

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5111

Modelo matemático de optimización alimenticia para la eficiencia productiva del ganado vacuno en el Ecuador

Bryan Welington Gonzabay Chiriguay

bryangonzabay380@gmail.com

<https://orcid.org/0009-0003-2430-7568>

RESUMEN

En este trabajo de investigación fue posible optimizar los recursos destinados a la alimentación del ganado en producción de leche de la ganadería NICVANA, mediante un modelo de programación lineal que fue implementado en Solver Excel 2010 que ayudó al administrador de la ganadería en la toma de decisiones a nivel nutricional, se compararon dos escenarios, constituidos, por el sistema optimizado y no optimizado, los datos de salida que proporcionó el modelo garantizó una alimentación diaria en la que se cubrieron los requerimientos mínimos de consumo de materia seca, y de energía, además, optimizó los costos por alimentación, obteniéndose un ahorro significativo, que incrementó la rentabilidad del negocio, de esta manera se demostró que el negocio estaba experimentando pérdidas a causa de una práctica no sistemática en el manejo de los recursos de la empresa destinados a la nutrición de los animales.

Palabras clave: optimización; recursos; costos; nutrición.

Correspondencia: bryangonzabay380@gmail.com

Artículo recibido 25 enero 2023 Aceptado para publicación: 25 febrero 2023

Conflictos de Interés: Ninguna que declarar

Todo el contenido de **Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar**, publicados en este sitio están disponibles bajo

Licencia [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



Cómo citar: Gonzabay Chiriguay, B. W. (2023). Modelo matemático de optimización alimenticia para la eficiencia productiva del ganado vacuno en el Ecuador. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 7(1), 9162-9177. https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v7i1.5111

Mathematical model of food optimization for the productive efficiency of cattle in Ecuador

ABSTRACT

In this research work it was possible to optimize the resources destined to feed livestock in milk production of NICVANA livestock, using a linear programming model that was implemented in Solver Excel 2010 that helped the livestock manager in decision-making at the nutritional level, two scenarios were compared, consisting of optimized and not optimized system, the output data provided by the model guaranteed a daily feed in which the minimum requirements of dry matter consumption were covered, and energy, in addition, optimised feed costs, resulting in significant savings, which increased the profitability of the business, in this way it was shown that the business was experiencing losses due to an unsystematic practice in the management of the company's resources for animal nutrition.

Keywords: *optimization; resources; costs; nutrition.*

INTRODUCCIÓN

La alimentación de los animales de carne y leche ha dejado de ser la aplicación de una serie de habilidades artesanales. En la actualidad la misma está basada en principios fisiológicos y nutricionales. Estos principios son los mismos para un sistema pastoril que para un sistema de producción con animales estabulados, consumiendo alimentos concentrados o raciones total o parcialmente mezcladas. La diferencia radica en el plano nutricional que puede ser alcanzado con un sistema u otro, y en el efecto sobre los productos finales de la digestión que se logran en cada uno de estos. (Santini, 2014, p.5)

Un elemento clave dentro de los sistemas de producción con rumiantes es la nutrición, ya que el potencial productivo de un animal sólo puede expresarse en la medida que sus necesidades de mantenimiento estén cubiertas y quede un excedente disponible para ser transformado en producto. En condiciones tropicales la base de estos sistemas de alimentación, son las pasturas naturales o cultivadas. Además, se cuenta con una biodiversidad de plantas que normalmente son consumidas por los animales en los potreros o al incursionar en terrenos con vegetación natural. Las posibilidades de usar subproductos de cultivos tropicales y del procesamiento de cereales y oleaginosas, son parte de una larga lista de materiales con gran potencial. Sin embargo, la eficiencia de su utilización está sujeta al conocimiento de sus características nutricionales, siendo los principales parámetros de evaluación, el contenido de nutrientes, el consumo y la digestibilidad del material. (Lachmann, 1999, p.1)

Entre los bovinos la vaca, especializada en producción de leche, es muy eficiente en convertir la fibra, el nitrógeno y la energía de su dieta en leche, para lograr una eficiencia, se requiere de la adecuada aplicación de las diferentes prácticas de manejo, entre las que destaca una buena alimentación que le permitan al productor una correcta recuperación del capital (Escabosa, 2022, p.1)

