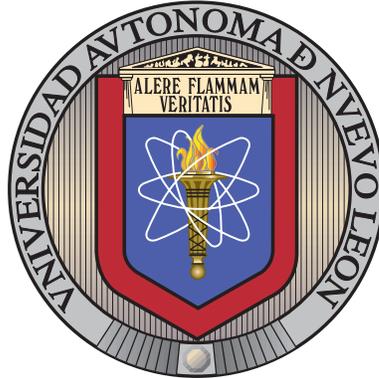


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



ASIGNACIÓN DE RECURSOS ALIMENTICIOS EN  
GANADERÍA BOVINA

POR

ROMEL WILMAR PÉREZ GONZÁLEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

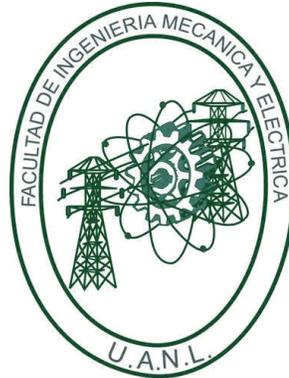
MAESTRÍA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

MAYO 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ASIGNACIÓN DE RECURSOS ALIMENTICIOS EN  
GANADERÍA BOVINA

POR

ROMEL WILMAR PÉREZ GONZÁLEZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS  
EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

MAYO 2016

**Universidad Autónoma de Nuevo León**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**Subdirección de Estudios de Posgrado**

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Asignación de Recursos Alimenticios en Ganadería Bovina», realizada por el alumno Romel Wilmar Pérez González, con número de matrícula 1707084, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis

---

Dr. Vincent Boyer

Asesor

---

Dr. José Arturo Berrones Santos

Revisor

---

Dr. Hugo Bernal Barragán

Revisor

Vo. Bo.

---

Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Mayo 2016

*Amo el canto del zenzontle,  
pájaro de cuatrocientas voces.*

*Amo el color del jade  
y el enervante perfume de las flores,  
pero amo más a mi hermano: el hombre.*

*A Betito Jr.*

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>10</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>14</b>
1.1. Descripción del problema . . . . .	17
1.2. Objetivos . . . . .	18
1.3. Estructura de la tesis . . . . .	18
<b>2. Marco Teórico</b>	<b>20</b>
2.1. Trabajos realizados en Ganaderia . . . . .	20
<b>3. Formulación Matemática</b>	<b>29</b>
3.1. FORMULACIÓN MATEMÁTICA . . . . .	29
3.1.1. Descripción del modelo . . . . .	30
3.1.2. Función Objetivo . . . . .	32
3.1.3. Restricciones . . . . .	32
<b>4. Metodología</b>	<b>37</b>

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	6
4.1. Equipo computacional . . . . .	38
4.2. Implementación Computacional . . . . .	38
4.3. Creación de Instancias . . . . .	38
4.3.1. Instancias del Modelo . . . . .	38
4.3.2. Instancia de alimentos . . . . .	39
4.4. Diseño de experimentos . . . . .	40
4.4.1. Costo . . . . .	40
4.4.2. Gap . . . . .	40
4.5. Resultados obtenidos del Modelo . . . . .	41
4.6. Variación entre lo requerido contra lo asignado . . . . .	43
4.7. Resumen de resultados obtenidos . . . . .	47
4.8. Resultados Diseños de experimetos . . . . .	49
<b>5. Conclusiones</b>	<b>52</b>
5.1. Trabajo futuro . . . . .	53
<b>A. Generalidades de Optimización</b>	<b>54</b>
A.1. Generalidades de Optimización . . . . .	55
A.1.1. Antecedentes de Optimización . . . . .	55
A.1.2. Técnicas para resolver los modelos de optimización . . . . .	56
A.1.3. Algoritmos para la resolución de problemas de optimización lineal . . . . .	57

<i>ÍNDICE GENERAL</i>	7
A.1.4. Heurística y Metaheurística . . . . .	57
A.2. NRC . . . . .	58
<b>B. Resumen detallados de resultados del modelo</b>	<b>59</b>

