaerobias, reduciendo significativamente las emisiones de gases durante el proceso, mientras produce un biofertilizante con contenido de macronutrientes y micronutrientes generalmente mayor que el compost tradicional, conteniendo niveles altos de nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio en formas más solubles que mejoran la fertilidad del suelo y resultan en mayor rendimiento de los cultivos (Black et al., 2021; Moss y Givens, 2002).

En términos cuantitativos, la aplicación de 2,167 kg de vermicompost/ha generaría un enriquecimiento de aproximadamente 975 kg de humus/ha al año, comparado con los 1,000 kg de humus por hectárea del estiércol compostado tradicional y los apenas 390 kg de humus del estiércol fresco, permitiendo además el aprovechamiento del lixiviado como biofertilizante líquido aplicable

mediante fertirriego o aspersión foliar, cerrando así el ciclo de nutrientes dentro del sistema productivo.

Finalmente, el lugar de Santa Lucía está constituyendo un sistema natural de sumideros de carbono que captura dióxido de carbono atmosférico de manera continua y contribuye activamente a la compensación de las emisiones generadas por las actividades ganaderas. Su consolidación y expansión contempla tres estrategias complementarias: la intensificación del potencial de captura mediante sistemas silvopastoriles que incorporan especies de crecimiento acelerado como gliricidia, madero negro, guácimo y leucaena, con densidades de 100 - 150 individuos por hectárea distribuidos en líneas paralelas cada 10 - 12 m para garantizar sombreado, forraje suplementario y captura continua sin comprometer la capacidad de carga; la restauración productiva de áreas marginales mediante plantaciones mixtas de especies maderables como caoba y acacia, junto con frutales como mango, aguacate y cítricos, aprovechando programas de incentivos forestales y manteniendo cobertura viva permanente para prevenir erosión; y la conservación activa de los bosques ribereños existentes mediante enriquecimiento con especies adaptadas como sauce, guayabo silvestre y negrito, implementando sistemas de exclusión ganadera con cercas vivas o eléctricas que preserven la integridad estructural y funcional de estos ecosistemas críticos para la protección de recursos hídricos y la maximización de la captura de carbono del sistema productivo.

Propuesta de Mitigación en Platanares

El sistema ganadero de Platanares, destinado al engorde de machos de 1 a 2 años en condiciones extensivas, requiere un plan de mitigación integral que reduzca las emisiones de metano por fermentación entérica mediante tres estrategias coordinadas. La primera contempla el establecimiento de bloques forrajeros de gramíneas mejoradas como mombaza y *Cynodon nlemfuensis* cv. Cayman en zonas de mayor uso, aprovechando la humedad de la laguna artificial, complementado con leguminosas forrajeras como *Arachis pintoi* y *Leucaena leucocephala* que

aportan proteína de alta calidad y reducen la necesidad de concentrados, integrado con un sistema de rotación intensificado que garantice acceso continuo a forraje joven de máxima digestibilidad.

La segunda estrategia implementa un sistema silvopastoril intensivo mediante reforestación con especies multipropósito en densidad de 100 - 150 individuos por ha, distribuidos estratégicamente para maximizar la captura de carbono, mejorar el microclima y reducir el estrés térmico animal, complementado con cercas vivas que eliminen la dependencia de postes tratados, hectárea considerando que los sistemas silvopastoriles bien manejados pueden mejorar la productividad y, a su vez, secuestran carbono (Ibrahim, 2001), mientras que diversos estudios que utilizan estos sistemas indican mejoras en la fertilidad del suelo, eficiente reciclaje de los nutrientes e incremento en la producción de biomasa del pasto base y total, con la consiguiente mejora de la calidad nutricional de la pastura asociada (Crespo, 2008).

