

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

FACULTAD DE CIENCIAS AGROALIMENTARIAS

ESCUELA DE ZOOTECNIA

Práctica dirigida en el Instituto Agropecuario Costarricense (IACSA), Santa Clara, Alajuela.

Adriana Mercedes Real Durán

Práctica presentada para optar por el título en el grado académico de Licenciatura en
Ingeniería Agronómica con énfasis en Zootecnia

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio

2019


HOJA DE APROBACIÓN

Esta práctica dirigida fue aceptada por la comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Zootecnia de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Agronómica con énfasis en Zootecnia



Ing. Jorge Alberto Elizondo Salazar, Ph. D.

Director de tesis



Ing. Miguel Vallejo Solís, M. Sc.

Miembro del tribunal




Ing. Michael López Herrera, M. Sc.

Miembro del tribunal



Ing. Carlos Campos Granados, Lic.

Miembro del tribunal



Ing. Rodolfo WingChing Jones, M. Sc.

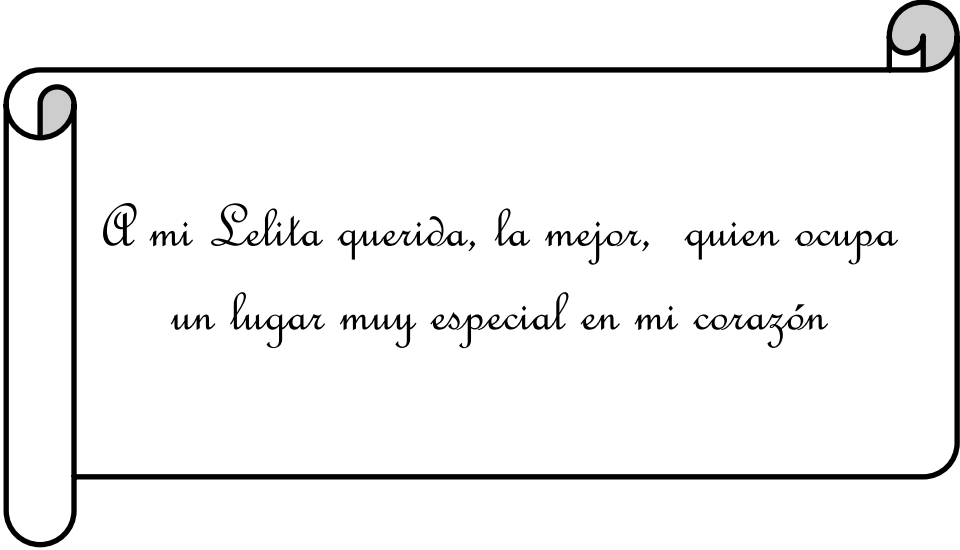
Director de Escuela



Ing. Adriana Mercedes Real Durán, Bach.

Sustentante

DEDICATORIA



*A mi Lelita querida, la mejor, quien ocupa
un lugar muy especial en mi corazón*

AGRADECIMIENTO

A Dios, quien me ha permitido llegar hasta aquí, con salud, que nunca me ha abandonado y ha cuidado de mí en cada etapa de mi vida.

A mi abuela, que ha cuidado de mí, que me ha aconsejado y ha sido un apoyo incondicional, quien me ayudó para asistir a la universidad, y que siempre me motivó a superarme académicamente.

A mi mamá, que siempre ha estado conmigo, y que se esforzó para que nunca me hiciera falta nada.

A mi hermana, que siempre me ha apoyado en todo y que se ha sacrificado para permitirme continuar con mis estudios.

A mis tíos Arturo, Zulema y José que siempre han estado cerca apoyándome y ayudándome en todo lo que estuviera a su alcance.

A Jose Pablo Gamboa, que me permitió ser parte de su proyecto y colaboró en la realización de mi práctica.

A Erick Blanco y Roberto Brenes quienes me permitieron realizar mi práctica en la ETAI.

A Juan Diego González y Fabián Quesada, quienes siempre estuvieron disponibles para ayudarme en lo que necesitara para realizar mi práctica, facilitando datos e información, con los que pasé muchos momentos agradables.

A Mónica Palma quien ha sido una gran amiga, y que desde el primer día de práctica siempre fue amable y colaboró con todo lo que necesitara.

A mi amiga Jéssica Vargas con la que pasé muchos momentos agradables durante la universidad y que sigue dándome consejos, apoyándome y motivándome.

A los profesores Jorge Elizondo, Miguel Vallejo, Carlos Campos, Sebastián Dorado y Michael López, quienes estuvieron disponibles en todo momento, orientándome y guiándome durante el proceso.

A la Universidad de Costa Rica, por acogerme todos estos años y formarme profesionalmente y a todo el personal del IACSA y la ETAI, que siempre estuvo disponible a colaborar en todo lo que necesitara.

ÍNDICE GENERAL

Contenido	Página
HOJA DE APROBACIÓN.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTO.....	iv
ÍNDICE DE CUADROS.....	viii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	ix
ÍNDICE DE ANEXOS.....	x
RESUMEN.....	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. REVISIÓN DE LITERATURA.....	3
2.1 ¿Qué son los sistemas silvopastoriles?.....	3
2.2 Tipos de sistemas silvopastoriles.....	4
2.3 Beneficios de los sistemas agroforestales.....	5
2.4 Especies seleccionadas para la propuesta de implementación del sistema silvopastoril.....	9
2.5 Cuantificación de la Huella de Carbono y otros gases de efecto invernadero.....	11
2.6 Alternativas para la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en lecherías.....	13

3. OBJETIVOS.....	18
3.1 General.....	18
3.2 Específicos.....	18
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	19
4.1 Descripción del lugar.....	19
4.2 Plan de trabajo.....	19
4.2.1 Participación de la planificación para la implementación de un sistema silvopastoril en el área destinada al pastoreo de las vacas secas de la lechería especializada del IACSA.....	19
4.2.1.1 Situación actual del área de pastoreo de las vacas secas.....	20
4.2.1.2 Redistribución del área de pastoreo de las vacas secas y estimación de costos.....	20
4.2.2 Estimación de la Huella de Carbono de la lechería especializada.....	21
4.2.2.1 Límites organizacionales.....	21
4.2.2.2 Límites operativos (alcances).....	21
4.2.2.3 Recolección de datos para la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero.....	22
4.2.2.4 Cálculo de la Huella de Carbono.....	22
4.2.2.5 Compensación Huella de Carbono.....	24
4.2.3 Balance nutricional de la dieta del hato lechero.....	25

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	27
5.1 Participación en la planificación del proyecto silvopastoril del Instituto Agropecuario Costarricense.....	27
5.1.1 Situación actual del área de pastoreo de las vacas secas.....	27
5.1.1.1 Estimación de la composición botánica de los apartos de pastoreo de las vacas secas.....	29
5.1.1.2 Análisis de suelo de los apartos de pastoreo de las vacas secas.....	31
5.2 Redistribución del área de pastoreo de las vacas secas y estimación de costo...	33
5.3 Estimación del costo de la implementación del sistema silvopastoril en el área dedicada al pastoreo de las vacas secas de la lechería especializada del IACSA.....	37
5.4 Estimación de la Huella de Carbono de la lechería especializada del IACSA.....	39
5.5 Compensación de la Huella de Carbono.....	41
5.6 Balance nutricional de la dieta del hato lechero.....	43
6. CONCLUSIONES.....	51
7. RECOMENDACIONES.....	52
8. REFERENCIAS.....	53
9. ANEXOS.....	63

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1.	Composición botánica de los apartos de pastoreo de las vacas secas.	30
2.	Análisis de suelo químico y de materia orgánica realizado en los apartos de pastoreo de las vacas secas.	31
3.	Valores críticos y máximos de nutrientes analizados por medio del ensayo en solución extractora KCl-Olsen.	32
4.	Estimación del peso promedio de las vacas secas de la lechería especializada del IACSA.	34
5.	Estimación del costo de la propuesta de distribución de apartos y establecimiento de la pastura para el establecimiento del sistema silvopastoril.	37
6.	Costo total del establecimiento de la plantación de Melina (<i>Gmelina arborea</i>) para el sistema silvopastoril a un plazo de 5 años.	38
7.	Balance nutricional de la dieta de las vacas altas productoras de la lechería especializada del Instituto Agropecuario Costarricense.	44
8.	Balance nutricional de la dieta de las vacas baja productoras de la lechería especializada del Instituto Agropecuario Costarricense.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1.	Área de pastoreo de las vacas secas.	27
2.	Propuesta de distribución para el establecimiento del sistema silvopastoril en el área destinada al pastoreo de las vacas secas de la lechería especializada del IACSA.	36
3.	Distribución porcentual de emisiones de gases de efecto invernadero expresados en t CO ₂ e de la lechería especializada del IACSA para el año 2017.	39
4.	Compensación de la Huella de Carbono del proyecto silvopastoril de la categoría de vacas secas de la lechería especializada del IACSA.	42
5.	Comparación del balance de proteína de las dietas de alta y baja producción utilizadas en la lechería especializada del IACSA y el balance de las dietas sugeridas.	46
6.	Comparación del balance de Energía Neta de Lactancia de las dietas de alta y baja producción utilizadas en la lechería especializada del IACSA y el balance de las dietas sugeridas	48
7.	Comparación del balance de fósforo de las dietas de alta y baja producción utilizadas en la lechería especializada del IACSA y el balance de las dietas sugeridas	49
8.	Comparación del costo total/día de alimento de las dietas utilizadas en la lechería especializada para las categorías de alta y baja producción y las dietas sugeridas.	50

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1.	Análisis químico de suelo del área de pastoreo de la categoría de vacas secas de la lechería especializada del IACSA	63
2.	Análisis de materia orgánica del área de pastoreo de la categoría de vacas secas de la lechería especializada del IACSA.	64
3.	Flujo de caja del establecimiento del sistema silvopastoril en el área dedicada al pastoreo de las vacas secas de la lechería especializada del IACSA.	65
4.	Emisiones de gases de efecto invernadero en equivalentes de CO ₂ de la lechería especializada del IACSA.	65
5.	Aporte de nutrientes de las materias primas utilizadas en la dieta sugerida para las vacas de alta producción de la lechería especializada del IACSA.	66
6.	Aporte de nutrientes de las materias primas utilizadas en la dieta sugerida para las vacas de alta producción de la lechería especializada del IACSA.	66

RESUMEN

Se realizó una práctica dirigida de 16 semanas en el Instituto Agropecuario Costarricense (IACSA), ubicado en Santa Clara de Florencia, Alajuela, en el área de la lechería especializada. Durante la permanencia en este lugar se desarrollaron prácticas relacionadas con forrajes, alimentación, Huella de Carbono y sistemas silvopastoriles. Se colaboró con la planificación para la implementación de un sistema silvopastoril, específicamente para el pastoreo de la categoría de vacas secas. Se realizó una propuesta de redistribución de apartos con el uso del programa QGIS contemplando el área destinada al sistema silvopastoril. Se obtuvo un total de 31 apartos, con un día de ocupación y 30 días de descanso. También se realizó una estimación del costo del establecimiento de este sistema y de la renovación de la pastura. Se estimó que el costo de la redistribución de los apartos y siembra del pasto es de $\text{C}\$4.197.926,16$, además se realizó el flujo de caja relacionado al área silvícola del sistema silvopastoril, en el cual se obtuvo un valor actual neto de $\text{C}\$1.689.196,19$ con una tasa interna de retorno de 29%. También, se realizó una estimación de la Huella de Carbono de la lechería especializada perteneciente al IACSA, por medio de estimaciones de las emisiones de CO_2e provenientes de distintas fuentes de emisión. Esto permitió realizar una valoración de la compensación de la Huella de Carbono del proyecto silvopastoril del área de vacas secas, teniendo como referencia las emisiones de CO_2e correspondientes a la categoría de vacas secas. Se utilizaron las directrices del IPCC (2006), y se obtuvo un total de 481,38 toneladas de dióxido de carbono de equivalentes, siendo el rubro de fermentación entérica el que mayor cantidad de CO_2e emite, con un valor de 43,33%. Además se estimó que el área de pastoreo de la categoría de vacas secas emite un total de 53,72 t CO_2e , siendo el sistema silvopastoril y bosque secundario capaz de remover 47,7 t CO_2e , además se estimó que el suelo es capaz de remover 56,17 t CO_2e . Por otro lado, se analizaron las dietas del hato de producción, por

medio de la estimación del balance nutricional de las dietas utilizadas en la lechería especializada para los animales de alta y baja producción; esto por medio del cálculo de los requerimientos de proteína cruda, energía neta de lactancia y fósforo según las fórmula del NRC (2001), dividiendo a los animales según la etapa de lactancia en la que se encontraban. Se obtuvo que tanto en los animales de alta y baja producción existe un balance positivo de nutrientes, es decir, los animales están consumiendo más nutrientes de los que necesitan. No obstante, el fósforo en la categoría de baja producción está por debajo del requerimiento. Se sugirió una dieta que permite mejorar el balance de los nutrientes analizados, por lo tanto se obtuvo una reducción de los nutrientes aportados por la dieta, acercándose en la mayor medida al balance neutro; es decir, al requerimiento de los animales. Así mismo se estimó el costo de las dietas sugeridas y se obtuvo una reducción en los costos de las dietas de los animales de alta y baja producción, del 32,27% y 34,10%, respectivamente.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de la población conlleva a un aumento en la producción de alimentos, según la FAO (2009) la población mundial aumentará en más de un tercio para el año 2050, para lo cual se estima que se necesita un aumento en la producción cárnica para producir cerca de 470 millones de toneladas. La alta demanda de productos de origen animal para el consumo humano provoca que se deban de implementar sistemas que además de mejorar la producción, sean sostenibles con el ambiente. Esto debido a que la ganadería es una actividad altamente productiva, sin embargo, puede acarrear efectos negativos sobre el medio ambiente si no se desarrolla de la forma adecuada.

Se ha comprobado que esta actividad tiene un alto impacto en la degradación de suelos y agua, así como un efecto negativo sobre los bosques y la biodiversidad debido a la deforestación; tiene una alta contribución al calentamiento global debido a las emisiones de gases de efecto invernadero como el metano, óxido nitroso y dióxido de carbono (Mora 2014); además de erosión acelerada, desertización, compactación, endurecimiento, disminución de la materia orgánica y disminución de la fertilidad del suelo (Sadeghian 2014).

Siguiendo la idea anterior, Sadeghian et al., (1998) mencionan que existe un efecto negativo de la ganadería en las propiedades de los suelos, debido a prácticas como la labranza y la deforestación que provocan un cambio en las propiedades físicas e hidrológicas del suelo, densidad aparente y la resistencia a la penetración se ven incrementadas, siendo éstas indicadoras de compactación. Sin embargo, Santos y Castillo (2015) mencionan en su estudio que las características químicas del suelo no se ven afectadas. En su estudio comparan el efecto de dos estrategias de pastoreo con dos niveles de carga animal sobre la concentración de materia orgánica, nitratos y fósforo, y no se encontraron diferencias significativas sobre las propiedades químicas entre tratamientos.

Además de lo mencionado anteriormente, otro problema que acarrea la ganadería tradicional, es la destrucción de bosques para el establecimiento de pasturas, provocando una disminución en la capacidad de retención de nutrientes, debido a que estos son reemplazados por una ligera cubierta de pasto, dándose una disminución en la capacidad fotosintética. Además se da un impedimento para el restablecimiento de los bosques debido principalmente al uso de estrategias como control mecánico y uso de herbicidas para el mantenimiento de los potreros y pasturas (Sánchez 1999).

La realidad expuesta anteriormente es la situación que enfrenta hoy en día la finca dedicada al ganado de leche de la Escuela Técnica Agrícola e Industrial (ETAI), ubicada en Santa Clara, en la provincia de Alajuela. La explotación cuenta con 50 hectáreas de potreros dedicados a la producción láctea, los suelos presentan la problemática de estar degradados y de ser de baja productividad, y los pastos sufren pisoteo excesivo por parte de los animales; además los potreros presentan invasión de malezas, poseen una deficiencia de drenajes y la orientación de sus cercas no es la recomendada.

Por estos motivos, es que surge dentro de la institución la idea de implementar algún sistema que ayude a contrarrestar la problemática que enfrenta. Una alternativa a esta situación son los sistemas silvopastoriles, los cuales tienen la capacidad de fijar nitrógeno en el caso de especies arbóreas leguminosas, aportando nitrógeno al suelo y aumentando la cantidad de nutrientes disponibles para las pasturas, también el proceso de descomposición de restos vegetales proveen nutrientes al suelo. Además generan microclimas, proveyendo sombra a los animales y reduciendo el estrés calórico, además se da un aumento en la fijación de nitrógeno (Luccerini et al., 2013). Sin embargo, el efecto de la sombra sobre los pastos puede afectar los procesos de síntesis de carbohidratos solubles, ya que la intensidad lumínica y la calidad de la luz tienen un efecto directo sobre los procesos fisiológicos de la planta (Mantilla y Ramírez 2015).

Los sistemas silvopastoriles contribuyen a la mitigación del cambio climático, los árboles tienen la capacidad de remover carbono de la atmósfera y almacenarlo en la biomasa aérea y en el suelo, estos sistemas pueden remover de la atmósfera entre 1-5 t de carbono/ha/año. Tienen la capacidad de proteger el balance hídrico, debido a que la asociación de árboles con pasturas provoca una disminución en la temperatura evitando pérdidas de agua por evaporación y transpiración, también los árboles actúan como barrera reduciendo la escorrentía, aumentan la infiltración y retención de agua (Villanueva et al., 2018).

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ¿Qué son los sistemas silvopastoriles?

En los sistemas agroforestales o de ganadería de sombra se da la integración de árboles dentro de las pasturas, siendo utilizados para sombra, alimentación animal. entre otros (Hernández y Babbar 2014). Árboles y arbustos pueden mezclarse a propósito con cultivos o sistemas de producción con el fin de obtener beneficios económicos, sociales y ambientales de una forma equilibrada (USDA 2013).

Los sistemas silvopastoriles en regiones fértiles tienen la característica de ser una actividad productiva y sostenible, además tienen un alto potencial de mejorar las áreas de baja fertilidad (FAO 1999). Los sistemas agroforestales se pueden dividir en silvo agrícolas; asociación de árboles más cultivos, silvopastoriles asociación de árboles más ganadería y sistemas agrosilvopastoriles; árboles con cultivos más ganadería (Solórzano 2005).

El objetivo de estos sistemas de producción es el de crear una integración de distintos componentes con el fin de establecer mejoras en los sistemas productivos, con miras en el aumento de la productividad y sostenibilidad, o sea obteniendo beneficios ambientales y comerciales (Burley y Speedy 1999). Estos componentes son: el componente arbóreo, el ganadero, el forrajero, el componente suelo y el clima (Niño 2016).

Dentro de los sistemas silvopastoriles se pueden tener distintas prácticas tales como (USDA 2013):

- Sistemas rompe vientos: estos sistemas protegen el suelo de la erosión, al mismo tiempo que mejoran el rendimiento de los cultivos.
- Bosques ribereños de amortiguación: se utilizan árboles y arbustos contiguos a cuerpos de agua como quebradas, lagos y humedales, con la finalidad de proteger la calidad del agua de contaminación proveniente de actividades agrícolas.
- Agricultura forestal: se caracteriza por la siembra de especies de alto valor comercial en los doseles de los árboles tales como: ginseng, hongos comestibles y hierbas medicinales.
- Silvicultura: es una práctica que integra y maneja árboles, ganado y forrajes en un mismo lugar, este sistema brinda sombra al ganado y permite tener un ingreso adicional al ser los árboles cosechados.