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

4.1. Costo por grupo . . . . .	42
--------------------------------	----

# ÍNDICE DE TABLAS

---

4.1. Variación porcentual para 100 vacas en 12 periodos . . . . .	44
4.2. Variación porcentual para 100 vacas en 24 periodos . . . . .	45
4.3. Variación porcentual para 100 vacas en 36 periodos . . . . .	46
4.4. Anova Costo . . . . .	51
4.5. Anova Gap . . . . .	51
B.1. Costo y gap promedio de 12 periodos para 100, 500 y 1000 vacas . . .	59
B.2. Costo y gap promedio de 24 periodos para 100, 500 y 1000 vacas . . .	60
B.3. Costo y gap promedio de 36 periodos para 100, 500 y 1000 vacas . . .	61

# AGRADECIMIENTOS

---

Primeramente a Dios por darme la vida, por todas las bendiciones que ha derramado sobre mí. A mis padres y a mis hermanos por todo el apoyo incondicional y por todos esos empujes motivacionales que han sido tan significativos para mí, que a consecuencia de ello he podido avanzar en cada obstaculo que se me presenta. Al Dr. Vincent Boyer por por creer en este proyecto, así como la oportunidad que me ha dado para poder ser parte de su grupo de investigación, por todos sus consejos y regaños que me han sido de gran provecho para poder emprender este camino de investigación. A CONACYT por la beca otorgada, gracias a ello se trabajó durante ésta investigación. A la Universidad Autónoma de Nuevo León. Al hermoso estado de Nuevo León.

A Eduardo por ser un amigo, gracias por todo hermano, por todas las enseñanzas y por todas las cosas que hemos convivido en estos dos años, gracias por abrirme las puertas de tu casa y que me tomaran en cuenta como uno más de la familia Valdes, por todo eso te agradezco enormemente. A Daniel Mosquera por ser un amigo, gracias por todas las enseñanzas. A myriam A Ernesto.

Al Dr. Héctor Hugo Bernal Barragan por ser parte de mi comité de Tesis, también por ser partícipe en este proyecto y por la disponibilidad de tiempo que mostró durante la resolución de éste mismo. Al Dr. Arturo Berrones por ser parte del comité de Tesis. Al Dr. Jesús Alberto Ramos Juárez del Colegio de Postgraduados Campus

Cardenas Tabasco por todo el apoyo. Al Dr. Gilberto Carlos Navarro Ortega por recibirme en Texcoco para la aclaración de muchas dudas en cuanto al manejo de vacas lecheras Holstein.

A mis compañeros de Yalma: Daniel Mosquera, Daniel Loera, Luis Benavides, Juan, Ruth, Myriam, Eduardo, Mayra, Nancy Arellano, Fernando, Andrés, René, Rodrigo, Carlos y Asael por todas las platicas tan amenas.

# RESUMEN

---

Romel Wilmar Pérez González.

Candidato para obtener el grado de  
Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio:

**Asignación de Recursos Alimenticios en Ganadería Bovina.**

Número de páginas: 67.

**OBJETIVOS Y MÉTODO DE ESTUDIO:** Estudiar las operaciones de agrupación de vacas, para su posterior asignación de forrajes y concentrados, buscando el costo mínimo por la compra de los alimentos, mediante un modelo matemático de agrupación con estructuras lineales. También analizar los efectos en el costo por la creación de más de tres grupos. Además analizar estadísticamente los resultados obtenidos. .

**CONTRIBUCIONES Y CONCLUSIONES:** Es importante destacar que la contribución de éste trabajo es la herramienta que se desarrolla para los tomadores de decisiones en las fincas ganaderas, para mejorar la eficiencia de los recursos financieros y agrícolas

del establecimiento. Se puede concluir que con éste trabajo se obtuvieron resultados sustanciales para los diferentes casos de estudio. Particularmente para los casos de 100 vacas en los distintos periodos de planeación, éstos encontraron una solución factible de 1 a 5 grupos respectivamente con un gap menor del 10 %. En los tamaños de 500 y 1000 vacas en los diferentes periodos se encontró una solución factible con un gap menor de 13 %. Lo anterior en un tiempo promedio de 2 horas.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_

Dr. Vincent Boyer

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

*Nunca consideres el estudio como una obligación, sino como la oportunidad para penetrar en el bello y maravilloso mundo del saber*

**Albert Einstein**

### Bosquejo

---

<b>1.1. Descripción del problema . . . . .</b>	<b>17</b>
<b>1.2. Objetivos . . . . .</b>	<b>18</b>
<b>1.3. Estructura de la tesis . . . . .</b>	<b>18</b>