Finalmente, el aprovechamiento racional del recurso hídrico mediante el establecimiento de barreras vivas perimetrales con especies riparias como *Salix humboldtiana* e *Inga vera* que prevengan erosión y controlen sedimentos, implementando monitoreo continuo del ecosistema acuático para prevenir eutrofización, mientras se desarrolla un sistema de riego que facilite el establecimiento de bloques forrajeros durante épocas de estrés hídrico, creando un sistema integrado que combine eficiencia productiva, sostenibilidad ambiental y adaptación climática mediante la optimización sinérgica de los recursos disponibles.

Propuesta de Mitigación en La Lima

El sistema ganadero en La Lima, dependiente del reciclaje biológico natural en ausencia de fertilización química, requiere una estrategia integral de mitigación mediante cinco componentes sinérgicos que optimicen la productividad y reduzcan emisiones sin comprometer la sostenibilidad económica. La modulación conductual del ganado mediante diseño ecológico corrige patrones de pastoreo desigual a través del rediseño estratégico de puntos de agua, sombra y saladeros, complementado con barreras vegetales vivas de *Jatropha curcas*, *Tabebuia rosea* y *Guazuma ulmifolia*

que orienten el movimiento animal y faciliten rotaciones naturales sin cercas costosas. Esta estrategia consiste en la implementación de un sistema de rotación en el pastoreo, mediante la división del potrero en apartos (lotes de terreno) más pequeños de igual tamaño y cambiando al ganado de sección en forma periódica, respetando los tiempos de descanso y ocupación de los forrajes (Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica [NAMA], 2016).

La restauración pasiva de márgenes ecológicos establece franjas de arbustivas fijadoras como *Indigofera*, *Crotalaria* y *Calliandra* entre pasturas y bosque secundario, enriqueciendo el suelo mediante fijación de nitrógeno y funcionando como zonas de amortiguamiento que permiten exclusiones temporales para regeneración asistida. Esto permite incrementar la cobertura boscosa, proveer sombra, el secuestro de carbono de la finca, facilitar la implementación del pastoreo racional, proveer forraje y frutos para el alimento al ganado y finalmente proveer frutos comestibles y madera para la familia (NAMA, 2016)

El plan de captura hídrica construye zanjas de infiltración y microtanques vivos en curvas de nivel sembrados con *Chrysopogon zizanioides* y gramíneas resistentes, capturando agua de escorrentía para mantener productividad en sequía, reducir erosión y promover microorganismos benéficos que fortalecen la fertilidad natural. También se recomienda realizar un sistema intensivo como en el sector de platanares. La integración sinérgica de estos componentes crea un sistema regenerativo que optimiza recursos naturales, reduce emisiones mediante mejoramiento de eficiencia digestiva y captura de carbono, manteniendo viabilidad económica a través de estrategias de bajo costo que aprovechan procesos ecológicos para sostener productividad a largo plazo.

Consolidación de Prácticas en los Tres Sectores.

El Cuadro 15 presenta un análisis comparativo de las principales prácticas de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero implementadas en tres fincas ganaderas: Santa Lucía, Platanares y La Lima. Este cuadro permite examinar de manera organizada cómo se distribuyen las

actividades en cada finca y su potencial de reducción de emisiones, expresado en porcentajes estimados (Anexo C).

Las actividades se seleccionaron según su naturaleza (alimentaria, silvopastoril, hídrica o de manejo del estiércol) y su contribución a la reducción de emisiones de metano (CH₄). Las prácticas que se aplican en varias fincas, como el pastoreo rotacional intensivo y la incorporación de especies de crecimiento acelerado, representan enfoques con alto potencial de replicación y beneficios comprobados en la captura de carbono y mejora del bienestar animal.

