

**CENTRO AGRONÓMICO TROPICAL
DE INVESTIGACIÓN Y ENSEÑANZA**

DIVISIÓN DE EDUCACIÓN

PROGRAMA DE POSGRADO

**EVALUACIÓN DE UN SISTEMA SILVOPASTORIL DE CEBA DE BOVINOS
BASADO EN EL USO DE ASOCIACIONES DE GRAMÍNEAS Y LEGUMINOSAS**

**Tesis sometida a consideración de la División de Educación y el Programa de
Postgrado como requisito para optar al grado de**

MAGISTER SCIENTIAE

en AGROFORESTERÍA Y AGRICULTURA SOSTENIBLE

JOSÉ DANIEL HERNÁNDEZ ANGUIZOLA

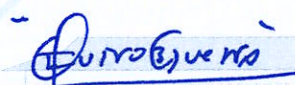
Turrialba, Costa Rica

2023

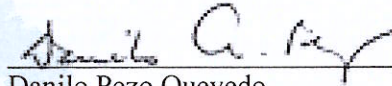
Esta tesis ha sido aceptada en su presente forma por la División de Educación y la Escuela de Posgrado del CATIE y aprobada por el Comité Consejero del estudiante, como requisito parcial para optar por el grado de

**MAGISTER SCIENTIAE EN AGROFORESTERÍA
Y AGRICULTURA SOSTENIBLE**

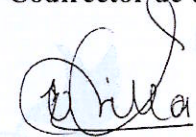
FIRMANTES:



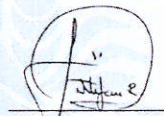
Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.
Codirector de tesis



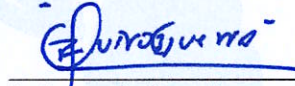
Danilo Pezo Quevedo
Codirector de tesis



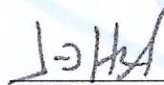
Cristóbal Villanueva Najarro, Ph.D.
Miembro Comité Consejero



Guillermo Detlefsen Rivera, M.Sc.
Miembro Comité Consejero



Roberto Quiroz Guerra, Ph.D.
Decano, Escuela de Posgrado



José Daniel Hernández Anguizola
Candidato

DEDICATORIA

A mis padres, hermanos y sobrinos, quienes son fuente de impulso para avanzar.

A Liann Muñoz quien previo a esta etapa y en el transcurrir de ella, me ha brindado su gran apoyo.

A tío Ruty por ser fuente de inspiración a lo largo de mi vida.

A todos y cada uno de lo que hicieron posible el cumplimiento de esta meta.

AGRADECIMIENTOS

A IFARHU-SENACYT por otorgarme la beca y la oportunidad de lograr esta meta.

A mi comité, por su guía y gran apoyo. Al Dr. Roberto Quiroz y al Dr. Danilo Pezo por su disponibilidad, orientación y enseñanzas en el desarrollo de este proyecto.

Al señor Alberto Ramírez y su esposa la señor Ana Abarca de Ramírez que con tanta amabilidad y disposición hicieron posible el desarrollo de esta investigación.

A CATIE por brindarme la oportunidad para conocer muchas personas, sus culturas y tradiciones.

A los compañeros y compañeras de estudio que fueron parte de la experiencia de vida en el CATIE.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. MATERIALES Y MÉTODOS	3
2.1 Localización, clima y suelo	3
2.2 Manejo de las pasturas	4
2.3 Selección y composición botánica de potreros	4
2.4 Manejo de los bovinos	5
2.5 Análisis del suelo	5
2.6 Evaluación de pasturas.....	5
2.7 Modelación del componente animal con el modelo de carne Life-Sim.....	6
2.8 Suplementación energética y carga animal.....	7
2.9 Mes de inicio del ciclo de ceba y su efecto sobre ganancia de peso y la rentabilidad del sistema	9
3. RESULTADOS	10
3.1 Características de los suelos	10
3.5 Validación del modelo de simulación	11
3.6 Energía requerida para aprovechar la proteína del pasto	12
3.8 Evaluación de excreción de N y emisión de CH ₄ en función de la carga y melaza suplementaria.....	14
3.9 Escenario compra y venta distintos meses del año	15
4. DISCUSIÓN.....	18
4.1 Ganancia de peso (GPD) en sistemas silvopastoriles (SSP).....	18
4.2 Modelación del componente animal con el modelo de carne Life-Sim.....	18
4.3 Uso de suplementación energética.....	19
4.5 Evaluación de excreción de N y emisión de CH ₄	20
4.6 Cambios de precio en la compra y venta y su efecto en la rentabilidad.	20
5. CONCLUSIONES	21
REFERENCIAS	22

INDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Características de los potreros seleccionados.	5
Cuadro 2. Diseño de tratamientos, carga animal y melaza.	8
Cuadro 3. Fertilidad y textura del suelo en el sistema estudiado. 0-20 cm profundidad.	10
Cuadro 4. Calidad nutritiva y disponibilidad de MS de las pasturas utilizadas en el estudio.	10
Cuadro 5. Temperatura y humedad promedio a pleno sol y bajo sombra durante un mes – del 3 de junio al 3 de julio del 2022.	11
Cuadro 6. Análisis de varianza y coeficientes de variación en la combinación de los diferentes niveles de suplementación con melaza y carga animal.	13
Cuadro 7. Emisión de CH ₄ , consumo de N y su partición en productos, en la orina y heces.	15
Cuadro 8. Resultados del análisis financiero, para el sistema de la finca, y el inicio de la ceba en diciembre y febrero, respectivamente.	17

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Localización del área de estudio Distrito Tres Equis, Cantón de Turrialba, Costa Rica.	3
Figura 2. Precipitación y temperatura promedio en el sitio estudiado (1988-2017).	4
Figura 3. Superficie de Respuesta para evaluar la ganancia de peso diario en función de distintos niveles de la carga animal, suplementación con melaza.	8
Figura 5. Evaluación del desempeño del modelo Life-Sim. MAE=valor promedio del error absoluto, RMSE=error medio cuadrático, CVRMSE=coeficiente de variación del error cuadrático medio.	11
Figura 6. Evaluación del desempeño del modelo Life-Sim, comparación x=y.	12
Figura 7. Simulación de la ganancia de peso limitada por energía y proteína usando como insumos los datos de la línea base (observado).	12
Figura 8. Simulación de la ganancia de peso limitada por energía y proteína en los distintos tratamientos de suplementación con melaza. T0=línea base, T10=10% de melaza, T20=20% de melaza, T30=30% de melaza, T40=40% de melaza, del consumo potencial de materia seca del animal.	13
Figura 9. Gráfico de dispersión mostrando la variación en GPD (Y) en función de la carga animal (X ₁) y el % de melaza suplementada (X ₂).	14
Figura 10. Ganancia de peso diaria según el mes de inicio del ciclo de ceba.	15
Figura 11. Margen Bruto (MB) US\$/animal según mes de inicio calculado en LifeSim. ...	16
Figura 12. Ganancia de peso diaria (GPD) animal ⁻¹ ciclo ⁻¹ línea base vs. tratamiento T20 (melaza al 20 %) del consumo potencial. Simulado con el modelo Life-Sim.	16
Figura 13. Margen bruto animal ⁻¹ ciclo ⁻¹ línea base vs. tratamiento T20 (melaza al 20 %) del consumo potencial. Utilizando el modelo Life-Sim.	17

LISTA DE ACRÓNIMOS

Siglas	Definición
CA	Carga animal
Cp	Consumo potencial
Cr	Cruce racial
Dig	Digestibilidad
Dis	Disponibilidad
ed	Edad
Fe	Factor energético para manutención
GP	Ganancia de peso
GPD	Ganancia de peso
GPDO	Ganancia de peso observada
GPDS	Ganancia de peso simulada
kg	Kilogramo
Life-Sim	Livestock feeding strategies simulation models
Lb	Línea base
MS	Materia seca
N	Nitrógeno
NT	Nitrógeno total
PC	Proteína cruda
Pi	Peso inicial
PV	Peso vivo
SSP	Sistemas silvopastoriles
UA	Unidad animal
Vc	Variación en el consumo

EVALUACIÓN DE UN SISTEMA SILVOPASTORIL DE CEBA DE BOVINOS BASADO EN EL USO DE ASOCIACIONES DE GRAMÍNEAS Y LEGUMINOSAS

José Daniel Hernández Anguizola

Resumen

Los sistemas silvopastoriles (SSP) son una alternativa sostenible para la producción de carne de ganado bovino. Esto se evidenció con el nivel de producción del SSP estudiado, donde se obtuvieron promedios de ganancias de peso diarias (GPD) por animal de 0,637 kg en pasturas que han persistido por más de 10 años. La producción en kilogramos de carne por hectárea de los tres últimos años (ciclos) ha sido de 431; 472; y 713 kg, con cargas que van de 1,9 a 3,2 UA (UA,400 kg) desde el inicio al final de cada ciclo de ceba de 10 meses, respectivamente. La productividad de los SSP depende en gran parte de las interacciones entre sus componentes. Para poder cuantificar las interacciones más relevantes se utilizó el Modelo de Simulación Life-Sim (subrutina carne) como herramienta tecnológica para la evaluación de un SSP de ceba de bovinos basados en pastoreo. Como resultado de la parametrización y validación del modelo, utilizando ganancias diarias de peso observadas (GPDO) y simuladas (GPDS), se encontró que el valor promedio del error absoluto o error medio absoluto (MAE) para 25 comparaciones fue de 0,056 kg. La modelación del sistema mostró que la GPD en pastoreo estaba limitada por el consumo de energía. El suministro de melaza al 20% del consumo potencial del bovino, aportó la energía requerida para un mejor aprovechamiento de la proteína contenida en el forraje consumido, alcanzando GPD máximas de 0,698 kg, mínimas de 0,660 y de 0,670 como promedio general. Otro escenario evaluado fue el efecto de la fluctuación de los precios de compra y venta de bovino para la actividad de ceba a lo largo del año. El máximo margen bruto correspondió al inicio de la ceba en febrero, alcanzando resultados de US\$ 621,05 por animal, el mínimo para marzo con US\$ 445,19 y una media general de US\$ 543,59. El modelo de Life-Sim muestra precisión y eficiencia en la evaluación de estrategias de alimentación de bovinos manejados en SSP. Otros parámetros medidos evaluados fueron consumo de N (g día^{-1}); eficiencia de uso de N (%); N urinario excretado (g día^{-1}); N fecal (g día^{-1}); N total excretado (g día^{-1}) y emisiones de CH_4 (kg ciclo^{-1}), obteniendo valores promedio de 85,05; 44,46; 18,13; 30,44; 48,57; y 63,15, respectivamente.

Palabras claves: La ganadería, sistemas silvopastoriles, modelo matemático, estrategias de alimentación, precios de subasta, *Erythrina poeppigiana* *Arachis pintoi*, *Urochloa*, modelo Life-Sim.

Abstract

Silvopastoral systems (SPS) are a sustainable alternative for beef cattle production, as evidenced by the level of production of the SSP studied, where average daily weight gains (GPD) per animal of 0.637 kg were obtained in pastures that have persisted for more than ten years under grazing. The production in kilograms of meat per hectare of the last three years (cycles) was 431; 472; and 713 kg, with stocking rates ranging from 1.9 to 3.2 AU (AU,400 kg) from the beginning to the end of each 10-month fattening cycle. Productivity of SPSs depends mainly on the interactions among their components. In order to quantify the most relevant interactions, the Life-Sim Simulation Model (beef module) was used as a technological tool for evaluating a grazing-based cattle fattening SPS. The parameterization and validation of the model using observed (GPDO) and simulated (GPDS) daily weight gains. The results showed that the average value of the absolute error or mean absolute error (MAE) for 25 comparisons was 0.056 kg. Modeling results showed that GPD under grazing was limited by energy consumption. The supply of molasses at 20% of the potential dry matter consumption provided the energy required for better use of the protein contained in the feed, reaching a maximum GPD of 0.698 kg, minimum of 0.660, and 0.670 as the general average. Another scenario evaluated was the effect of fluctuations in bovines' purchase and sale prices for the fattening activity throughout the year. The maximum gross margin of US\$ 621.05 per animal was obtained when fattening initiated in February. The minimum, in turn, was achieved in March with US\$ 445.19 and a general average of US\$ 543.59. The Life-Sim model showed precision and efficiency in evaluating the feeding strategies of cattle managed in SSP. Other parameters evaluated were N consumption (g day⁻¹); N use efficiency (%); Urinary N excreted (g day⁻¹); Fecal N (g day⁻¹); Total N excreted (g day⁻¹) and CH₄ emissions (kg cycle⁻¹), obtaining average values of 85.05; 44.46; 18.13; 30.44; 48.57; and 63.15, respectively.

Keywords: Livestock production, silvopastoral systems, mathematical model, feeding strategies, auction prices, *Erythrina poeppigiana*, *Arachis pintoi*, *Urochloa*, Life-Sim model.

1. INTRODUCCIÓN

Los productos provenientes de la actividad ganadera cubren una tercera parte del consumo de proteína de origen animal a nivel global (Steinfeld et al. 2009). Factores como el aumento en la población, y los cambios en la dieta debidos al desplazamiento humano de las áreas rurales a las urbanas, el aumento en los ingresos económicos familiares y los cambios asociados en la dieta, están resultando en una mayor demanda de productos de la actividad ganadera, tanto en calidad como cantidad (Steinfeld et al. 2009; Pezo 2017). Para el año 2050 se prevé una duplicación en la demanda de carne bovina (Steinfeld et al. 2006).