---

La ganadería es una actividad que pertenece al sector primario que radica en el empleo de animales que son dóciles con fines de producción para su aprovechamiento. Dependiendo de la clase ganadera, se pueden adquirir diferentes productos derivados, como la leche, huevos, lana, miel, entre otros. Las formas de obtención pueden ser de tres tipos: La ganadería intensiva, los animales están estabulados y reciben alimento procesado. Es necesario la utilización de tecnología para generar mayor rendimiento e inspeccionar el bienestar del animal. La segunda es la ganadería extensiva, también conocidos como tradicionales o convencionales, dicha explotación se realiza en terrenos grandes. Dado que los animales pastorean y recolectan libremente su alimento. Finalmente la ganadería de autoconsumo, se alude a la cría de

animales por una familia para adquirir productos como leche, carne o huevos con énfasis en el consumo del núcleo familiar.

El sector primario en México tiene una gran importancia, tanto por su participación en la economía (Producto Interno Bruto), como por el considerable número de población que en ella se desempeña o ejerce alguna labor, según Duran et al. [1]. Así mismo, el elevado porcentaje del territorio nacional dedicado a la actividad ganadera está estimado en 56 %, denotando claramente la importancia productiva para la nación.

En el año 2014, México obtuvo una producción nacional de leche bovino de 11,129,918 litros. También el consumo de productos de leche descremada fue estimada en 255 mil toneladas, lo anterior de acuerdo a datos del SIAP (Servicio de Información Agroalimentario y Pesquera)[2], según Rivera et al. [3] la leche es uno de los alimentos más completos para el ser humano, dadas las características fundamentales de sus nutrimentos, así como una fuente fundamental de calcio para los niños y personas de una edad avanzada. Dichos productos están catalogados como productos de la canasta familiar.

Existen diversas operaciones que una finca ganadera realiza a diario, como son las estrategias que se llevan a cabo para aumentar el peso a los animales, también el incremento de la producción lechera, sin olvidar realizar una correcta agrupación de los animales para darles los requerimientos nutricionales de acuerdo a las necesidades específicas. Además de una planeación en la compra de forrajes y concentrados que necesitarán a lo largo del ciclo productivo, así como la incorporación de complementos nutricionales para mejorar las distintas dietas, por lo cual tener sistemas de producción eficientes es fundamental para suplir la necesidad de un mercado latente. Las consideraciones antes expuestas es lo que motiva a estudiar ésta clase de problemas bajo estrategias de investigación de operaciones.

Las metodologías de producción de leche en México son diversos por la gran variedad de climas que existen, suelos y tipos de vegetación, por tanto los proce-

dimientos de producción se han tenido que adecuar a diversos ecosistemas; dando como resultado ha subdividir el territorio nacional en cinco grandes zonas ecológico-ganaderas, las cuáles están catalogadas como: árida, semiárida, templada, trópico seco y trópico húmedo.

La producción de leche en un sistema tecnificado o estabulado se practica en la zona norte y altiplano (Durango, Coahuila, Guanajuato, Jalisco, Aguascalientes, Chihuahua, México, San Luis Potosí, Hidalgo, Querétaro y Baja California). El tipo de raza se aglomera en la Holstein Friesian, cuya alimentación se basa en el uso de alimentos balanceados y forrajes henificados o ensilados. La producción que se obtiene oscila entre 7 mil y 8.5 mil litros por lactancia (equivalente a 305 días). La ordeña se realiza de manera mecánica y el establo está equipado con tanques de enfriamiento.

El sistema semi-tecnificados se localiza en la zona norte y altiplano (Baja California, Baja California Sur, Colima, Chihuahua, Distrito Federal, Hidalgo, Jalisco, México, Michoacán, Morelos, Puebla, Sinaloa, Sonora, Tlaxcala y Zacatecas). El tipo de ganado es el resultado de una serie de cruzamientos entre las razas Holstein Friesian, Pardo Suizo y Criollo (cita). La alimentación se basa principalmente en el uso de alimentos balanceados (consumo de 5 a 6 kg/vaca/día), de esquilmos agrícolas mezclados con maíz molido y del pastoreo directos en pastos nativos. La producción de leche por lactancia (280-305 días) es de 1600 a 2800 litros por vaca. La ordeña se realiza manualmente y en algunos pocos casos mecánica.