Los costos de producción afectan negativamente la rentabilidad de la operación, estos varían en función del nivel tecnológico aplicado en la granja, la disponibilidad de mano de obra, agua, forraje para el ganado, la genética animal, entre otros (Polanco, et al., 2021)

Al momento el pequeño productor, sin disponer de los elementos mencionados, no considera su sistema de producción como una actividad económica tal como lo cataloga una pequeña, mediana o gran empresa y por tal motivo no aplica la contabilidad cuyo objetivo es registrar sistemáticamente todos los rubros de egresos e ingresos que se

generen diariamente y que al final de un período, sea semanal, mensual, semestral o anual, considere su ganancia o pérdida en el negocio y realice los ajustes financieros necesarios cuando así lo requiera (Polanco, et al., 2021).

En este trabajo de investigación se ha propuesto optimizar la alimentación de los animales en la ganadería NICVANA, con el objetivo de reducir los costos de producción y mantenimiento de la granja, logrando de esta manera un incremento en los beneficios del productor, para tal efecto se ha propuesto un modelo matemático de programación lineal, que se encargará de tomar decisiones basadas en un conjunto de restricciones, que tomarán en cuenta los requerimientos nutricionales, el consumo y la digestibilidad de los animales para cumplir con los objetivos propuestos.

DESARROLLO

La nutrición está ligada a la disponibilidad en cantidad y calidad del alimento a través del año, y por lo general en ambientes áridos y semiáridos las condiciones climáticas rigurosas traen aparejadas diferencias también importantes en la calidad y cantidad de forraje a través del año (Veneciano, 2020, p.4).

Esto es de fundamental importancia en los sistemas pastoriles de zonas templadas, donde las dietas suelen presentar desbalances energía/proteína y bajos contenidos de materia seca (MS). Es necesario tener en cuenta que existen diferencias importantes en la dinámica de la digestión cuando se comparan distintos alimentos como el ensilaje de grano húmedo, ensilaje de maíz o sorgo de planta entera, ensilajes de otras gramíneas y leguminosas o heno (Santini, 2014, p.5).

Por otro lado, es importante conocer que el aparato digestivo de los rumiantes, está compuesto por un complejo estómago, compuesto por cuatro compartimientos que alberga una gran cantidad de microorganismos, (bacterias, protozoos y hongos), ubicados mayoritariamente en el rumen, haciendo posible la digestión de forrajes al estado fresco o conservados para cubrir sus requerimientos nutricionales (Lanuza, 2012, p.1).

Valoración nutritiva del alimento

La valoración nutritiva es un factor importante, “para conocer el aporte de energía y nutrientes utilizables por los animales, de acuerdo con la especie, y poder calcular raciones.” (Marín, 2022, p.4).

El valor nutritivo de los alimentos está determinado por la composición química, definida como la proporción de cada fracción (carbohidratos, lípidos, compuestos nitrogenados, cenizas) en las materias primas y la composición particular de cada una de las fracciones (p. ej. almidón, FDN, aminoácidos, minerales utilizables), que determina el valor nutritivo para cada especie, en función de su edad y estado productivo. La valoración nutritiva comprende: Digestibilidad, valoración energética, valoración proteica y la valoración de otros componentes del alimento. (Marín, 2022, p.6).

La digestibilidad de un alimento indica la cantidad de un alimento completo o de un nutriente particular del alimento, que no se excreta en las heces y que, por consiguiente, se considera que es utilizable por el animal tras la absorción en el tracto digestivo (Marín, 2022, p.7).

La digestibilidad se puede estimar para alimentos o nutrientes se puede estimar con el porcentaje de alimento utilizable por el animal como:

$$(\text{Alimento ingerido} - \text{Heces}) * 100 / (\text{Alimento ingerido} - \text{heces})$$

$$(\text{Nutriente en alimento ingerido} - \text{Nutriente en heces}) * 100 / (\text{Nutriente en alimento ingerido})$$

Digestibilidad por diferencia: en rumiantes, la determinación de la digestibilidad de las materias primas no forrajeras requiere conocer la digestibilidad del forraje utilizado como ración basal. Luego se determina la digestibilidad conjunta del forraje y la materia prima problema. La digestibilidad de la materia prima investigada se calcula como la diferencia entre la digestibilidad de la ración completa y la del forraje base (Marín, 2022, p.10).