Hacer frente a estos retos con una ganadería extensiva, sin atención al cuidado de los recursos naturales, se encamina a resultar cada vez en más problemas de sostenibilidad incluso a mediano plazo, pues posiblemente cada vez será mayor la dependencia de insumos externos (Alonso 2011). Todo esto acrecienta la urgencia de encontrar alternativas para minimizar los impactos negativos de la actividad ganadera sobre la base de recursos naturales (Barahona Rosales y Sánchez Pinzón 2005).

Los sistemas silvopastoriles (SSP) son una alternativa importante de producción bovina en comparación a los sistemas extensivos o convencionales (Alonso 2011; Buitrago-Guillen et al. 2018; Ibrahim et al. 2007; Lam 2016; Miranda et al. 2008) Esto se debe, entre otros factores, a su capacidad para integrar en una misma unidad de producción distintos componentes como son: árboles (maderables y/o frutales, o bien, multipropósito), forrajeras leguminosas (arbustivas y/o rastreras), pasturas de gramíneas (naturales y/o mejoradas) y animales herbívoros (bovinos y/o equinos, ovinos y caprinos, entre otros). Estos sistemas proyectan su sostenibilidad al hacerse menos dependientes de uso de insumos externos. Todo esto es posible entre otras razones, gracias a la fijación de nitrógeno atmosférico, la extracción de nutrientes de niveles más profundos del perfil por árboles con sistemas radiculares profundos y su deposición a través de caída de hojas y ramas, y la reducción de la evapotranspiración en el estrato herbáceo, etc. (Buitrago-Guillen et al. 2018; Iglesias et al. 2017)

Debido a que el proceso de toma de decisión en los sistemas de producción ganaderos está ligado a distintas variables, comprendidas entre ellas las de tipo económico, sociocultural y biológico, lo convierten en un procedimiento bastante complejo (Silveira da Fontoura Junior et al. 2007). Por ejemplo, las características nutricionales cambiantes a lo largo del año de los alimentos suministrados o cosechados por los rumiantes a lo largo del año, los distintos sistemas de uso de forrajes y suplementos, el tipo de animales, y la influencia que, las variaciones climáticas tienen sobre ellos, hacen difícil plantear una sola estrategia de alimentación que cubra los requerimientos nutricionales de los animales a lo largo del año (Dong et al. 2006; Vera et al. 2014). Es por esa complejidad que Silveira da Fontoura Junior (2007) menciona la necesidad de incorporar distintas áreas del conocimiento en el análisis y diseño de recomendaciones para la toma de decisión en los sistemas ganaderos.

En este contexto, los modelos de simulación son un herramienta analítica de gran valor, pues representan de manera simplificada la realidad, considerando distintas variables, características y restricciones, las cuales se describen por medio de símbolos, diagramas y ecuaciones (Martínez et al. 2011). Cuando se trabaja con estos modelos se toma la información de un sistema real o línea base (Lb), ajustando los datos (parametrización),

creando y validando los modelos (validación) es posible evaluar escenarios alternativos antes de ser implementados en campo. Esto disminuye la inversión en tiempo y dinero (León-Velarde et al. 2006); los cuales limitan la prueba y eventual adopción de tecnologías agrícola.

La necesidad de contar con herramientas que brinden respuestas precisas, rápidas y económicas que ayuden en la toma de decisiones para el diseño de sistemas sostenibles de producción bovina es evidente en la literatura. Diversos autores (Barahona y Sanchez 2005; Carrera et al. 1963; León-Velarde et al. 2006; Pezo, 2017; Soca et al. 2007) resaltan la urgencia de desarrollar nuevas metodologías para la evaluación y propuesta de estrategias de alimentación utilizando recursos locales para cubrir los requerimientos de los animales, pero que a su vez permita lograr una producción más rentable. La herramienta conocida como Livestock Feeding Simulation Strategies Models (Life-Sim), desarrollada por la División de Manejo de Recursos Naturales del Centro Internacional de la Papa (CIP), con apoyo financiero del Systemwide Livestock Program (SLP) del Grupo Consultivo sobre Investigación Agrícola Internacional (CGIAR), responde a esa necesidad, pues se desarrolló con el objetivo de evaluar distintas estrategias de alimentación y sus efectos en el rendimiento animal. Este modelo consta de submódulos específicos para bovinos de lechería y de carne, búfalos y cabras, así como uno para cerdos (León-Velarde et al. 2006).

El presente trabajo tuvo como finalidad resaltar los beneficios que se pueden obtener con el uso de la modelación de procesos biofísicos para el desarrollo de alternativas de manejo sostenible en la producción de carne de bovinos manejados en SSP. El uso de estos modelos, una vez validados con datos reales, permite disminuir la subjetividad y la incertidumbre en la predicción de los beneficios ocasionados por cambios en las estrategias de alimentación, ayuda a reducir los costos en tiempo y dinero para la prueba en campo, ya que dan la oportunidad de evaluar distintos escenarios antes de ser implementados en campo. Además, para el caso especial de la ceba de ganado, el modelo permite evaluar diferentes escenarios como el efecto de la variación de los precios de compra y venta en la actividad sobre la eficiencia económica del sistema.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Localización, clima y suelo

El estudio se realizó en una explotación de 4 hectáreas (ha), de las cuales 3 ha están en pasturas dedicadas a la ceba de bovinos tipo comercial y 1 ha se encuentra cubierta por bosque secundario donde predomina la especie *Erythrina poeppigiana* (poró). (Figura 1).

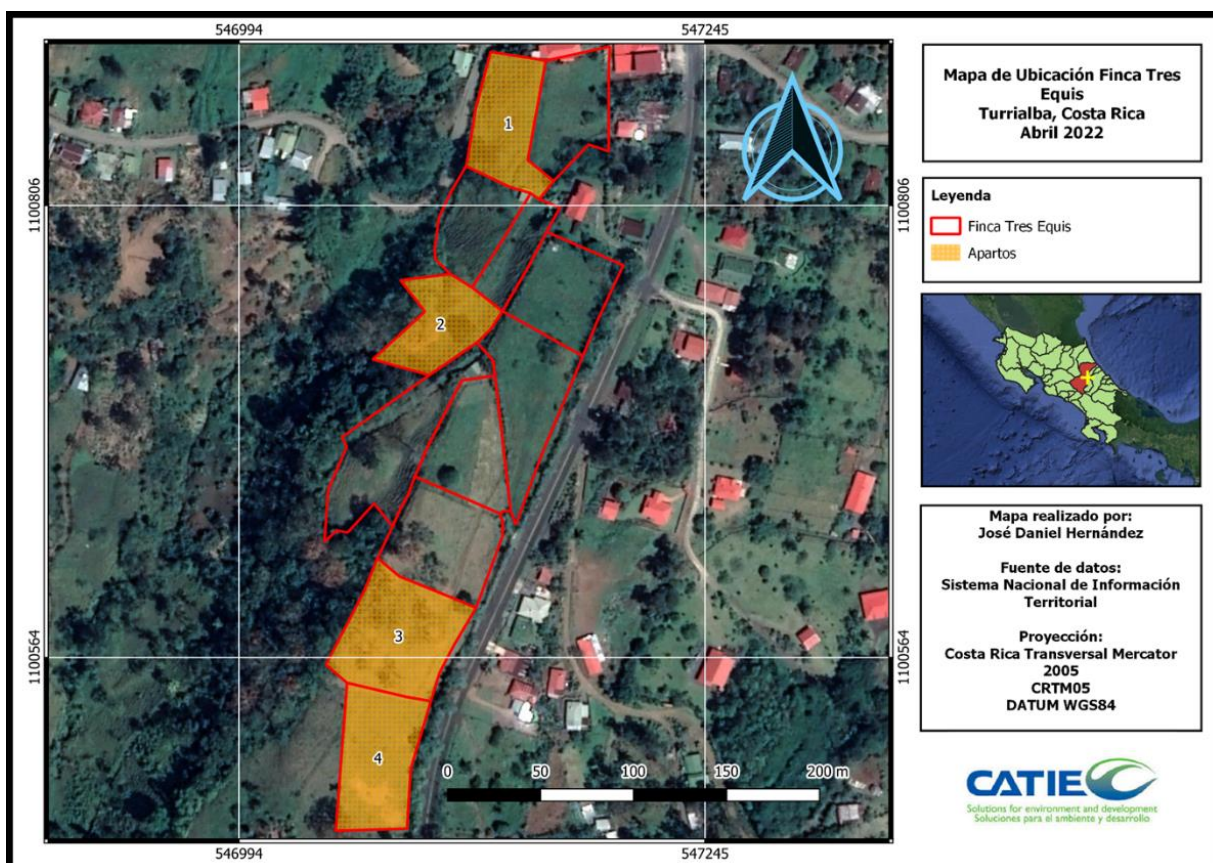


Figura 1. Localización del área de estudio Distrito Tres Equis, Cantón de Turrialba, Costa Rica.

El contorno rojo delimita las divisiones y formas de los 12 potreros de la explotación. Con un color de fondo, aparecen los potreros seleccionados para la toma de muestras del estudio.

La explotación se encuentra localizada en el Distrito Tres Equis, Cantón de Turrialba, Provincia de Cartago, Costa Rica, a $9^{\circ}57'18''$ N y $83^{\circ}34'11''$ E, a 712 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.), una precipitación, promedio anual, de 3,200 mm distribuida entre marzo y noviembre y una temperatura de 24°C . La topografía es ondulada con pendientes entre 25% y 35%. Los suelos en la zona son del Orden Inceptisoles, con textura franco-arcillosa, caracterizados por la presencia de incrustaciones calcáreas y horizontes de cenizas volcánicas.

En la Figura 2 se muestra la distribución promedio mensual de las lluvias de los años comprendidos entre 1988 y 2017. Además, la variación en la temperatura a lo largo de la misma época.

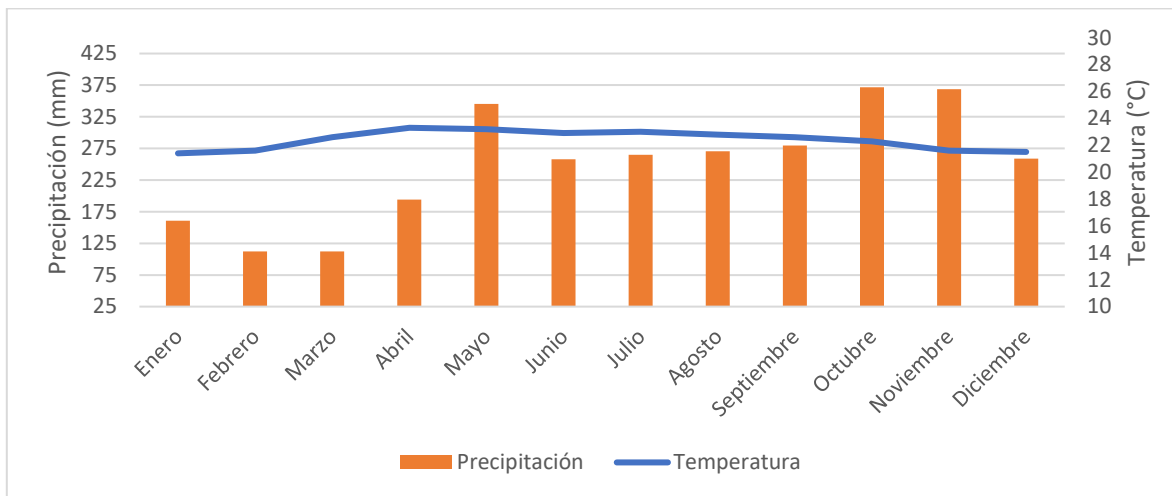


Figura 2. Precipitación y temperatura promedio en el sitio estudiado (1988-2017).

Fuente: Adaptado de Zepner et al. (2020).

2.2 Manejo de las pasturas

La finca cuenta con un área de 3 hectáreas en pasturas, dividida en 12 potreros de 2500 m² cada uno. El periodo de ocupación de cada potrero es de 3 días, proporcionando un descanso de al menos 30 días entre pastoreos. Estos se manejan con una carga animal (CA) inicial de 1,9 UA/ha (1 UA = 400 kg) en promedio cuando ingresa un nuevo lote de animales, y luego se incrementa hasta 3,2 UA al final del ciclo de ceba de 10 meses. Estos potreros se encuentran delimitados por cercas vivas, en su mayoría de especies multipropósito como *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp, de la que se aprovecha la hojarasca y ramas tiernas para preparar ensilaje para suplementación de los animales. Otra especie que compone las cercas vivas es el poró (*Erythrina poeppigiana*), que conforma el estrato más alto y aporta nutrientes al suelo a través de la hojarasca y ramas caídas. Las especies poró (*Erythrina poeppigiana*) y laurel (*Cordia alliodora*) se encuentran también dispersas en los potreros como resultado de la regeneración natural y de algunos esfuerzos de reforestación.

La finca cuenta con dos galeras techadas donde se proporciona agua, sales minerales y otros alimentos a los animales, pero a su vez sirven para el descanso. Cabe mencionar, que todos los potreros tienen acceso a una de las galeras y su desplazamiento se logra con la ayuda de portones y cercas eléctricas móviles.

2.3 Selección y composición botánica de potreros

Para el estudio fueron seleccionados cuatro potreros, aquellos con y sin asociación entre pastos, árboles y la leguminosa herbácea *Arachis pintoii* (Cuadro 1).

Cuadro 1. Características de los potreros seleccionados.