2.2 Tipos de sistemas silvopastoriles

Existen distintos tipos de sistemas silvopastoriles debido a la combinación de distintas plantas leñosas con pasturas, cada sistema tiene el propósito de obtener beneficios económicos, sociales y ecológicos, a continuación se describen algunos de estos sistemas:

- Cercas vivas: en este tipo de sistema se utilizan especies cuyas ramas tienen la capacidad de rebrotar, las cuales son usadas para delimitar potreros en las fincas, este sistema provee sombra a los animales, además pueden servir como barrera rompe vientos protegiendo el suelo de la erosión (PRESAAC 2016).
- Árboles dispersos en potreros: consiste en la plantación de árboles o arbustos en los potreros. Plantas leñosas como el Guanacaste (*Enterolobium cyclocarpum*) y el Guácimo (*Guazuma ulmifolia*) proveen sombra a los animales, además son una fuente de forraje y frutos (Marinidou y Jiménez 2010).
- Barreras vivas: son utilizados en suelos con pendiente para prevenir la erosión del mismo, las especies como el laurel y bambú pueden ser usados para este fin. Este sistema mejora la fertilidad del suelo, aumenta la calidad de las pasturas, además el uso de especies leguminosas tienen la capacidad de fijar nitrógeno mejorando la calidad de los pastos (Marinidou y Jiménez 2010).
- Cortinas rompe vientos: en este sistema se da la plantación de árboles maderables en hileras en los bordes de los potreros con el fin de disminuir el impacto del viento en las pasturas, animales y suelo (Solórzano 2005).
- Bancos forrajeros: son pequeñas superficies destinadas a la siembra de plantas leñosas con alto valor forrajero, éstas se encuentran en gran cantidad y proporcionan forraje con alto contenido de proteína, de buena digestibilidad, siendo una fuente de materia seca en épocas de escasez de pasto (Marinidou y Jiménez 2010).

Solórzano (2015) menciona que los sistemas agroforestales pueden ser reconocidos por medio de los pagos por servicios ambientales. El artículo 2 del Decreto N° 39660 del MINAE, menciona que el pago por servicios ambientales tiene la finalidad de contribuir con la protección y mantenimiento en fincas de propietarios que contemplen bosque natural, plantaciones forestales y sistemas agroforestales.

Algunos de los sistemas agroforestales que son reconocidos por el sistema de pagos por servicios ambientales son (Solórzano 2005):

- Sistema de pasto mejorado en asocio con árboles de alta densidad: es un sistema en el que se usan pastos mejorados como la *Brachiaria brizantha* en conjunto de árboles de crecimiento espontáneo, y el sistema se caracteriza por ser fijador de carbono, debido a la alta densidad del follaje del pasto.
- Sistema de bosque ripario más pasto: utilizado para la protección de nacientes de agua, consiste en una franja de al menos 4 metros de ancho de árboles rodeando el cuerpo de agua, contiguo a la franja se tienen los apartos de pasto mejorado.
- Sistema cerca viva diversificada más pasto: en este sistema se utilizan varias especies de árboles tales como el indio pelado, madero negro e incluso manzanas de agua, más pastos mejorados.

2.3 Beneficios de los sistemas silvopastoriles

En los sistemas silvopastoriles, los arbustos además de ser utilizados como fuente de forraje pueden cumplir otro tipo de funciones; tales como la conservación de la biodiversidad, fijación de carbono y protección del suelo y de cuencas hidrográficas (Alonso 2011).

Los sistemas agroforestales contribuyen a la conservación de la biodiversidad, fijación de carbono y protección del suelo y cuencas hidrográficas (Deambrosi et al. 2012), al reciclaje de nutrientes, permiten mantener las características estructurales del suelo, favorecen el crecimiento y la calidad de los pastos y aportan sombra a los animales. Además, permiten obtener un producto secundario como: leña, madera, frutos, forraje, entre otros (Russo y Botero 2014) y puede ser un medio para la disminución de las emisiones de dióxido de carbono. Árboles como el guácimo, nance, pochote, cedro y el guanacaste, pueden ser utilizados en estos sistemas, y tienen la ventaja que algunos son forrajeros o maderables. Otro beneficio de las especies arbóreas es el pago que otorga el Fondo Nacional de Financiamiento Forestal (FONAFIFO) de \$1,3 por árbol plantado, siendo esto un incentivo para optar por un sistema agroforestal (Cárdenas 2014).

PRESAAC (2016), menciona algunas ventajas de los sistemas silvopastoriles, dentro de las cuales se tienen:

- Aumento del bienestar animal: la temperatura en zonas con sombra puede disminuir en 2-3° Celsius respecto a la temperatura real, esto favorece la producción animal,

ya que estos dedican un mayor tiempo al pastoreo. La disponibilidad de sombra permite un aumento del consumo del forraje del 13% en comparación a animales que no tienen sombra disponible, por lo tanto mejora la conversión alimenticia, la ganancia de peso y la producción de leche.

- Incremento del valor nutricional de los forrajes: la asociación de gramíneas con especies leguminosas o arbustos con alto nivel proteico permite aumentar el nivel proteico de la dieta al combinar ambas especies, además el uso de especies arbustivas proveen a los animales fuentes de forraje de mayor digestibilidad, aumentado el consumo voluntario de alimento. Mejía-Díaz et al. (2017) obtienen valores de consumo de materia seca mayores en sistemas silvopastoriles de Botón de oro (*Tithonia diversifolia*) y pasto Kikuyo (*Cenchrus clandestinum*) en comparación a sistemas de monocultivo de pasto Kikuyo, siendo el consumo de materia seca de 13,3 y 10,91 kg MS/animal/día, respectivamente.
- Protección del suelo: las raíces de árboles y arbustos tienen la capacidad de absorber nutrientes de estratos profundos del suelo, además previenen la erosión de la capa superficial de tierra, además el uso de especies leguminosas mejoran la calidad del suelo debido a su capacidad de fijación de nitrógeno.
- Protección del medio ambiente: los árboles y arbustos usados en sistemas silvopastoriles poseen la capacidad de tomar carbono del aire y utilizarlo para el crecimiento de tronco, hojas y raíces, removiendo carbono de la atmósfera.

Otros beneficios de los sistemas silvopastoriles según Tintaya (2015) son:

- Mantenimiento de la diversidad biológica en el paisaje agrícola: los sistemas agroforestales brindan hábitat y recursos a la especie animal, manteniendo la conexión del paisaje.
- Conservación del suelo: aumento de la materia orgánica por caída de follaje y descomposición de raíces; transformación de fósforo inorgánico poco disponible a formas disponibles, redistribución de cationes de potasio, magnesio y calcio en el perfil del suelo.
- Conservación de la vegetación: condiciones de microclima y cobertura a especies vegetales, provee hábitat y alimento para especies polinizadoras; sombra, reduce la invasión de malezas, redistribución de lluvias para evitar el arrastre de semillas y facilitar la regeneración de especies vegetales.

Dentro de los beneficios de los sistemas silvopastoriles, están los servicios ambientales que estos generan. Beer et al. (2003), mencionan que los principales servicios de estos sistemas son: restauración de suelos degradados y conservación de agua, secuestro de carbono y conservación de la biodiversidad.

Los sistemas silvopastoriles tienen un efecto benéfico sobre la cantidad de materia seca producida, Mahecha et al. (1999) menciona que cuando se introduce una especie leguminosa como la leucaena (*Leucaena leucocephala*) en sistemas silvopastoriles conformados por pasto estrella (*Cynodon nlemfluensis*) y algarrobo forrajero (*Prosopis juliflora*) se ha logrado un aumento en la producción y calidad del forraje. Otro aspecto que influye sobre la producción de biomasa es la selectividad de los animales hacia distintos componentes de las pasturas y arbustos, debido a que afecta la capacidad de rebrote de las pasturas y su persistencia (Pezo e Ibrahim 1999), por lo que es de suma importancia considerar los hábitos de consumo de los animales a la hora de escoger las especies que conformarán el sistema silvopastoril.

La carga animal y los períodos de descanso son aspectos críticos a considerar en los sistemas silvopastoriles, debido a que los pastos y las especies arbóreas comparten un mismo terreno, lo que puede provocar competitividad y afectar el crecimiento de las especies deseables. En este sentido, la carga animal debe establecerse en función de la cantidad de biomasa producida disponible (Pezo e Ibrahim 1999).

A pesar de que los sistemas silvopastoriles puedan afectar el crecimiento de los pastos, se debe considerar que estos sistemas producen beneficios muy importantes sobre medio ambiente, como lo es la capacidad de mitigación del calentamiento global. Naranjo et al. (2012) en su estudio comparan las remociones de gases de efecto invernadero (GEI) en equivalentes de CO₂, en sistemas silvopastoriles intensivos con leucaena, sistemas silvopastoriles asociados a árboles maderables y en pasturas degradadas y mejoradas. Estos últimos obtuvieron valores de 3153 y 3259 kg de equivalentes de CO₂/ha/año removidos, respectivamente. Mientras que el sistema silvopastoril con leucaena y el sistema silvopastoril asociado a árboles maderables removieron 8800 y 26565 kg equivalentes de CO₂/ha/año respectivamente, lo que demuestra la alta capacidad de estos sistemas para ser utilizados como estrategias de mitigación del calentamiento global.

En relación con lo anterior, Alonso (2011) menciona que sistemas silvopastoriles conformados por pasto Mombaza (*Megathyrus maximus*) y Laurel (*Cordia alliodora*) con

edades de 3 a 7 años, tiene la capacidad de almacenar hasta 205 toneladas de carbono, valor que se aproxima al obtenido por López et al. (1999) de 200 t C/ha para sistemas silvopastoriles conformados por Mombaza y Laurel con una edad de 7 años. De igual manera Giraldo et al. (2008) analizan el contenido de carbono almacenado en un sistema silvopastoril conformado por Acacia (*Acacia decurrens*) y pasto Kikuyo (*Kikuyocloa clandestinum*) con una edad de 6 años, los cuales determinan que el sistema almacena 260 t C/ha, además se compara con el almacenamiento de carbono en pasturas sin presencia de árboles, el cual es de 54 t C/ha, lo que evidencia el impacto ambiental que este tipo de sistema genera.

A pesar de que los sistemas silvopastoriles son una alternativa bastante viable, tienen algunas limitaciones. Según Clavero y Suarez (2006) se pueden enlistar las siguientes limitaciones técnicas y socioeconómicas:

- Poco conocimiento sobre plagas y enfermedades en sistemas agroforestales.
- Poco conocimiento en cuanto a manejo de pastos poco comunes, como frecuencias de corte, tasas de recuperación, mortalidad y tiempo para el primer corte; y poco conocimiento del valor nutricional de especies que pueden ser de uso potencial en estos tipos de sistemas.
- Falta de difusión y educación en temas agroforestales, que permita obtener mano de obra técnica u obrera calificada para dar el seguimiento adecuado a un sistema silvopastoril.
- Alto período de espera para la utilización de sistemas silvopastoriles, ya que se necesita un largo período entre el establecimiento y el uso por parte de los animales o el acarreo.
- Otra limitante que se tiene es en el área económica, ya que estos sistemas requieren de una inversión, y en algunas ocasiones se dificulta la obtención de créditos agrícolas con bajas tasas de interés, también se carece de un sistema que proporcione semillas de alta calidad, disponibilidad y precios accesibles, para el establecimiento de un sistema agroforestal.

Se debe de tomar en cuenta una serie de aspectos a la hora de implementar un sistema silvopastoril, ya que de estos dependerá el éxito del sistema. Niño (2016) menciona que se deberá de escoger la especie forestal en función del lugar y la finalidad de la

producción (maderables, frutales, etc.); se debe hacer la preparación del terreno de igual manera en la que se prepara para cualquier cultivo agrícola, tomando en cuenta el tipo de propagación de la especie forrajera a utilizar; otro aspecto importante es el diseño y distribución de los árboles, debido a que entre mayor espaciamiento de los árboles, mayor será la producción de biomasa. Además también menciona que se debe de tomar en cuenta el espacio necesario para el ingreso de maquinaria de manera tal que los espacios sean aprovechados al máximo.

Según FAO (2015) se debe de tomar en cuenta el espacio de terreno disponible, la especie arbórea y pastos a utilizar y su propósito, ya sea para delimitación de potreros, ramoneo directo, bancos de proteína o barreras vivas. Dentro de algunas especies gramíneas que pueden ser utilizadas en sistemas silvopastoriles se pueden mencionar *Brachiaria decumbens*, *B. humidicola*, *B. brizantha*; también se puede hacer uso de maní forrajero (*Arachis pintoi*), y especies arbóreas o arbustivas como el madero negro (*Gliricidia sepium*), nacedero (*Trichanthera gigantea*), botón de oro (*Tithonia diversifolia*), entre otros; la elección de las especies a utilizar va a depender de la zona en donde se quiera implementar el sistema.

2.4 Especies seleccionadas para la propuesta de implementación del sistema silvopastoril

Gmelina arborea (Melina)

Esta especie arbórea perteneciente a la familia Verbenaceae, originaria de áreas tropicales y subtropicales de Asia, ha sido cultivada en tierras bajas de países de África y América Central. Se caracteriza por ser de un tamaño de mediano a grande, decíduo, con un fuste largo y recto, además de ser una especie maderable de rápido crecimiento (González y Serrano 2004), posee también una excelente capacidad de rebrote, es una especie caducifolia y puede llegar a medir 30 metros de altura y hasta más de 80 cm de diámetro (Rojas y Murillo 2004).

Se recomienda la plantación de la melina en suelos profundos (mínimo 60 cm), húmedos y con buen drenaje, evitándose los suelos erosionados, compactados y de topografía quebrada. La Melina se adapta a altitudes entre los 0-600 msnm, además tiene un requerimiento de precipitación de 2000-2500 mm, con una temperatura óptima de 24-29 °

C. Es una especie que se desarrolla en suelos de textura franca y franca arcillosa y de alta fertilidad, con un pH entre 5-6, y una pendiente máxima de 30% (Rojas y Murillo 2004).

La Melina tiene una edad de rotación que depende del propósito para el cual se utilice la madera, ésta oscila entre 10 y 14 años cuando el propósito es madera para aserrío. Además esta especie puede alcanzar rendimientos de 30 m³/ha/año, e inclusive en suelos andisoles bajo óptimas condiciones el rendimiento puede ser de 45 m³/ha/año (Rojas y Murillo 2004).

Esta especie además de utilizarse con un propósito maderable se ha utilizado en actividades ganaderas como fuente de forraje, con un contenido de proteína cruda del 15% y una digestibilidad del 43% (CIAT 2017), también aprovechable por sus frutos y corteza como fuente secundaria de alimentación. En sistemas agroforestales se puede observar en conjunto con especies como tabaco, maíz, café y cacao, como cerca viva, barreras protectoras, cortinas rompe vientos, entre otras (Carbajal 2017).

Megathyrsus maximus cv Mombaza (Mombaza)

El pasto Mombaza, liberado en 1993, por el Centro Nacional de Investigación de Ganado de Carne Cuentas (CNPGC), en Brasil, es una especie de porte alto de entre 1,6-1,7 m, con hojas erectas, anchas y quebradizas e inflorescencia de tipo panícula. Este pasto tiene como requerimiento suelos de media a alta fertilidad, y se caracteriza por tener una utilización eficiente del fósforo del suelo. Requiere de precipitaciones anuales superiores a 1300 mm, tolera temperaturas de 20-35°C y se adapta en altitudes de 0 a 1100 msnm. Se ha observado que tiene una buena adaptación en las regiones Huetar Norte y Pacífico Central de Costa Rica, demostrando altas tasas de crecimiento (33 t/ha/año), períodos cortos de recuperación y buenos rendimientos en producción animal (Carrillo 2017). Este tipo de pasto puede alcanzar valores de proteína entre 10-14% con una digestibilidad de 60-70% (CIAT 2017). Por otra parte, Carrillo (2017) menciona que el contenido de proteína del mismo es de 11,6%, mientras que el contenido de fibra detergente neutra y fibra detergente ácida es de 70,9 y 37,8 %, respectivamente.

2.5 Cuantificación de la Huella de Carbono y otros gases de efecto invernadero

Según MINAE (2012), el sector agropecuario para el año 2012 emitió cerca de 1.119.000 toneladas de gases de efecto invernadero como equivalentes de CO₂, siendo la ganadería la responsable de cerca del 18% de las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por actividades humanas (Córdoba 2011). Estos gases se producen en las explotaciones pecuarias debido a diferentes procesos tales como: procesos fisiológicos de los animales que emiten gases como el metano, aplicaciones de fertilizantes nitrogenados que aportan óxido nitroso y uso de combustibles fósiles para maquinaria que emiten varios gases, como el dióxido de carbono (CATIE 2013).

A nivel nacional se están tomando medidas para combatir las emisiones de carbono provenientes de diferentes actividades, a través del Plan Nacional de Descarbonización de la economía para el período 2018-2050. El cual consiste en la implementación de distintas acciones que ayuden a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. La implementación de este plan consiste en tomar medidas a través de 10 principales ejes: transporte público, vehículos ligeros, transporte de carga, energía renovable, construcción de edificaciones bajas en emisiones, modernización del sector industrial, sistemas de gestión de residuos con bajas emisiones de GEI, sistemas alimentarios eficientes y gestión de territorios que conserven la biodiversidad (MINAE 2019).

Además de los ejes mencionados anteriormente, el plan de descarbonización busca tomar medidas relacionadas a la disminución de emisiones de GEI en el área de la ganadería (Eje 9), este busca mejorar la eficiencia de producción por medio de acciones de cambio a implementarse en 3 períodos. Para el período 2019-2022 se busca impulsar el sector ganadero de manera tal que colabore al proceso de descarbonización por medio del uso de prácticas eficientes, protección de ecosistemas y captura de carbono. Para el período 2023-2030 se pretende evaluar las acciones implementadas en el período anterior y las metas establecidas, de manera tal que se permita realizar una actualización de las estrategias para la ganadería baja en carbono. Por último, para el período 2031-2050 se busca que se dé una transformación a escala que permita consolidar una ganadería eco-competitiva, que conserve los ecosistemas y que sea baja en carbono (MINAE 2019).

Asociado a lo anterior, es de suma importancia la cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero, ya que con ellos se determinará el impacto de las medidas implementadas. Para la cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero se

deben de tomar en cuenta los principales procesos que participan en la producción de leche. Según CATIE (2013) se deben tener las siguientes consideraciones:

- Características de la zona de estudio: se debe de analizar el historial del uso del suelo, características climáticas de la zona como temperatura y precipitación promedio y características del suelo como las pendientes y la aplicación de fertilizantes.
- Características productivas de la finca: caracterización del hato (vacas secas, en producción novillas, terneros, etc), registro de la producción diaria por vaca así como del porcentaje de grasa y proteína; también se debe caracterizar el uso del suelo como la cantidad de hectáreas utilizadas y los pastos disponibles. Se debe de caracterizar de la mejor manera la dieta, ya que es uno de los procesos más importantes para la cuantificación de gases de efecto invernadero. En este aspecto se debe de determinar el porcentaje de digestibilidad in vitro de la materia seca (DIVMS) y el porcentaje de proteína (PC).

Además de lo mencionado anteriormente, según el IPCC (2006) para elaboración del inventario de gases de efecto invernadero se deben de tomar en cuenta emisiones de metano provenientes de procesos de fermentación entérica, y emisiones de metano, óxido nitroso y dióxido de carbono provenientes a la gestión del estiércol. También deben de tomarse en cuenta las emisiones provenientes la fertilización de las pasturas, uso de combustibles, consumo eléctrico y uso de gases refrigerantes (Vallejo et al. 2013).