Finalmente se tiene el sistema de doble propósito o lechería tropical. Éste tipo se hace en las regiones tropicales del país (Chiapas, Veracruz, Jalisco, Guerrero, Guanajuato, Tabasco, Zacatecas, Nayarit, San Luis Potosí y Tamaulipas) y utiliza a las razas cebuínas y las cruces entre razas Pardo Suizo, Holstein Friesian y Simmental. Como lo indica el nombre de este sistema tiene como función zootécnica (cría, mejora y explotación de los animales domésticos) el producir carne o leche, dependiendo la demanda del mercado. El rendimiento está entre 2 y 4 litros al día

por vaca, utilizan técnicas de manejo rudimentarias y predomina el pastoreo libre. La ordeña es manual, basando su alimentación en el pastoreo y un mínimo de suplementación alimenticia. En dicho sistema de producción la productividad de leche por lactancia (120-180 días) es de 300 a 700 litros por vaca. La leche se destina a la venta directa del consumidor y/o a la elaboración de quesos.

Una de las labores fundamentales en cualquiera de estos sistemas productivos es la agrupación de las vacas para posteriormente asignar los recursos alimenticios a los mencionados grupos. La agrupación de los animales es sustancial, generalmente en las fincas la asignación de forrajes y concentrados se hace de manera homogénea para todas las vacas, lo cuál trae como consecuencia que algunas vacas consuman más alimentos de lo que demandan, causando sobrepeso en dichos animales, baja producción de leche y un costo muy alto por alimentarlas. Por lo cuál surge el interés de encontrar una metodología que permita crear grupos con la finalidad de minimizar el costo por compra, tanto de forraje, así como de concentrado. Este tipo de agrupación en las sistemas productivos no se viene desarrollando, además no se tiene el cálculo de los requerimientos mínimos de las vacas en lactancia. Actualmente se efectúa a base de los conocimientos empíricos que el administrador ha adquirido a lo largo tiempo, y en ocasiones se realiza de acuerdo a la intuición y observación de reses por el capataz, lo que conlleva a una asignación homogénea de los alimentos para todas las vacas, ocasionando un costo alto por alimentarlas y también sobrepeso en algunos animales.

## 1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

El tema propuesto consiste en desarrollar una metodología matemática con estructuras lineales, que facilite las labores de agrupación de las vacas en las fincas y, su posterior alimentación, con el objetivo de hacer un uso eficiente de los recursos financieros y agrícolas que cuenta el establecimiento. Esto debido a que a diario en las fincas ganaderas los administradores toman decisiones de cómo agrupar a los

animales y distribuir la cantidad de alimentos dependiendo de sus requerimientos energéticos. Además el de saber que cantidad de nutrimentos se le tiene que asignar a una vaca para que pueda llegar a una producción de leche que se pretende alcanzar, estos requerimientos se pueden obtener gracias a las ecuaciones del NRC (Nutrient Requirements of Dairy Cattle)[4] ya que nos facilita conocer los gastos nutricionales que tiene una vaca por mantenimiento, producción de leche, así como los requerimientos que ésta debe tener para recorrer la distancia que camina desde el lugar donde pastorea hacia la sala de ordeña.

## 1.2 OBJETIVOS

Estudiar las operaciones de agrupación de vacas que tienen similitud en cuanto a consumo de forraje y cocentrados, con el objetivo de minizar costos por compra de alimentos.

### **Objetivos específicos**

- Estudiar la asignación de recursos alimenticios con técnicas de agrupación.
- Abordar una metodología para alcanzar cierta producción de leche para vacas en distintas semanas de lactancia, además de considerar distintos pesos, distancias de traslados desde el lugar de pastoreo hacia la sala de ordeña.
- Analizar los efectos que tiene la calidad de grupos sobre el costo.

## 1.3 ESTRUCTURA DE LA TESIS

Este trabajo consta de siete secciones, los cuáles son: Introducción, Marco Teórico, Formulación Matemática, Metodología Experimentación, Conclusiones y dos Apéndice.

- En la introducción se exhibe una breve explicación de lo que es ganadería, la importancia y las principales operaciones que en ella se lleva a cabo. Así también se ostenta una pequeña motivación y los principales objetivos de la investigación.
- En el segundo capítulo se presentan el estado del arte sobre los trabajos de ganadería con enfoques de optimización. Lo que permite al lector conocer las características más notables sobre metodologías y formulaciones matemáticas de éste problema.
- En el tercer capítulo se explica detalladamente el modelo matemático de agrupación.
- El cuarto capítulo se describe la implementación computacional realizada, también el equipo de cómputo que se utilizó y los resultados que se obtuvieron.
- En el quinto capítulo se relatan las conclusiones y el trabajo a futuro.
- En el apéndice A se habla sobre historia y definiciones de lo que es investigación de operaciones. Además de un breve resumen del NRC 2001 (National Research Council). En el apéndice B se muestran las tablas que los resultados que se obtuvieron del modelo.