Potrero	Etiqueta	Composición	Observación ^a
1	T+A	<i>Urochloa brizantha</i> cv Toledo + <i>Arachis pintoi</i>	Asocio gramíneas-leguminosa a pleno sol (sin árboles)
2	T+A+E	<i>Urochloa brizantha</i> cv Toledo + <i>Arachis pintoi</i> + <i>Erythrina poeppigiana</i>	Asocio gramíneas-leguminosa. Los árboles en la cerca aportan gran cantidad de hojarasca.
3	D+E	<i>Urochloa decumbens</i> + <i>Erythrina poeppigiana</i> + <i>Cordia alliodora</i>	Gramínea sola con árboles dispersos.
4	D	<i>Urochloa decumbens</i>	Monocultivo de gramínea a pleno sol, con pastos y leguminosas naturales.

^a Todos los potreros cuentan con cercas vivas de *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp.

2.4 Manejo de los bovinos

En los tres últimos ciclos de ceba, se utilizaron novillos de distintos tipos raciales, con pesos promedio de 275 kg; los cuales son pesados cada mes para dar seguimiento a los cambios de peso. Los animales son adquiridos en las subastas ganaderas cercanas a la finca. Cuando los animales llegan a la finca, se les aplica tratamientos de desparasitante y vitaminas. Los animales se mantienen en pastoreo libre por 10 meses, y se le proporciona sal mineralizada y agua limpia a voluntad donde logran alcanzar pesos finales promedio de 467 kg animal⁻¹ ciclo⁻¹. Cabe mencionar que eventualmente se suministra eventualmente ensilaje de *Gliricidia sepium* (Jacq.) Kunth ex Walp, una vez los animales alcanzan pesos de 350 kg.

2.5 Análisis del suelo

Para el estudio, en cada uno de los potreros se tomaron cinco muestras de suelo con un barreno hasta 20 cm de profundidad. A partir de estas muestras se obtuvo una submuestra combinada para los análisis en laboratorio. Se utilizó el método de Bouyucos (granulometría) para determinar la textura, con lectura inicial de 40 s y una lectura final de 2 h. En cuanto a fertilidad se utilizaron 3 métodos. Se implementó el método de extracción en Olsen Modificado pH 8,5 para determinar los valores de Cu, Zn, Mn, Fe, K y P. Extracción en Cloruro de Potasio 1N para determinación los contenidos de Ca, Mg y Acidez Intercambiable. Por último, se utilizó el método de combustión total en equipo auto analizador para identificar el pH en agua, Carbono y Nitrógeno. El detalle de los procedimientos utilizados se describe en Díaz-Romeu y Hunter (1978).

2.6 Evaluación de pasturas

La disponibilidad (Dis) en kg de materia seca (MS) de las pasturas en el mes de junio (época de lluvia) se determinó utilizando la técnica BOTANAL (Tothill et al. 1978); en la cual, mediante un recorrido por cada una de los potreros se identificaron cinco muestras reales que

reflejaban los distintos niveles de producción forrajera presentes en los potreros, los mismos que sirvieron de referencia para evaluar entre 60 y 120 muestras visuales por potrero. En todos los casos se utilizó un marco cuadrado de 0,25 m² (0.5 x 0.5 m). La variación en el número de muestras visuales respondió a las condiciones de cada sitio, con un mayor número de muestras en potreros con mayor variabilidad. Las mediciones se realizaron un día antes de la entrada de los animales a pastoreo (oferta de pasto).

De cada potrero se extrajeron dos muestras de la pastura. Una muestra fue tomada simulando la cosecha del animal, teniendo en cuenta la selectividad de éstos (Villalobos y Arce 2014). Otra muestra fue el resultado de la combinación del material vegetal obtenido en las muestras reales, las cuales fueron cortadas a 10 cm sobre la superficie del suelo, pesadas por separado y mezcladas para la obtención de la submuestra que fue analizada en el laboratorio de Análisis de Productos Animales y Vegetales de la Escuela de Ciencias Agrarias de la UNA para determinación de DIVMS siguiendo la metodología descrita por Van Soest y Robertson, (1985), y el protocolo recomendado por el fabricante para el incubador Daisyll® (ANKOM Technology, Fairport, NY-USA).

El porcentaje de materia seca (% MS) se obtuvo al secar las muestras en horno de ventilación forzado a una temperatura de 65°C hasta alcanzar un peso constante, para luego ser pesada y conocer la diferencia entre el peso seco y el peso fresco de la muestra. Para el nitrógeno total (NT) y carbono total (C) las muestras se analizaron en el Laboratorio de Análisis de Suelos, Tejidos y Aguas del CATIE por medio del método de combustión (Díaz-Romeu y Hunter 1978); el contenido de proteína cruda (PC) se calculó multiplicando el NT por 6,25. Todos estos datos fueron usados como insumos para las corridas en el modelo de simulación Life-Sim.

2.7 Modelación del componente animal con el modelo de carne Life-Sim

La parametrización del modelo se llevó a cabo utilizando insumos obtenidos de los registros de la finca y declaraciones del productor, referente a los tres últimos ciclos productivos de la finca, así como de la literatura (Cuadrado C. et al. 2004). Además de los resultados obtenidos en este trabajo y las observaciones y mediciones realizadas en campo, se evaluaron los registros de los distintos componentes del sistema, de manera que las entradas al modelo sean representativas del sistema real. Estos valores fueron: Peso inicial (Pi) 220 kg, edad (Ed) 1 año, cruce racial (Cr) ½ - ¾ europeo, consumo potencial (Cp) 3,0 kg de MS por 100 kg de PV, factor energético (Fe) para manutención fijado en 35% del PV, porcentaje de variación (% Vc) en el consumo (Vc) de 10%. La disponibilidad de forraje a lo largo del año, utilizada en el modelo, varió entre 950 y 3192 kg MS ha⁻¹ ciclo⁻¹, para la época seca y de lluvias comprendidas entre los meses de diciembre y marzo, y de abril a noviembre, respectivamente, y la digestibilidad fue de 62,5 y 65,7%, para las épocas seca y de lluvias respectivamente. El pasto tuvo un valor promedio de PC del 8,69% y se utilizó una carga animal de 3 UA ha⁻¹.

Para validar el modelo, se utilizaron tres índices recomendados en la literatura para calcular el nivel de precisión; estos fueron el error medio absoluto (MAE) y medida común del error de pronóstico; el error cuadrático medio (RMSE) y su coeficiente de variación (CVRMSE) a (Castellaro G. et al. 2007; Martínez et al. 2011; Silveira da Fontoura Junior et al. 2007; Quiroz et al. 2017). MAE y RMSE son los mejores descriptores para evaluar modelos de

simulación (Willmott 1982). La validación del modelo se hizo utilizando la ganancia de peso diaria observada (GPDO) y la simulada (GPDS),

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n}$$

$$RMSE = \sqrt{\sum_{i=1}^n (GPDS_i - GPDO_i)^2 / n}$$

$$CV(RMSE) = \frac{RMSE}{media\ GPDO} \times 100$$

donde:

GPDO: Ganancia de peso diaria observada (kg) GPDS: Ganancia de peso diaria simulada (kg), CV: Coeficiente de variación (%), $Y_i - X_i$: GPDS-GPDO, n: Número de observaciones

2.8 Suplementación energética y carga animal

Para la determinación del nivel de suplementación energética requerido para el sistema de alimentación actual, se analizó el sistema de alimentación practicado, y se encontró que la energía era el nutriente limitante (Figura 6); por ello, se diseñó un experimento simulado para determinar en qué medida diferentes niveles de una fuente energética como la melaza pueden ayudar a aprovechar el exceso de proteína provisto por el pasto en el sistema actual. Se evaluaron los siguientes niveles de melaza, expresados como porcentaje del consumo potencial de MS: 0% (T0), 10% (T10), 20% (T20), 30% (T30) y 40% (T40). El costo por kilo MS de melaza fue de US\$ 0.35, y los valores promedio de valor nutritivo de la melaza utilizados para correr el modelo fueron: 73,5% MS, 5,74% de PC y una Dig del 85% (base de datos Life-Sim), los cuales son similares a los reportados por Araiza et al. (2013) y Carrera et al. (1963). Se consideró un incremento mensual del 10% en el consumo potencial (Cp) del animal, esto debido entre otros factores, al aumento en el peso vivo (PV) a lo largo del ciclo. El consumo de melaza fue ajustado de acuerdo con el PV y varió entre 1,1 y 2,3; 2,2 y 4,6; 3,3 y 6,8; y 3,6 y 7,5 kg animal⁻¹ día⁻¹, para T10, T20, T30 y T40, respectivamente.

Con el fin de analizar la interacción entre la suplementación energética por la carga animal usada en el sistema, y el nivel de suplementación que maximiza el uso de la proteína ofrecida en la alimentación actual, se diseñó un experimento virtual para determinar la combinación óptima de los tratamientos evaluados. Se usó un diseño de Superficie de Respuesta Rotable de Composición Central (Montgomery, citado por León-Velarde y Quiroz 1998). Los tratamientos se diseñaron y corrieron en Excel con el programa desarrollado por León Velarde y Quiroz (1998). Se evaluaron 4 tratamientos factoriales (2^k) y 4 axiales (2k) y el tratamiento central (n₀). El tratamiento central se repitió cinco veces. El total de tratamientos evaluados fue de nueve, producto de 2^k+2k+n₀, (donde k=2). Para que el diseño sea rotatable se requiere de un valor (a) que varía en función del número de puntos en la porción factorial del diseño.

El valor de “a” para este estudio se estimó como $a=P^{1/4}$, donde $P=2^k$ y $k=2$ (número de tratamiento) entonces $a=1,414$,

$$a=P^{1/4}$$

$$a = (2^2)^{1/4}$$

$$a = 1.414$$

El diseño de los tratamientos evaluados, tanto en código como los valores estimados de niveles de carga animal y melaza se muestran en la Figura 3. Las variables X_1 = carga animal ($UA\ ha^{-1}$) y X_2 = melaza (% consumo potencial de MS) varió de 1 a 5 y de 0 a 40, respectivamente. Los tratamientos centrales con código 0, correspondieron a $3\ UA\ ha^{-1}$ y 20% de melaza del consumo potencial.

Cuadro 2. Diseño de tratamientos, carga animal y melaza.

	T	CA (UA/ha)	Melaza (%)	GPD (kg)
Factoriales	1	2	10	0,602
	2	4	10	0,586
	3	2	30	0,739
	4	4	30	0,725
Axiales	5	1,586	20	0,689
	6	4,414	20	0,666
	7	3	5,86	0,558
	8	3	35	0,753
Centrales	9,1	3	20	0,687
	9,2	3	20	0,672
	9,3	3	20	0,692
	9,4	3	20	0,677
	9,5	3	20	0,684

T=tratamientos, CA=carga animal, UA=unidad animal (1UA=400kg), GPD=ganancia de peso diaria.

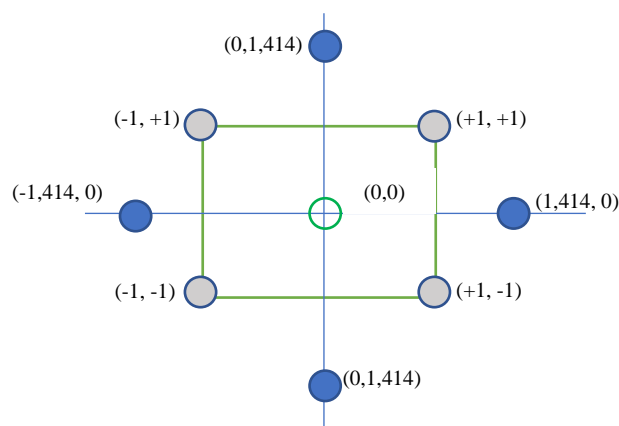


Figura 3. Superficie de Respuesta para evaluar la ganancia de peso diario en función de distintos niveles de la carga animal, suplementación con melaza.

El círculo verde representa el tratamiento central, los puntos grises los tratamientos factoriales y los azules, los axiales.

2.9 Mes de inicio del ciclo de ceba y su efecto sobre ganancia de peso y la rentabilidad del sistema

Para responder a la pregunta, ¿qué pasaría si se inicia el ciclo de ceba en un determinado mes del año?, se corrieron diferentes escenarios usando el modelo Life-Sim, uno para cada mes del año. Para todos ellos, las condiciones iniciales del modelo consistieron en: Pi de 266 kg y los precios de compra y venta por kg de peso vivo que se muestran en el Anexo 3. Los resultados de las simulaciones en términos de GPD y rentabilidad fueron analizados usando estadística descriptiva. En este escenario se estimó el costo de producción de 1 kg de forraje fresco, calculado de los gastos en los que incurre el productor en el manejo de las pasturas y los derivados del establecimiento y los costos de depreciación anual, considerando también las cercas vivas, dividido por el área total de pastoreo (ver Anexo 5A), y una Dis entre 950 y 3192 kg MS ha⁻¹ para la época seca y época de lluvia comprendidas entre los meses de diciembre y marzo, y entre los meses de abril y noviembre, respectivamente. Además, se estimó el % de los gastos totales que corresponde al manejo de las praderas.

Se utilizó estadística descriptiva para el análisis de los resultados de las simulaciones en términos de GPD y rentabilidad. En este escenario se estimó el costo de producción de 1 kg de forraje fresco en base a los gastos fijos y variables en los que incurre el productor en el manejo de las pasturas y los derivados del establecimiento, considerando también las cercas vivas, dividido por el área total de pastoreo. Además, se estimó el porcentaje de los gastos totales que corresponde al manejo de las praderas. Cabe señalar que el consumo potencial se evaluó en base a 3 kg de MS por 100 kg PV, considerando un aumento mensual del 10% del PV para un novillo con un Pi de 266 kg con un ciclo de ceba de 10 meses.