Para elaborar el inventario de la Huella de Carbono se deben establecer los límites del mismo, los cuales determinan el alcance del inventario, estos identifican las fuentes de emisión de gases de efecto invernadero que van a ser tomadas en cuenta para la realizar el inventario. Vallejo et al. (2013) en su guía elaborada para la gestión de la Huella de Carbono de la Industria Cárnica establece dos tipos de límites: organizacionales y operativos. Los límites organizacionales determinan las operaciones de una empresa que son incluidas dentro del inventario para la estimación de la Huella de Carbono, por ejemplo, una compañía que se dedique a dos tipos de actividades; por lo que el límite organizacional, va a enfocarse sólo en un tipo de actividad para la estimación de las emisiones de GEI.

Los límites operativos, llamados también alcances, determinan cuáles son las fuentes de emisión dentro de una actividad que deben ser incluidas dentro del inventario. Estos límites se clasifican a su vez en límites operativos directos e indirectos. El primer tipo de límite toma

en cuenta las emisiones que provienen de fuentes pertenecientes a una empresa, tales como la fermentación entérica, producción de excretas, fertilización, uso de combustibles, etc. (Vallejo et al. 2013).

El límite operacional indirecto determina las emisiones que proceden de fuentes que son necesarias para el funcionamiento de la actividad, pero que no se producen dentro de la actividad, por ejemplo; las fuentes de electricidad o fuentes provenientes de servicios contratados para mantenimiento (Vallejo et al. 2013). Una vez identificadas las fuentes emisoras de gases de efecto invernadero, se procede a la recolección de datos y por último se cuantifican las emisiones de GEI, obteniendo de esta manera de la Huella de Carbono de una actividad.

2.6 Alternativas para la disminución de las emisiones de gases de efecto invernadero en lecherías

Existen algunas prácticas que pueden implementarse con el objetivo de disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero producto de la actividad lechera. Según la Global Research Alliance (2014), la actividad ganadera emite metano (CH₄), óxido nitroso (N₂O) y dióxido de carbono (CO₂) en proporciones de 44%, 29% y 27%, respectivamente, por lo que algunas prácticas van enfocadas en la mitigación de estos gases en específico. Haro y Gómez (2018) menciona que existen distintas áreas de intervención en las cuales se pueden aplicar estas estrategias de mitigación, a continuación se describen las áreas y sus respectivas estrategias:

- Alimentación y nutrición: alimentación de precisión, suplementos alimenticios, mejora de dieta y sustitutos, mejora en la calidad del forraje.
- Genética y mejoramiento animal: hallazgo de criterios de selección, selección de animales de baja producción de metano, selección de animales de alto rendimiento con alimentación de baja calidad.
- Modulación del rumen: vacunas para la inhibición de metano, inhibidores, transferencia de microorganismos de animales de baja producción de metano.
- Gestión de estiércol: depósito y aplicación de estiércol, captura de biogás de procesos anaeróbicos, temperatura y aireación del estiércol
- Manejo de pasturas: secuestro de carbono, prácticas de pastoreo y manejo de pasturas.

Actualmente en el mercado se pueden encontrar suplementos alimenticios con la capacidad de reducir la producción de metano ruminal, tal es el caso de los ionóforos. Estos compuestos además de tener un efecto benéfico en la producción, han demostrado un efecto negativo sobre las bacterias metanogénicas e inhiben a las bacterias gram negativas que liberan hidrógenos; también este tipo de suplemento puede disminuir el consumo de alimento debido a un aumento en la eficiencia fermentativa, reduciendo la proporción acetato: propionato y por lo tanto reduciendo las emisiones de metano (Pérez y López 2011). Según Rodríguez (2016) la degradación de la fibra en el rumen produce ácidos grasos volátiles, principalmente ácido acético, dióxido de carbono e hidrógeno, esto provoca un aumento en la proporción ácido acético: propiónico llegando a valores de 4, lo que significa que se da un aumento en la producción de metano, a través de la siguiente ecuación: $CO_2 + 4 H_2 = CH_4 + 2 H_2O$, por lo que los suplementos como los son los ionóforos buscan disminuir esta proporción para disminuir la producción de metano.

La inclusión de lípidos en las dietas de los rumiantes tiene un efecto en la producción de metano (FAO 2013). Los aceites de girasol, de almendra, de semilla de algodón, de coco y de linaza son materias primas que pueden utilizarse como fuentes de lípidos en dietas altas en forrajes, los cuales tienen la capacidad de disminuir las emisiones de metano hasta en un 50% (Casasola y Villanueva 2015). Debido a modificaciones en los procesos fermentativos en el rumen, los ácidos grasos tienen un efecto tóxico sobre los microorganismos metanogénicos del rumen, además utilizan el hidrógeno en un proceso llamado biohidrogenación ruminal, habiendo una competencia en el uso del hidrógeno (Casasola y Villanueva 2015).

El uso de compuestos bioactivos presentes en las plantas es una alternativa para disminuir la producción de metano. Estos compuestos secundarios como taninos, saponinas y aceites esenciales, se producen en las ramas y forrajes de climas cálidos. Los taninos han demostrado tener la capacidad de reducir hasta un 20% las emisiones de metano, sin embargo, estos compuestos son considerados en algunos casos antinutricionales debido a que afectan la absorción de aminoácidos. Por otra parte, estos compuestos tienen la capacidad de controlar los nematodos intestinales (FAO 2013), por lo tanto es importante evaluar los pros y contras que una alternativa puede brindar, para saber en cuánta proporción se puede implementar obteniendo beneficios sin perjudicar la producción animal. A parte del uso de compuestos bioactivos, se puede hacer uso de ácidos orgánicos, prebióticos y probióticos, la manipulación enzimática y microbiana, la inmunización contra

bacterias metanogénicas, son medidas relacionadas al uso de suplementos alimenticios que tienen un efecto positivo en las reducciones de GEI (Pérez y López 2011).

Existen otras alternativas para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la fermentación entérica, estas alternativas están relacionadas al manejo y gestión de la alimentación. La inclusión de concentrado en las dietas (granos o alimentos energéticos) provoca una disminución del pH en el rumen (5,8), produciendo un cambio en la proporción de microorganismos ruminales. A su vez, esto disminuye las bacterias celulolíticas y hemicelulolíticas y aumenta las bacterias amilolíticas, produciendo cambios en la proporción de acetato: propionato y se da una disminución en la producción de metano (Casasola y Villanueva 2015). Según FAO (2013) el uso de concentrados puede disminuir la producción de metano, pero puede aumentar la producción de gases como el óxido nitroso y dióxido de carbono, por lo tanto es de suma importancia conocer el impacto general que provoca el uso de algunas alternativas sobre otros parámetros para escoger la estrategia que genere mayor beneficio.

Una alternativa muy importante que debe tomarse en cuenta, es la alimentación de precisión, la cual es una estrategia que se centra en brindar a los animales justo lo que necesitan para producir. Esto se logra aumentando la exactitud en el cálculo de los requerimientos nutricionales, permitiendo minimizar el desperdicio de alimento, maximizar la producción y minimizar las emisiones de GEI (FAO 2013), esto se logra tomando en cuenta las materias primas que se utilizan para llenar el requerimiento, ya que como se mencionó anteriormente la degradación de la fibra de los forrajes provoca un aumento en la producción de metano. Es de suma importancia la estimación de los requerimientos de los animales, ya que estos cambian según la etapa productiva en la que se encuentren y el conocimiento de estas necesidades puede provocar una mejora en la eficiencia en el uso de recursos. Este tipo de alimentación combina la capacidad genética presente en los animales con la alimentación y el uso de las pasturas, y requiere de instalaciones con tecnología avanzada para monitorear con precisión las necesidades del animal y manejo de las pasturas (Global Research Alliance 2014).

Para el desarrollo de la nutrición de precisión es de suma importancia la realización de análisis químicos constantes para conocer la calidad nutricional de las materias primas utilizadas en las dietas de los animales. Asociado a esto, el uso de la ración total mezclada es una herramienta que permite satisfacer los requerimientos nutricionales de los animales,

sin embargo, estas raciones deben modificarse constantemente dependiendo del requerimiento de los animales, según la época del año, disponibilidad de materias primas o por costos (Casasola y Villanueva 2015). La elaboración de balances nutricionales de las dietas de los animales es una parte importante de la nutrición de precisión, ya que permiten conocer cuál es el requerimiento nutricional de los animales, además posibilita la estimación del aporte nutricional de las materias primas utilizadas en las dietas, determinando si hay excesos de nutrientes en las dietas o por lo contrario existe una deficiencia nutricional.

Una deficiencia de nutrientes puede traer consecuencias negativas sobre parámetros productivos y reproductivos, sin embargo, un exceso de nutrientes puede acarrear efectos perjudiciales para el medio ambiente. Los excedentes de nitrógeno y fósforo que aportan las dietas con balances positivos de estos nutrientes son excretados de los animales por medio de las heces y orina. Excesos en el contenido de proteína cruda en la dieta tienen un impacto significativo en las emisiones de óxido nitroso. Además de significar una fuente de emisiones de GEI, según FAO (2013) el exceso de nitrógeno y fósforo están asociados a una aceleración en el proceso de eutrofización en aguas superficiales, el cual es un proceso relacionado al crecimiento excesivo de algas disminuyendo la disponibilidad de oxígeno y deteriorando la calidad del agua, debido a un mal manejo de los desechos orgánicos, lo que significa que generan también un impacto negativo sobre los ecosistemas acuáticos.

Un mal manejo de los desechos orgánicos puede provocar otros problemas para el medio ambiente y la salud de animales y humanos. Se puede dar un aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero como el metano y el óxido nitroso, también aplicaciones en altas dosis de excretas en los suelos pueden afectar negativamente la fertilidad del mismo. Lixiviados de nitratos provenientes de lugares de aplicación o almacenamiento de excretas pueden transferirse a las aguas subterráneas, afectando la calidad del agua de consumo humano (FAO 2013).

Algunas medidas relacionadas a la gestión de las excretas pueden reducir el impacto ambiental; el uso de instalaciones que permitan recolectar y almacenar los desechos previene la escorrentía de nutrientes al medio ambiente, además pueden ser almacenados para utilizarse como fertilizantes. Otras prácticas como la regulación de la temperatura de los desechos almacenados y la aireación de las excretas pueden influir en las emisiones de metano (CH_4) y amoníaco (NH_3), además de tener un efecto positivo en la reducción del óxido nitroso (N_2O) (Global Research Alliance 2014), esto se da debido a que

conforme aumenta la temperatura hasta valores de 40°C se da un aumento en la actividad microbiana relacionada a los procesos de nitrificación (Claros 2012).

El uso de excretas como fertilizante es una medida viable para la reducción de las emisiones de óxido nitroso, estas emisiones son reducidas si la cantidad de nitrógeno aplicado es la cantidad necesaria que la pastura requiere para un óptimo crecimiento, también pueden haber reducciones según la época en la que se aplique, es recomendable hacer uso de esta materia prima en épocas del año donde el crecimiento es menor (Global Research Alliance 2014). Otra medida que puede ser aplicada es el uso de la digestión anaeróbica de los desechos, en esta se da la degradación de materia orgánica por las arqueas, produciendo metano, dióxido de carbono y otros gases, esta práctica es una excelente alternativa para mitigar las emisiones de GEI, además, este tipo de procesos pueden ser una fuente de energía renovable debido a la producción de biogás el cual está constituido en un 60-80% de metano (FAO 2013). Se debe de tomar en cuenta que el metano producido por el biodigestor debe ser consumido para evitar la liberación del mismo al medio ambiente.

Otras medidas relacionadas al uso de electricidad, combustibles y gases refrigerantes pueden ser aplicadas; la sustitución de la iluminación por luces de bajo consumo puede ser una opción para disminuir el consumo de electricidad, asociado a esto, el uso de paneles solares pueden ser una fuente de energía renovable que puede disminuir el consumo eléctrico. La optimización en el uso de transporte y maquinaria agrícola permite disminuir el consumo de combustible y el uso de aceites lubricantes, y el reemplazo de gases refrigerantes en sistemas de aire acondicionado por gases energéticamente eficientes puede ayudar a reducir las emisiones de GEI (Vallejo et al. 2013).

3. OBJETIVOS

3.1 General

Realizar un análisis del componente nutricional, forrajero y del inventario de gases de efecto invernadero con el fin de proponer un sistema productivo sustentable en la lechería especializada del Instituto Agropecuario Costarricense.

3.2 Específicos

- Participar en la planificación de la implementación de un sistema silvopastoril conformado por pasto Mombaza (*Megathyrsus maximus cv Mombaza*) en asociación con la especie arbórea Melina (*Gmelina arborea*) en el área de vacas secas, en la finca dedicada al ganado de leche del Instituto Agropecuario Costarricense.
- Cuantificar los inventarios de gases de efecto invernadero y la remoción de gases de la lechería y del sistema silvopastoril que se desea implementar en la Escuela Técnica Agrícola e Industrial.
- Analizar la calidad y composición nutricional del componente forrajero que forma parte de la dietas del hato lechero.

4. MATERIALES Y METODOS

4.1 Descripción del lugar

Se realizó la práctica dirigida de 16 semanas en el Instituto Agropecuario Costarricense (IACSA), el cual es una institución perteneciente a la Conferencia Episcopal de Costa Rica, creada en 1962. A este instituto pertenece el Colegio Agropecuario de San Carlos (CASC) y la Escuela Técnica Agrícola e Industrial (ETAI). La ETAI es una institución parauniversitaria que imparte el grado de diplomado en carreras como administración de empresas, biotecnología, ciencias agropecuarias, manejo forestal, contabilidad y finanzas, y servicio y actividades ecoturísticas.

Además de las instituciones mencionadas, el IACSA cuenta con sistemas de producción de ovinos, caprinos, gallinas ponedoras y pollos de engorde. A su vez cuenta con un módulo de lechería especializada que entrega su producción a la Cooperativa Dos Pinos. El IACSA cuenta con aproximadamente 50 hectáreas dedicadas a la lechería especializada, predominando en ellas los pastos Mombaza (*Megathyrus maximus cv Mombaza*) y estrella (*Cynodon nlemfluensis*). El hato de esta lechería está conformado por 98 animales de las razas Holstein, Jersey y Girolando principalmente. De los cuales 77 semovientes están en producción y 21 vacas están secas, siendo este sistema el utilizado para realizar esta práctica.

4.2 Plan de trabajo

4.2.1 Participación de la planificación para la implementación de un sistema silvopastoril en el área destinada al pastoreo de las vacas secas de la lechería especializada del IACSA

Durante el desarrollo de la práctica dirigida se colaboró con la propuesta del proyecto de planificación para el establecimiento de un sistema silvopastoril en el área dedicada al pastoreo de las vacas secas de la lechería del IACSA, el cual estuvo a cargo del coordinador de la carrera de Ciencias Forestales de la Escuela Técnica Agrícola e Industrial. Esta propuesta formó parte de un proyecto de restauración de paisajes de la finca, buscando solucionar diferentes problemáticas relacionadas con el área agrícola, ganadera y forestal del mismo instituto. Para esto se colaboró con el análisis de la situación actual del área de pastoreo, se elaboró una propuesta de redistribución del área de pastoreo, y la estimación de los costos de la redistribución de la misma y del establecimiento de pasturas.

4.2.1.1 Situación actual del área de pastoreo de las vacas secas

Para el análisis de la situación actual del área de pastoreo de las vacas secas se realizó un recorrido por la zona para observar el estado de los apartos. Además se realizó una estimación de composición botánica para la determinación de las especies predominantes en el área de pastoreo. Para esto se utilizó un marco de PVC de 50x50 cm, con el cual se tomaron 15 puntos en cada apto, y se le asignó un porcentaje según la especie presente: gramínea, gamalote, Mombaza, hoja ancha y ciperácea. Una vez obtenido todos los puntos en cada apto se estimó el porcentaje total de cada especie.

También para realizar el análisis de la situación del área de pastoreo se procedió a realizar un análisis de suelo, para lo cual se escogió un apto representativo 3815 m² para determinar las condiciones generales de la finca y se tomaron 7 muestras a una profundidad de 20 cm para formar una muestra compuesta la cual se cuarteó y se extrajo una muestra de 1,0 kg, y se envió al Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) de la Universidad de Costa Rica, para la realización de un análisis químico completo KCl-Olsen Modificado y un análisis de materia orgánica.

4.2.1.2 Redistribución del área de pastoreo de las vacas secas y estimación de costos

El terreno disponible para llevar a cabo este proyecto es de aproximadamente 6,7 hectáreas. Se procedió a trazar un recorrido de las áreas delimitadas por cercas utilizando un GPS para tener un mapa más detallado del área efectiva. A partir de esto se procedió por medio del programa de información geográfica Quantum GIS a realizar la propuesta para la redistribución de los apartos.

Para la correcta redistribución de los apartos, se necesitó estimar el tamaño adecuado de los mismos, esto se logró por medio de la recolección de información de la cantidad de vacas secas en pastoreo y el peso de los animales. A su vez, se estimó el rendimiento en materia seca del pasto a utilizar para la renovación de los apartos (*Megathyrsus maximus cv Mombaza*). El mismo se determinó por medio del muestreo de un apto, utilizando un área de 16 m² a una altura de 20 cm, se pesó, y luego se extrajo una submuestra de 0,8 kg, que se secó en una estufa a 60°C por 48 horas para la obtención de la materia seca. A partir de estos datos se obtuvo la disponibilidad de MS total que permitió generar el tamaño de apartos más pertinente para el pastoreo de las vacas secas.

Se utilizó el software de información geográfica; Quantum GIS, con el cual se dividió la imagen aérea de la finca obtenida por drones, tomando en cuenta el tamaño de los apartos, caminos y las franjas del sistema silvopastoril, siendo las últimas de 6 metros de ancho.

Una vez obtenida la nueva distribución a partir de los datos de perímetros y áreas de los apartos, franjas silvopastoriles y caminos, se procedió a estimar los costos de la implementación del sistema, tomando en cuenta los costos para la preparación del terreno, materiales a utilizar para el establecimiento de las cercas, mano de obra, costo de la semilla de pasto y las plantas de Melina para las franjas silvopastoriles.

4.2.2 Estimación de la Huella de Carbono de la lechería especializada

Se estimó la Huella de Carbono de la lechería especializada, para determinar la proporción de gases de efecto invernadero emitidos por la categoría de vacas secas. Esta información es requerida para analizar la compensación de la Huella de Carbono por parte del sistema silvopastoril propuesto para esta categoría.

La estimación de la Huella de Carbono se hizo con base en la *Guía Metodológica para Gestionar la Huella de Carbono en la Industria Cárnica* (Vallejo et al. 2013). Se determinó primeramente las fuentes emisoras de GEI por parte del IACSA que se iban a incluir para la elaboración del inventario de GEI, es decir, se establecieron los límites para llevar a cabo dicho inventario.

4.2.2.1 Límites organizacionales

El límite organizacional para la elaboración del inventario de la Huella de Carbono se enfocó únicamente en la actividad pecuaria de la lechería especializada del Instituto Agropecuario Costarricense, por lo que sólo se tomaron en cuenta las fuentes de emisión provenientes de dicha actividad.

4.2.2.2 Límites operativos (alcances)

Las fuentes directas de emisión (o alcance tipo 1) que se incluyeron en el inventario fueron: emisiones producto de la fermentación entérica, excretas, uso de fertilizantes, uso de combustible, uso de aceites lubricantes, y manejo de residuos orgánicos. Las emisiones de gases de efecto invernadero producto del uso de electricidad se incluyeron dentro de las fuentes indirectas (alcance tipo 2).