Cuadro 15

Actividades a realizar en las tres secciones: Santa Lucía, Platanares y La Lima

Actividades	Impacto en reducción de emisiones	Santa Lucía	Platanares	La Lima
Reformulación dietética con forrajes de alta digestibilidad y concentrados	15-20%	X		
Reducción del contenido de FDN en la dieta	5-10%	X		
Incorporación de aditivos naturales inhibidores de metano	10-15%	X		
Pastoreo rotacional intensivo con subdivisión de potreros	10-12%	X	X	X
Vermicompostaje con <i>Eisenia fetida</i>	30-40%	X		
Sistemas silvopastoriles con especies nativas	20-30%	X	X	
Restauración productiva con especies maderables y frutales	10-15%	X		
Conservación activa de bosques ribereños	15-20%	X		
Bloques forrajeros con gramíneas y leguminosas	12-18%		X	
Aprovechamiento de recurso hídrico con barreras vivas y riego	8-12%		X	

Actividades	Impacto en reducción de emisiones	Santa Lucía	Platanares	La Lima
Modulación conductual con rediseño de infraestructura y barreras vivas	10-15%			X
Pastoreo rotacional con división en apartos	12-18%			X
Restauración pasiva de márgenes ecológicos	15-20%			X
Zanjas de infiltración y microtanques vivos	8-10%			X
Integración sinérgica de estrategias regenerativas	20-25%			X
Incorporación de especies de crecimiento acelerado	20-30%	X	X	X

Conclusiones

La caracterización de las tres unidades productivas de la Hacienda Flores (Santa Lucía, Platanares y La Lima) permitió identificar diferencias clave en aspectos como sistema de manejo, tipo de alimentación y cobertura arbórea, factores que influyen directamente en las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Las estimaciones realizadas evidencian que las secciones con manejo semiestabulado, mayor carga animal y menor cobertura arbórea presentan mayores emisiones totales de CO₂e, mientras que las secciones con sistemas silvopastoriles y uso eficiente de recursos tienden a generar menores emisiones.

Las acciones que destacan por incidir directamente en la reducción de las fuentes de mayor generación de emisiones (fermentación entérica y manejo de estiércol) incluyen la reformulación de la dieta para mejorar su digestibilidad, la implementación de sistemas silvopastoriles con especies de rápido crecimiento, el pastoreo rotacional intensivo y la modernización del manejo de estiércol a través del vermicompostaje.

La estrategia integral de mitigación prioriza el manejo optimizado de la fermentación entérica y la gestión eficiente del estiércol como las intervenciones de mayor impacto, complementadas con la optimización del uso de recursos hídricos y forrajeros. Esta aproximación estratégica permite atacar directamente las principales fuentes emisoras, asegurando reducciones significativas de gases de efecto invernadero mientras se mantiene la viabilidad económica y sostenibilidad operativa del sistema ganadero a largo plazo.

Recomendaciones

Para reducir el impacto ambiental de la actividad ganadera, es fundamental implementar un enfoque integral que aborde múltiples aspectos de la operación. Esto incluye mejorar la calidad de la dieta del ganado mediante la incorporación de forrajes de alta digestibilidad y la reducción del contenido de fibra estructural para disminuir la producción de metano entérico, así como implementar prácticas eficientes de manejo del estiércol a través de compostaje o biodigestores que reduzcan las emisiones de metano y óxido nitroso.

Simultáneamente, se debe optimizar el uso de combustibles mediante una mejor planificación del transporte interno y el empleo de maquinaria eficiente, complementando estas medidas con la incorporación de fuentes de energía renovable, como sistemas solares fotovoltaicos, para reducir las emisiones asociadas al consumo eléctrico. El éxito de estas iniciativas requiere capacitar al personal sobre prácticas de mitigación de gases de efecto invernadero y fomentar una cultura de sostenibilidad en la finca, estableciendo además un sistema de monitoreo continuo de emisiones que permita evaluar el impacto de las medidas adoptadas y ajustar las estrategias según los resultados obtenidos.