## CAPÍTULO 2

# MARCO TEÓRICO

---

## Bosquejo

---

2.1. Trabajos realizados en Ganaderia . . . . .	20
---	----

---

## 2.1 TRABAJOS REALIZADOS EN GANADERIA

Desde hace muchos años los modelos matemáticos para sistemas agrícolas se han utilizado. En la década de los 50's diversos productores de leche se han basado en la programación lineal para poder hacer dietas balanceadas para sus hatos ganaderos. Existen varias aplicaciones, pero una de las primeras en investigación operativa en ganadería fue la de Waugh [5], y su función principal era la de determinar la mejor combinación de alimentos a un bajo costo, sin sobrepasar una serie de requisitos como la de las necesidades nutrimentales de los animales. Partiendo de que las vacas lecheras requieren una combinación de nutrientes para mantenimiento y otra que es para producción de leche. También en el trabajo de Fisher [6] se hizo una extensión del trabajo antes mencionado.

Bath and Bennett [7] desarrollaron un programa lineal computarizado para hacer raciones. El objetivo era de maximizar los ingresos por encima de los costos de

alimentación, éste programa tenía datos de 101 ingredientes de alimentos diferentes, y contaba con la posibilidad de cambiar ciertas especificaciones nutricionales para cada ingrediente, así como la opción de añadir alimentos. Los datos de entrada que se tomaron en cuenta fueron los de peso de la vaca, grasa en la leche, respuesta de producción de leche, precio de la leche. Los requisitos básicos de nutrientes para las vacas lecheras fueron tomados del NRC 1978 [8].

Cabrera [9] propone un modelo utilizando cadenas markov bajo estructuras lineales, con la finalidad de optimizar los ingresos de un hato lechero. La función objetivo contaba con dos opciones en cada estado: mantener o reemplazar un animal. También estudió cinco dietas, así como el impacto ambiental. Las dietas variaron en proporciones de ensilaje de alfalfa, maíz y harina de soya, que determinó el consumo de materia seca, producción de leche. El problema lo resolvió mediante el Solver de Excel.

Kleyn y GOUS[10] formularon un modelo de programación matemática para poder determinar la estrategia nutricional óptima para una vaca lechera. El modelo determina el nivel óptimo de producción y alimentación correspondiente que se le debe asignar a una vaca en producción. Una de los resultados que mostró fue que la estrategia nutricional aplicado depende de la disponibilidad, el precio y calidad de forraje o concentrado.

Además en el trabajo de Şahman et al.[11], presentan un algoritmo genético para determinar la mejor mezcla de alimentación para aves a un menor costo. Así también en el trabajo de Samuel [12], presenta un modelo lineal de dietas para aves de corral.

Oladokun et al. [13] formularon un modelo lineal de dietas para buscar la combinación óptima de los ingredientes disponibles, pero con restricciones que satisficieran las necesidades nutricionales de los animales con la función objetivo de minimizar el costo.

En el trabajo de Whittemore y Fawcett [14] presentan un modelo para simular

el crecimiento en cerdos para la inclusión de proteínas y energía. Éste a su vez separaba la ganancia de peso diario en componentes libres y tejidos grasos. Fawcett y otros [15, 16] incorporaron este modelo a un modelo de programación lineal para la formulación de raciones a costo mínimo para producir ganancia de peso vivo.

En el trabajo de Dipti Singh y Pratiksha Saxena [17] desarrollan un modelo lineal para la formulación de dietas, con el objetivo minimizar el costo. Además migraron este modelo a un algoritmo genético para encontrar una solución en un tiempo menor que el del modelo.