Los precios de compra y venta utilizados para el estudio fueron los reportado por la Corporación de Fomento Ganadero de Costa Rica (CORFOGA) (CORFOGA 2022), referente a los precios de las subastas ganaderas a lo largo del año 2021 (ver Anexo 3). Se seleccionó el precio para animales con pesos entre 251 y 300 kg como rango de pesos de compra y, entre 401 y 500 kg como el rango de peso de venta. El análisis de simulación se realizó teniendo en cuenta el mes de inicio del ciclo de ceba, y los 10 meses de duración de éste.

2.10 Análisis financiero

El análisis financiero se efectuó haciendo una proyección de la actividad a 12 años considerando que esa es la vida útil, tanto de la pastura como de la cerca. Para valorar la pastura se estimó el costo de establecimiento con base a un estudio de Pezo y Cardona (2021) en Belice. Los costos asociados al mantenimiento de los potreros se tomaron de los registros del productor para el año 2021 y los precios de compra y venta de los animales se basaron en lo reportado por CORFOGA (CORFOGA 2022)(Anexo 3), para un ciclo de ceba que inicia en el mes de diciembre y finaliza en el mes de octubre. Con la información anterior, se realizó un análisis financiero estimando el valor actual neto (VAN), la tasa interna de retorno (TIR),

con una tasa de descuento de 9%¹ y la relación beneficio costo B/C, todo esto para evaluar la viabilidad del sistema estudiado.

3. RESULTADOS

3.1 Características de los suelos

Los resultados de los análisis de suelo en cuanto a fertilidad y textura se muestran en el Cuadro 3. Se encontró una textura franco-arcillosa en los primeros 20 cm del perfil del suelo, y pH ácido, en un rango de 5,1 a 5,7. Los porcentajes de C y N en el potrero T+A fueron los más altos en los perfiles evaluados con valores de 0,44 y 4,03% respectivamente.

Cuadro 3. Fertilidad y textura del suelo en el sistema estudiado. 0-20 cm profundidad.

Etiqueta	Prof.	pH	Acidez	N	C	Arena	Limo	Arcilla	Textura
Potrero	cm	H ₂ O	Cmol (+)/l	%	%	%			
T+A	0-20	5,4	0,20	0,44	4,03	47,0	27,8	25,2	Franco arcillo arenoso
T+A+E	0-20	5,1	0,48	0,33	2,79	37,0	23,7	39,3	Franco arcilloso
D+E	0-20	5,3	0,33	0,30	2,61	41,1	27,6	31,3	Franco arcilloso
D	0-20	5,7	0,18	0,25	2,44	46,0	29,7	24,3	Franco

3.2 Disponibilidad de forraje y componentes de calidad nutritiva de las pasturas en oferta

En el Cuadro 4. se observan los resultados de los análisis de calidad nutritiva realizados en las pasturas. Estos muestran un efecto positivo considerable en el asocio con leguminosas herbáceas como leñosas.

Cuadro 4. Calidad nutritiva y disponibilidad de MS de las pasturas utilizadas en el estudio.

Potrero	Etiqueta	Dig (%)	Ms (%)	PC (%)	Dis, (kg MS ha ⁻¹)	Dis, (t MS ha ⁻¹)
1	T+A	56,8	24,9	4,5	3793	3,8
2	T+A+E	63,7	25,0	9,9	3901	3,9
3	D+E	70,0	21,2	13,4	2991	3,0
4	D	59,7	17,6	8,6	2399	2,4

Dig: digestibilidad; MS: materia seca; PC: proteína cruda; Dis: disponibilidad.

3.3 Componente arbóreo

En el potrero D+E se encuentran dispersos 23 árboles de poró (*Erythrina poeppigiana*) y 6 individuos de laurel (*Cordia alliodora*). Estos árboles proporcionan un 48% de sombrío en un área de 2500 m². Utilizando un radiómetro modelo SM206-solar se encontró una reducción en la radiación incidente del 54% (17,8 MJ m² d⁻¹ al sol y 8,2 MJ m² d⁻¹ a la

² Tasa de interés en colones del Banco Central de Costa Rica al 27 de octubre de 2022.

sombra). La disminución en la temperatura debajo de la copa de los árboles fue de 0,04 °C y el porcentaje de humedad fue 8,74% mayor bajo sombra. Los resultados de las lecturas de los sensores SensorPush HT. W para los meses de junio y julio en sombra y a pleno sol se muestran en el Cuadro 5.

Cuadro 5. Temperatura y humedad promedio a pleno sol y bajo sombra durante un mes – del 3 de junio al 3 de julio del 2022.

Variables	Condiciones	
	Exposición al sol	Exposición a la sombra
Temperatura (°C)	26,15	26,11
Humedad (%)	77,94	86,68

3.4 Cercas vivas

En la explotación existen aproximadamente 800 m de cercas vivas de *G. sepium* de las cuales actualmente, con una distancia entre árboles de 2 m aproximadamente, y de estos se podan unos 572 m, dos veces/año, con una producción total anual de 1320 kg de ensilaje, equivalente a 2.30 kg/árbol. La cosecha se realiza de manera selectiva, cortando solo las ramas de mayor desarrollo y dejando los rebrotes nuevos para futuras cosechas y garantizar así la actividad fotosintética de los árboles. Seis meses después de la elaboración, el ensilaje presentó las características siguientes: 48% de MS, 23.25% de PC y 73.16% de DIVMS.

3.5 Validación del modelo de simulación

La comparación de los valores GPDO y GPDS se muestran en la Figura 4, donde se pueden observar la ganancia mínima, máxima y la media general de 25 observaciones, correspondiente a los animales engordados entre los años 2019 y 2021. El valor promedio del error absoluto o Mean Absolute Error (MAE) para las 25 comparaciones fue de 0,056 kg, y el error medio cuadrático (RMSE) y el coeficiente de variación (CV) fueron de 0,07 y 10,56%, respectivamente.

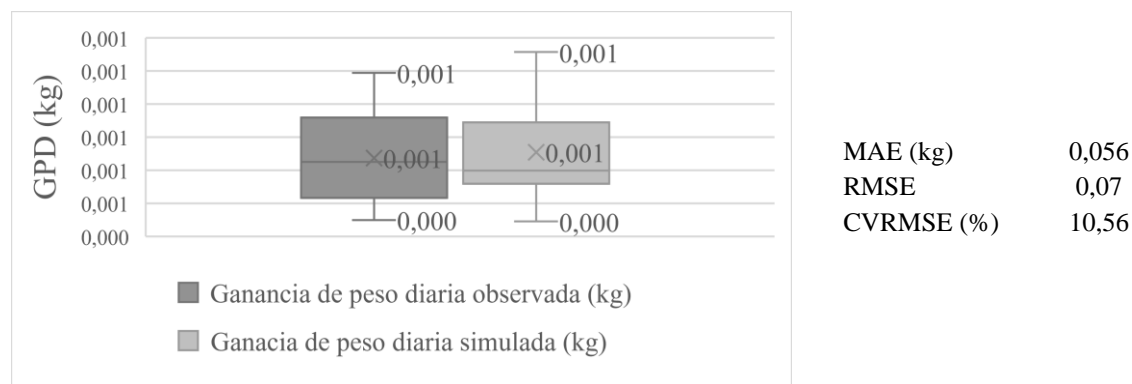


Figura 4. Evaluación del desempeño del modelo Life-Sim. MAE=valor promedio del error absoluto, RMSE=error medio cuadrático, CVRMSE=coeficiente de variación del error cuadrático medio

En la figura 6 se observa la dispersión de los datos de GPDO y GPDS alrededor de la línea 1:1 (línea de 45°).

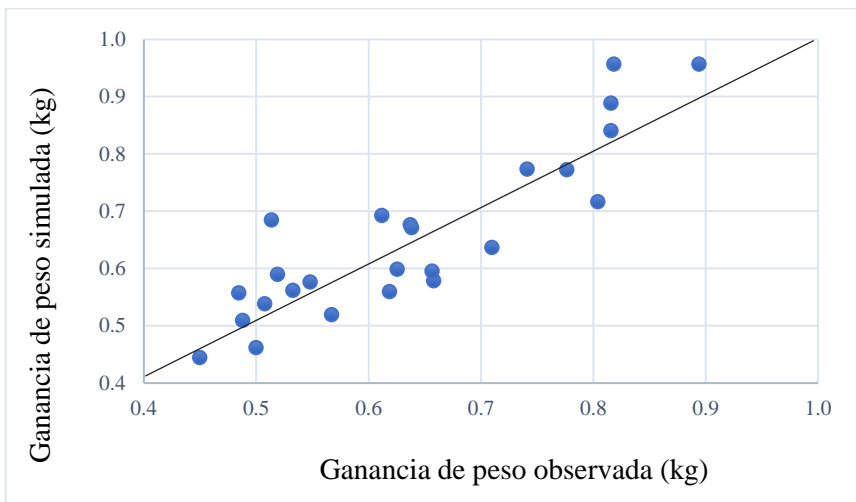


Figura 5. Evaluación del desempeño del modelo Life-Sim, comparación x=y.

3.6 Energía requerida para aprovechar la proteína del pasto

En la Figura 6. Simulación de la ganancia de peso limitada por energía y proteína usando como insumos los datos de la línea base (observado).se puede apreciar que, a través de todo el ciclo de ceba (10 meses), la ganancia de peso estuvo limitada por el consumo de energía y que, por ende, existe un excedente de PC a lo largo de todo el periodo, el cual se podría aprovechar mejor con la inclusión de una fuente de energía. Por esa razón se analizó la posibilidad de incluir melaza como una fuente de energía fácilmente fermentable.

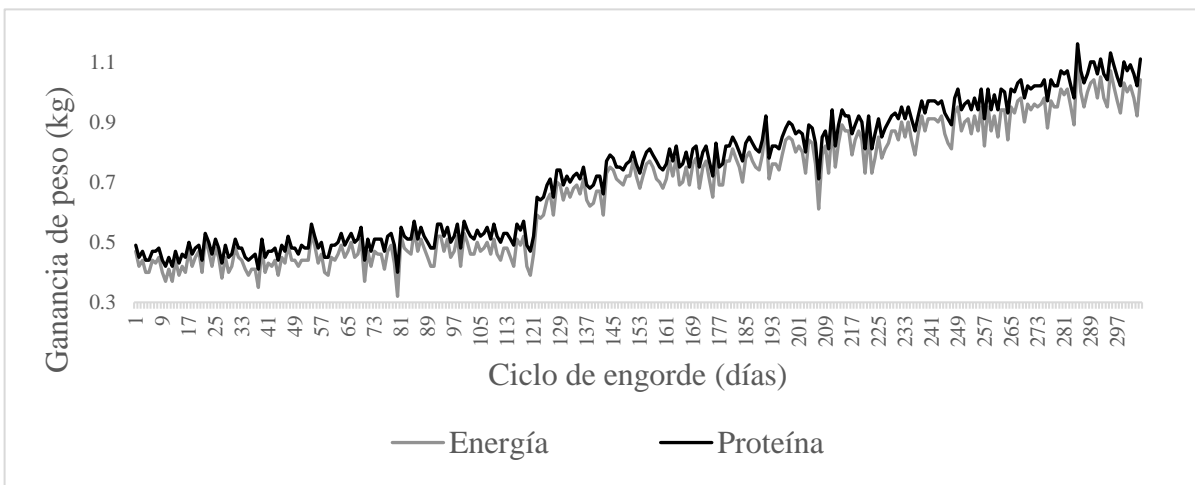


Figura 6. Simulación de la ganancia de peso limitada por energía y proteína usando como insumos los datos de la línea base (observado).

La suplementación con melaza al 20% (T20) del consumo potencial repercutió en un uso más eficiente de la PC respecto a los demás tratamientos (Figura 7. Simulación de la ganancia de

peso limitada por energía y proteína en los distintos tratamientos de suplementación con melaza. Con la suplementación de 10% de melaza todavía hubo un déficit de energía, y con los niveles de 30 y 40% se presentó un exceso de energía. Cabe señalar que el consumo potencial se estimó tomando como base 3 kg MS por 100 kg de PV, considerando un aumento mensual del 10 % del PV para un novillo con un Pi de 220 kg, mantenido en el sistema a lo largo de un ciclo de ceba de 10 meses. Con el uso de la melaza como suplemento se alcanzó GP de hasta 262 kg animal⁻¹ ciclo⁻¹ para el tratamiento T20, mientras que sin suplementación energética la GP fue de solo 205 kg animal⁻¹.