4.2.2.3 Recolección de datos para la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero

Para la elaboración del inventario de la Huella de Carbono de la lechería especializada se recolectaron datos del año 2017, debido a que se necesitan los datos de un año calendario completo, y al momento de realizar la práctica estos eran los datos completos disponibles. Estos datos fueron procesados en hojas de Excel para un mejor ordenamiento de los mismos.

Los datos recolectados fueron:

- Fermentación entérica: se recolectaron los datos de la estructura de hato, además se realizó el pesaje de los animales de producción y las vacas secas; el peso de la categoría de terneras se obtuvo del programa computacional de reGISStros Vampp Bovino Versión 3.0.
- Excretas: se estimó la producción de metano (CH_4) y de óxido nitroso (N_2O) a partir de la estructura de hato disponible para el año analizado.
- Fertilizantes: se recolectó información del tipo de fertilizante utilizado, dosis aplicada, frecuencia de aplicación y cantidad de terreno abarcado.
- Combustible: se obtuvo información de la cantidad de litros utilizados durante el año, para el funcionamiento de la maquinaria agrícola y el camión de transporte.
- Aceites lubricantes: se obtuvo información de la cantidad de cambios de aceite realizados durante el año a la maquinaria agrícola y al camión utilizado para transporte de alimento, además de la cantidad de aceite utilizado en cada cambio.
- Residuos orgánicos: se recolectaron datos de la cantidad de horas que pasan los animales en confinamiento, además del dato de peso vivo de los animales de producción.
- Electricidad: la lechería cuenta con medidor propio, por lo que se obtuvo la información del registro de la cantidad de kWh consumidos por la misma.

4.2.2.4 Cálculo de la Huella de Carbono

Una vez recolectados los datos se procedió a realizar los cálculos por medio de fórmulas en Excel. Se utilizaron las fórmulas descritas en la *Guía Metodológica para Gestionar la Huella de Carbono en la Industria Cárnica* (Vallejo et al. 2013), y de manera general las emisiones de GEI se calcularon por medio de la fórmula:

Total datos de la actividad * *Factor de emisión* = *Emisiones (t)* * *Potencial de Calentamiento Global* = $\text{CO}_2 \text{ e (t)}$.

Los factores de emisión (FE) de cada fuente de emisión de GEI y los potenciales de calentamiento global (PCG) se describen en *Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero* (IPCC 2006).

Se utilizaron las siguientes fórmulas para el cálculo de la estimación de GEI de cada fuente (IPCC 2006):

Fermentación entérica:

- $\text{Emisiones de CH}_4 = \text{Unidades animales} * \text{FE (kg CH}_4/\text{animal/año)} * \text{PCG (CH}_4)/1000$.

Excretas:

- $\text{Emisiones de CH}_4 = \text{Unidades animales} * \text{FE (kg CH}_4/\text{animal/año)} * \text{PCG (CH}_4)/1000$.
- $\text{Emisiones de N}_2\text{O} = \text{Unidades animales} * \text{FE N (kg N/cabeza/año)} * \text{FE N}_2\text{O} * \text{PCG N}_2\text{O}/1000$.

Fertilizantes:

- $\text{Emisiones de N}_2\text{O} = \text{kg N} * \text{FE N}_2\text{O-N} * 44/28 * \text{PCG N}_2\text{O}/1000$.

Combustible:

- $\text{Emisiones de CO}_2 = \text{Total consumo combustible (litros)} * \text{FE CO}_2 \text{ (t CO}_2/\text{l)} * \text{PCG CO}_2$
- $\text{Emisiones de CH}_4 = \text{Total consumo combustible (litros)} * \text{FE CH}_4 \text{ (t CH}_4/\text{l)} * \text{PCG CH}_4$
- $\text{Emisiones de N}_2\text{O} = \text{Total consumo combustible (litros)} * \text{FE N}_2\text{O (t N}_2\text{O/l)} * \text{PCG N}_2\text{O}$

Aceites lubricantes:

- $\text{Emisiones de CO}_2 = \text{Litros de aceite} * \text{FE CO}_2 \text{ (kg CO}_2/\text{l)} * \text{PCG CO}_2/1000$.

Electricidad:

- $\text{Emisiones de CO}_2 = \text{Total consumo electricidad (kWh)} * \text{FE CO}_2 \text{ (t CO}_2/\text{kWh)} * \text{PCG CO}_2$

Lombricompost:

- Emisiones $CH_4 = \sum a (Ma * EFa) * PCG CH_4$, donde a= compostaje, Ma: masa de materia orgánica y EF: factor de emisión CH_4 (kg CH_4 / kg de materia orgánica) (Rivadeniera 2017).

Una vez obtenido el valor de las emisiones de gases de efecto invernadero por parte de la lechería especializada se estimó la cantidad de GEI emitidos por hectárea. Con este valor y con la cantidad de hectáreas pertenecientes al área de pastoreo de las vacas secas se procedió a calcular la cantidad de GEI emitida por esta categoría.

Producción de CO_2 e/kg leche (Quirós 2015):

- $\frac{(0,337+0,116*G+0,06*P)*L}{\text{kg } CO_2 \text{ e totales}}$, donde G: grasa, P: proteína y L: kg leche/año.

4.2.2.5 Compensación Huella de Carbono

Se realizó la determinación de la compensación de la Huella de Carbono del proyecto silvopastoril para el pastoreo de las vacas secas; para esto se calculó la fijación de dióxido de carbono en las franjas silvopastoriles. Se utilizó la fórmula $CO_{2fijado} = C * (44/12)$, donde C= carbono teórico fijado en plantaciones de Melina en Costa Rica, con un valor de 8,2 t/ha (Rodríguez y Pratt 1998). Este valor corresponde a una densidad de siembra recomendada para producción de madera para aserrío de aproximadamente 1100 plantas/ha, lo que equivale a una distancia de siembra de 3 x 3 m (Sampayo et al. 2011).

De la misma manera, se procedió a estimar la fijación de CO_2 en el bosque secundario y la zona de protección del río, utilizando como valor de fijación de CO_2 el obtenido por Chacón et al. (2007) de 3,1 t/ha para bosques secundarios. Con el valor total obtenido de fijación de CO_2 y con la cantidad de GEI emitidos por la categoría de vacas secas, se estimó por diferencia el balance de carbono del sistema.

Para la estimación de la fijación de carbono por parte del suelo, se consideró el valor obtenido por Abarca (2019) de carbono orgánico almacenado en el suelo en dos distintas zonas de San Carlos; Upala y Cutris, el cual es de 2,29 ton C/ha. Este valor se multiplica por el factor de conversión 44/12 (Rodríguez 2016) para obtener los valores de CO_2 e, con el valor obtenido se estimó la cantidad de CO_2 e removidos en la totalidad del área de pastoreo de las vacas secas, la cual es de 6,69 hectáreas.

4.2.3 Balance nutricional de la dieta del hato lechero

Se realizó un balance nutricional de la dieta de los animales adultos de la categoría de producción, para lo cual se recolectaron datos de la dieta utilizada en los animales, estos datos fueron facilitados por el encargado del lugar. Se estimó el consumo aproximado de sorgo en canoa, por medio de la toma de 7 muestras y pesaje de las mismas. También se estimó el consumo de forraje en pastoreo, por medio del muestreo de forraje disponible antes y después del pastoreo. Se tomó una muestra de 16 m² pre y post pastoreo, y se procedió a tomar una submuestra de aproximadamente 1,5 kg a la cual se le estimó el contenido de materia seca, por medio de un secado en estufa a 60° por 48 horas.

Para la determinación del requerimiento de energía, proteína y fósforo se dividieron los animales en las categorías de alta productora; si el animal produce más de 15 kg y baja productora si el animal produce menos de 15 kg, también se hizo una subcategoría dependiendo del período de lactancia en el que se encuentre el animal (Inicio, media y final de lactancia) y posteriormente se calculó el requerimiento según la categoría y subcategoría, se utilizaron las fórmulas:

Proteína (g) (Elizondo 2003):

- Mantenimiento: $152,11 + (0,4218 * \text{Peso Vivo})$
- Producción: $43,61 + (11,543 * \text{Peso Vivo}) * \text{kg Leche}$

Energía (Mcal) (Elizondo 2009):

- Mantenimiento: $0,08 * \text{Peso vivo}^{0,75}$
- Caminar: $0,00045 * \text{Peso Vivo} * \text{Distancia sala de ordeño}$
- Pastoreo: $0,0012 * \text{Peso Vivo}$
- Actividad Quebrado: $0,006 * \text{Peso Vivo}$
- Producción de Leche: $(0,0929 * \text{Grasa}) + (0,0547 * \text{PC}) + (0,0395 * \text{Lactosa}) * \text{kg Leche}$

Fósforo (g)

- Mantenimiento: $(\text{kg MS} * 1) + (0,002 * \text{Peso Vivo}) + (0,09 * \text{kg Leche})$

Los requerimientos nutricionales se calcularon en una plantilla de Excel, para luego utilizarse en el balance nutricional, comparando el requerimiento contra el aporte de la dieta utilizada. Una vez realizado el balance se calculó una nueva dieta incluyendo diferentes

ingredientes para mejorar su composición nutricional, se calculó el costo de la misma y se comparó respecto a la utilizada habitualmente.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1 Participación en la planificación del proyecto silvopastoril del Instituto Agropecuario Costarricense

5.1.1 Situación actual del área de pastoreo de las vacas secas

Se realizó un reconocimiento del lugar en el cual se pretendía implementar el proyecto silvopastoril. Primeramente, con el recorrido de los apartos destinados al pastoreo de las vacas secas, se pudo observar que esta área se divide únicamente en 7 apartos de diferentes tamaños. En la Figura 1 se muestra el área de pastoreo y la cantidad de apartos que se manejan, esta imagen fue obtenida por medio de drones, la cual se utilizó posteriormente para el tema silvopastoril. Se pueden identificar tamaños heterogéneos, lo que supone la falta de un esquema de rotación eficiente. Es importante que exista un sistema de rotación de potreros, ya que esto permite que los períodos de ocupación sean cortos impidiendo que los animales consuman los rebrotes, disminuyendo las reservas de la planta para crecer nuevamente después del pastoreo, también permite mejorar la calidad y cantidad del forraje, brindando forraje con una buena producción de materia seca y con un adecuado contenido nutricional, además, con sistemas de rotación adecuados se puede planificar las labores culturales de una manera más ordenada (Pérez 2011).



Figura 1. Disposición de los apartos del área de pastoreo de las vacas secas de la lechería especializada.

Los períodos controlados de descanso permiten optimizar la cantidad y calidad del forraje, ya que si se brinda forraje muy tierno la calidad es elevada, sin embargo, se obtiene poco rendimiento de materia seca, mientras que un período de descanso prolongado provoca una disminución de la calidad, al aumentar la proporción tallo: hoja (Pérez 2017). Es de suma importancia una correcta rotación de los apartos, ya que permite obtener una mayor eficiencia por unidad de superficie, además permite que se dé un apropiado descanso de la pastura, permitiendo una correcta recuperación y crecimiento de los apartos, esto se logra con una división apropiada de los apartos, la cual disminuye el pisoteo, la compactación del suelo y la erosión del suelo, además permite una mayor infiltración de agua y mayor penetración del aire (Dávila et al. 2005).

La alimentación y el cuidado de la vaca lechera son de suma importancia, debido a que esta etapa tendrá grandes repercusiones en el período de lactancia del animal. Nutrefeed (2010), menciona que la alimentación de la vaca seca es uno de los aspectos más descuidados en los sistemas lecheros, sin embargo, este período es de vital importancia, ya que una alimentación deficiente durante esta etapa puede conllevar a la disminución de la condición corporal de los animales, provocando bajos picos de lactancia, aumento en el intervalo parto-celo, por consiguiente un aumento en el intervalo parto-concepción. Además durante las últimas 3 semanas de gestación existe un aumento en el requerimiento de energía debido al desarrollo del feto y la síntesis del calostro, también la glándula mamaria tiene una elevada demanda de glucosa, aminoácidos y ácidos grasos a los 4 días post parto (Díaz et al. 2011), por lo que es de suma importancia la correcta alimentación de los animales de esta categoría.

Asociado a lo anterior, es importante determinar la especie de pasto disponible para la alimentación de esta categoría, por lo que se realizó un análisis de la composición botánica en los apartos de pastoreo para las vacas secas. Se observó la ausencia de un pasto predominante, además de potreros invadidos por malezas como el gamalote, lo que dificulta la disponibilidad de forraje para los animales de esta categoría. También se identificaron zonas con mal drenaje, con excesivo encharcamiento, lo que es un indicativo de que existe una posible compactación del terreno. Noguera y Vélez (2011) menciona que el pisoteo de los animales en pastoreo provoca una mayor compactación en los primeros 15 cm de suelo, disminuyendo la porosidad y aumentando la densidad aparente, causando una disminución del desarrollo de las raíces de la planta y el rendimiento de la misma.

Por otra parte Villanueva e Ibrahim (2002) analizaron el efecto de un sistema silvopastoril de conformado por Jaúl (*Alnus acuminata*) de cuatro años y pasto Kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) sobre parámetros de densidad aparente y resistencia a la penetración en comparación a un monocultivo de pasto kikuyo, se obtiene una disminución en la resistencia a la penetración, con valores de 3,16 y 2,14 kg/m² para el sistema silvopastoril y el monocultivo respectivamente, en el caso de la densidad aparente el valor obtenido fue de 1,23 g/cm³ para el monocultivo y 1,07 g/cm³ para el sistema silvopastoril, evidenciando los beneficios de implementar un sistema silvopastoril.

Otra apreciación de los potreros es que las cercas que delimitan los apartos no se orientan de este a oeste, por lo que la sombra de los árboles se proyecta sobre el pasto dificultando el crecimiento del mismo. Villamizar y Salgado (2011) en su estudio analizaron el efecto de la incidencia de luz sobre la producción de materia seca del pasto mombaza a diferentes edades de corte; 25, 35, y 45 días, con producciones de materia seca bajo condiciones de luz de 390, 312,5 y 244,9 kg MS/ha respectivamente, y producciones de materia seca bajo condiciones de sombra natural de 110,3, 122,2 y 52,6 kg MS/ha para las tres edades de corte mencionados, respectivamente. El efecto de la incidencia de luz sobre la producción de materia seca se puede reducir manejando la orientación de los árboles, de manera tal que una orientación de este-oeste permite pasar la luz solar hacia el pasto (MARENA 2006)

5.1.1.1 Estimación de la composición botánica de los apartos de pastoreo de las vacas secas.

Para evidenciar la situación de la disponibilidad forrajera se realizó la estimación de la composición botánica, para la cual se tomaron un total de 105 puntos. En el Cuadro 1 se observa la proporción de las especies encontradas en el lugar.

Cuadro 1. Composición botánica promedio de los apartos de pastoreo de las vacas secas

Especie	Proporción %
Gramínea	72,2
Gamalote	10,48
Mombaza	9,70
Hoja Ancha	6,40
Ciperácea	1,20
Total	100

Se encontró que existe una alta variabilidad en cuanto a la composición de forraje de los apartos, por lo tanto existe un desequilibrio en el aporte de nutrientes debido a que la composición nutricional de las especies que forman parte del componente forrajero no es homogénea. Esto significa que los animales reciben una alimentación desbalanceada, la cual puede provocar una deficiencia nutricional repercutiendo negativamente en la condición corporal de las vacas secas, debido a que el pasto Mombaza compone sólo el 9,7% de las especies forrajeras de los apartos, lo que demuestra que existe una necesidad de establecer una pastura que permita satisfacer los requerimientos nutricionales de mantenimiento y gestación. Según Ospina (2007), cuando se presenta un balance energético negativo en una vaca postparto se da una elevada movilización de reservas corporales, llegando a provocar hígado graso, afectando la síntesis de colesterol por lo tanto la producción de hormonas reproductivas derivadas del mismo.

En el período de transición de la vaca seca es importante promover el consumo de materia seca, debido a que en los últimos días de secado se da una tendencia a la disminución del consumo de materia seca. La disponibilidad de una fuente de forraje en el período de transición estimula el consumo y prepara la flora y papilas ruminales promoviendo un aumento en la motilidad, por otra parte, mantener a los animales en condiciones mínimas de estrés previene que se dé una disminución del consumo (Fernández 2013), por lo que el establecimiento de un sistema silvopastoril podría prevenir bajas en el consumo de alimento, debido a reducción del estrés calórico debido a la sombra proveída por los árboles que forman parte del sistema.

5.1.1.2 Análisis de suelo de los apartos de pastoreo de las vacas secas.

Otra de las actividades realizadas para el conocimiento de la situación del área de pastoreo fue el muestreo del suelo para el posterior análisis químico y de materia orgánica (ver Anexo 1 y 2), en el Cuadro 2 se puede observar los parámetros analizados.

Cuadro 2. Análisis de suelo químico y de materia orgánica realizado en los apartos de pastoreo de las vacas secas.

		Valores Críticos	Muestra
pH	H ₂ O	5,5	5,8
cmol(+)/L	Acidez	0,5	0,15
	Ca	4	13,31
	Mg	2	7,24
	K	0,2	0,35
	CICE	5	21,05
%	SA	---	0,7
mg/L	P	10	3
	Zn	3	4
	Cu	1	12
	Fe	10	77
	Mn	5	74
mS/cm	CE	1,5	0,2
%	C	---	1,5
	N	---	0,18
Relación	C/N	---	8,3

Según Bernier y Alfaro (2006) la acidez afecta el rendimiento, persistencia y calidad de los cultivos. Además en condiciones de acidez se da un aumento en la solubilidad de iones de aluminio y manganeso, estos producen toxicidad en las plantas, disminuyendo el crecimiento de las mismas y consecuentemente viéndose afectada la producción de materia seca. Asimismo, provocan la inhibición de la absorción de macronutrientes secundarios como el calcio y el magnesio por parte de las plantas. Por lo que la acidez es un parámetro de suma importancia que debe ser analizado. Según Bertsch (2015), se considera que un suelo presenta problemas de acidez cuando el 10% del valor de la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) es menor al valor de acidez. El análisis de suelos realizado para el

área de pastoreo de las vacas secas, indica que el mismo no presenta problemas de acidez, siendo el 10% de la CICE (2,10 vs 0.15) mayor a la acidez.

En el caso de macronutrientes como el calcio, potasio y magnesio, y micronutrientes como el fósforo, zinc, cobre, manganeso y hierro (Cuadro 2), todos se encuentran por debajo de valores máximos recomendados para estos minerales y por encima de los valores críticos, esto se puede observar en el Cuadro 3, el cual indica los valores adecuados para los nutrientes analizados por medio de la solución extractora KCl-Olsen (Bertsch 2015).

Cuadro 3. Valores críticos y máximos de nutrientes analizados por medio del ensayo en solución extractora KCl-Olsen.

Característica	Nivel Crítico	Máximo
Saturación de acidez, %	Más de 10	
Calcio (cmol/L)	Menos de 4	Más de 50
Magnesio (cmol/L)	Menos de 1	Más de 15
Potasio (cmol/L)	Menos de 0,2	Más de 5
Fósforo (mg/L)	Menos de 10	Más de 200
Zinc (mg/L)	Menos de 2	Más de 50
Cobre (mg/L)	Menos de 1	Más de 100
Manganeso (mg/L)	Menos de 5	Más de 100
Hierro (mg/L)	Menos de 10	Más de 500

Tomado de Bertsch (2015)

Según Gamarra et al. (2018), la relación de carbono-nitrógeno (C/N) es un indicativo de la calidad del sustrato orgánico del suelo, y expresa la cantidad de nitrógeno disponible para las plantas. En suelos con valores de entre 10 y 14 se da una mineralización y una rápida ruptura de tejidos, debido a la estimulación de la actividad microbiana, aumentando los nutrientes disponibles para las plantas y microorganismos. En el Cuadro 2 se puede observar que la relación C/N se encuentra por debajo del valor indicado.