En 1972 Dean [18], propuso un modelo de programación lineal. El trabajo tuvo el objetivo de maximizar los ingresos por encima de los costos de alimentación. Él modelo eligió la mezcla de concentrados, la mezcla de fibra y la cantidad de la producción de leche que maximiza los rendimientos netos. Rendimiento neto lo definieron como el valor de la producción de leche, menos los costos de alimentación. Cabe señalar que el modelo tuvo como datos de entrada el peso, la etapa de lactancia, y la capacidad productiva del individuo. Así como la conclusión de los autores que indicaron que un área de oportunidad que observaron en su modelo de programación lineal fue la falta de conocimientos básicos sobre las relaciones fundamentales de producción, como lo que respecta al vínculo de producción neta de energía de lactancia.

En el trabajo de Tozer [19] presenta cuatro modelos de programación matemática para formular raciones para alimentar vaquillas de reemplazo que estaban en crecimiento de 50 a 550 kg y con un crecimiento diario de 600, 700 y 800 gramos. Todo esto con la finalidad de alcanzar un peso de 600 kg de peso vivo al parto. Esto utilizando programación Lineal y estocástica.

En la investigación de Ocampo [20] realiza una simulación sobre el consumo de forraje en materia seca para vacas lecheras con cruce de Holando X cebú en Paraguay, considerando y evaluando el consumo de materia seca y el consumo de concentrado. Además este modelo asumió que las vacas cebuinas tienen una mayor capacidad para

disipar el calor debido a la diferencia en el número de glándulas sudoríparas y una mayor superficie corporal. Las variables de entrada y salida que se consideraron son las siguientes: el peso vivo (kg); la crucea ( $3/4$ ,  $5/8$  y  $1/2$  de Holstein); temperatura ambiental; la velocidad del viento; disponibilidad y digestión del forraje; tasa de crecimiento del forraje; cantidad y calidad de la suplementación y carga animal. Las variables de salidas fueron: la producción diaria de leche y la variación del peso vivo. El desarrollo de éste modelo permitió abstraer y analizar los componentes que inciden sobre el desempeño productivo de vacas cruzas Holstein y Cebú bajo condiciones climáticas de trópico y subtropical, donde se asume que el uso de concentrado en niveles altos sin diferenciar biotipos no siempre se refleja en mayores producciones de leche en animales de mayor potencial productivo, debido al efecto del estrés térmico sobre el consumo voluntario de materia seca. La conclusión de ésta simulación fue que la producción de leche bovino en climas cálidos favorecen a vacas con porcentaje de sangre cebuina intermedios, superando inclusive a animales con mayor proporción de sangre Holstein, gracias a una mayor capacidad de disipación de calor.

En el 2000 Kalantari et al.[21], propuso determinar la óptima regla de reemplazo en Holstein de hatos lecheros en el país de Iran, utilizando un modelo de programación dinámica. Las vacas se describieron en términos de variables de estados, que comprenden producción de leche, paridad, el estado de preñez, y el mes actual en producción de leche. El objetivo es maximizar el valor neto de las vacas en una planeación de 15 años. Utilizaron un modelo de Simulación de cadenas de Markov, los elementos estocásticos son las probabilidades de embarazo y el aborto, el nivel de producción de leche.

En 1987 Tahir Rehman y Carlos Romero [22], presentan un modelo de dietas que incorporaba técnicas de programación por metas, esto debido a que los modelos lineales convencionales comúnmente utilizados para la alimentación del ganado sufre debilidades en cuanto a la formulación de raciones. Señalan que una de las debilidades es la rigidez matemática que debe estar respetando para cumplir con los requerimientos mínimos nutricionales. La metodología que desarrollaron incorpora

funciones de penalización que hacen que los requerimientos de los niveles mínimos de nutrientes sea más flexible y realista.

En los trabajos de Pierre y Harvey [23, 24, 25] presentan modelos de optimización estocástica para dietas. Ésto mediante la programación con restricciones de probabilidad cuando los nutrientes son aditivos e independientes a través de los ingredientes de los alimentos.

También Lara [26], desarrolla un trabajo con múltiples objetivos para la formulación de raciones en ganadería, todo esto en una situación de la vida real. Las consideraciones de los cuatro modelos se describen a continuación. El primer modelo tiene dos objetivos: la minimización del costo y la maximización del uso de los alimentos almacenados en la granja, los cuáles eran: heno de alfalfa, pulpa de remolacha seca, cáscaras de semillas de algodón y algodón enteros. Éste último objetivo representaba el deseo de incluir la mayor cantidad de alimentación en la granja como sea posible. El segundo modelo tiene tres objetivos: minimizar costo, maximizar la inclusión de alimentos almacenados y minimizar la inclusión de otros alimentos. Éste último objetivo se puede expresar como la suma del resto de los alimentos. El tercer modelo tiene dos objetivos: la minimización de costos y la maximización de las cantidades de alimentos almacenados en la dieta sobre el importe total.