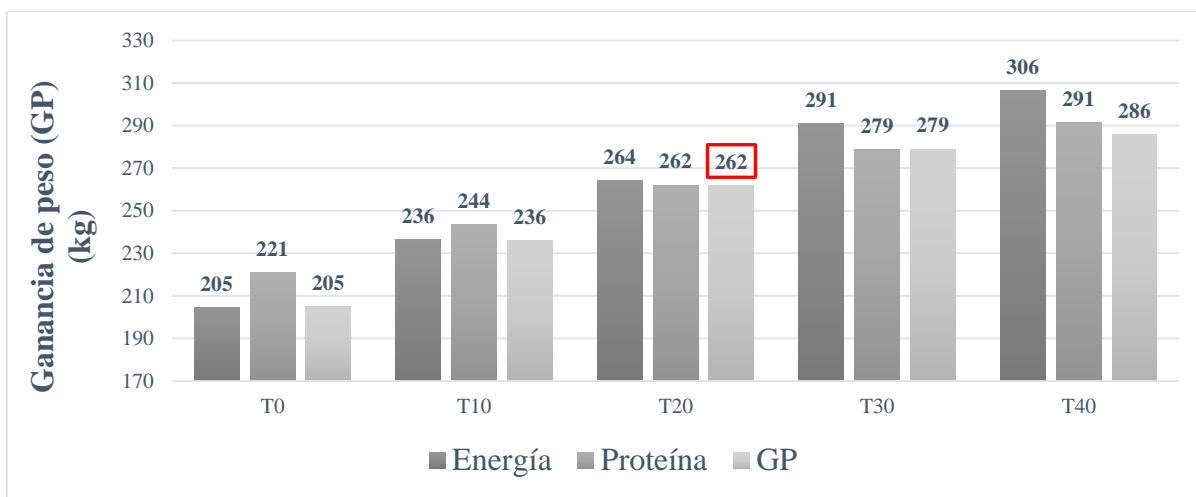


Figura 7. Simulación de la ganancia de peso limitada por energía y proteína en los distintos tratamientos de suplementación con melaza. T0=línea base, T10=10% de melaza, T20=20% de melaza, T30=30% de melaza, T40=40% de melaza, del consumo potencial de materia seca del animal.

3.7 Determinación de la combinación óptima de la suplementación energética y la carga animal (superficie de respuesta)

El análisis de varianza y la evaluación de los coeficientes del polinomio de segundo grado para la combinación de diferentes niveles de suplementación con melaza y carga animal se muestran en el

Cuadro 6. Tanto el componente lineal como el cuadrático fueron significativos ($p < 0.001$). En lo que respecta a los coeficientes, el intercepto y los coeficientes de las variables X_1 , X_2 y x_2^2 fueron significativos ($p < 0.001$). Todos los demás coeficientes no fueron probabilísticamente diferentes a 0 ($p > 0.05$).

Cuadro 6. Análisis de varianza y coeficientes de variación en la combinación de los diferentes niveles de suplementación con melaza y carga animal.

Análisis de varianza					
Fuente de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Fo	
Lineal	2	0,0358	0,0193	484,5302	(**P<0,01)
Cuadráticos	2	0,0014	0,0007	85,7641	** (P<0,01)

Productos cruzados	1	0,0000	0,0000	0,0251	N.S.
Falta de ajuste	3	0,0000	0,0000	0,1329	N.S.
Error	4	0,0003	0,0001		
TOTAL	12	0,0403			

Coefficientes

		Coefficiente.	Error estándar	Estandístico t	
B0	Intercepto	0,68240	0,00282	241,94385	** (P<0,01)
B1	X1	-0,00782	0,00223	-3,50519	** (P<0,01)
B2	X2	0,06898	0,00223	30,93176	** (P<0,01)
B3	X1^2	-0,00333	0,00239	-1,39023	N.S.
B4	X2^2	-0,01433	0,00239	-5,99084	** (P<0,01)
B5	X1*X2	0,00050	0,00315	0,15856	N.S.

NS = no significativo, ** = significativo

La figura 9 muestra la respuesta resultante de la siguiente ecuación:

$$Y = 0.682 - 0.078 * X_1 + 0.069 * X_2 - 0.0033 * X_1^2 - 0.0143 * X_2^2 + 0.0005 * X_1 * X_2,$$

Donde: X_1 = carga animal y X_2 = nivel de melaza suplementaria.

El punto óptimo se encontró en $X_1 = 2.004 \text{ UA ha}^{-1}$ y $X_2 = 43.896 \%$ de melaza. La respuesta en GPD para este punto estacionario fue de $0.769 \text{ kg animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$. Resalta el efecto de los distintos tratamientos de melaza, contrario a los efectos ocasionados por los distintos tratamientos de carga animal.

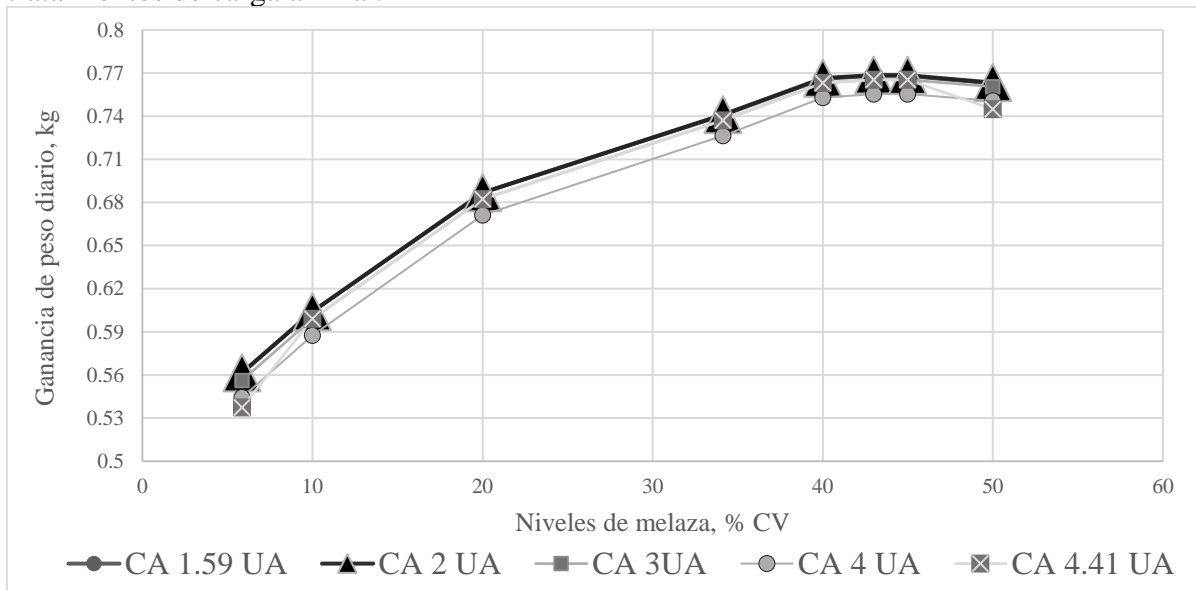


Figura 8. Gráfico de dispersión mostrando la variación en GPD (Y) en función de la carga animal (X_1) y el % de melaza suplementada (X_2).

3.8 Evaluación de excreción de N y emisión de CH_4 en función de la carga y melaza suplementaria

No se encontró diferencias significativas ($P>0,05$) entre los tratamientos evaluados en la superficie de respuesta para la excreción de N, la eficiencia en el uso de N dietético ni las emisiones de CH₄. Los valores diarios de consumo de N, eficiencia en el uso de N urinario, N fecal, excreción total de N, así como la emisión de CH₄ durante el ciclo de ceba se muestran en el Cuadro 7.

Cuadro 7. Emisión de CH₄, consumo de N y su partición en productos, en la orina y heces.

Variable	Media	Error estándar
Consumo N, g día ⁻¹	85,05	6,83
N urinario, g día ⁻¹	18,13	1,35
N fecal, g día ⁻¹	30,44	2,41
N total excretado, g día ⁻¹	48,57	3,74
Eficiencia uso N, %	44,46	0,26
Emisión CH ₄ , kg ciclo ⁻¹	63,15	4,33

3.9 Escenario compra y venta distintos meses del año

Los mejores resultados en GPD se presentaron al dar inicio al ciclo de ceba con la compra de los animales en el mes de abril (Figura 10); sin embargo, las variaciones entre meses de inicio de la ceba no fueron grandes, pues con el inicio de la ceba en diciembre, cuando se obtuvo la menor GPD, esta fue de solo un 5,4% menor a la obtenida para abril.

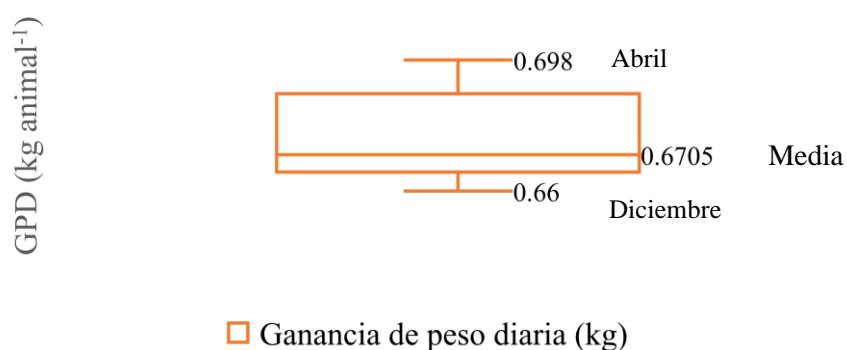


Figura 9. Ganancia de peso diaria según el mes de inicio del ciclo de ceba.

En cuanto al margen bruto estimado por el modelo Life-Sim (Figura 11), los mayores valores correspondieron al inicio del ciclo de ceba en febrero; por el contrario, los valores más bajos fueron para el mes de marzo, cuando también se obtuvo la ganancia económica más baja. Un análisis sobre los factores que inciden sobre el margen bruto mostró que, para los meses de

noviembre a febrero, la variación positiva en los precios explicó entre el 6 y el 20% (ver Anexo 4); en cambio, para el resto de meses, la variación negativa de los precios osciló entre -2% y -8%.

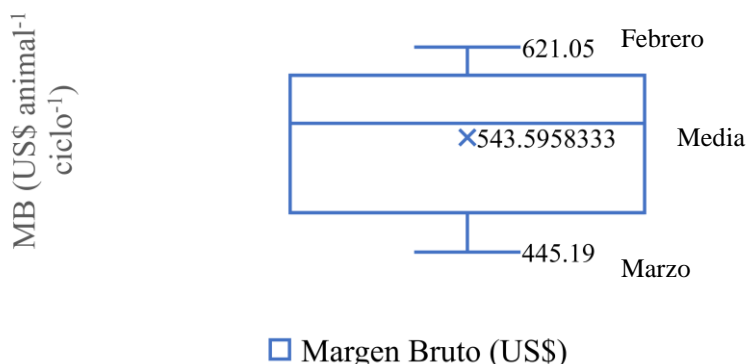


Figura 10. Margen Bruto (MB) US\$/animal según mes de inicio calculado en LifeSim.

En la figura 12 se muestra que cuando se suplementa con melaza al 20 % (T20) se dan aumentos en la ganancia de peso en promedio de 27.1% superior a los obtenidos en ausencia de suplementación, independientemente del mes en que se inició el ciclo de ceba. Pero la mayor GPD se logró con el inicio de ceba en abril.

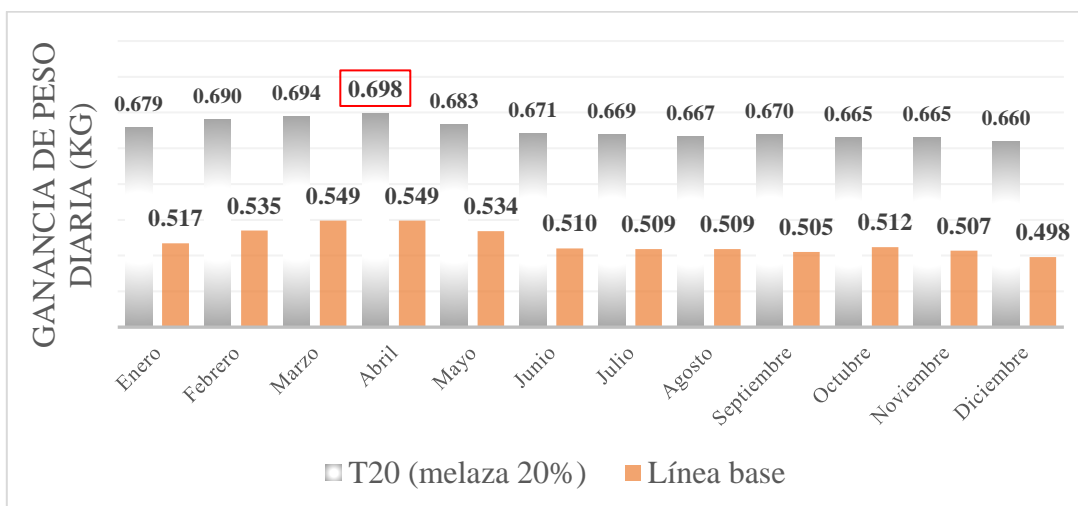


Figura 11. Ganancia de peso diaria (GPD) animal⁻¹ ciclo⁻¹ línea base vs. tratamiento T20 (melaza al 20 %) del consumo potencial. Simulado con el modelo Life-Sim.

Sin embargo, cuando se estimó el margen bruto, en cualquiera de los meses de inicio y finalización de la ceba, para el manejo actual de la finca (Lb) y la suplementación con 20% de melaza (T20) del consumo potencial, se encontró que para las condiciones de este estudio, que la suplementación no era una opción viable, desde el punto de vista económico, pues en todos los casos resultó en una reducción del margen bruto de la actividad (Figura 13).