Este valor puede ser mejorado por medio del uso de sistemas silvopastoriles. Crespo (2008) menciona que existe un enriquecimiento del suelo por efecto de los árboles cercanos a las pasturas, debido a que hay mayor flujo de nutrientes en el sistema suelo-pasto por la acción de la biomasa de los árboles, aumentando la entrada de carbono al sistema por los

residuos de hojas y ramas de los árboles. También los sistemas silvopastoriles aumentan los indicadores de fertilidad como la materia orgánica, N, P, K, Ca, Mg y pH, por lo que es de suma importancia el uso de estos sistemas para mejorar la calidad de los suelos de las áreas de pastoreo de la lechería especializada.

5.2 Redistribución del área de pastoreo de las vacas secas y estimación de costos

Para la planificación de la implementación del sistema silvopastoril en el área de pastoreo de las vacas secas se necesitó primeramente determinar la disponibilidad forrajera para posteriormente realizar la correcta distribución de los apartos según las necesidades de los animales. El pasto que se escogió en la institución para conformar el sistema silvopastoril fue el Mombaza (*Megathyrus maximus* cv Mombaza). Debido a que en los apartos de las vacas secas no hay un pasto implementado como tal, se procedió a muestrear un apto de las vacas de producción que sí tiene el pasto Mombaza establecido, para tener una idea del rendimiento de este pasto en el lugar y poder realizar la distribución de los apartos en función del rendimiento de materia seca.

Para esto se recolectó una muestra de 16 m² del pasto y se obtuvo un peso en fresco de 44,86 kg, del total se extrajo una muestra de 800 gramos la cual se secó en una estufa para la determinar el contenido de materia seca. Se determinó que el rendimiento del pasto Mombaza fue de 5780,23 kg MS/ha, con un contenido de materia seca de 20,62% con 26 días de recuperación. Estos valores son cercanos a los obtenidos por Rodríguez (2009), el cual obtuvo el rendimiento y contenido de materia seca a diferentes edades de corta y diferentes alturas del pasto Mombaza, con valores entre 22-23% MS y un rendimiento de 4324 kg MS/ha para una altura de corte de 20 cm y 30 días de recuperación. Sin embargo, el dato de materia seca obtenido en esta práctica pudo haber sido sobreestimado por no usarse la metodología adecuada para la recolección de la muestra. En comparación a Rodríguez (2009), el cual en su estudio utiliza un marco de acero de 50x50 cm (0.25 m²) y tomó varias submuestras de cada parcela analizada, obteniendo un dato más representativo del rendimiento del pasto.

El rendimiento obtenido en la presente práctica puede atribuirse al manejo de la pastura, el cual es fertilizado dos veces por año (mayo y agosto) a razón de 2 quintales por hectárea de Abopasto®, urea o Magnesamon®. También es fertilizado por medio de bomba boñiguera a razón de 5 tanques por hectárea en conjunto de 2 galones de microorganismos eficientes de montaña, una vez cada 30 días.

Es de suma importancia contar con una buena fuente de forraje como lo es el pasto Mombaza (*Megathyrus maximus* cv. Mombaza) para la alimentación animal, según Carrillo (2017) en su revisión menciona que el rendimiento en materia seca de este forraje es de 33 t/ha/año, valor que está por debajo del valor estimado; 52,62 t/ha/año (4,324 t con una frecuencia de pastoreo de 30 días), por lo que representa una ventaja, al haber una elevada disponibilidad de forraje. Por otra parte, el pasto Mombaza presenta atributos tales como; alta producción de forraje por hectárea, rápida recuperación después del pastoreo, tolerancia intermedia al salivazo (*Prosapia* sp.), tolerancia a altas condiciones de humedad temporales en el suelo, alta proporción hoja: tallo y buena calidad nutricional (Carrillo 2017).

Una de las actividades realizadas para el cumplimiento del objetivo fue la obtención del peso promedio de las vacas secas, esto para determinar la necesidad diaria de forraje en función del consumo de materia seca respecto al peso vivo. De acuerdo al NRC (2001) se puede estimar el consumo de materia seca a partir del contenido de fibra detergente neutro del forraje, con la siguiente fórmula: $120/\%FDN$. Según lo reportado por Barragán y Cajas (2019) el contenido de FDN del pasto Mombaza a los 28 días es de 63,69%, con esta información y los pesos obtenidos en el Cuadro 4 se obtuvo el requerimiento de materia seca diario/animal.

Cuadro 4. Peso de las vacas secas de la lechería especializada del IACSA.

ID	Peso (Kg)	ID	Peso (Kg)
618	437,5	170	575
9911/648	550	283	592,5
621	437,5	223	607,5
1122	340	739	382,5
8	430	274	507,5
113	545	616	475,5
3	540	1816 ESL	395
690	497,5	9450	460
9908/645	455	116	457,5
58	572,5	711	570
273	490	707	520
746	342,5	220	550
705	555	Promedio	491,42

Basado en un consumo de materia seca de 1,88 % PV se obtuvo un requerimiento de 9,26 kg MS; este valor corresponde al consumo de materia seca proveniente del pastoreo. Con estos datos se procedió a estimar el tamaño adecuado de los apartos según

la cantidad de terreno disponible. Por medio del programa Quantum GIS, se obtuvo un área total disponible para la implementación del sistema silvopastoril de 66.952,4 m², siendo 56.063,6 m² disponibles para la redistribución de los apartos y 10.888,7 m² para el establecimiento de las franjas de Melina, las cuales fueron se orientaban de este a oeste y tenían un ancho de 6 m.

El área aprovechable requerida para la totalidad de animales por día fue de 535,61 m², y tomando como porcentaje de aprovechamiento del apto, el reportado por Villalobos et al. (2019) para el pasto Mombaza de un 30%, se obtuvo que el tamaño por apto debe de ser de aproximadamente 1785 m². Con el área total disponible para la redistribución de apartos, se obtienen un total de 31 apartos con 30 días de descanso y 1 de ocupación. La distribución final de los apartos se puede observar en la Figura 2. En esta distribución se aprecia la disposición de las franjas silvopastoriles y la orientación de las cercas que delimitan los apartos, siendo ésta de este-oeste. La enumeración de los apartos establece el orden de rotación de los mismos, permitiendo que haya un tiempo adecuado de recuperación de las pasturas, para garantizar una buena producción de biomasa y calidad nutricional.

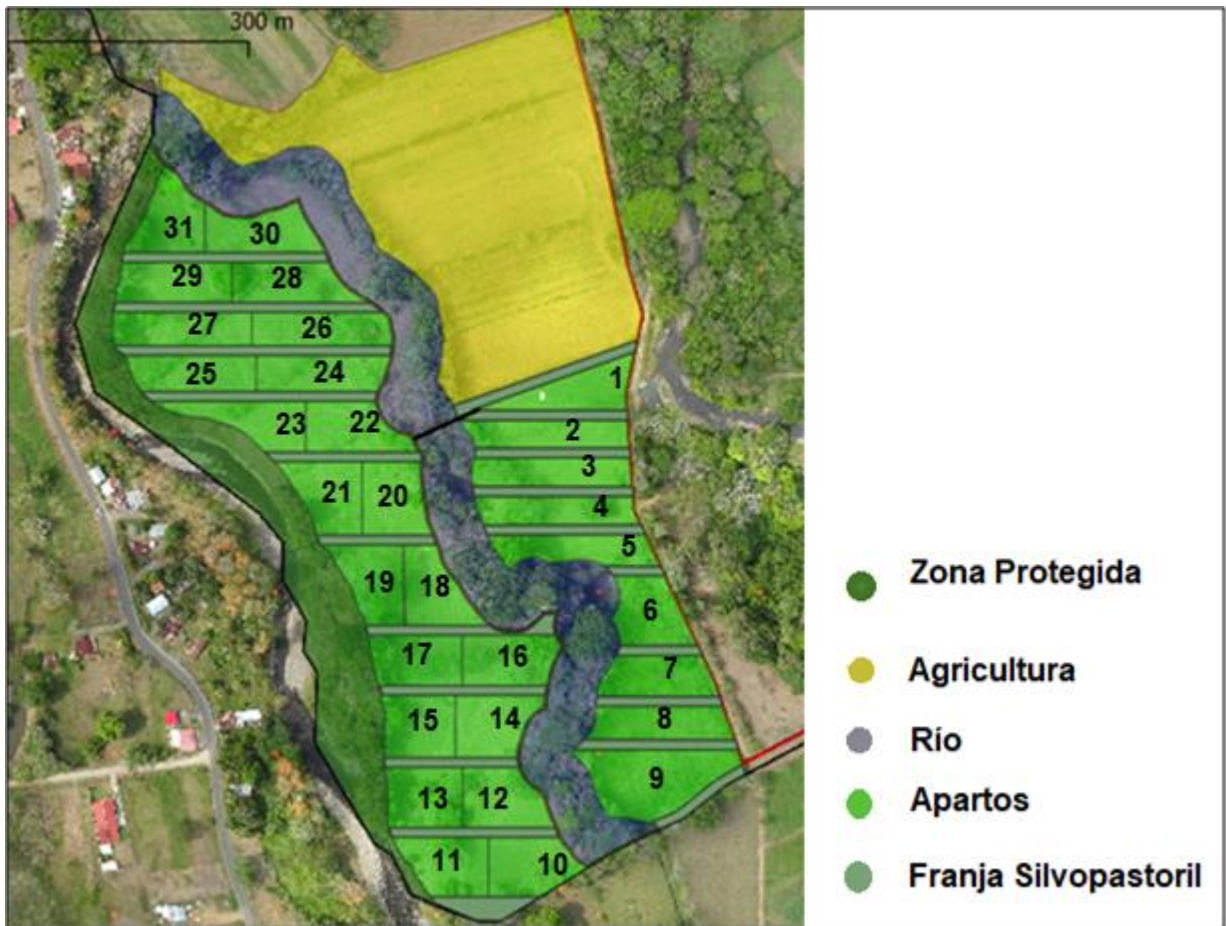


Figura 2. Propuesta de distribución para el establecimiento del sistema silvopastoril en el área destinada al pastoreo de las vacas secas de la lechería especializada del IACSA.

Respecto a la orientación de los apartos, es de suma importancia que los árboles utilizados para la implementación del sistema silvopastoril no proyecten una sombra sobre el pasto, Navarro y Villamizar (2012) en su estudio demuestran el efecto de la sombra natural proveída por árboles y el sol sobre distintos parámetros del pasto Mombaza a tres frecuencias de corte. Se obtuvo una mayor producción de materia seca en condiciones de luz directa que en condiciones de sombra para todas las frecuencias de corte, asociado a esto recalca la importancia del tiempo de descanso de las pasturas, ya que entre mayor sea este período la planta tendrá mayor capacidad para almacenar reservas, las cuales serán utilizados por los rebrotes hasta que la planta cuente con suficiente área foliar para acelerar el crecimiento a través de la fotosíntesis.

5.3 Estimación del costo de la implementación del sistema silvopastoril en el área dedicada al pastoreo de las vacas secas de la lechería especializada del IACSA.

A partir de la propuesta de distribución de apartos se estimó el costo de los materiales necesarios para la implementación del sistema, también se contempló el costo de la semilla de pasto y las plantas de Melina necesarias para las franjas silvopastoriles. Con ayuda del programa Quantum GIS se determinó los perímetros de los apartos y las áreas tanto de los apartos como de las franjas silvopastoriles, para la estimación de costos de delimitación de los apartos. En el Cuadro 5 se observa los rubros contemplados para la estimación del costo del establecimiento de la pastura y el delimitado de los apartos. Para el rubro de semilla de Mombaza se utilizó la densidad de siembra teórico de 6 kg/ha (Resusa 2019) en un área total de 56.063,6 m².

Cuadro 5. Estimación del costo de la propuesta de distribución de apartos y establecimiento de la pastura para el establecimiento del sistema silvopastoril.

Rubro	Monto ¢
Preparación Terreno Apartos	474.989
Semilla Mombaza	252.286
Alambre SilvoPastoril	66.319
Alambre Potreros	147.047
Cerca Eléctrica Silvopastoril	513.470
Cerca eléctrica apartos	2.743.812
Total	4.197.926

Tipo de cambio de venta BCCR, diciembre 2018: ¢598,69

Se estimó el costo para el establecimiento de las franjas del sistema silvopastoril; en el Cuadro 6 se puede observar los rubros considerados para la estimación de los costos, los cuales contemplan gastos del mantenimiento del proyecto en los primeros 5 años del establecimiento del mismo. El costo se determinó para un área total de 1,2 ha de plantación de Melina, con una densidad de siembra de 1250 plantas/ha, densidad propuesta por el ingeniero forestal del lugar, valor el cual se aproxima al reportado por Sampayo et al. (2011) de 1100 plantas/ha.

Cuadro 6. Costo total del establecimiento de la plantación de Melina (*GMelina arborea*) para el sistema silvopastoril a un plazo de 5 años.

Protocolo Establecimiento Silvopastoril			Costos Insumos, ¢	Costo Jornales, ¢
Año 1	Mes 0	Control Malezas Químico	75.000	30.000
		Subsoleo	200.000	30.000
		Control de Hormiga	14.000	60.000
		Siembra	300.000	90.000
	Mes 1	Resiembra	30.000	30.000
		1° Fertilización (17-17-17)	25.361	60.000
	Mes 2	1° Control Químico Malezas	39.000	30.000
	Mes 4	Poda Formación	1.600	60.000
			3.971	
	Mes 5	2° Control Químico Malezas	12.758	60.000
			9.132	
	Mes 6	2° Fertilización Fósforo	3.119	90.000
54.863				
Mes 8	3° Control Malezas	12.758	60.000	
		9.132		
Mes 11	4° Control Malezas	3.119	60.000	
		12.758		
Año 2	Mes 15	5° Control Malezas	9.132	60.000
		3.119		
	Mes 20	6° Control Malezas	12.758	60.000
			9.132	
Año 3		Raleo Sanitario	0	45.000
		Control Nectria	8.000	30.000
Año 4		Control Nectria	4.000	30.000
Año 5		Control Nectria	4.000	30.000
Total			884.850	135.000

Tipo de cambio de venta BCCR, diciembre 2018: ¢598,69

Se elaboró un flujo de caja del proyecto (Ver Anexo 3), en el cual se obtuvo un valor actual neto de ¢1.689.196,19 y una tasa interna de retorno del 29%. Villanueva et al. (2010) establecen que el valor actual neto es la diferencia entre los ingresos y egresos de un proyecto, siendo este conveniente cuando el valor obtenido es mayor a cero y la tasa interna de retorno es la tasa de interés a la cual el proyecto iguala su VAN a cero, si esta es mayor

a la tasa de interés con la que se inicia el proyecto es viable. Siguiendo lo anterior se pueden comparar los valores obtenidos, siendo el VAN mayor a cero y un TIR elevado cercano del 29%, en este caso no se tiene tasa de interés ya que la propuesta buscaba que se diera una inversión con fondos propios del instituto, de manera tal que se considerara que existe un retorno del dinero invertido. Sin embargo, si el valor del TIR se compara con la tasa básica pasiva (BCCR) correspondiente a la fecha del estudio, la cual corresponde a 5,75% para el mes de diciembre, tomando en cuenta este valor se considera que el presente proyecto es viable.

5.4 Estimación de la Huella de Carbono de la lechería especializada del IACSA

Se realizó la estimación de la Huella de Carbono de la lechería especializada incluyendo animales en producción y vacas secas para el año 2017 la cual generó 481,38 toneladas de dióxido de carbono equivalentes para el año en cuestión. En la Figura 3 se muestra de manera detallada la proporción de las emisiones de tCO₂e de cada rubro incluido en la estimación. El rubro de fermentación entérica y combustible son las principales fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero, con emisiones de 208,58 y 186,49 t CO₂e, respectivamente (Ver Anexo 4). El rubro de combustibles tiene una alta participación en las emisiones debido a que se contaba con dos tractores y un camión de transporte de alimento, aumentando el consumo de gasolina.

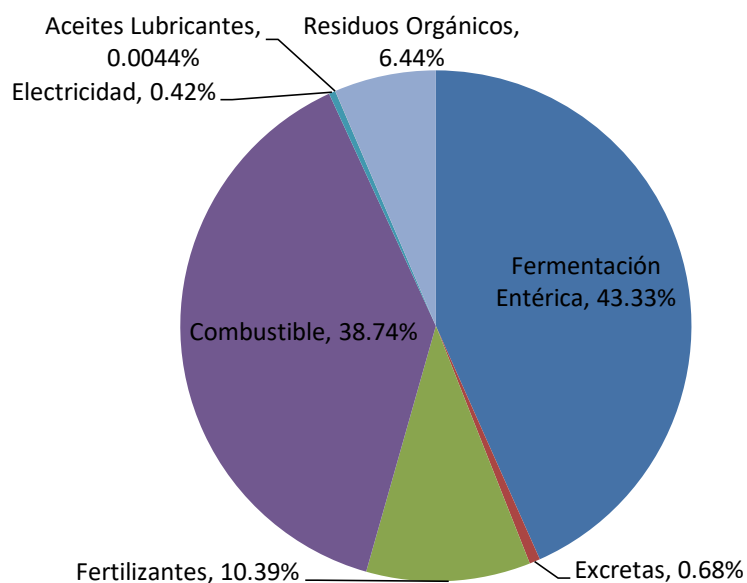


Figura 3. Distribución porcentual de emisiones de gases de efecto invernadero expresados en t CO₂e de la lechería especializada del IACSA para el año 2017.

La fermentación entérica es el rubro que posee mayor participación en las emisiones de gases de efecto invernadero provenientes de la actividad lechera. Estos resultados coinciden con los obtenidos por Quirós (2015), el cual realizó una estimación de la Huella de Carbono en una lechería en la zona de San Carlos, el cual obtuvo que el parámetro de fermentación entérica tiene un porcentaje de participación del 61,78% del total de las emisiones de CO₂e producidas por la explotación pecuaria. Por otra parte Gómez (2018) en su estudio determina que la contribución del rubro de fermentación entérica es del 59,2%, seguida por la gestión de excretas, fabricación y uso de insumos, aplicación de fertilizantes y uso de combustible y energía con valores de 20,8%, 12,2%, 5,3% y 2,5%, respectivamente.

Las emisiones de CO₂e de la lechería del IACSA provenientes de procesos fisiológicos como la fermentación entérica, gestión de excretas y residuos orgánicos representan el 50,45% de las emisiones totales, este valor se encuentra por debajo al reportado por el MAG (2010), el cual en su estudio determina el balance de GEI en fincas ganaderas de la región Chorotega, se obtiene que el 87% de las emisiones totales en las lecherías provienen de fuentes relacionadas a procesos fisiológicos. Rivera et al. (2016) en su estudio comparan las emisiones de metano provenientes de la fermentación entérica en un sistema silvopastoril conformado por *Leucaena* (*Leucaena leucocephala*) y pasto estrella africana (*Cynodon plectostachyus*) respecto a un sistema convencional de pasto estrella africana, estos reportan valores de 6 y 19,27 t/ha de CO₂e, estos valores pueden verse influenciados por el contenido y degradabilidad de la fibra.