Referencias

- Ibrahim, M. (2001). *Tree-pasture interaction in silvopastoral systems: effect of trees on light transmission and forage productivity* [Tesis, Costa Rica]. www.sidalc.net.
<https://www.sidalc.net/search/Record/KOHA-OAI-BVE:113883/Description>
- Acosta, A. y Díaz, T. (2014). *Lineamiento de política para el desarrollo sostenible del sector ganadero*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO).
https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/36391971/Ganaderia_sostenible_FAO-libre.pdf?1422189250=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DGanaderia_sostenible_FAO.pdf&Expires=1752805400&Signature=bdHm7SezM6cGjBK1IIIT7Mmjb-clUIOLDWvplwiPXIdps3UHFTMyLHOvBOG3uGI-DVqN2jRrxIOUv1QD0zPsi~zBwsa1r9PYysEczVhHp3VOLQEy~VrLCsyUgW9jDC3s9exxUBsDclg~KG~kEYK27b8Lnq7hgvJnBiN-Af3V~25xefigj4pvAc9PqPxm25UCQlzbawIWxuTX6Qz9R2KSRzaZrCEUa9yINfDtdXdQEGG5G9VWcmVbusRS6Gg16hoox4KBMmoMAZQ5xhQTtNmKJq6430y1w-Z3GZqjRiX~GR~1m0HEO0YEnxj3kV68hLUIi6cZGdYpMarLMiUMCF66Jw__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA
- Alvarenga, M. R. (2021). *Efecto del estiércol bovino en diferentes etapas de descomposición en el desarrollo de la lombriz roja californiana (Eisenia fetida)* [Proyecto Especial de Graduación, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras]. [efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj](https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj.chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/d126fa1e-0b61-40dc-bbf4-8adabd7a6d95/content).
<https://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/d126fa1e-0b61-40dc-bbf4-8adabd7a6d95/content>
- Benaouda, M., González Ronquillo, M., T. Molina, L. y Castelán Ortega, O. A. (2017). Estado de la investigación sobre emisiones de metano entérico y estrategias de mitigación en América Latina. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 8(4), 965–974.
<https://doi.org/10.29312/remexca.v8i4.20>
- Black, J. L., Davison, T. M. y Box, I. (2021). Methane Emissions from Ruminants in Australia: Mitigation Potential and Applicability of Mitigation Strategies. *Animals : An Open Access Journal from MDPI*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/ani11040951>
- Castillo García, W. A. (2023). *Viabilidad económica-financiera de la producción de ganado de engorde semiestabulado en la comunidad de Santa Elena, La Cruz, Guanacaste, desarrollado por la Asociación de Desarrollo Integral de Santa Elena* [Proyecto de graduación de grado, Universidad Nacional Sede Regional Chorotega, Campus Liberia, Liberia]. repositorio.una.ac.cr.
<https://repositorio.una.ac.cr/items/fde772f7-7f1d-4a73-826d-4d0f4375e47e>
- Cottle, D. J., Nolan, J. V. y Wiedemann, S. G. (2011). Ruminant enteric methane mitigation: a review. *Animal Production Science*, 51(6), 491. <https://doi.org/10.1071/AN10163>