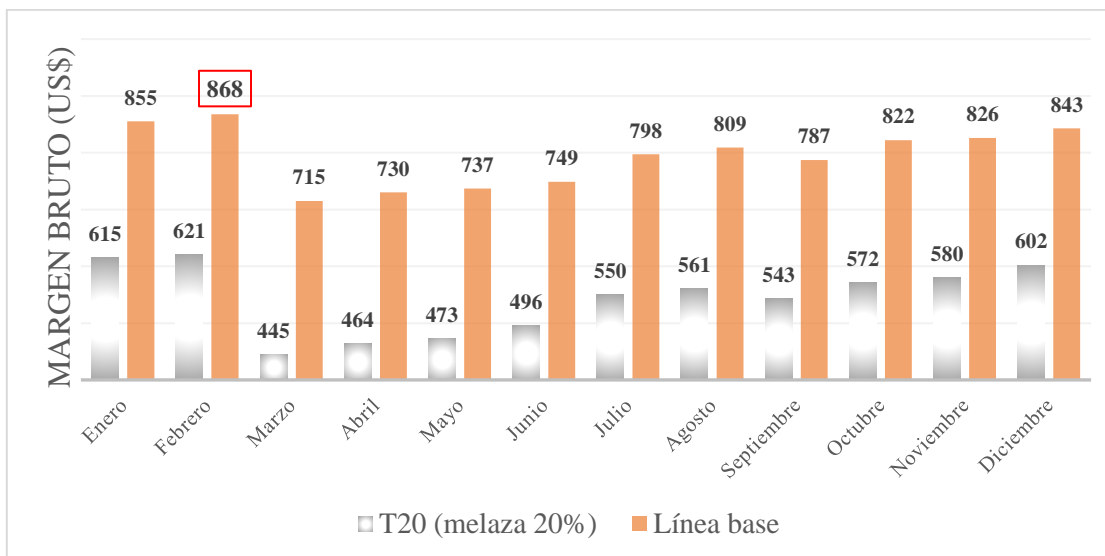


Figura 12. Margen bruto animal⁻¹ciclo⁻¹ línea base vs. tratamiento T20 (melaza al 20 %) del consumo potencial. Utilizando el modelo Life-Sim.

Los resultados de la evaluación financiera del sistema se muestran en el Cuadro 8 y la evaluación financiera completa en el Anexo 5. La columna titulada “observado” muestra los resultados del análisis financiero correspondiente al año 2021, utilizando los datos del productor (Lb) (ver Anexo 5^a). Los resultados del análisis financiero de los datos simulados iniciando el ciclo de ceba en el mes de diciembre no difieren de los mostrados para los datos observados (Cuadro 8) y la información completa en el Anexo 5^b. Bajo la columna titulada “simulado (febrero)” se muestran los resultados que se obtuvieron iniciando el ciclo de ceba en el mes de febrero (ver Cuadro 8), el cual resultó en la mejor eficiencia financiera respecto a cualquiera de los otros meses del año (ver Anexo 5^c). El incremento relativo entre lo observado para la práctica actual de la finca (Lb) y los valores que se obtienen al iniciar el ciclo en febrero, son \$10,727, 14% y 0,30 para el VAN, TIR y la relación B/C, respectivamente.

Cuadro 8. Resultados del análisis financiero, para el sistema de la finca, y el inicio de la ceba en diciembre y febrero, respectivamente.

Análisis financiero	Observado	Simulado (diciembre)	Simulado (febrero)
Valor Actual Neto (VAN)	\$19,324	\$19,787	\$30,050
Tasa Interna de Retorno (TIR)	37%	38%	51%
Relación beneficio/costo (B/C)	1,33	1,33	1,63

4 DISCUSIÓN

4.1 Ganancia de peso (GPD) en sistemas silvopastoriles (SSP).

Los resultados del presente estudio confirman que SSP bien manejados mejoran la productividad y rentabilidad cuando se compara con sistemas ganaderos tradicionales (Pezo e Ibrahim, 1998). En el caso particular del sistema de pastoreo practicado en la finca motivo del presente estudio se encontró una GPD de $0,637 \text{ kg animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$ valor que supera a las ganancias de peso mínimas que se han obtenido en diversos estudios en que se ha evaluado la ganancia de peso en SSP, la cual ha variado entre de $0,400$ y $0,500 \text{ kg animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$ (Iglesias et al. 2006). Entre los factores que pueden explicar las buenas ganancias de peso observadas en este estudio están las buenas prácticas de manejo de pastoreo aplicadas por el productor, lo cual se refleja en buena disponibilidad de pastos y la persistencia de especies deseables, pese a tener más de 12 años de uso; además, debido a las condiciones climáticas favorables para el crecimiento del pasto que se presentan a lo largo de todo el año. En contraste, en zonas con período seco definido se ha logrado menores ganancias de peso, así en un sistema de pasturas similar al practicado en la finca bajo estudio, Iglesias et al. (2017) logran una GPD de $0,449 \text{ kg animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$ y Pérez et al. (2008) obtuvieron una GPD de $0,486 \text{ kg animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$, mientras que en una pastura de gramíneas en monocultivo la GPD fue de $0,369 \text{ kg animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$.

Los SSP, a pesar de la complejidad de los factores que involucra (Silveira da Fontoura Junior et al. 2007), ofrecen una diversidad de ventajas sobre los sistemas tradicionales. Entre dichas ventajas se puede citar: mayor productividad en sistemas de producción de leche, carne y doble propósito (Bacab Pérez y Solorio Sánchez 2011; López et al. 2017; Russo 2018); así como la capacidad de alcanzar sostenibilidad entre los aspectos ambientales y el progreso en la ganadería (Iglesias et al., 2017). Estos hallazgos concuerdan con las acciones propuesta por Pezo (2017) para hacer frente a los retos actuales y futuros que enfrenta la ganadería, a través del aumento en la producción en las áreas de pasturas existentes.

4.2 Modelación del componente animal con el modelo de carne Life-Sim

La distribución de las ganancias de peso diarias observadas (GPDO) es similar a las simuladas (GPDS), pues los datos obtenidos están distribuidos, alrededor de la línea de 45° o $x=y$, tal como se muestra en la figura 5. Por otro lado, los intervalos de confianza se superponen y el estimador MAE indica que la diferencia promedio en GPD fue apenas de $0,056 \text{ kg}$, lo cual representa un $9,3 \%$ del valor promedio. El coeficiente de variación de la raíz del cuadrado medio del error fue de $10,56 \%$. Todo esto evidencia la robustez del modelo Life-Sim para predecir ganancias de peso en animales de ceba manejados bajo pastoreo, como fue el caso de este estudio. No hay evidencia que el modelo Life-Sim tienda a la sobre o subestimación, ya que los puntos se distribuyen aleatoriamente alrededor de la línea $x=y$.

Todas las métricas (MAE, RMSE, CVRMSE) estimadas en este estudio corresponden a modelos con un alto nivel de predicción de los datos medidos. Los resultados concuerdan con parámetros estándares utilizados en la literatura (Castellaro G. et al. 2007; Martínez et al. 2011; Silveira da Fontoura Junior et al. 2007; Quiroz et al. 2017), y confirman que las métricas MAE y RMSE son buenos descriptores para evaluar la robustez de los modelos de simulación (Willmott 1982).

En un estudio previo, Orden et al. (2004) aplicaron el mismo submodelo carne del modelo LFI-SIM a tres diferentes sistemas de ceba de bovinos a base de forrajes practicado en Filipinas y encontraron un CV de 9,37%, el cual no difiere del valor obtenido en este estudio (CV=10,56%). Por otro lado, Castellaro G. et al. (2007), simularon la ganancia de peso de toretes Hereford en pastoreo, con pesos iniciales de 192 y 169 kg animal⁻¹, utilizando un modelo desarrollado en la versión 7.1 de Visual Basic Excel[®], obtuvieron valores ligeramente menores de CVRMSE (9,98 % y 5,11%), al simular las GPD con novillos de 192 y 169 kg de peso inicial, respectivamente. En contraste, Maquivar-Linfoot et al. (2006) en un estudio de simulación de ganancia de peso en bovinos manejados en el trópico húmedo de Costa Rica utilizando el nivel 1 del modelo de simulación NRC, detectaron sub y sobreestimación de las ganancias de peso, los cuales atribuyeron a la variabilidad y sobrestimación de las ganancias de peso diario, los cuales atribuyeron a la variabilidad en las condiciones presentes en el sistema estudiado por ellos.

4.3 Uso de suplementación energética.

Las salidas del modelo validado sugirieron que incluso con pasturas tropicales bien manejadas como las utilizadas en la finca motivo del estudio, se presenta a lo largo de todo el ciclo de ceba una diferencia de energía respecto al aporte de proteína. Este resultado es similar a lo reportado por Sánchez (2007), quien a su vez concluyó que el uso de melaza como fuente energética contribuye a hacer un aprovechamiento más eficiente de la proteína contenida en los forrajes. De igual forma, Lauric et al. (2018) indica que el uso de melaza actúa positivamente en la GPD de animales jóvenes. Por otro lado, autores como Carrera et al. (1963) encontraron que al suplementar 0,730 kg de melaza al día cuando las pasturas muestran buena calidad durante la época de lluvia no era una opción viable. Sin embargo, los mismos autores reportan que llevar a cabo dicho tratamiento en la época seca repercute en un aumento de hasta el 82% en comparación con animales no suplementados.

La melaza de caña, por su disponibilidad en el área de estudio y su costo, se constituye en un suplemento energético con buen potencial para su uso en sistemas como el estudiado. En el presente estudio se evidenció que la suplementación con melaza al 20% del consumo potencial (T20) proporciona la energía necesaria para mejorar la GP en el ciclo de ceba (Figura 7), mientras que los aumentos en ganancia de peso conseguidos con los niveles superiores de suplementación (T30 y T 40) son relativamente pequeños comparados con los de T20, por lo que no resultan económicamente justificados. Cabe señalar que el nivel de melaza a suplementar debe variar en función de las condiciones en que se trabaja, como son la frecuencia y cantidad suministrada, el método de suministro, la época del año, los tipos de animales (raza, peso, edades), así como las características de los forrajes usados como dieta base (Lauric et al., 2018).

Proveer melaza al 20% del consumo potencial a novillos con un ciclo de ceba de 10 meses pueden resultar en un aumento de la GP de hasta 63 kg ciclo⁻¹ (Figura 7); y que, si el periodo de ceba se prolonga hasta 12 meses, el incremento tanto en GPD como el MB seguía siendo lineal, alcanzando valores de 0,737 kg animal⁻¹ día⁻¹ y \$ 651,33, respectivamente. No obstante, el productor declaró que él optó por ciclos de 10 meses de ceba por año, porque de esa manera le permite dar dos meses adicionales de descanso a las pasturas, además de los que ocurren en cada ciclo de pastoreo. Es posible que esa decisión también haya ayudado a

la estabilidad de las pasturas, ya que estas presentan buenos niveles de productividad y una composición botánica adecuada, a pesar de tener más de 12 años de haber sido establecidas, y manejadas con cargas relativamente alta.

4.4 Uso del diseño de Superficie de Respuesta para la simulación de escenarios de producción

El diseño Superficie de Respuesta Rotable de Composición Central permite analizar un número de tratamientos menor que los logrados en un factorial completo con 5 niveles de cada factor, y estimar sus efectos sobre un grupo de variables de respuesta, y al final ello ayuda a encontrar el nivel óptimo de la combinación de las variables independientes (Figueroa Preciado, 2003, León-Velarde y Quiroz, 1998). En este estudio se encontró que el óptimo biológico ($0,769 \text{ kg animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$ de GPD) se logró con una carga animal de $2,00 \text{ UA ha}^{-1}$ y una suplementación de melaza equivalente al 43,8 % del consumo potencial.

Es importante resaltar que el uso de un diseño de este tipo en ensayos de campo, le permite al investigador ahorrar tiempo, espacio y dinero, al reducirse el número de tratamientos, sin perder la ortogonalidad de los mismos (Carrera et al. 1963, Soca et al. 2007). Si se aplican este diseño para el análisis de escenarios con el modelo Life-Sim, es posible definir *ex ante* cuáles tratamientos se podrían evaluar en los ensayos con animales, que son tan costosos y difíciles de implementar (León-Velarde et al. 2006, Martínez et al. 2011).

4.5 Evaluación de excreción de N y emisión de CH₄

El consumo diario de N encontrado en este estudio, así como su excreción por medio de la orina y las heces, fueron inferior a los valores reportados por Beltran et al. (2022) para zonas templadas. En dicho estudio el consumo de N reportado para ganado de carne en zonas templadas y la eficiencia en el uso de N variaron entre 173 y 328 g día^{-1} y entre $16,1$ y $26,8\%$, respectivamente, mientras que en el presente estudio los valores promedio en el consumo de N fueron $85,05 \text{ g día}^{-1}$ y la eficiencia en el uso de N alcanzó un 44.46% . Esas diferencias son esperadas, dado que las pasturas en zonas templadas tienden a tener un mayor contenido de N que las tropicales y los animales frecuentemente son suplementados con concentrados. La emisión promedio de $\text{CH}_4 \text{ kg animal}^{-1} \text{ ciclo}^{-1}$ para un ciclo de 10 meses reportadas en este estudio fueron de $63,15 \pm 4,33$, valor similar a lo reportado por Meo-Filho et al. (2022), y que equivale a una emisión de $4,7 \text{ t CO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$, considerando una carga animal de 3 UA ha^{-1} . La emisión anual de metano se encuentra dentro del rango de 32 y $83 \text{ kg animal}^{-1} \text{ año}^{-1}$ reportados por DeRamus et al. (2003). Esta emisión equivale a $4,7 \text{ t CO}_2 \text{ eq ha}^{-1}$, considerando una carga animal de 3 UA ha^{-1} .