Medición del consumo

Las técnicas desarrolladas y actualmente utilizadas para medir el consumo de forraje por animales en pastoreo varían desde mediciones en la pastura en las cuales se estima el consumo de grupos de animales hasta el uso de marcadores para estimar el consumo en animales individuales. Las técnicas utilizadas con animales en pastoreo generalmente dependen de los recursos disponibles y los objetivos del experimento, por ej., mediciones en fincas vs. mediciones en trabajos de experimentación. ***Estas técnicas se dividen en tres grupos principales (Hammeleers, 2022, p.1)***

- Basadas en el consumo de forraje, el consumo se calcula por diferencia entre el forraje disponible antes de la introducción de los animales y el residual después que estos salen de la pastura.

- Basadas en la producción del animal, la medición del consumo, tiene en cuenta los requerimientos del animal.
- Basadas en el consumo individual por el animal, tienen en cuenta la cantidad de forraje disponible y su digestibilidad y la estimación de la excreta fecal.

La técnica seleccionada depende de la disponibilidad de recursos y el objetivo del experimento, e incluye mediciones de la productividad total de la pastura o del consumo individual de los animales.

Requerimientos Nutricionales

Consumo de Materia Seca

El consumo de materia seca MSI es de fundamental importancia en nutrición porque establece la cantidad de nutrientes disponibles para un animal para la salud y la producción. El MSI, real o estimado con precisión es importante para la formulación de las dietas para prevenir la subalimentación o la sobrealimentación de nutrientes y promover el uso eficiente de los nutrientes, La subalimentación de nutrientes restringe la producción y puede afectar la salud de un animal; la sobrealimentación de nutrientes aumenta los costos de alimentación, puede resultar en una excreción excesiva de nutrientes en el medio ambiente, y en cantidades excesivamente altas puede ser tóxico o causar efectos adversos para la salud (NCR, 2001) (NCR, 2001, p.28).

La ventaja que tiene considerar el valor del alimento a base de materia es que los nutrientes que se encuentran en la materia seca, pueden ser comparados de forma absoluta y permite medir a todos los alimentos en un mismo patrón, lo que facilita la tarea al decidir la adquisición de una determinada materia prima o evaluar la dieta que se esté administrando al ganado (Escabosa, 2022, p.4).

Ecuación para predecir el MS

El NCR 2001, propone la siguiente ecuación para estimar el consumo de materia seca en vacas lactantes.

$$MSI \left(\frac{kg}{d} \right) = (0,372 * FCM\ 4\% + 0,0968 * PV^{0.75}) * (1 - e^{(-0.192*(SL+3.67))})$$

Donde FCM 4 %: leche corregida al 4 % de grasa (Kg/día), PV: representa el peso vivo de la vaca en (Kg), SL representa la semana de lactación.

El término $(1 - e^{(-0.192 * (SL + 3.67))})$ corrige la disminución de MS al principio de la lactación. Es muy sensible a la SL, especialmente durante las diez primeras semanas, las diferencias en MS entre la primera y la segunda o lactaciones posteriores son tenidas en

cuenta a través del PV y de la FCM 4%, una diferencia de 100 kg en PV supone un cambio de la MSI de 1,5 kg/día. Es importante introducir valores precisos de la FCM 4%, PV y SL del grupo de vacas que está siendo valorado. (p.29)

Energía

Los valores energéticos de alimentos y dietas y las necesidades energéticas (mantenimiento, lactación, actividad física, gestación y crecimiento) se expresan en unidades de energía neta de lactación (EN_L). Los valores de EN_L de un alimento se obtienen determinando en primer lugar su contenido en energía digestible a partir de la composición química (Linn, 2001, p.5).

Según el NCR -2001, el método para obtener los valores de EN_L de los alimentos incluye: Estimar la energía digestible de un ingrediente a partir de su composición química.

Calcular un factor de corrección basado en la MS y el contenido total de nutriente digestible (TDN) de la dieta a nivel de mantenimiento TDN_{1x} .

Convertir los valores de energía digestible corregida en energía metabolizable (EM) y finalmente a EN_L .