- Crespo, G. (2008). Importancia de los sistemas silvopastoriles para mantener y restaurar la fertilidad del suelo en las regiones tropicales. *Revista Cubana De Ciencia Agrícola*, 42(4), 329–335. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.redalyc.org/pdf/1930/193015490001.pdf
- Gerber, P. J [P J], Henderson, B [B], Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Faluccci, A. y Tempio, G. (2013). *Tackling climate change through livestock: A global assessment of emissions and mitigation opportunities*. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.fao.org/4/i3437e/i3437e.pdf
- Henry, B. y Eckard, R. (2009). Greenhouse gas emissions in livestock production systems. *Tropical Grasslands*, 43(232–238). chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.tropicalgrasslands.info/public/journals/4/Historic/Tropical%20Grasslands%20Journal%20archive/PDFs/2009%20issue%20pdfs/Vol_43_04_2009_p232_238%20Henry%20%20Eckard.pdf
- Herrera, M., Wollenberg, E., Nihart, A. y Liisa-, M. (2012). *Climate change mitigation and agriculture*. Earthscan.
- Hristov, A. N., Oh, J., Firkins, J. L., Dijkstra, J., Kebreab, E., Waghorn, G., Makkar, H. P. S., Adesogan, A. T., Yang, W., Lee, C., Gerber, P. J [P. J.], Henderson, B [B.] y Tricarico, J. M. (2013). Special topics--Mitigation of methane and nitrous oxide emissions from animal operations: I. A review of enteric methane mitigation options. *Journal of Animal Science*, 91(11), 5045–5069. <https://doi.org/10.2527/jas.2013-6583>
- International Rice Research Institute. (2014). *Agriculture's call to implement MRV for accurate climate reporting*. <https://www.cgiar.org/news-events/news/from-theory-to-action-agricultures-call-to-implement-mrv-for-accurate-climate-reporting/>
- Ku-Vera, J. C., Castelán-Ortega, O. A., Galindo-Maldonado, F. A., Arango, J., Chirinda, N., Jiménez-Ocampo, R., Valencia-Salazar, S. S., Flores-Santiago, E. J., Montoya-Flores, M. D., Molina-Botero, I. C., Piñeiro-Vázquez, A. T., Arceo-Castillo, J. I., Aguilar-Pérez, C. F., Ramírez-Avilés, L. y Solorio-Sánchez, F. J. (2020). Review: Strategies for enteric methane mitigation in cattle fed tropical forages. *Animal : An International Journal of Animal Bioscience*, 14(S3), s453-s463. <https://doi.org/10.1017/S1751731120001780>
- Ministerio de Agricultura y Ganadería de Costa Rica. (2016). *Ganadería bovina en Costa Rica*. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfndmkaj/https://www.mag.go.cr/bibliotecavirtual/L01-10885.pdf
- Moss, A. R. y Givens, D. I. (2002). The effect of supplementing grass silage with soya bean meal on digestibility, in sacco degradability, rumen fermentation and methane production in sheep. *Animal Feed Science and Technology*, 97(3-4), 127–143. [https://doi.org/10.1016/S0377-8401\(02\)00022-6](https://doi.org/10.1016/S0377-8401(02)00022-6)

- Pelletier, N., Pirog, R. y Rasmussen, R. (2010). Comparative life cycle environmental impacts of three beef production strategies in the Upper Midwestern United States. *Agricultural Systems*, 103(6), 380–389. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.03.009>
- Ramírez, J. (2009). *Diagnóstico de la producción de carne bovina en Honduras* [Proyecto Especial de Graduación, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras]. [efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj. https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/3106ec47-8a47-4756-8216-5a9b26fbf699/content](https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/3106ec47-8a47-4756-8216-5a9b26fbf699/content)
- Secretaría de agricultura y ganadería. (2023a). *Ganadería de Honduras inicia su transformación*. <https://www.prensa.sag.gob.hn/2023/09/19/ganaderia-de-honduras-inicia-su-transformacion-hacia-una-economia-baja-en-emisiones-y-resiliente/>
- Secretaría de agricultura y ganadería. (2023b). *Presentan análisis de la ganadería de leche y carne de Honduras*. <https://www.prensa.sag.gob.hn/2023/07/21/presentan-analisis-de-la-ganaderia-de-leche-y-carne-de-honduras/>
- Sistema nacional de información territorial de Honduras. (2024). <https://sinit.hn/2024/09/02/1810-victoria/>
- Steininger, M., Stolle, F., Hewson, J. y Pesmajoglou, S. (2014). *Manual de medición, reporte y verificación (MRV) de REDD+ versión 2.0*. [chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9414/Manual_de_medicion_reporte_y_verificacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/9414/Manual_de_medicion_reporte_y_verificacion.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Villegas-Cornelio, V. M. y Laines Canepa, J. R. (2017). Vermicompostaje: I avances y estrategias en el tratamiento de residuos sólidos orgánicos. *Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas*, 8(2), 393–406. <https://doi.org/10.29312/remexca.v8i2.59>

Anexos

Anexo A

Encuesta para la recolección de datos

Formularios estándar para recolección de información en campo de fincas con mediciones MRV