Lo mencionado anteriormente indica que las emisiones de metano pueden ser disminuidas si se implementa un sistema silvopastoril, también es importante el conocimiento de alternativas relacionadas a la fermentación entérica, manejo de residuos y de excretas que pueden ser implementadas para mitigar las emisiones de CO₂e, que serán mencionadas más adelante.

Otro aspecto que puede ser analizado son las emisiones de GEI por unidad de producto (leche) emitidas por año. Durante el período analizado el hato de ordeño estaba formado por 70 animales en promedio, con una producción diaria de 989 kg de leche en total y 360.985 kg/año, con una composición de proteína y grasa de 3,4 y 4 % respectivamente. A partir de las emisiones totales de CO₂e obtenidas y la producción de leche anual se estimó que se producen 1,327 kg CO₂e/kg leche FPCM. Este valor es menor al reportado por Quirós (2015), el cual menciona que en el país se emiten 2,3 kg CO₂ e/ kg FPCM

(corrección de grasa y proteína corregido por la producción de leche total). También se encuentra por debajo al reportado por Gómez (2018) en su estudio, en el que se obtiene un valor de 1,43 kg CO₂ e/kg FPCM, por otra parte Rivera et al. (2016) reportan valores de 2,05 y 2,34 kg CO₂ e/kg leche FPCM para un sistema silvopastoril (Leucaena-pasto estrella) y un sistema convencional (pasto estrella) respectivamente. Estos valores se encuentran por arriba del obtenido en el presente estudio, sin embargo, aunque existe una elevada producción de equivalentes de CO₂ por parte de la actividad pecuaria analizada existe un producción admisible de CO₂ e por kilogramo de leche, sin embargo, se deben utilizar alternativas que contribuyan a la mitigación de las emisiones de CO₂ e por kilogramo de leche.

5.5 Compensación de la Huella de Carbono

Con los resultados obtenidos del inventario de la Huella de Carbono se determinó la producción de CO₂ emitidos por hectárea/año en la actividad lechera. Se obtuvo que se producen 8,02 t de CO₂ e por hectárea/año, de esta manera se establece que la categoría de vacas secas emite 53,72 t de CO₂ e/ha/año en un área total de 6,7 ha. Opuesto a esto se estimó la remoción de CO₂ por parte de la Melina del sistema silvopastoril y la remoción de CO₂ del bosque secundario (zona protegida), para calcular la compensación de la Huella de Carbono de la categoría de vacas secas. Se determinó que la Melina remueve 32,74 t de CO₂ al año, lo que coincide con lo reportado por Naranjo et al. (2012), quienes mencionan que los sistemas silvopastoriles asociados a especies maderables tienen la capacidad de remover 34,78 tCO₂ e. De igual manera, se estimó que el bosque secundario remueve 14,96 t de CO₂, así mismo, se estimó de manera teórica la remoción de CO₂ e por parte del suelo, obteniendo que el área de pastoreo de 6,69 ha fija 56,17 ton CO₂ e/año. En la Figura 4 se puede observar la diferencia existente entre las emisiones de CO₂ e y la remoción total de CO₂ (Melina y bosque secundario).

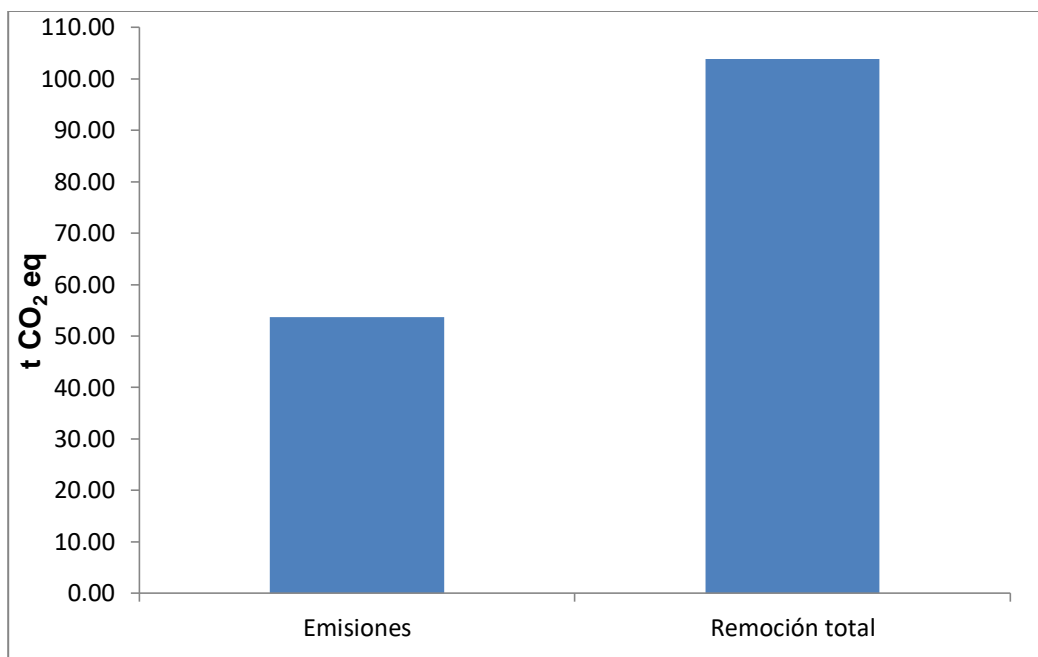


Figura 4. Compensación de la Huella de Carbono del proyecto silvopastoril de la categoría de vacas secas de la lechería especializada del IACSA.

Se determinó que con la implementación del sistema silvopastoril se produciría un balance positivo en cuanto a la compensación de la Huella de Carbono, lo que significa que se podrían remover mayor cantidad de CO₂e que los que el sistema emite, es decir, existen cerca de 50,15 ton CO₂e a favor, por lo que la implementación de un sistema silvopastoril tiene la capacidad de mitigar las emisiones de GEI provenientes de la categoría de las vacas secas, por lo tanto, es de suma importancia el tipo de pastura que forma parte del componente forrajero, ya que las gramíneas utilizadas como fuentes de forraje son generalmente de metabolismo C4, lo que permite una mayor capacidad de almacenamiento de carbono en forma de materia orgánica (FAO 2003), por otra parte, el manejo brindado a la pastura determinará si el carbono almacenado en el suelo por la planta se mantendrá almacenado en forma de materia orgánica o retornará al ambiente (Abarca 2016).

Un aspecto importante que determinará la capacidad de fijación de carbono por parte del sistema silvopastoril es la especie arbórea y el tipo de pasto utilizado. Naranjo et al. (2012) mencionan que sistemas silvopastoriles conformados por *Brachiaria brizantha* y *Arachis pintoi* tienen una capacidad de fijación de 15 t CO₂ e, mientras que sistemas conformados por pasto estrella (*Cynodon nlemfuensis*) en asocio con árboles fijan alrededor de 18 t de CO₂, también cabe destacar la capacidad de fijación de carbono que poseen los

pastos en monocultivo, por ejemplo pastos como el jaragua (*Hypparrhenia rufa*) y el kikuyo (*Kikuyocloa clandestinum*) en monocultivos tienen la capacidad de fijar 19,1 y 17,6 t CO₂e, respectivamente. Por lo tanto, se deben de plantear estrategias en cuanto a las especies utilizadas para conformar el sistema silvopastoril, ya que esto determinará la capacidad de fijación de carbono y por lo consiguiente la mitigación en las emisiones de GEI.

Según FAO (2013) existen algunas prácticas de mitigación de gases de efecto invernadero, relacionadas con procesos de fermentación entérica; prácticas asociadas al uso de suplementos alimenticios, como el uso de inhibidores, ionóforos como la monensina, compuestos bioactivos de las plantas como los taninos, saponinas y aceites esenciales; y aceptores de electrones como el fumarato, nitrato y sulfatos, uso de enzimas exógenas fibrolíticas y uso de levaduras son alternativas que ayudan a controlar las emisiones de metano proveniente de la fermentación entérica. También factores relacionados con la calidad de la dieta, como la calidad del forraje, contenido de concentrado, digestibilidad y el consumo de alimento afectan la producción de metano en el rumen, por ejemplo la madurez de los forrajes provoca un aumento en el contenido de lignina, FDN y FDA provocando una disminución en la digestibilidad del mismo, provocando un aumento en la producción de CH₄.

Estrategias de reducción de emisiones asociadas a fuentes como la iluminación y uso de combustibles, tales como la sustitución de la iluminación por luces eficientes, optimización de los recorridos de los vehículos y maquinaria agrícola, uso de paneles solares para calentamiento de agua, uso de gases energéticamente más eficientes para el funcionamiento de aire acondicionado, la implementación de biodigestores para gestionar la excretas y producción de biogás son alternativas sencillas que pueden implementarse para mitigar las emisiones de GEI provenientes de estos tipos de fuentes (Vallejo et al. 2013).

5.6 Balance nutricional de la dieta del hato lechero

Se determinó el requerimiento nutricional de energía neta de lactancia, proteína cruda y fósforo total del hato lechero en las categorías de alta y baja producción. En el Cuadro 7 se detalla el requerimiento nutricional de la categoría de alta producción. Se puede observar que el aporte de la dieta utilizada sobrepasa el requerimiento diario de los animales para todos los nutrientes, por lo tanto existe un balance positivo de nutrientes, lo que significa que los animales están consumiendo una cantidad de nutrientes mayor que el requerimiento nutricional de los mismos, por lo tanto existe una sobre alimentación del hato.

Cuadro 7. Balance nutricional de la dieta de las vacas altas productoras de la lechería especializada del Instituto Agropecuario Costarricense.

		PC (g)	ENL (Mcal)	Fósforo (g)
Inicio	Requerimiento	1.879,46	25,27	36,02
	Aporte	3.022,38	28,71	46,75
	Balance	1.142,92	3,44	10,73
Media	Requerimiento	1.946,02	24,59	36,85
	Aporte	3.022,28	28,71	46,75
	Balance	1.076,36	4,12	9,90
Final	Requerimiento	2.608,32	25,94	35,82
	Aporte	3.022,28	28,71	46,75
	Balance	414,06	2,77	10,93

Así mismo, se realizó la estimación del balance nutricional de la dieta de las vacas de baja producción. En el Cuadro 8 se detalla el resultado del balance nutricional realizado, se puede observar que en las categorías de inicio y mitad de lactancia el aporte de proteína cruda de la dieta se encuentra por encima del requerimiento nutricional de los animales, así mismo existe un aporte de energía por parte de la dieta mayor al requerimiento estimado; en el caso del fósforo existe una pequeña deficiencia en todas las etapas de lactancia.

Cuadro 8. Balance nutricional de la dieta de la vacas baja productoras de la lechería especializada del Instituto Agropecuario Costarricense.

		PC (g)	ENL (Mcal)	Fósforo (g)
Inicio	Requerimiento	1.311,37	18,18	27,25
	Aporte	2.463,54	24,33	25,68
	Balance	1.152,17	6,15	-1,57
Media	Requerimiento	1.443,52	21,25	28,10
	Aporte	2.463,54	24,33	25,68
	Balance	1.020,02	3,08	-2,43
Final	Requerimiento	2.027,44	20,14	27,99
	Aporte	2.463,54	24,33	25,68
	Balance	436,11	4,19	-2,31

Relacionado con lo anterior, es de suma importancia que exista un balance adecuado de nutrientes en las dietas de los animales, con el propósito de satisfacer las demandas nutricionales para evitar deficiencias de energía que conlleven a una reducción

en la condición corporal de los mismo, afectando negativamente el desempeño reproductivo de los mismos (INATEC 2016). Problemas reproductivos tales como la falta de ciclicidad, baja tasa de concepción, aumento en el intervalo entre partos y un aumento en la incidencia de crías débiles son consecuencias de una alimentación deficiente en energía, por lo tanto se debe de garantizar el aporte correcto de nutrientes en las dietas utilizadas (Granja et al. 2012).

Es importante también velar que las dietas suministradas a los animales no tengan un exceso de nutrientes, ya que se da una disminución en la eficiencia de la alimentación, además de que pueden tener consecuencias negativas tanto en los animales como en el medio ambiente y en el costo de la alimentación. Tal es el caso del exceso de proteína en las dietas, Martínez (2002) menciona que el exceso de nitrógeno proveniente de la dieta debe de ser eliminado para evitar intoxicaciones por amoníaco. Este se metaboliza en el hígado y se transforma a urea, eliminándose por vía renal, siendo este un proceso muy demandante de energía, repercutiendo en el balance energético del animal. Por lo tanto, un excedente de este nutriente puede traer consecuencias negativas sobre la producción, debido a que la energía que se utilizaría para producción de leche se debe de utilizar para eliminar el exceso de urea.

Otro aspecto que se debe de tomar en cuenta, que se produce debido a una alta ingestión de proteína o cuando no hay disponibilidad de carbohidratos solubles en la dieta, es la disminución en la capacidad de las bacterias del rumen para transformar el amoníaco en proteína microbiana, de modo tal que este es transportado hacia el hígado para sintetizar urea la cual se libera en la sangre para su reabsorción en el rumen, sin embargo cuando el contenido de urea es elevado se difunde hacia la leche, que es lo que se conoce como nitrógeno ureico en leche (MUN por sus siglas en inglés) (Cerón et al. 2014).

Además del gasto energético que implica la eliminación del exceso de urea en el organismo producto de un elevado consumo de proteína, se tienen otras consecuencias negativas sobre el organismo del animal, específicamente en el ámbito reproductivo, un exceso de urea en el individuo puede provocar un ambiente tóxico en el útero y el oviducto, afectando los gametos y al embrión, produciendo una disminución de la fertilidad (Meléndez y Bartolomé 2017). Esto evidencia la necesidad de modificar las dietas con el objetivo de reducir los excedentes de nutrientes que consumen los animales observado en los balances realizados.

A partir del balance nutricional elaborado, se procedió a realizar una dieta de sugerencia para satisfacer de una manera más eficiente el requerimiento nutricional y disminuir el excedente de nutrientes ingeridos (Ver Anexo 5 y 6). En la figura 4 se compara el balance de proteína cruda realizado a las dietas que se utilizan de manera habitual en la lechería (Balance anterior) y el balance de proteína cruda obtenido con la modificación de las dietas (Balance propuesto). Se puede observar que se dio una disminución en el aporte de proteína en las dietas sugeridas, por lo tanto, la cantidad de proteína que proporciona la dieta es más cercana al requerimiento real de proteína en comparación a la dieta convencional.

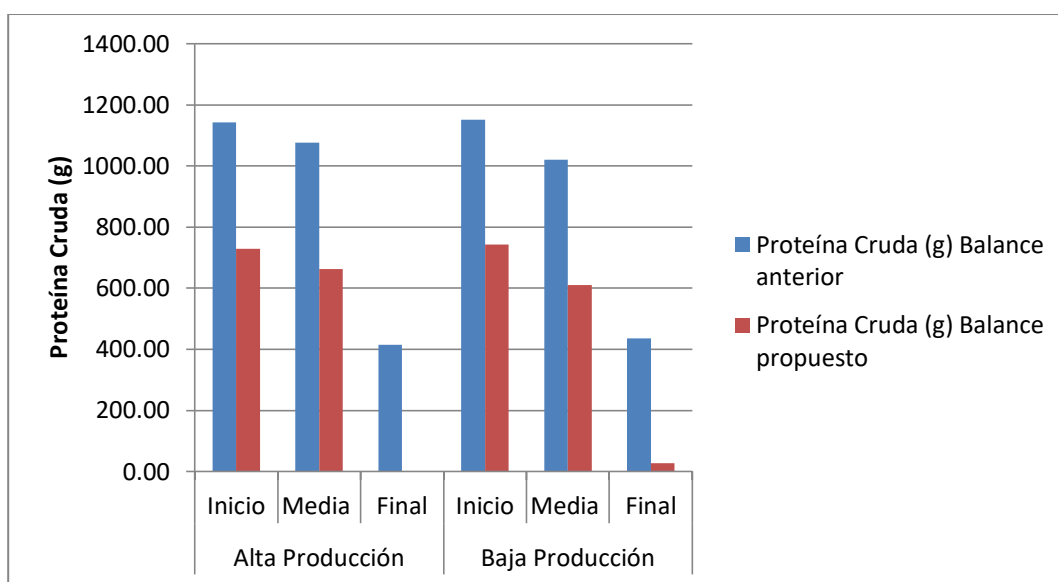


Figura 5. Comparación del balance de proteína de las dietas de alta y baja producción utilizadas en la lechería especializada del IACSA y el balance de las dietas sugeridas.

Es importante satisfacer de la manera más eficiente el requerimiento de proteína de los animales, por lo tanto el uso de dietas con un aporte adecuado de este nutriente provocan una disminución de la tasa de excreción de nitrógeno a través de la orina. Este es un aspecto que debe ser tomado en cuenta debido a que una elevada tasa de excreción de nitrógeno puede traer consecuencias negativas al medio ambiente. Elizondo-Salazar (2006), explica que excesos de nitrógeno pueden causar toxicidad en animales y plantas, además de producir problemas en la calidad de las aguas, debido a que excesos de nitrógeno en cuerpos de agua provocan la proliferación de organismos acuáticos que afectan la calidad

del agua y disminuyen la concentración de oxígeno de la misma, esto afecta a los organismos que requieren oxígeno provocando una condición llamada hipoxia.

Otro impacto relacionado a los excesos de nitrógeno en fuentes de agua, es la enfermedad denominada metahemoglobinemia, que ocurre cuando se da el consumo de agua contaminada con nitratos, los cuales se convierte en nitrito en el intestino delgado y provoca la oxidación de la molécula de hemoglobina, provocando una disminución en la capacidad de transporte de oxígeno generando la condición de anoxia (Elizondo- Salazar 2006). Es por esto que se deben de usar sistemas de alimentación más eficientes, con el propósito de que exista una producción sostenible con el ambiente y que el impacto ambiental se reduzca en la mayor medida posible.

De igual manera se analizó el aporte de energía neta de lactancia por parte de la dieta convencional y la dieta sugerida, en la Figura 6 se observa el balance de energía neta de lactancia de las dietas utilizadas habitualmente (Balance anterior) y el balance de energía de la dieta sugerida (Balance propuesto). Cuanto más cercano sea el valor a cero, el nivel de energía se acercará más al requerimiento, por lo que se puede observar que en las dietas sugeridas se da una disminución del excedente de energía que se suministraba en las dietas.

Así como una deficiencia de energía puede repercutir negativamente en la condición corporal de las vacas secas antes del parto disminuyendo las reservas corporales para soportar la etapa de lactancia, un aporte de energía por encima del requerimiento puede provocar un engrasamiento excesivo aumentando el riesgo de presentar problemas metabólicos después del parto (López 2006). Desordenes metabólicos como la cetosis tipo II (Síndrome de la vaca gorda) es una enfermedad relacionada a animales con elevada condición corporal, en la cual se da una disminución del consumo de alimento, además se da una infiltración de grasa en el hígado provocando una insuficiencia hepática la cual disminuyendo sus funciones gluconeogénicas e inmunitarias, por lo que animales con este tipo de padecimiento son más susceptibles contraer infecciones como la mastitis y la metritis (Muiño et al. 2013). Condiciones corporales entre 3,25 y 3,5 disminuyen la incidencia de estos desordenes metabólicos (López 2006), por lo que es vital el suministro de dietas con densidades energéticas adecuadas que garanticen un apropiado consumo de alimento.