El contenido en nutrientes digestibles en un alimento se calcula a partir de su composición química, a continuación, se multiplica por el calor de combustión del componente y finalmente se calcula aditivamente la energía digestible del alimento a nivel de mantenimiento, con las siguientes ecuaciones (Linn, 2001, p.5).

$$DE \left(\frac{Mcal}{Kg} \right) = 0.04409 * TDN(\%)$$

$$EM \left(\frac{Mcal}{Kg} \right) = 1.01 * DE \left(\frac{Mcal}{Kg} \right) - 0.45$$

$$EN_L \left(\frac{Mcal}{Kg} \right) = 0.0245 * TDN(\%) - 0.12$$

Requerimientos proteicos

Anteriormente el Nutrient Requirements of Dairy Cattle (NRC) 2001, trataba los requerimientos proteicos en términos de cantidad de proteína cruda necesitada por día o como porcentaje en la dieta de materia seca. Se ha reconocido que el sistema de proteína cruda ha fallado en el cálculo de proteína (NCR, 2001) disponible en la ración y los requerimientos del animal. Por ejemplo, con el sistema de proteína cruda se asume que proteína de nitrógeno no-proteico, como urea, es igual a la proteína proveniente del

recurso natural, como podría ser Alimento con soja o semilla de algodón. Esto no es verdad, investigaciones han demostrado que los microorganismos del rumen necesitan nitrógeno para la síntesis de proteínas microbiana. Ahora el animal tiene necesidades proteicas para el mantenimiento del tracto digestivo, sistema nervioso, estructura muscular, etc. Antes la proteína cruda abarcaba todo como una sola necesidad de proteína cruda para todo el animal (Pritchard, 2022, p.1)

La proteína metabolizable (PM) se define como la proteína verdadera digerida en el intestino a aminoácidos y posteriormente absorbida, las necesidades proteicas de los animales se expresan en unidades de PM, las principales fuentes de PM, son la proteína indegradable del alimento en el rumen (PIR), la proteína bruta microbiana (PBM) y fuentes de proteína endógena (Linn, 2001, p.9).

Las necesidades de proteína de los animales se expresan en unidades de proteína metabolizable (PM) y se determinan de forma factorial como la suma de las necesidades de mantenimiento, lactación, gestación y crecimiento. Las necesidades de PM de mantenimiento incluyen excreciones urinarias, proteína metabólica fecal, proteína endógena, crecimiento del peso y descamación de la piel (Linn, 2001, p.9).

Le ecuación para estimar la proteína metabolizable de mantenimiento está dada por la siguiente relación.

$$PM_{mant}(g/d) = (0.3 ** (PV - PF)^{0.6} + 4.1 ** (PV - PF)^{0.5} + \left[(MSI * 0.30) - 0.5 * \left(\frac{PBM}{0.8} - PBM \right) \right] + \left[\frac{0.4 * (11.8 * MSI)}{0.67} \right]$$

Donde, PMmat: proteína metabolizable de mantenimiento, PV (Kg): peso vivo y PF (Kg): peso del feto.

Las necesidades de PM para el crecimiento se calculan en función de la ganancia del peso vivo y de su concentración energética. Se utilizan dos ecuaciones dependiendo del peso vivo vacío (PVV).

$$PVV \leq 478 \text{ kg: } GP \times (268 - (29.4 \times (ER/VC))) / [83.4 - (0.114 \times PVV)] / 100$$

$$PVV > 478 \text{ kg: } GP \times (268 - (29.4 \times (ER/VC))) / 0.28908$$

Donde, GP: ganancia de peso, ER: energía retenida y VC: ganancia diaria de peso.

La diferencia entre las dos ecuaciones es el denominador, cuando el PVV es menor de 478 kg, la eficacia de PM para crecimiento es variable, mientras que por encima de 478 kg se supone que la eficacia es constante e igual a 28,9%.

Las necesidades de PM para gestación se consideran sólo a partir de los 190 días. La ecuación de cálculo es: $[(0.69/\text{día de gestación}) - 69.2] * (\text{peso del ternero al nacimiento}/45)] / 0.33$. La eficacia de conversión de proteína metabolizable a proteína del feto se asume igual al 33% (NCR, 2001)

Minerales

Una serie de elementos inorgánicos son esenciales para el normal crecimiento y reproducción de los animales. Los requeridos en las cantidades del gramo se denominan macrominerales y este grupo incluye calcio, fósforo, sodio, cloro, potasio, magnesio y azufre. Los macrominerales son componentes estructurales importantes del hueso y otros tejidos y sirven como constituyentes importantes de los fluidos corporales (NCR, 2001, p.130).