I. INFORMACIÓN DE LA FINCA

Fecha: _____

Periodo evaluado: _____

Nombre persona productora: _____

Nombre de la finca: _____ ID MRV del sistema: _____

Correo electrónico: _____

Nombre del encargado: _____

II. DATOS PARA ESTIMACIÓN DE EMISIONES

II.i Composición del Hato

Categorías	Cantidad	Peso promedio	kg/leche/día	Concentrado/animal/día
Terneras				
Terneros				
Novillas				
Vacas secas				
Vacas en producción				
Toretos				
Toros				
Caballos				

II.ii Pastos y forrajes

Área total de la finca (Ha): _____

Cantidad de apartos: _____

Área destinada a pastoreo (Ha): _____

Especie de pasto: _____

Área con pastos de corte (Ha): _____

Área de bosque (Ha): _____

¿Realiza algún tipo de fertilización de los pastos?

Sí () No ()

Tipo de fertilización: Química () Purines/bioles () Biofermentos () Orgánicos () Otros: _____

Anexo B

Ecuaciones en base al capítulo 10 del IPCC

ENERGÍA NETA PARA CRECIMIENTO (PARA VACUNOS Y BÚFALOS)

$$NE_g = 22,02 \cdot \left(\frac{BW}{C \cdot MW} \right)^{0,75} \cdot WG^{1,097}$$

Donde:

NE_g = energía neta para el crecimiento, MJ día⁻¹

BW = peso corporal vivo promedio (BW) de los animales de la población, kg

C = es un coeficiente con un valor de 0,8 para hembras, 1,0 para castrados y 1,2 para toros (NRC, 1996)

MW = peso corporal vivo y maduro de una hembra adulta en condición corporal moderada, kg

WG = aumento de peso diario promedio de los animales de la población, kg día⁻¹

RELACIÓN ENTRE LA ENERGÍA DISPONIBLE EN UNA DIETA PARA MANTENIMIENTO Y LA ENERGÍA DIGERIBLE CONSUMIDA

$$REM = \left[1123 - (4092 \cdot 10^{-3} \cdot DE\%) + [1126 \cdot 10^{-5} \cdot (DE\%)^2] - \left(\frac{25,4}{DE\%} \right) \right]$$

Donde:

REM = relación entre la energía neta disponible en una dieta para mantenimiento y la energía digerible consumida

DE% = energía digerible expresada como porcentaje de la energía bruta

EMISIONES TOTALES POR FERMENTACIÓN ENTÉRICA DEL GANADO

$$\text{Total } CH_{4\text{Entérica}} = \sum_i E_i$$

Donde:

Total $CH_{4\text{Entérica}}$ = emisiones totales de metano por fermentación entérica, Gg CH_4 año⁻¹

E_i = emisiones de las i^{th} categorías y subcategorías de ganado

EMISIONES DE CH_4 DE LA GESTIÓN DEL ESTIÉRCOL

$$CH_{4\text{Estiércol}} = \sum_{(T)} \frac{(EF_{(T)} \cdot N_{(T)})}{10^6}$$

Donde:

$CH_{4\text{Estiércol}}$ = emisiones de CH_4 por la gestión del estiércol, para una población definida, Gg CH_4 año⁻¹

$EF_{(T)}$ = factor de emisión para la población de ganado definida, kg CH_4 cabeza⁻¹ año⁻¹

$N_{(T)}$ = la cantidad de cabezas de la especie/categoría de ganado T del país

T = especie/categoría de ganado

TASAS DE INGESTA DE N PARA VACUNOS

$$N_{ingesta(T)} = \frac{GE}{18,45} \cdot \left(\frac{CP\%}{6,25} \right)$$

Donde:

$N_{ingesta(T)}$ = N consumido diariamente por animal de la categoría T , $\text{kg N animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$

GE = ingesta de energía bruta del animal, en modelo entérico, basada en energía digerible, producción de leche, preñez, peso actual, peso maduro, tasa de aumento de peso, y constantes del IPCC, $\text{MJ animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

18.45 = fracción de conversión para GE dietaria por kg de materia seca, MJ kg^{-1} . Este valor es relativamente constante para toda una amplia gama de alimentos de forraje y basados en granos que consume habitualmente el ganado.