4.6 Cambios de precio en la compra y venta y su efecto en la rentabilidad.

Con respecto a la evaluación de la fecha de inicio del ciclo de ceba, los resultados de GPD por animal obtenidos en los distintos meses oscilaron entre $0,660$ y $0,698 \text{ kg animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$, correspondientes a los meses de diciembre y abril, respectivamente, con una media general de $0,670 \text{ kg animal}^{-1} \text{ día}^{-1}$, sin embargo, cuando se analizó el efecto de la fecha de inicio de ceba sobre el margen bruto (MB), la variación fue mucho más amplia, con US\$ $445,19$

cuando la ceba empezó en marzo y US\$ 621,05 para el inicio en febrero, y la media general fue para los 12 meses del año fue de US\$ 543,59. Aplicando el modelo de León-Velarde et al. (2006) para estimar el impacto de los precios, la GP, así como sus interacciones, se obtuvo que las diferencias entre los meses de enero y febrero, el 20 y 17% era explicado por los cambios en precios de compra y venta de los animales, el 67 y 71% por la GP y el 14 y 12% por su interacción. En el resto de los meses, el impacto de los precios de compra y venta y la interacción GP x precio fueron negativos, excepto para las meses de noviembre y diciembre. Ello explica la disminución importante en el MB, aún en aquellos meses en que presentaron mayores GP.

Grajales Cedeño et al. (2021) muestran que distintos factores (época del año, edades, razas, pesos, etc.) e incluso las interacciones entre ellos tienen efectos variables sobre los precios de compra y venta en las subastas ganaderas en Panamá. En este sentido, los autores identificaron que los precios de los animales más bajos se presentan en los meses de enero y febrero cuando hay escasez de alimentos por la estación seca, lo que lleva a una mayor oferta de animales, para reducir la carga en las fincas. Estas condiciones aplican también a la variación de precios en Costa Rica, reportadas por CORFOGA (2022).

5. CONCLUSIONES

1. Life-Sim mostró ser una herramienta valiosa para la simulación de escenarios de alimentación debido a que posee una robusta capacidad de predicción del comportamiento del componente animal manejados bajo pastoreo en un sistema silvopastoril, pues el error de estimación fue de apenas 10,56%, y un valor promedio del error absoluto (MAE) de todas las observaciones de 0,056 kg.
2. Bajo las condiciones del estudio, la suplementación con melaza al 20% del consumo voluntario potencial permite lograr el máximo aprovechamiento de la PC contenida en los pastos, pero ello no resultó en mejoras en la eficiencia económica del sistema; por el contrario, esta se redujo con respecto a lo alcanzado sin suplementación.
3. Cuando se combinaron las variables carga animal y nivel de suplementación con melaza, el óptimo biológico se alcanzó con una carga de 2 UA ha⁻¹ y un nivel de melaza suplementaria equivalente al 43% del consumo potencial. Esto sugiere que la suplementación energética es atractiva desde el punto de vista biológico, pero no es rentable con los precios actuales de insumos y del ganado en pie. Por ello se recomienda que las evaluaciones biológicas deben ir siempre acompañadas de una evaluación financiera.
4. Dar inicio al ciclo de ceba en el mes de febrero, con la compra de novillos que pesan entre 251 y 300 kg, puede resultar en incrementos de 72, 49 y 31% en los indicadores VAN, TIR y B/C, respectivamente; cuando se compara con la práctica actual, de inicio de la ceba en diciembre. Esas diferencias se deben en un 17% a los precios, 71% a la GPD y 12% a la interacción entre estos.
5. En base a las características y manejo del sistema estudiado y los resultados obtenidos, podemos concluir que los SSP brindan condiciones apropiadas y sostenibles para generar

un ingreso por ha de \$ 1423, con aporte de N de 44,3 kg ha⁻¹ año⁻¹ y una emisión de CH₄ de 63,15 kg ciclo⁻¹, o sea (4,7 t CO₂ eq ha⁻¹).

REFERENCIAS

- Alonso, J. 2011. Los sistemas silvopastoriles y su contribución al medio ambiente. Revista Cubana de ciencia agrícola. (en línea). Revista Cubana de Ciencia Agrícola 45(2):7. Disponible en <https://www.redalyc.org/html/1930/193022245001/>.
- Araiza, R; Soto, A; Murillo Ortiz, M; Haubi Segura, Y. 2013. Degradabilidad ruminal in situ y digestibilidad in vitro de diferentes formulaciones de ensilados de maíz-manzana adicionados con melaza (en línea). Avances en Investigación Agropecuaria 17(2):79-96. Disponible en <http://www.ucol.mx/revaiia/portal/pdf/2013/mayo/7.pdf>.
- Bacab Pérez, HM; Solorio Sánchez, FJ. 2011. Oferta y consumo de forraje y producción de leche en ganado de doble propósito manejado en sistemas silvopastoriles en Tepalcatepec, Michoacán. Tropical and Subtropical Agroecosystems 13(3):271-278.
- Barahona Rosales, R; Sánchez Pinzón, S. 2005. Limitaciones físicas y químicas de la digestibilidad de pastos tropicales (en línea). Revista Corpoica 6(1):69-82. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5624715>.
- Beltran, IE; Calvache, I; Cofre, R; Salazar, F; Keim, JP; Morales, A; Pulido, RG; Alfaro, M. 2022. Nitrogen intake and its partition on urine , dung and products of dairy and beef cattle in Chile. Agronomy:1-17.
- Buitrago-Guillen, ME; Ospina-Daza, LA; Narváez-Solarte, W. 2018. Silvopastoral systems: An alternative in the mitigation and adaptation of bovine production to climate change. Boletín Científico del Centro de Museos 22(1):31-42. DOI: <https://doi.org/10.17151/bccm.2018.22.1.2>.
- Carrera, C; Muñoz, H; Solares, L. 1963. Melaza de caña como suplemento en el engorde de bovinos en zacate guinea (*Panicum máximum*) (en línea). Técnica Pecuaria (7):34-38. Disponible en <file:///C:/Users/HP/Downloads/2053-6720-1-PB.pdf>.
- Castellaro G., G; Klee G., G; Chavarría R., J. 2007. Un modelo de simulación de sistemas de engorda de bovinos a pastoreo. Agricultura Técnica 67(2):163-172. DOI: <https://doi.org/10.4067/s0365-28072007000200006>.
- CORFOGA. 2022. Precio promedio de ventas de bovinos comercializados en las subastas ganaderas pertenecientes a la Federación de Subastas Ganaderas, 2007-2022. (en línea,

- sitio web). Consultado 1 ago. 2022. Disponible en <https://www.corfoga.org/download/precios-subasta-julio-2022/>.
- Cuadrado C., H; Torregroza S., L; Jiménez M., N. 2004. Comparación bajo pastoreo con bovinos machos de ceba de cuatro especies de gramíneas del género *Brachiaria*. *Revista Medicina Veterinaria y Zootecnista Córdoba* 9:7.
- DeRamus, HA; Clement, TC; Giampola, DD; Dickison, PC. 2003. Methane Emissions of Beef Cattle on Forages. *Journal of Environmental Quality* 32(1):269-277. DOI: <https://doi.org/10.2134/jeq2003.2690>.
- Díaz-Romeu, R; Hunter, A. 1978. Metodologías de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigaciones en invernadero. Turrialba, CR, CATIE. 68 p. s.l., s.e.
- Dong, H; Mangino, J; McAllister, TA; Hatfield, JL; Johnson, DE; Lassey, KR; Aparecida de Lima, M; Romanovskaya, A. 2006. Capítulo 10: Emisiones resultantes de la gestión del ganado y del estiércol. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories :Pp. 10-91.
- Figueroa Preciado, G. 2003. Optimización de una superficie de respuesta utilizando JMP IN. *Mosaicos Matemáticos* 11:17-23.
- Grajales Cedeño, JK; Bethancourt García, JA; Corrales, G; Sánchez-Galán, EA; Vargas, R; Quintero Chanis, ER; Gallardo, J; Geider, JC. 2021. Factores que intervienen en la variación del precio de comercialización de bovinos en subastas ganaderas de Panamá (2016 – 2020). *Zootecnia Tropical* 39(October). DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.5545844>.
- Ibrahim, M; Villanueva, C; Casasola, F. 2007. Sistemas silvopastoriles como una herramienta para el mejoramiento de la productividad y rehabilitación ecológica de paisajes ganaderos en Centro América. *Archivos Latinoamericanos de Produccion Animal*. 15 73-87.
- Iglesias, JM; Simón, L; Lamela, L; Hernández, D; Hernández, I; Milera, M; Castillo, E; Sánchez, T. 2006. Sistemas agroforestales en Cuba: algunos aspectos de la producción animal. *Pastos y Forrajes* 29:217.
- Iglesias, JM; Simónt, L; Martín, GJ. 2017. Sistemas silvopastoriles en el contexto cubano. 12(1):75-82.
- Ku Vera, JC; Briceño, EG; Ruiz, A; Mayo, R; Ayala, AJ; Aguilar, CF; Solorio, FJ; Ramírez,

- L. 2014. Manipulación del metabolismo energético de los rumiantes en los trópicos: opciones para mejorar la producción y la calidad de la carne y leche. (en línea). Revista Cubana de Ciencia Agrícola 48(1):43-53. Disponible en <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=fua&AN=97286503&lang=es&site=ehost-live>.
- Ministerio de Agricultura República Dominicana; IICA (Instituto Interamericano De Cooperación Para La Agricultura); USDA (United States Department of Agriculture); MEPyD (Ministerio de Economía, Planificación y Desarrollo, República Dominicana). 2016. Establecimiento y uso de sistemas silvopastoriles en República Dominicana. Santo Domingo, República Dominicana.
- Lauric, A; Torres Carbonell, C; De Leo, G. (2018). Utilización de suplementación líquida (melaza) para el ganado bovino en el sudoeste de la provincia de Buenos Aires, Argentina. Relevamiento de casos reales. Buenos Aires, Argentina, INTA. Informe Técnico (en línea). Buenos Aires, s.e. Disponible en <http://hdl.handle.net/20.500.12123/9780>.
- León-Velarde, C; Quiroz, RA. 1998. Selecting optimum ranges of technological alternatives by using response surface designs in systems analysis. CIP Program Report 1998 pp. 387-394.
- León-Velarde, C; Quiroz, RA; Cañas, R; Osorio, J; Guerrero, J; Pezo, D. 2006. LIFE - SIM: Livestock Feeding Strategies Simulation Models. s.l., s.e. 38 p.
- López, O; Sánchez, T; Iglesias, M; Lamela, L; Soca, M; Arece, J; De La Caridad, M. 2017. Silvopastoral systems as alternative for sustainable animal production in the current context of tropical livestock production. (en línea). Pastos y Forrajes 40(2):83-95. Disponible en <http://scielo.sld.cu/pdf/pyf/v40n2/pyf01217.pdf> http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-03942017000200001&lng=es&nrm=iso.
- Maquivar-Linfoot, MG; Galina-Hidalgo, CS; Mendoza-Martínez, GD; Verduzco-Gómez, AR; Galindo-Badilla, JR; Molina-Sanchez, R; Estrada-Konig, S. 2006. Prediction of the daily weight gain by the use of the NRC model in supplemented heifers in the humid tropics of Costa Rica. Revista Científica de la Facultad de Ciencias Veterinarias de la Universidad del Zulia 16(6):634-641.
- Martínez, BC; Rosado, OR; López, FG; Hernández, PP; Becerra, AM; Villamil, LV. 2011.

- Aplicación de modelos de simulación en el estudio y planificación de la agricultura, una revisión. *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 14(3):999-1010.
- Meo-Filho, P; Berndt, A; Pezzopane, JRM; Pedroso, AF; Bernardi, ACC; Rodrigues, PHM; Bueno, ICS; Corte, RR; Oliveira, PPA. 2022. Can Intensified Pasture Systems Reduce Enteric Methane Emissions from Beef Cattle in the Atlantic Forest Biome? *Agronomy* 12(11):2738. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12112738>.
- Miranda, T; Machado, R; Machado, H; Brunet, J; Duquesne, P. 2008. Valoración económica de bienes y servicios ambientales en dos ecosistemas de uso ganadero. *Zootecnia Tropical* 26(3):187-189.
- Orden, EA; Pezo, DA; Leon Velarde, CU; Domingo, SN; Villar, EC. 2004. Predicting body weight changes of beef cattle in. *Philippine J. Vet. Anim. Sci* 30(1):185-197.
- Pérez, E; Soca, M; Díaz, L; Corzo, M. 2008. Comportamiento etológico de bovinos en sistemas silvopastoriles en Chiapas, México. *Pastos y Forrajes* 31:171.
- Pezo, D. 2017. Tecnologías forrajeras para la intensificación de la ganadería en el contexto del cambio climático (en línea). *Revista UTN* 78(April):18-25. Disponible en <https://www.fontagro.org/wp-content/uploads/2018/03/REVISTA-78-ARTÍCULO-DANILO-PEZO.-Tecnologías-forrajeras-para-la-intensificación-de-la-ganadería.pdf>.
- Pezo, D; Ibrahim, M. (1998). *Sistemas silvopastoriles: Módulo de Enseñanza Agroforestal No. 2* (en línea). s.l., s.e. Disponible en http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/4024/Sistemas_silvopastoriles.pdf;jsessionid=DDC42CBA38E04A49841DC3598AD962C0?sequence=1.
- Pezo, DA; Cardona, J. (2021). *Best Practices for Increasing Resilience in Belizean Livestock Farms: Some Lessons Learnt. Special Report # 2*. CATIE and Belize Livestock Producers Association. Turrialba, s.e.
- Quiroz, R; Loayza, H; Barreda, C; Gavilán, C; Posadas, A; Ramírez, DA. 2017. Linking process-based potato models with light reflectance data: Does model complexity enhance yield prediction accuracy? (en línea). *European Journal of Agronomy* 82:104-112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.10.008>.
- Russo, RO. 2018. Reflexiones sobre los sistemas silvopastoriles. *Pastos y Forrajes* 38(2):157-161.
- Sánchez, J. 2007. Utilización eficiente de las pasturas tropicales en la alimentación de ganado