La vía digestiva es generalmente la fuente principal de entrada de los minerales al metabolismo, aunque ciertos elementos pueden causar toxicidad cuando son inhalados o penetran por la piel como el cadmio y el selenio, los elementos cuya absorción por difusión simple es casi completa, son los electrolitos monovalentes como el sodio, cloro y potasio, el calcio, cinc, hierro y cobre, utilizan ciertos mecanismos específicos que incluyen el transporte utilizando una proteína específica y son absorbidos en forma selectiva y dependiente de todo un sistema determinado. La excreción de minerales endógenos es vía heces u orina (Linn, 2001, p.22).

Los minerales traza o micro elementos, están presentes en el organismo en cantidades muy pequeñas, sin embargo, desempeñan un papel importante en la constitución del organismo del animal, unos formando partes de vitaminas o enzimas, otros como activadores de un sistema y otros como el cromo cuya función se vincula a la acción de la hormona insulina, metabolismo de los triglicéridos y del sistema inmune. Los forrajes, contienen cantidades variables de estos elementos, por tal razón su inclusión en la ración debe ser equilibrada, debido a las interacciones entre sí, por lo tanto, se sugiere conocer el contenido mineral de los forrajes, las deficiencias de estos elementos pueden ser subclínica y causar pérdidas muy grandes en el hato afectado, las deficiencias pueden producirse por niveles bajos del elemento o por exceso de otro mineral (Linn, 2001, p.28).

Vitaminas

Las vitaminas se clasifican en liposolubles o hidrosolubles, las vitaminas A, D, E y K son liposolubles, las vitaminas B y la vitamina C son solubles en agua. Las vitaminas tienen

diversas funciones, incluida la participación en muchas funciones metabólicas vías, la función de las células inmunitarias y la regulación génica. A la deficiencia clínica de una vitamina da como resultado una enfermedad, como el raquitismo cuando la vitamina D es deficiente, pueden ocurrir deficiencias subclínicas en las que los signos clínicos de la deficiencia no son evidentes pero el rendimiento o general la salud animal es menos que óptima (NCR, 2001, p.187).

Según Linn, (2001), las necesidades de vacas de leche en vitaminas liposolubles son:

Vitamina A, UI/día = $110 \cdot PV(Kg)$

Vitamina D, UI/día = $30 \cdot PV(Kg)$

Vitamina E, UI/día = $0.80 \cdot PV(Kg)$

Costos de Producción

Para incrementar la producción y productividad de leche es necesario aplicar innovaciones tecnológicas orientadas a mejorar el manejo adecuado de pastos y forrajes, además de conocer las características, la composición y la función de los alimentos en el ganado. Los costos de producción del litro de leche están distribuidos de la siguiente manera, la mano de obra representa el 14 %, medicinas 6 %, inseminación, 5 %, ordeño, 2% fertilizantes, 12 %, aditivos, 14 %, balanceado 57 % (PRONACA, 2023).

MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología desarrollada en la solución del problema, fue de tipo cuantitativa, haciendo uso de herramientas como la entrevista y la observación directa, de esta manera fue posible analizar en problema bajo dos escenarios, el operativo funcional del sistema, al momento de la investigación y el operativo funcional optimizado. La investigación fue desarrollada en la ganadería NICVANA, ubicada en la parroquia Puerto Jelí del Cantón Santa Rosa Provincia de El Oro, con el objetivo de mejorar la productividad del negocio del ganado lechero, la metodología implementada en la búsqueda de una solución factible está basado en un modelo de programación lineal que permita, reducir los costos de producción y mantenimiento, sin desmejorar la nutrición de los animales mediante la optimización de los recursos disponibles en la ganadería. El hato cuenta con un modelo de ganadería semiestabulado en lechería, con 55 cabezas de ganado, distinguiendo un mestizaje de razas como, Brahman, Brown Swiss y Holstein, distribuido en dos lotes, uno de producción o fase de lactancia y otro, en fase de vacas secas, cada lote se encuentra subdividido 12 lotes, con un área aproximada de 2080 m² por lote,

además el sistema cuenta con un sistema de riego por aspersión programado, con su respectivo control de malezas.