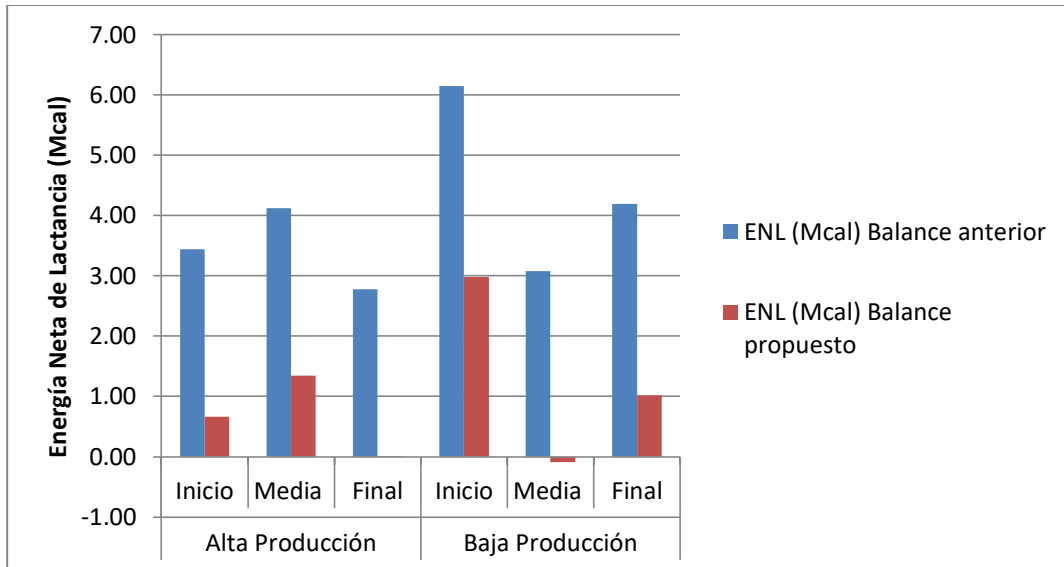


Figura 6. Comparación del balance de Energía Neta de Lactancia de las dietas de alta y baja producción utilizadas en la lechería especializada del IACSA y el balance de las dietas sugeridas.

Así mismo, se estimó la cantidad de fósforo total suministrada en las dietas tradicionales, en la Figura 7 se puede observar que en los animales de alta producción se dio una disminución del aporte de fósforo con la dieta sugerida (Balance propuesto), esto significa que hubo una disminución en la cantidad de fósforo que no es aprovechado por el animal, disminuyendo la cantidad de fósforo excretado por el animal. Según Elizondo-Salazar (2005) el fósforo es transportado por medio del agua de escorrentía y erosión a aguas superficiales, el fósforo es un nutriente limitante en el agua, por lo que un exceso del mismo produce una proliferación de algas y microorganismos acuáticos, provocando una disminución en la disponibilidad de oxígeno, afectando organismos aeróbicos, siendo este proceso llamado eutrofización.

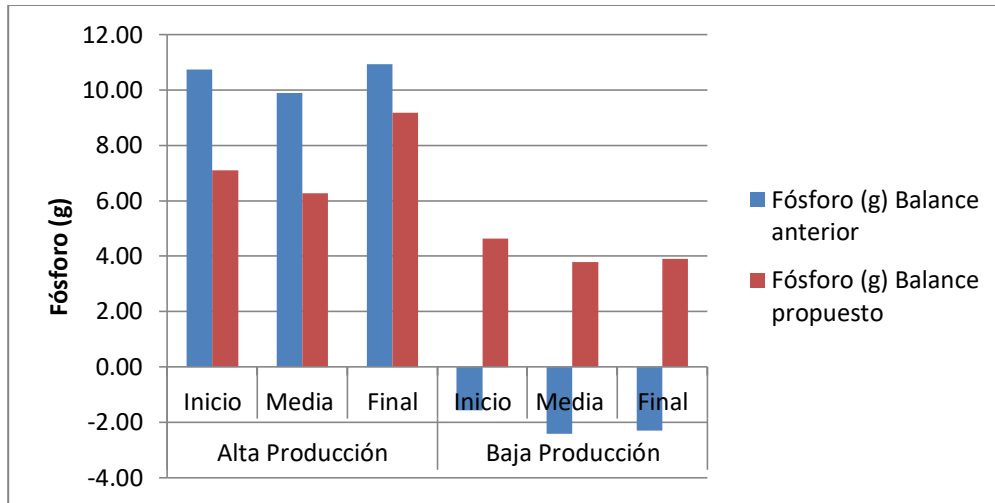


Figura 7. Comparación del balance de fósforo de las dietas de alta y baja producción utilizadas en la lechería especializada del IACSA y el balance de las dietas sugeridas.

Se puede observar también que en el caso de las dietas de los animales de baja producción que se dio un aumento en el aporte de fósforo, anteriormente, según el balance nutricional de la dieta usada convencionalmente existía una pequeña deficiencia en cuanto al requerimiento de fósforo. Debido a que el fósforo es un macro mineral, es decir, que se requiere en una cantidad mayor, es importante satisfacer el requerimiento del mismo.

El fósforo participa en mecanismos relacionados al control del apetito, eficiencia en la utilización de los alimentos, tiene función de coenzima en diversos procesos de fermentación y además forma parte de ácidos nucleicos, también es de suma importancia para el desarrollo y mantenimiento del tejido esquelético y crecimiento celular. Deficiencias de este elemento pueden afectar el rendimiento reproductivo de los animales, afectando la normalidad del ciclo estral o provocar dificultades para preñarse, también el fósforo se relaciona parte proteica de la leche (caseína), por lo que deficiencias de fósforo puede provocar una disminución en la producción de leche, estas deficiencias pueden provocar fenómenos de pica, buscarán la forma de obtener el fósforo deficiente por medio de la ingesta de huesos, madera e inclusive tierra (Hernández 2005).

Por último, se estimó el costo de la dieta sugerida y se comparó con respecto a la dieta utilizada convencionalmente, en la Figura 8 se puede observar que tanto en la dieta sugerida para animales de alta como en los de baja producción se da una disminución en el costo diario total por día, en la dieta de alta producción se da una disminución del 23,10%

respecto a la dieta convencional, y en el caso de la dieta de baja producción se da una reducción del 29,05 % respecto a la dieta convencional.

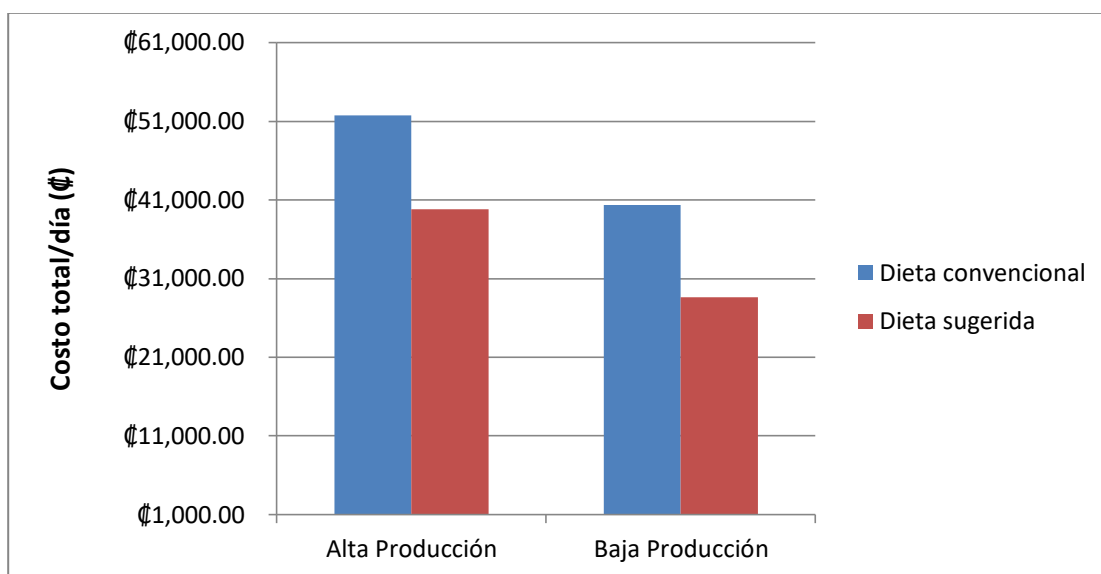


Figura 8. Comparación del costo total/día de alimento de las dietas utilizadas en la lechería especializada para las categorías de alta y baja producción y las dietas sugeridas.

Es de suma importancia buscar la manera de disminuir los costos de producción en los sistemas pecuarios, según León (2015) el rubro de alimentación representa el 54% del total de los costos de producción, y el 40,8% de los costos totales de alimentación corresponden a la alimentación de los animales en producción, por lo que una disminución en los costos de alimentación representarán un beneficio económico muy elevado, mejorando la rentabilidad de las explotaciones pecuarias.

6. CONCLUSIONES

Se debe establecer sistemas de rotación de potreros adecuados, para maximizar el rendimiento de las pasturas y el contenido nutricional de las mismas. La estimación de la composición botánica realizada en el área de pastoreo de las vacas secas evidencia la necesidad del establecimiento de una pastura que garantice el suministro adecuado de nutrientes a los animales de la categoría de vacas secas.

Por medio de la estimación de la huella de carbono se concluye que los procesos de fermentación entérica poseen la mayor participación en cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero, el rubro de combustibles posee el segundo lugar en generación de GEI.

La implementación de un sistema silvopastoril en el área de pastoreo de las vacas secas permite mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero producidos por esta categoría, además de que tienen efectos positivos en la producción animal, y de los cuales se puede obtener también un beneficio económico. El sistema silvopastoril de Melina asociado a pasto Mombaza es una alternativa para mitigar una fracción de las emisiones de CO₂e generadas por la categoría de vacas secas.

Existe una necesidad de optimizar los sistemas de alimentación por medio de la modificación de las dietas utilizadas en los animales de producción, esto evita que haya un excedente de nutrientes, más de los que el animal necesita para mantenimiento y producción, por consiguiente dándose una reducción en la excreción de los nutrientes, afectando de manera negativa los ecosistemas. Además de contribuir con el medio ambiente, una alimentación eficiente contribuye a que se dé una reducción en los costos de alimentación.

7. RECOMENDACIONES

Se recomienda que se dé el establecimiento de una pastura y de un sistema de rotación que permita un pastoreo eficiente, procurando obtener pastos de buena calidad nutricional y con un buen rendimiento productivo. Esto se obtiene mediante la división de apartos en función del consumo de los animales y del rendimiento de las pasturas.

Es recomendable el establecimiento de un sistema silvopastoril ya que ayuda a mitigar cierta cantidad de CO₂e. Sin embargo es necesario poner en prácticas medidas que ayuden a disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero, además es importante considerar el tipo de especie de pasto y la especie arbórea que conformará el sistema silvopastoril, ya que esta determinará la capacidad de remoción de CO₂e del sistema.

Se debe de optimizar el uso de vehículos y maquinaria agrícola para la reducción del consumo de combustible y el uso de aceites lubricantes. Se sugiere la implementación de paneles solares para disminuir el consumo de electricidad, también la implementación de procesos de digestión anaeróbica relacionados al manejo de las excretas es otra medida para la producción de biogás, sirviendo como fuente de energía renovable.

Es de suma importancia cuantificar de forma real la capacidad de remoción de CO₂e por parte del componente arbóreo del sistema silvopastoril y del suelo, ya que se tendrá un valor más acertado de la compensación de la huella de carbono del sistema.

Se recomienda la elaboración de los balances nutricionales con el fin de determinar cuáles nutrientes se están brindando en mayor proporción respecto a los requerimientos, además se sugiere realizar cambios en las dietas para mejorar la eficiencia de la alimentación y mejorar los costos de las dietas.

Se sugiere la utilización de especies forrajeras como el madero negro (*Gliricidia sepium*), el poró (*Erythrina poeppigiana*), la leucaena (*Leucaena leucocephala*), ya que son especies que contienen taninos, los cuales ayudan a disminuir las emisiones de metano producto de procesos de fermentación en el rumen. También se recomienda el uso de ionóforos como la monensina y el uso de levaduras para mitigar las emisiones de GEI.

8. REFERENCIAS

- Abarca, S. 2016. Emisión de gases de efecto invernadero y absorción de carbono en fincas ganaderas. *Alcances tecnológicos* 11(1):71-76.
- Abarca, S. 2019. Adicionalidad de Carbono Orgánico del Suelo en fincas Ganaderas de Cría del Plan Piloto. Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria. San José, Costa Rica. 13 p.
- Alonso, J. 2011. Los sistemas silvopastoriles y su contribución al medio ambiente. *Revista Cubana de Ciencia Agrícola* 45(2): 107-115.
- Barragán, W; Cajas, Y. 2019. Cambios bromatológicos y estructurales en *Megathyrus maximus* bajo cuatro arreglos silvopastoriles. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*. 20(2):231-244.
- Beer, J; Harvey, C; Ibrahim, M; Harmand, J; Somarriba, E; Jiménez, F. 2003. Servicios ambientales de los sistemas agroforestales. *Agroforestería en las Américas*. 10(37):80-87.
- Bernier, R; Alfaro, M. 2006. Acidez de los suelos y efectos del encalado. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Osorno, Chile. 46 p.
- Bertsch, F. 2015. El análisis de suelos. Una herramienta para diagnosticar los problemas de suelos: ventajas y limitaciones. Consultado el 10 de octubre de 2019. Disponible en: <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/LSF/AnalisisSuelos.pdf>
- Burley, J; Speedy, A. 1999. Investigación agroforestal: perspectivas globales. *Agroforestería para la producción animal en América*: 37-50.
- Carbajal, A. 2017. Sistema silvopastoril con árboles multipropósito: GMelina 53 *Arborea* Roxb, ex Sm., *Enterolobium cyclocarpum* Jacq Griseb y *Swietenia macrophylla* King. En Palmar Grande, Municipio de Tlatlaya, Estado de México. Tesis de Licenciatura. Universidad Autónoma del Estado de México. Temascaltepec, México. 75 p.
- Cárdenas, J. 2014. Ganadería de sombra en Costa Rica: beneficios, obstáculos y realidad actual. *Ambientico* 245: 16-20.

- Carrillo, O. 2017. Pasto Mombaza *Panicum maximum* Jacq. Oficina Nacional de Semillas. Consultado el 16 de octubre de 2019. Disponible en: http://ofinase.go.cr/wp-content/uploads/2017/09/doctecnica_Mombaza.pdf
- Casasola, F; Villanueva, C. 2015. Buenas prácticas para la mitigación al cambio climático de los sistemas de producción de leche en Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. 128 p.
- CATIE. 2013. Metodología para el análisis de la Huella de Carbono a través del análisis de ciclos de vida en sistemas lecheros. Consultado el 14 de agosto de 2018. Disponible en: <http://gamma.catie.ac.cr/ecleds/wp-content/uploads/2013/04/Metodologia-de-HC-LCA140420131.pdf>
- Cerón, M; Henao, A; Múnera, O; Herrera, A; Díaz, A; Parra, A; Tamayo, C. 2014. Concentración de nitrógeno ureico en leche. Interpretación y aplicación práctica. Medellín, Colombia. 18 p.
- Chacón, P; Leblanc, H; Russo, R. 2007. Fijación de carbono en un bosque secundario de la región tropical húmeda de Costa Rica. *Tierra Tropical* 3(1):1-11.
- CIAT. 2017. Especies vegetales útiles para sistemas silvopastoriles del Caquetá, Colombia. Bogotá, Colombia. 84 p.
- Clavero, T; Suárez, J. 2006. Limitaciones en la adopción de los sistemas silvopastoriles en Latinoamérica. *Pastos y Forrajes* 29(3): 307.
- Claros, J. 2012. Estudios del proceso de nitrificación y desnitrificación vía nitrito para el tratamiento biológico de corrientes de agua residual con alta carga de nitrógeno amoniacal. Tesis de doctorado. Universidad Politécnica de Valencia. 191 p.
- Córdoba, L. 2011. Cambio climático y la ganadería. Consultado el 14 de agosto de 2018. Disponible en: http://proleche.com/recursos/documentos/congreso2011/4.Cambio_climatico_y_la_ganaderia.pdf
- 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.

- Dávila, O; Ramírez, E; Rodríguez, M; Gómez, R; Barrios, C. 2005. El manejo del potrero. Consultado el 2 de diciembre de 2019. Disponible en: http://repositorio.uca.edu.ni/2124/1/el_manejo_de_%20potrero.pdf
- Deambrosi, A; Capozzolo, M; Castro, C. 2012. Sistemas Silvopastoriles. Revista Voces y Ecos 29:28-30.
- Díaz, F; García, A; Kalscheur, K. 2011. Alimentación de la vaca seca. South Dakota State University. Consultado el 2 de diciembre de 2019. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/318311645>
- Elizondo, J. 2003. Requerimientos nutricionales de las vacas en producción. Consultado el 2 de diciembre de 2019. Disponible en: http://eeavm.ucr.ac.cr/Documentos/ARTICULOS_PUBLICADOS/2003/50.pdf
- Elizondo-Salazar, J. A. 2005. El fósforo en los sistemas ganaderos de leche. Agronomía Mesoamericana 16(2): 231-238.
- Elizondo-Salazar, J. A. 2006. El nitrógeno en los sistemas ganaderos de leche. Agronomía Mesoamericana 17(1): 69-77.
- Elizondo, J. 2009. Requerimientos nutricionales del ganado de leche según el modelo del NRC 2001. Energía Neta de Lactancia. Actualidad Zootecnia 1(5):32-41.
- FAO. 1999. Educación ambiental para el trópico de Cochabamba. Cochabamba Bolivia.
- FAO. 2003. Agroforestería para la producción animal en América Latina II. Roma, Italia. 374 p.
- FAO. 2009. La agricultura mundial en la perspectiva del año 2050. Consultado el 1 de octubre de 2019. Disponible en: http://www.fao.org/fileadmin/templates/wsfs/docs/Issues_papers/Issues_papers_SP/La_agricultura_mundial.pdf
- FAO. 2013. Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera. Roma, Italia. 231 p.

- FAO. 2015. Guía metodológica para la implementación de Escuelas de Campo para Agricultores (ECA) en sistemas silvopastoriles agroecológicos. Bogotá, Colombia. 152 p.
- Fernández, O. 2013. La vaca seca y en transición, una inversión muy rentable y un cuidado muy específico. *Revista Frisona Española* 195:110-116.
- Gamarra, C; Vera, M; Galeano, M; Cabrera, A. 2018. Relación carbono-nitrógeno en suelos de sistemas silvopastoriles del Chaco paraguayo. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales* 9(46): 4-26.
- Giraldo, A; Zapata, M; Montoya, E. 2008. Captura y flujo de carbono en un sistema silvopastoril de la zona Andina Colombiana. *Asociación Latinoamericana de Producción Animal*. 16(4):241-245.
- Global Research Alliance. 2014. Reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero de la ganadería. Mejores prácticas y opciones emergentes. 41 p.
- Granja, Y; Cerquera, J; Fernández, O. 2012. Factores nutricionales que interfieren en el desempeño reproductivo de la hembra bovina. *Revista Colombiana de Ciencia Animal* 4(2): 458-472.
- Gómez, E. 2018. Impacto de las prácticas de manejo sobre la huella de carbono de la leche en los sistemas de producción bovina de la provincia de Ubaté. Tesis para optar por el grado de Magister. Universidad Nacional de Colombia. 94 p.
- González, G; Serrano, R. 2004. Propiedades y utilidades de la madera de Melina (*Gmelina arborea*) procedente de árboles plantados en Costa Rica. *Kuru: Revista Forestal* 1(1): 1-9.
- Haro, J; Gómez, C. 2018. Mitigación de emisiones provenientes de la ganadería en la región andina. Lima, Perú. 24 p.
- Hernández, J. 2005. El Fósforo en la vaca lechera. Consultado el 1 de octubre de 2019. Disponible en: <https://www.engormix.com/ganaderia-leche/foros/fosforo-vaca-lechera-argent-t2749/>
- Hernández, I; Babbar, L. 2014. Ganadería de sombra en Costa Rica. *Ambientico* 245: 9-15.