- lechero. *In* Revista Facultad Nacional de Agronomía. s.l., s.e. p. 383-435.
- Silveira da Fontoura Junior, JA; De Melo Menezes, L; Nunes Corrêa, M; Laurino Dionello, NJ. 2007. Utilização de modelos de simulação em sistemas de produção de bovinos de corte. *Veterinária e Zootecnia* 14(1):19-30.
- Soca, P; Cabrera, MR; Bruni, M. 2007. Nivel de suplementación energética, ganancia de peso vivo y conducta de vacunos en crecimiento bajo pastoreo de campo natural Energy supplementation level , live weight gain and behaviour of growing beef cattle grazing native pasture. *Agrociencia* XI:1-10.
- Steinfeld, H; Gerber, P; Wassenaar, T; Castel, V; Rosales, M; de Haan, C. 2006. *Livestock's Long Shadow*". s.l., s.e.
- Tohill, JC; Hargreaves, JNG; Jones, RM. 1978. Botanal- A comprehensive sampling and computing procedure for estimating pasture yield and composition. *Tropical Agronomy Technical Memorandum* 8:26.
- Villalobos, L; Arce, J. 2014. Evaluación agronómica y nutricional del pasto estrella africana (*Cynodon nlemfuensis*) En la zona de Monteverde, Puntarenas, Costa Rica. II. Valor nutricional. (en línea). *Agronomía Costarricense* 38(1):133-145. Disponible en http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0377-94242014000100008&lng=en&nrm=iso&tlng=es.
- Willmott, CJ. 1982. Some comments on the evaluation of model performance. *Bulletin - American Meteorological Society* 63(11):1309-1313. DOI: [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1982\)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1982)063<1309:SCOTEO>2.0.CO;2).
- Zepner, L; Karrasch, P; Wiemann, F; Bernard, L. 2020. *ClimateCharts.net* – an interactive climate analysis web platform. (en línea). Consultado 21 nov. 2022. DOI: <https://doi.org/https://doi.org/10.1080/17538947.2020.1829112>.

ANEXOS

Anexo 1. Información y resultados de la validación del modelo.

Número de animal	Ciclo	Peso inicial (Pi)	Peso final (Pf)	Ganancia de peso (GP)	Ciclo ceba, días	Ganancia de peso observada (kg)	Ganancia de peso simulada (kg)	Diferencias	Cuadrado de las diferencias	Raza	Factor energético	Ingesta potencial	VAD
9	3	220	431	211	385	0,548	0,577	-0,03	0,00	Cross breed 1/2-3/4	31	3	0,029
11	1	271	449	178	291	0,612	0,693	-0,08	0,01	Cross breed 1/2-3/4	31	3	0,081
12	1	227	407	180	291	0,619	0,560	0,06	0,00	Cross breed 1/2-3/4	31	3	0,059
14	3	247	470	223	350	0,637	0,677	-0,04	0,00	Cross breed 1/2-3/4	31	3	0,040
15	3	266	460	194	304	0,638	0,672	-0,03	0,00	Cross breed 1/2-3/4	31	3	0,034
17	3	303	528	225	342	0,658	0,579	0,08	0,01	Cross breed 1/2-3/4	31	3	0,079
18	2	259	440	181	255	0,710	0,637	0,07	0,01	Cross breed 1/2-3/4	31	3	0,073
19	2	300	489	189	255	0,741	0,774	-0,03	0,00	Cross breed 1/2-3/4	31	3	0,033
20	2	289	487	198	255	0,776	0,773	0,00	0,00	Cross breed 1/2-3/4	31	3	0,003
21	2	282	487	205	255	0,804	0,717	0,09	0,01	Cross breed 1/2-3/4	31	3	0,087
22	2	263	471	208	255	0,816	0,841	-0,03	0,00	Cross breed 3/4-7/8	35	3	0,025
23	2	280	488	208	255	0,816	0,889	-0,07	0,01	Cross breed 3/4-7/8	35	3	0,073
24	3	313	574	261	319	0,818	0,957	-0,14	0,02	Cross breed 3/4-7/8	35	3	0,139
25	2	284	512	228	255	0,894	0,957	-0,06	0,00	Cross breed 3/4-7/8	35	3	0,063
1	3	230	413	183	407	0,450	0,445	0,00	0,00	Native	24	3	0,005
2	1	292	433	141	291	0,485	0,558	-0,07	0,01	Native	24	3	0,073
3	1	272	414	142	291	0,488	0,510	-0,02	0,00	Native	24	3	0,022
4	3	237	453	216	432	0,500	0,462	0,04	0,00	Native	24	3	0,038
5	3	270	472	202	398	0,508	0,539	-0,03	0,00	Native	24	3	0,031
6	3	233	442	209	407	0,514	0,685	-0,17	0,03	Native	24	3	0,171
7	1	309	460	151	291	0,519	0,590	-0,07	0,01	Native	24	3	0,071
8	1	297	452	155	291	0,533	0,562	-0,03	0,00	Native	24	3	0,029
10	1	277	442	165	291	0,567	0,520	0,05	0,00	Native	24	3	0,047
13	1	310	492	182	291	0,625	0,599	0,03	0,00	Native	24	3	0,026
16	3	302	518	216	329	0,657	0,596	0,06	0,00	Native	24	3	0,061
Promedio		273	467	194		0,637	0,655	0	0,11				0,018
Total		6833	11684	4851					0,07				1,393
								RMSE	10,56			MAE, Kg	0,056

Anexo 2. Cálculos de aplicación de melaza por tratamiento.

Contenido de MS/Kg de m	0,735			
	Trat-10%	Trat-20%	Trat-30%	Trat-40%
Peso inicial	266	266	266	220
Cons. Potencial (Kg,MS)	7,98	7,98	7,98	6,6
Melaza (Kg,MS)	0,8	1,6	2,4	2,6
Mes 1	1,1	2,2	3,3	3,6
Mes 2	1,2	2,4	3,6	4,0
Mes 3	1,3	2,6	3,9	4,3
Mes 4	1,4	2,8	4,2	4,7
Mes 5	1,5	3,0	4,6	5,0
Mes 6	1,6	3,3	4,9	5,4
Mes 7	1,7	3,5	5,2	5,7
Mes 8	1,8	3,7	5,5	6,1
Mes 9	2,0	3,9	5,9	6,5
Mes 10	2,1	4,1	6,2	6,8
Mes 11	2,2	4,3	6,5	7,2
Mes 12	2,3	4,6	6,8	7,5

Anexo 3. Precios por kg de PV de compra y venta de bovinos CORFOGA año 2021.

Compra		Venta		Diferencia
Mes	Precio	Mes	Precio	Precio
Ene	1.91	Nov	2.31	0.40
Feb	1.95	Dic	2.29	0.34
Mar	2.02	Ene	1.89	-0.13
Abr	2.05	Feb	1.93	-0.12
May	2.24	Mar	1.97	-0.27
Jun	2.3	Abr	2.04	-0.26
Jul	2.2	May	2.17	-0.03
Ago	2.23	Jun	2.2	-0.03
Sep	2.26	Jul	2.15	-0.11
Oct	2.27	Ago	2.23	-0.04
Nov	2.02	Sep	2.25	0.23
Dic	2.2	Oct	2.31	0.11

Anexo 4. Factores que inciden en el margen bruto (pesos, precios y su interacción)

Mes			Mes			Mes			Mes		
Enero	Valor (\$)	Porcentaje (%)	Abril	Valor (\$)	Porcentaje (%)	Julio	Valor (\$)	Porcentaje (%)	Octubre	Valor (\$)	Porcentaje (%)
Precio	88,00	0,2	Precio	-26,40	-0,09	Precio	-6,60	-0,02	Precio	-8,80	-0,03
Peso	300	0,67	Peso	342,35	1,16	Peso	340,65	1,03	Peso	353,67	1,04
Interacción	62,83	0,14	Interacción	-20,04	-20,04	Interacción	-4,65	-0,01	Interacción	-6,23	-0,02
Febrero	Valor (\$)	Porcentaje (%)	Mayo	Valor (\$)	Porcentaje (%)	Agosto	Valor (\$)	Porcentaje (%)	Noviembre	Valor (\$)	Porcentaje (%)
Precio	74,80	0,17	Precio	-59,40	-0,23	Precio	-6,6	-0,02	Precio	50,6	0,13
Peso	317,34	0,71	Peso	363,58	1,4	Peso	345,3	1,03	Peso	311,32	0,78
Interacción	55,33	0,12	Interacción	-43,82	-0,17	Interacción	-4,65	-0,01	Interacción	35,45	0,09
Marzo	Valor (\$)	Porcentaje (%)	Junio	Valor (\$)	Porcentaje (%)	Septiembre	Valor (\$)	Porcentaje (%)	Diciembre	Valor (\$)	Porcentaje (%)
Precio	-28,60	-0,10	Precio	-57,20	-0,22	Precio	-24,20	-0,08	Precio	24,20	0,06
Peso	337,14	1,18	Peso	356,33	1,38	Peso	346,66	1,13	Peso	333,22	0,89
Interacción	-21,70	-0,08	Interacción	-40,28	-0,16	Interacción	-16,87	-0,06	Interacción	16,66	0,04

Anexo 5. Análisis financiero de línea base y datos simulados.

Cuadro A. Análisis financiero situación observada (Lb).

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12
GASTOS	\$ 11 250,81	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15
Cerca eléctrica	\$ 1 645,76												
Cerca tradicional (puas)	\$ 6 850,92												
Mano de obra		\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38
Pasturas	\$2 754,13	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78
Insumos-animal		\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78
Compra de 10 animales		\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20
INGRESOS													
Venta de animales		\$10 997,91	\$10 997,91	\$10 997,91	\$10 997,91	\$10 997,91	\$10 997,91	\$10 997,91	\$10 997,91	\$10 997,91	\$10 997,91	\$10 997,91	\$10 997,91
Beneficios netos	-\$11 250,81	\$4 269,76	\$4 269,76	\$4 269,76	\$4 269,76	\$4 269,76	\$4 269,76	\$4 269,76	\$4 269,76	\$4 269,76	\$4 269,76	\$4 269,76	\$4 269,76
Flujo de caja	-\$11 250,81	-\$6 981,05	-\$2 711,28	\$1 558,48	\$5 828,25	\$10 098,01	\$14 367,78	\$18 637,54	\$22 907,30	\$27 177,07	\$31 446,83	\$35 716,60	\$39 986,36

Cuadro B. Análisis financiero situación simulada, iniciando ciclo mes de diciembre.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12
GASTOS	\$ 11 250,81	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15	\$ 6 728,15
Cerca eléctrica	\$ 1 645,76												
Cerca tradicional (puas)	\$ 6 850,92												
Mano de obra		\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38
Pasturas	\$2 754,13	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78
Insumos-animal		\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78
Compra de 10 animales		\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20	\$5 766,20
INGRESOS													
Venta de animales		\$11 062,59	\$11 062,59	\$11 062,59	\$11 062,59	\$11 062,59	\$11 062,59	\$11 062,59	\$11 062,59	\$11 062,59	\$11 062,59	\$11 062,59	\$11 062,59
Beneficios netos	-\$11 250,81	\$4 334,44	\$4 334,44	\$4 334,44	\$4 334,44	\$4 334,44	\$4 334,44	\$4 334,44	\$4 334,44	\$4 334,44	\$4 334,44	\$4 334,44	\$4 334,44
Flujo de caja	-\$11 250,81	-\$6 916,37	-\$2 581,92	\$1 752,52	\$6 086,97	\$10 421,41	\$14 755,86	\$19 090,30	\$23 424,74	\$27 759,19	\$32 093,63	\$36 428,08	\$40 762,52

Cuadro C. Análisis financiero situación simulada, iniciando ciclo mes de febrero.

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5	Año 6	Año 7	Año 8	Año 9	Año 10	Año 11	Año 12
GASTOS	\$ 11 250,81	\$ 5 134,95	\$ 5 134,95	\$ 5 134,95	\$ 5 134,95	\$ 5 134,95	\$ 5 134,95	\$ 5 134,95	\$ 5 134,95	\$ 5 134,95	\$ 5 134,95	\$ 5 134,95	\$ 5 134,95
Cerca eléctrica	\$ 1 645,76												
Cerca tradicional (puas)	\$ 6 850,92												
Mano de obra		\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38	\$413,38
Pasturas	\$2 754,13	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78	\$435,78
Insumos-animal		\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78	\$112,78
Compra de 10 animales		\$4 173,00	\$4 173,00	\$4 173,00	\$4 173,00	\$4 173,00	\$4 173,00	\$4 173,00	\$4 173,00	\$4 173,00	\$4 173,00	\$4 173,00	\$4 173,00
INGRESOS													
Venta de animales		\$10 902,69	\$10 902,69	\$10 902,69	\$10 902,69	\$10 902,69	\$10 902,69	\$10 902,69	\$10 902,69	\$10 902,69	\$10 902,69	\$10 902,69	\$10 902,69
Beneficios netos	-\$11 250,81	\$5 767,74	\$5 767,74	\$5 767,74	\$5 767,74	\$5 767,74	\$5 767,74	\$5 767,74	\$5 767,74	\$5 767,74	\$5 767,74	\$5 767,74	\$5 767,74
Flujo de caja	-\$11 250,81	-\$5 483,07	\$284,68	\$6 052,42	\$11 820,17	\$17 587,91	\$23 355,66	\$29 123,40	\$34 891,14	\$40 658,89	\$46 426,63	\$52 194,38	\$57 962,12