Modelación matemática del problema

Los modelos matemáticos tienen muchas ventajas sobre una descripción verbal del problema, una ventaja es que un modelo matemático describe un problema de manera mucho más concisa, esto tiende a hacer más comprensible la estructura general del problema y ayuda importantes relaciones de causa y efecto, además un modelo matemático forma un puente hacia el uso de técnicas matemáticas de alta potencia y computadoras para analizar el problema. (Hillier, 2015, p.14)

Los modelos son una herramienta importante en la comprensión de los sistemas de producción ganadera, ya que proporcionan una forma de representar el conocimiento existente, los componentes del sistema y sus interacciones, y las entradas y salidas (Harris, 1992, p.1)

La programación lineal es una herramienta de análisis cuantitativo y modelación matemática, que ayuda en la planeación y toma de decisiones respecto a problemas básicos de la economía como la asignación eficiente de recursos (Render et, a., 2012).

La optimización de las raciones de alimento a través de modelos matemáticos monitorea las necesidades de los animales a lo largo del día, de modo que la función objetivo (también llamada función objetivo de la función de eficiencia) puede ser mínimo o máximo dependiendo de los requisitos del problema (ROTARU, et al., 2017).

Winston (2015), considera siete pasos para desarrollar un modelo de procesos, estos son, definición del problema, colección de los datos, desarrollo del modelo, verificación del modelo, optimización y toma de decisiones, presentación del modelo y su implementación.

Definición del problema

El modelo tiene por objetivo, optimizar los costos de alimentación de los animales en producción de leche en la ganadería NICVANA, considerando, requerimientos de nutrición, consumo y la digestibilidad de los animales.

Desarrollo del modelo

Datos de entrada del modelo

Los datos de entrada del modelo fueron proporcionados por el administrador de la ganadería, en ellos se distinguen, la composición de las dietas suministradas a los

animales, el número de animales, el tipo de ganado y el sistema de crianza y producción.

Supuestos del modelo

- El peso vivo de los animales tiene un promedio de 458 Kg.
- Los requerimientos nutricionales no consideraron condiciones de clima, distancias recorridas, tasa de bocado y cantidad de barro en las patas del animal.
- El análisis bromatológico y los proximales de los alimentos cuentan con información fidedigna para el modelo.
- Las estimaciones de los requerimientos de energía, minerales, proteína y consideran una producción de 4.3 litros por día
- El precio de venta de las materias primas incluye el transporte con una frecuencia de un viaje por semana.

La función objetivo

La función objetivo, está programada para minimizar los costos por ración, como resultado de la combinación de los alimentos que satisfacen los requerimientos nutricionales del ganado seleccionado en producción de leche, para un precio p_i , y una cantidad requerida c_i , su modelo esta dado por:

$$F_{CM} = \sum p_i * c_i$$

Modelo de restricciones

La función objetivo esta sujeta a restricciones de tipo nutricional, y capacidad ruminal.

Restricciones nutricionales

Energía Neta de Lactación (ENL)

$ENL \leq \sum ENL_i * c_i$, en esta inecuación, ENL(Mcal/Kg): representa la energía total de lactación requerida para las necesidades energéticas (mantenimiento, lactación, actividad física, gestación y crecimiento), ENL_i : representa el aporte de energía de cada materia prima, finalmente c_i , la cantidad suministrada de cada materia prima.

Proteína Metabolizable

$PM \leq \sum PM_i * c_i$, esta restricción, $PM(g/Kg)$: define la cantidad de proteína verdadera digerida en el intestino a aminoácidos y posteriormente absorbida para cubrir necesidades de mantenimiento, lactación, gestación y crecimiento, PM_i : representa el aporte de proteína de cada materia prima.

Calcio requerido

$Ca \leq \sum Ca_i * c_i$, aquí, Ca (g/kg): define la cantidad de calcio total requerido, Ca_i : representa el aporte de calcio de cada materia prima.

Potasio requerido

$PO \leq \sum PO_i * c_i$, aquí, PO (g/kg): define la cantidad de potasio total requerido, PO_i : representa el aporte de potasio de cada materia prima.