$CP\%$ = porcentaje de proteína cruda de la dieta, entrada

6.25 = conversión de kg de proteína de la dieta a kg de N de la dieta, $\text{kg proteína en el alimento (kg N)}^{-1}$

Anexo C

Cuadro específico de las Actividades a realizar en los sectores de la hacienda

Actividad o práctica para implementar	Finca	Resultado esperado	Impacto en reducción de emisiones (%)	Referencias
Reformulación dietética con forrajes de alta digestibilidad y concentrados energético-proteicos	Santa Lucía	Mejora del perfil nutricional de la dieta, aumento de la productividad y reducción de metano entérico	15-20%	(Ku-Vera et al., 2020)
Incorporación de aditivos naturales (taninos, aceites esenciales) en la dieta	Santa Lucía	Inhibición de la metanogénesis ruminal y mejora del balance nutricional	10-15%	(Ku-Vera et al., 2020)
Pastoreo rotacional intensivo con subdivisión de potreros y presencia de árboles	Santa Lucía	Mejora en la utilización de forraje, confort térmico animal y productividad	10-12%	(Cottle et al., 2011; Ku-Vera et al., 2020)
Implementación de vermicompostaje con Eisenia fetida	Santa Lucía	Reducción de gases en el tratamiento de estiércol y obtención de biofertilizantes de alta calidad	30-40%	(Alvarenga, 2021; Villegas-Cornelio y Laines Canepa, 2017)
Restauración productiva de áreas marginales con especies maderables y frutales	Santa Lucía	Incremento de cobertura vegetal y valor productivo del suelo	10-15%	(Pelletier et al., 2010)
Conservación activa de bosques ribereños con enriquecimiento y exclusión ganadera	Santa Lucía	Protección de ecosistemas críticos y mejoramiento de la calidad hídrica	15-20%	(Ku-Vera et al., 2020)
Establecimiento de bloques forrajeros con gramíneas mejoradas (Mombaza y Cayman) y leguminosas (Arachis pintoi, Leucaena)	Platanares	Mejora de la calidad nutricional del forraje, reducción de requerimientos de concentrado y menor producción de metano entérico	12-18%	(Ku-Vera et al., 2020)

Actividad o práctica para implementar	Finca	Resultado esperado	Impacto en reducción de emisiones (%)	Referencias
Implementación de sistema silvopastoril intensivo con especies multipropósito (Guazuma, Gliricidia, Tabebuia) y cercas vivas	Platanares	Captura de carbono, mejora de microclima, reducción del estrés térmico y mejora de fertilidad del suelo	20-30%	(Ibrahim, 2001; Crespo, 2008)
Modulación conductual del ganado mediante rediseño de puntos de agua, sombra y saladeros con barreras vivas	La Lima	Mejor distribución del pastoreo, reducción del sobrepastoreo y optimización de forrajes sin cercas costosas	10-15%	(NAMA, 2016)
Implementación de sistema de pastoreo rotacional con división en apartos y tiempos de descanso	La Lima	Mayor eficiencia en el uso del forraje y mejor recuperación de pasturas	12-18%	(NAMA, 2016)
Restauración pasiva de márgenes ecológicos con arbustivas fijadoras (Indigofera, Crotalaria, Calliandra)	La Lima	Aumento de cobertura boscosa, fijación de nitrógeno, forraje adicional y mayor secuestro de carbono	15-20%	(NAMA, 2016)
Construcción de zanjas de infiltración y microtanques vivos con vegetación en curvas de nivel	La Lima	Captura de escorrentía, prevención de erosión, conservación de agua y mejora del suelo	8-10%	(NAMA, 2016)
Integración sinérgica de estrategias regenerativas para eficiencia digestiva y captura de carbono	La Lima	Sistema productivo resiliente, eficiente y económicamente sostenible	20-25%	(NAMA, 2016)