- INATEC. 2016. Manual del protagonista. Nutrición Animal. Buena Esperanza, Nicaragua. 127 p.
- IPCC. 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Japón. 628 p.
- León, H. 2015. Eficiencia en el costo de alimentación y la mano de obra. Consultado el 1 de octubre de 2019. Disponible en: <http://proleche.com/recursos/documentos/congreso2015/produccion/Charla2.pdf>
- López, A; Sclönvoigt, A; Ibrahim, M; Kleinn, C; Kanninen, M. 1999. Cuantificación del carbono almacenado en el suelo de un sistema silvopastoril en la zona Atlántica de Costa Rica. Agroforestería en la Américas. 6(23):51-53.
- López, F. 2006. Relación entre condición corporal y eficiencia reproductiva en vacas Holstein. Bioecnología en el sector agropecuario y agroindustrial. 4(1):77-86.
- Luccerini, S; Subovsky, E; Borodowski, E. 2013. Sistemas silvopastoriles: una alternativa productiva para nuestro país. Apuntes Agroeconómicos N°8. Consultado el 2 de diciembre de 2019. Disponible en: https://www.agro.uba.ar/apuntes/no_8/sistemas.htm
- Mahecha, L; Rosales, M; Molina, C; Molina, E. 1999. Experiencias en un sistema silvopastoril de pasto estrella, *Leucaena leucocephala-Cynodon plectostachyus-Prosopis juliflora* en el Valla de Cauca. Consultado el 18 de febrero de 2020. Disponible en: <http://www.fao.org/ag/aga/agap/frg/agrofor1/Mahech20.htm>
- MAG. 2010. Determinación del balance de gases de efecto invernadero en fincas ganaderas de la región Chorotega, como elemento de referencia para mejorar la competitividad. Consultado el 30 de setiembre de 2019. Disponible en: http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual/bibliotecavirtual/a00202.pdf
- Mantilla, D; Ramírez, N. 2015. Efecto de la intensidad lumínica y precipitación sobre el crecimiento del pasto *Brachiaria brizantha* cv Toledo en Piedemonte Llanero. Tesis de Licenciatura. Universidad de la Salle. Bogotá, Colombia. 65 p.
- MARENA. 2006. Establecimiento y manejo de sistemas silvopastoriles. Managua, Nicaragua. 61 p.

- Marinidou, E; Jiménez, G. 2010. Sistemas Silvopastoriles. Comisión Nacional Forestal. Chiapas, México. 46 p.
- Martínez, A. 2002. Necesidades proteicas en el ganado vacuno lechero. Revista Mundo Ganadero 145: 20-28.
- Mejía-Díaz, E; Mahecha-Ledesma, L; Angulo-Arizala, J. 2017. Consumo de materia seca en un sistema silvopastoril de *Tithonia diversifolia* en trópico alto. Agronomía Mesoamericana. 28(2):389-403.
- Meléndez, P; Bartolomé, J. 2017. Avances sobre nutrición y fertilidad en ganado lechero: Revisión. Revista Mexicana de Ciencias Pecuarias 8(4):407-417.
- MINAE. 2012. Inventario nacional de gases de efecto invernadero y absorción de carbono. Consultado el 14 de agosto de 2018. Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/natc/crinir2.pdf>
- MINAE. 2019. Plan nacional de descarbonización. 102 p. Consultado el 3 de diciembre de 2019. Disponible en: <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2019/02/PLAN.pdf>
- Mora, E. 2014. Ganadería entre los árboles para recuperar equilibrios ecológicos. Ambientico 245: 2-3.
- Muiño, R; Hernández, J; Chapel, J; Castillo, C; López, M; Pereira, V; Vázquez, P; Abuelo, A; Díaz, F; Benedito, J. 2013. Desórdenes metabólicos en la vaca lechera de alta producción (VLAP). Lugo, España. 146 p.
- Naranjo, J; Cuartas, C; Murgueito, E; Chará, J; Barahona, R. 2012. Balance de gases de efecto invernadero en sistemas silvopastoriles intensivos con *Leucaena leucocephala* en Colombia. Livestock Research for Rural Development 24(8):12-23.
- Navarro, O; Villamizar, I. 2012. Evaluación de diferentes frecuencias de corte en Guinea Mombaza (*Panicum maximum*, Jacq), bajo condiciones del sol y sombra natural influenciada por el dosel de Campano (*Pithecellobium saman*) en Sampedrés, Sucre. Revista Colombiana de Ciencia Animal 4(2): 377-395.

- Niño, I. 2016. Inclusión del caucho (*hevea brasiliensis*) en sistemas silvopastoriles en el Municipio de San José del Guaviare. Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Acacias, Colombia. 44 p.
- Noguera, M; Vélez, J. 2011. Evaluación de algunas propiedades físicas del suelo en diferentes usos. Revista de Ciencias Agrícolas. 28(1):40-52.
- NRC. 2001. Nutrient requirements of dairy cattle. National Research Council. Estados Unidos. 401 p.
- Nutrefeed. 2010. Alimentación de la vaca seca. Consultado el 16 de octubre de 2019. Disponible en: http://www.bedatouyasociados.com.ar/_recursos/users/administrador/2010-6-3_r8555.pdf
- Ospina, O. 2007. Interrelaciones entre la nutrición y reproducción. Análisis y experiencias de campo. Revista de Medicina Veterinaria. 13:39-47.
- Pérez, D; López, S. 2011. Los rumiantes y el calentamiento global: alternativas para disminuir las emisiones de metano. Primera reunión de la investigación agropecuaria 73-86.
- Pezo, D; Ibrahim, M. 1999. Colección módulos de enseñanza agroforestal: Sistemas Silvopastoriles. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 279 p.
- PRESAAC. 2016. Establecimiento y uso de Sistemas Silvopastoriles en República Dominicana. Santo Domingo, República Dominicana. 36 p.
- Quirós, G. 2015. Determinación de la Huella de Carbono y utilización de energía solar en unidades productoras de leche como alternativa al cambio climático en la región Huetar Norte de Costa Rica. TFG para optar por el grado de bachiller. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 77 p.
- Resusa. 2019. Ficha Técnica pasto mombasa *Panicum maximun cv.* Mombasa. Consultado el 30 de setiembre de 2019. Disponible en: <http://resusa.co.cr/nuevo/wp-content/uploads/2019/03/MOMBASA.pdf>
- Rivadeniera E. 2017. Determinación de la Huella de Carbono en la planta de abonos Chavez-Miño. Tesis de Licenciatura. Universidad de las Américas. 107 p.

- Rivera, J; Chará, J; Barahona, R. 2016. Análisis del ciclo de vida para la producción de leche bovina en un sistema silvopastoril intensivo y un sistema convencional en Colombia. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*. 19(3):237-251.
- Rodríguez, J; Pratt, L. 1998. Potencial de carbono y fijación de dióxido de carbono de la biomasa en pie por encima del suelo en los Bosques de Costa Rica. Instituto Centroamericano de Empresas. 69 p.
- Rodríguez, M. 2009. Rendimiento y valor nutricional del pasto *Panicum maximum* cv. Mombaza a diferentes edades y alturas de corte. TFG para optar por el grado de bachiller. Instituto Tecnológico de Costa Rica. 41 p.
- Rodríguez, J. 2016. Proceso certificación C-Neutral de una finca ganadera en Costa Rica. Ministerio de Agricultura y Ganadería. 51 p.
- Rojas, F; Murillo, O. 2004. Manual para productores de Melina *Gmelina arborea*, en Costa Rica. Fonafifo. 314 p.
- Russo, R; Botero, R. 2014. Ganadería de sombra: ¿mito o realidad? *Ambientico* 245:4-8
- Sadeghian, S; Rivera, J; Gómez, M. 1998. Impacto de sistemas de ganadería sobre las características físicas, químicas y biológicas de suelos en los Andes de Colombia. *Agroforestería para la producción animal en América Latina*: 77-95p.
- Sadeghian, S. 2014. Impacto de la ganadería sobre el suelo, alternativas sostenible de manejo. Consultado el 7 de mayo de 2018. Disponible en: <http://www.desertificacion.gob.ar/mapas/modelos/impacto%20de%20la%20ganaderia%20sobre%20el%20suelo.pdf>
- Sampayo, S; Silva, M; García, J. 2011. Establecimiento de plantaciones comerciales de melina (*Gmelina arborea* Roxb) en Tamaulipas. Instituto Nacional de Investigaciones

Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Consultado el 2 de diciembre de 2019. Disponible en: <http://www.inifapcirne.gob.mx/Biblioteca/Publicaciones/893.pdf>

Sánchez, M. 1999. Sistemas agroforestales para intensificar de manera sostenible la producción animal en América Latina. Agroforestería para la producción animal en América Latina: 1-13.

Santos, J; Castillo, J. 2015. Efecto del manejo del pastoreo sobre características del suelo en sistemas ganaderos doble propósito en Yucatán, México. Bioagrocencias 8(1): 12-16.

Solórzano, N. 2005. Sistemas agroforestales en fincas de pequeños agricultores y la generación de servicios ambientales. “El caso de la región del pacífico central de Costa Rica”. Tesis de maestría. Universidad Nacional de Costa Rica. 26 p.

Tintaya, M. 2015. Evaluación de especies en sistemas agroforestales de la comunidad de Capellanía, Municipio de Coroico del Departamento de la Paz. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. 105 p.

USDA. 2013. ¿Qué es Agroforestería? Consultado el 7 de mayo de 2018. Disponible en: https://www.fs.usda.gov/nac/documents/workingtrees/infosheets/WhatisAF_Spanish.pdf


Vallejo, M; Garnier, L; Nájera, J. 2013. Guía metodológica para gestionar la Huella de Carbono en la industria cárnica. German Society for International Cooperation. San José, Costa Rica. 52 p.

Villalobos, L; Alfaro, D; Conejo, F; WingChing, J. 2019. ¿Cómo incrementar el aprovechamiento en pasturas de piso? Evaluación de una estrategia en pastos Estrella Africana y Mombasa. Ventana Lechera 43:24-34.

- Villamizar, I; Salgado, S. 2011. Evaluación de diferentes frecuencias de corte a una altura de 30 cm en pasto Guinea Mombaza (*Panicum maximum, Jacq*), en condiciones de sol y sombra natural influenciada por el dosel del árbol de campano (*Pithecellobium saman*) en el municipio de Sampués, Sucre. Tesis de licenciatura. Universidad de Sucre. 101 p.
- Villanueva, C; Casasola, F; Detlefsen, G. 2018. Potencial de los sistemas silvopastoriles en la mitigación al cambio climático y en la generación de múltiples beneficios en fincas ganaderas de Costa Rica. Turrialba, Costa Rica. 60 p.
- Villanueva, C; Ibrahim, M. 2002. Evaluación del impacto de los sistemas silvopastoriles sobre la recuperación de pasturas degradadas y su contribución en el secuestro de carbono en lecherías de altura en Costa Rica. Agroforestería de las Américas. 9(35-36):69-74.
- Villanueva, C; Ibrahim, M; Haensel, G. 2010. Producción y rentabilidad de sistemas silvopastoriles. Estudios de caso en América Central. Turrialba, Costa Rica. 78 p.

9. ANEXOS

Anexo 1. Análisis Químico de suelo del área de pastoreo de la categoría de vacas secas de la lechería especializada del IACSA.



CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS
CIUDAD DE LA INVESTIGACIÓN, UCR
LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES
REPORTE DE ENSAYO
RE-R01 (V2)

CIA Centro de
Investigaciones
Agronómicas

Nº DE REPORTE: 69054
 USUARIO: INSTITUTO AGROPECUARIO COSTARRICENSE
 SUBCLIENTE: adriana.mb.6462@hotmail.com
 RESPONSABLE: ADRIANA REAL DURAN
 CORREO: jgamboa@etai.ac.cr
 TELÉFONO: 2475-6622

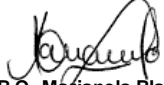
PROVINCIA: ALAJUELA
 CANTÓN: SAN CARLOS
 LOCALIDAD: SANTA CLARA
 CULTIVO: PASTOS


ANÁLISIS: QC,CN
 FECHA RECEPCIÓN: 05/11/2018
 EMISIÓN DE REPORTE: 15/11/2018
 Nº DE MUESTRAS TOTAL: 1
 PÁGINA: 1/2

ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS													
Solución Extractora: KCl-Olsen Modificado		pH	cmol(+)/L					%	mg/L				
		H ₂ O	ACIDEZ	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
ID USUARIO	ID LAB	5.5	0.5	4	1	0,2	5		10	3	1	10	5
LOTE UNICO	S-18-10168	5.8	0.15	13.31	7.24	0.35	21.05	0.7	3	4.0	12	77	74

-----ÚLTIMA LÍNEA-----


Los valores debajo de cada elemento corresponden con los Niveles Críticos generales para la solución extractora usada
 CICE=Capacidad de intercambio de Cationes Efectiva=Acidez+Ca+Mg+K SA=Porcentaje de Saturación de Acidez=(Acidez/CICE)*100


B.Q. Mariana Blanco M.
N.I. 2468
Gestoría de Calidad


Ing. Agr. Michael González A.
N.I. 7827
Gestoría Técnica

1. Las unidades están expresadas en base seca, en masa/v. 2. Procedimiento: pH y CE en agua 10:25; Acidez, Al, Ca y Mg con KCl 1M 1:10; P, K, Zn, Fe, Mn y Cu con Olsen Modificado pH 8,5 (NaHCO₃ 0,5 N, EDTA 0.01M, Superfloc 127) 1:10; S con Ca(H₂PO₄)₂·H₂O 0,008M 10:25. Acidez determinada por valoración con NaOH y Al con HCl; P y S por Colorimetría con el Analizador de Inyección de Flujo (FIA) y el resto de los elementos por Espectrofotometría de Absorción Atómica. C y N totales por combustión seca en Autoanalizador. 3. El muestreo es responsabilidad del usuario. 4. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas. 5. El tiempo de custodia de las muestras es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 6. El Reporte de Ensayo con validez es el original firmado y sellado que se imprime a solicitud expresa del usuario; cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico o fax libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

Anexo 2. Análisis de materia orgánica del área de pastoreo de la categoría de vacas secas de la lechería especializada del IACSA.

	CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS CIUDAD DE LA INVESTIGACIÓN, UCR LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES REPORTE DE ENSAYO RE-R01 (V2)				CIA Centro de Investigaciones Agronómicas	
	<p>Nº DE REPORTE: 69054</p> <p>USUARIO: INSTITUTO AGROPECUARIO COSTARRICENSE</p> <p>SUBCLIENTE: adriana.mb.6462@hotmail.com</p> <p>RESPONSABLE: ADRIANA REAL DURAN</p> <p>CORREO: jgamboa@etai.ac.cr</p> <p>TELÉFONO: 2475-6622</p>					
PROVINCIA: ALAJUELA CANTÓN: SAN CARLOS LOCALIDAD: SANTA CLARA CULTIVO: PASTOS		ANÁLISIS: QC,CN FECHA RECEPCIÓN: 05/11/2018 EMISIÓN DE REPORTE: 15/11/2018 Nº DE MUESTRAS TOTAL: 1 PÁGINA: 2/2				
ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS						
ID USUARIO	ID LAB	mS/cm	%		Relación	
		CE	C	N	C/N	
LOTE UNICO	S-18-10168	1,5	0.2	1.5	0.18	8.3
-----ÚLTIMA LÍNEA-----						
OBSERVACIÓN: El % C y N totales se determinaron con el Autoanalizador de C/N por combustión seca. Los valores de % C total correlacionan muy bien ($R^2 \geq 0,95$) con el % de MO. Si quiere estimar el valor del % MO a partir del dato de % C total determinado con esta metodología, multiplique el % C total por 1,43.						

Anexo 3. Flujo de caja del establecimiento del sistema silvopastoril en el área dedicada al pastoreo de las vacas secas de la lechería especializada del IACSA.

AÑOS	1	2	3	4	5	TOTAL		
COSTOS								
COSTOS	₡2,259,709	₡170,021	₡117,913	₡34,000	₡68,913			
TOTAL COSTOS	₡2,259,709	₡170,021	₡117,913	₡34,000	₡68,913			₡2,650,556
INGRESOS								
PSA	₡698,250		₡349,125		₡349,125			
VENTA MADERA			₡500,000		₡3,200,000			
TOTAL INGRESOS	₡698,250	₡0	₡849,125	₡0	₡3,549,125			₡5,096,500
Flujo de efectivo	₡1,561,459	₡170,021	₡731,213	₡34,000	₡3,480,213			₡2,445,944
Flujo Neto Acumulado	₡1,561,459	₡1,731,481	₡1,000,268	₡1,034,268	₡2,445,944			
COSTOS ACTUALIZADOS	₡1,487,104	₡154,214	₡631,649	₡27,972	₡2,726,838			₡1,689,196.19
								29%
								VAN
								TIR

Anexo 4. Emisiones de gases de efecto invernadero en equivalentes de CO₂ de la lechería especializada del IACSA.

Emisiones	Cantidad (t CO ₂ e)
Fermentación Entérica	208,58
Excretas	3,26
Fertilizantes	50,03
Combustible	186,49
Electricidad	2,00
Aceites Lubricantes	0,02
Residuos Orgánicos	31,01
Total	481,38

Anexo 5. Aporte de nutrientes de las materias primas utilizadas en la dieta sugerida para las vacas de alta producción de la lechería especializada del IACSA.

Materia Prima	MS (%)	PC (%)	ENL (Mcal)	Ca (%)	P(%)	Consumo Fresco (kg)	Consumo MS (kg)	PC (g)	Fósforo (P)	ENL (Mcal)
Apolo 16	87	16,0	1,83	0,4	0,3	2	1,7	278,4	5,2	3,2
Sorgo*	20,2	19,5	1,56	0	0	10	2,0	402,8	0,0	3,2
Harina de soya	88	46,5	1,64	0,9	0,6	1,0	0,88	409,20	5,28	1,44
Maíz Molido	86,5	7,0	1,96	0,2	0,1	2	1,7	121,1	1,7	3,4
Mombaza Multiplex	20,62	12,3	1,3	0	0	55,09	11,36	1.363,04	0,0	14,77
oro	97	0,0	0	17,27	16	0,2	0,2	0,0	30,9	0,0
Total						70,29	17,92	2608,60	43,11	25,94

Anexo 6. Aporte de nutrientes de las materias primas utilizadas en la dieta sugerida para las vacas de alta producción de la lechería especializada del IACSA.

Materia Prima	MS (%)	PC (%)	ENL (Mcal)	Ca (%)	P(%)	Consumo Fresco (kg)	Consumo MS (kg)	PC (g)	Fósforo (P)	ENL (Mcal)
Apolo 16	87	16	1,83	0,4	0,3	2,75	2,39	382,8	7,18	4,38
Sorgo*	20,2	19,94	1,56	0	0	8,0	1,62	322,23	0,0	2,52
Mombaza Multiplex	20,62	12,3	1,3	0	0	53,2	10,97	1.349,18	0,0	14,26
oro	96,5	0	0	17,27	16	0,2	0,2	0,0	24,7	0,0
Total						64,11	15,13	2054,21	31,88	21,6