Capacidad Ruminal

Restricciones de consumo de materia seca (MSI)

$$MSI \left(\frac{kg}{d} \right) = (0,372 * FCM 4\% + 0,0968 * PV^{0.75}) * (1 - e^{(-0.192*(SL+3.67))})$$

Se registro un peso vivo promedio de 458 Kg, para vacas con 4 semanas de lactación.

$$MSI \left(\frac{kg}{d} \right) = (0,372 * 0.04 + 0,0968 * (458)^{0.75}) * (1 - e^{(-0.192*(10+3.67))}) = 8.90$$

Restricciones Fibra Cruda

$FC \leq \sum FC_i * c_i$, aquí, FC (g/kg): define la cantidad de fibra cruda total requerido, FC_i : representa el aporte de fibra cruda de cada materia prima.

RESULTADOS

Figura 1. Implementación del modelo en Excel Solver

Datos de entrada del modelo						
	Pasto Estrella(Kg)	Guinea(Kg)	Maíz mol (KG)	Bana. Verde(Kg)	Melaza (KG)	Harina pescado
MS %	2,49	1,87	2,94	1,87	6,41	8,28
PC %	0,27	0,22	2,35	1,03	2,56	5,80
EM (Mcal)	4,49	3,55	5,88	5,23	6,41	19,13
ENL (Mcal)	3,24	2,43	4,11	3,37	4,10	12,75
FC %	0,85	0,56	0,82	0,093	0,00	2,32
Ca %	0,01	0,01	0,01	0,001	0,03	0,15
P %	0,01	0,01	0,01	0,001	0,0026	0,12
Costos	\$ 0,08	\$ 0,08	\$ 0,49	\$ 0,33	\$ 0,37	\$ 1,18
Variables de decisión						
	Pasto Estrella(Kg)	Guinea(Kg)	Maíz mol (KG)	Bana. Verde(Kg)	Melaza (KG)	Harina pescado
	4,69	0	0	0	0	1,40
Restricciones						
	Utilizado		Requerimiento mínimo Diario			
MS %	23,25	>=	8,90			
PC %	9,38	>=	8,01			
EM (Mcal)	47,75	>=	5,93			
ENL (Mcal)	33,00	>=	9,94			
FC %	7,21	>=	7,21			
Ca %	0,26	>=	0,26			
P %	0,20	>=	0,16			
Modelo costo						
Costo Alimen=	\$2,02					

Los resultados del escenario optimizado, establecen que, para cubrir los requerimientos mínimos de materia seca, energía metabolizable, energía neta de lactancia, fibra seca, proteína cruda, calcio y potasio, las vacas en producción de leche deben consumir 4.69 Kg de forraje, acompañado de 1.4 Kg de harina de pescado, asumiendo un costo diario costo por alimentación de 2.02 dólares por animal, por otro lado, el modelo establece que existe un excedente de materia, lo cual no es perjudicable para el animal, además en el escenario no optimizado se registra un costo de alimentación por animal de 2.93 dólares, generando un ahorro de 0.91 dólares por animal, el escenario optimizado asegura una nutrición balanceada, a diferencia de los que presentaba el escenario sin optimizar, ya que no se registraba con exactitud, el aporte de nutrientes requeridos a diario por los animales.

CONCLUSIONES

El modelo matemático fue capaz de balancear y optimizar los requerimientos nutricionales en la ganadería NICVANA, generando un ahorro de 0.91 dólares por animal. Es recomendable incorporar la modelación matemática en el negocio del ganado, ya que permiten tomar decisiones de forma sistemática garantizando una mejor productividad. Se espera un incremento en la producción de leche a causa de una nutrición que considera de forma sistemática los requerimientos de producción y mantenimiento de los animales que cubre los requerimientos mínimos de los animales.

REFERENCIAS

- Adolfo Cevallos Polanco, M. V. (2021). Costo real de producción del litro de leche, en pequeños ganaderos de. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 1-16.
- Ancuța Simona ROTARU, M. B. (2017). Mathematical Modeling of Feed Rations Using Solver. *Bulletin UASVM Animal Science and Biotechnologies* , 1-5.
- Bellingeri, A. G. (2020). Development of a linear programming model for the optimal allocation of nutritional resources in a dairy herd. *ournal of dairy science*, 103(11), 10898-10916.
- Bondi, A. A. (1989). Nutrición Animal. S. A. Zaragoza, 546.
- Calderón, F. L. (21 de 12 de 2022). *ganadería*. Obtenido de <https://www.engormix.com/ganaderia-carne/articulos/alimentacion-manejo-ganado-bovino-t39579.htm>
- Escabosa, A. L. (15 de 12 de 2022). Producción de ganado lechero. Mexico.

- Espinosa, C. E. (15 de Diciembre de 2008). Evaluación de modelos de crecimiento e implementación del sistema de fraccionamiento accionamiento de proteínas y carbohidratos de Cornell en las pasturas del CIC Santa María para la optimización del sistema de alimentación del ganado de leche. Mexico: CIENCIA UNISALLE.
- Hammeleers, A. (23 de 12 de 2022). Métodos para estimar consumo voluntario de forrajes por rumiantes en pastoreo.
- Harris, B. L. (1992). *Linear programming applied to dairy cattle*. USA: Iowa State University.
- Hillier, F. S. (2015). *Introduction to operations Research*. Mexico: McGraw Hill México.
- Lachmann, M. &. (1999). La estimación de la digestibilidad en ensayos con rumiantes. *Universidad de Zulia, Facultad de Ciencias Veterinarias*, 21.
- Lanuza, F. &. (2012). *REQUERIMIENTOS DE NUTRIENTES SEGÚN ESTADO FISIOLÓGICO EN BOVINOS DE LECHE*. Valdivia-Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias – Centro Regional de Investigación Remehue.
- Lazo-Salas, G. J.-B.-G.-R.-H. (2018). Basurto, R. e I. Tejada de Hernández. 1992. Digestibilidad aparente de la pulpa deshidratada de limón. Comparación de métodos para estimarla. *Téc. Pec. Méx.* 30(1):13 - 22. *Nutrición Animal Tropical*, 21.
- Linn, J. (Octubre de 2001). NECESIDADES NUTRITIVAS DEL GANADO VACUNO LECHERO: RESUMEN DE LAS NORMAS DEL NRC (2001). *n Avances en nutrición y alimentación animal*, 1-26.
- López, L. B. (2011). Nutrición y alimentación animal. . *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, , 465-499.
- Marín, D. A. (2022). *NUTRICIÓN Y ALIMENTACIÓN ANIMAL*. Cordova: Departamento de Producción Animal.
- Martínez, G. D. (2016). *Alimentación de ganado bobino con dietas altas en grano*. Mexico: UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA.
- NCR, N. R. (2001). *National Academies Press*. Obtenido de <http://www.nap.edu/catalog/9825.html>
- Pritchard, S. (20 de 12 de 2022). Obtenido de https://www.produccion-animal.com.ar/informacion_tecnica/manejo_del_alimento/72-ration_cap_7.pdf

- PRONACA). (17 de 01 de 2023). *PRONACA*. Obtenido de <https://www.procampo.com.ec/index.php/blog/10-nutricion/178-produccion-forraje-leche>
- Render, B. S. (2012). *Métodos cuantitativos para los*. Pearson Educación.
- Sampaio, C. B. (2009). Dinâmica ruminal da fibra em detergente neutro em bovinos alimentados com forragem tropical de baixa qualidade e suplemento com compostos nitrogenados. *Revista Brasileira de Zootecnia*, 10. doi: • <https://doi.org/10.1590/S1516-35982009000300023>
- SANTINI, F. J. (2014). *NUTRICIÓN ANIMAL APLICADA*. BALCARE: INTA EEA Balcarce - Facultad de Ciencias Agrarias (UNMdP).
- Solórzano, T. J. (2022). Optimización del costo de alimentación para ganado de engorde en Guanacaste, Costa Rica. doi:DOL: <https://doi.org/10.18845/ea.v8i1.5654>
- TECNOLÓGICO, I. N. (2016). *MANUAL DEL PROTAGONISTA NUTRICIÓN ANIMAL*. INSTITUTO NACIONAL TECNOLÓGICO.
- Veneciano, J. H. (2020). *Cría y recría de bovinos*. Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias , Cát. Producción Animal - Ingeniería Agronómica. Cát. Producción Animal - Ingeniería Agronómica. Obtenido de <https://www.produccion-animal.com.ar/>
- Winston, W. L. (2015). *Management Science Lodelling*. . Canada: CENGAGE Learning.