Tahir Rehman y Carlos Romero [27], realiza una formulación de raciones para ganado que se postula en un marco de técnicas de toma de decisiones de múltiples criterios. Mencionan que los problemas para formular las raciones para las dietas involucran varios criterios y deben modelarse con técnicas que pueden solucionar este tipo de problemas. Así también se enfocaron en programación de metas y sus variantes tales como los enfoques ponderados, lexicográficas y múltiples objetivos.

García Martínez [28] desarrollan una metodología que permite realizar una ración a coste mínimo, así como el nivel de producción a máximo beneficio en la temporada de invierno en el engorde de bovino, bajo un sistema de pastoreo. Calculan mediante programación lineal la ración a mínimo costo, contemplaba las restriccio-

nes de energía metabólica, energía neta de crecimiento y ganancia de peso, consumo de materia seca y la administración de concentrado. Una vez que establecen la ración a mínimo costo se determina por iteraciones múltiples el nivel de ganancia media diaria que genera un beneficio máximo. También el modelo permitía incorporar todas aquellas restricciones fisiológicas que se estimen oportunas y calcula la ración al máximo beneficio. Uno de los resultados que obtuvieron era que tenían que modificar la estrategia de alimentación, utilizando suplementos en las primeras etapas de crecimiento de animal, aprovechando que la eficiencia de conversión de los animales jóvenes es mayor a la presentada por los adultos.

En el estudio de Wilman [29] plantea un sistema de puntuación en una escala de 1 a 5 para medir la condición corporal en vacas lecheras en cualquier punto durante la lactancia de cada una de éstas. Las vacas fueron anotados en apariencia y palpación en la parte de la espalda y cuartos traseros. Las relaciones del cuerpo en cuanto a peso vivo, medidas del tamaño del marco, la producción de leche y las características relacionadas con el sistema de puntuación de condición corporal fueron las que se determinaron. Durante 18 meses, 28 vacas en cada unos de los 29 establos lecheros que fueron utilizados para tomar media del cuerpo y la puntuación de la condición corporal, los datos los obtuvieron a partir de cada hato en intervalos de 3 meses. Obtuvieron que el peso corporal y medidas del tamaño del marco no podría ser correlacionada con la condición corporal. También las vacas lecheras de mayor eficiencia en cuánto a producción de leche no mostraron aumento significativo en la puntuación de condición corporal durante la lactancia. Las vacas que aumentaron de manera significativa en la puntuación fueron las productoras menos eficiente. Tambien concluyen en este trabajo que el cuerpo de condición del sistema de puntuación es un medio para determinar con precisión la condición corporal de las vacas lecheras, independientes del peso vivo y el tamaño del marco.

En el 2001 Grant y Albright [30], describen que el consumo del alimento en vacas lecheras es controlada por ruminorreticular y mecanismos fisiológicos, pero una agrupación adecuada puede controlar la ingesta en un ambiente de alimentación,

como resultado de su impacto reflejada en la comodidad de las vacas, la competencia para la alimentación, entre otros recursos como la salud del hato. Argumentaron que una agrupación bien establecida estratégicamente minimizará el impacto negativo de la competencia negativa en la ingesta de alimentos. Señalan que la vacas de primer parto se benefician que sean separadas de los animales más viejos por el aumento de la ingesta y la productividad, justificando que las vacas de primer parto se encuentran en un etapa de crecimiento. Los espacios con las que cuenta cada vaca, la accesibilidad hacia los comederos, y el tipo de alimentación debe ser considerado al determinar el tamaño óptimo del grupo. También concluyeron que en un grupo de ganado, la jerarquía social, la competencia para la alimentación, el agua, el espacio y la disponibilidad de alimentos determinará el comportamiento alimentario y el consumo de materia seca.

En Gumen et al.[31], mencionan que el período seco y la gestión temprana post-parto son factores decisivos para la fertilidad en vacas lecheras. Indican que el periodo de seca tradicional disminuye el consumo de materia seca antes del parto, lo que resulta en una disminución en la ingesta de energía. Así como un balance energético negativo aumenta la concentración de ácidos grasos no esterificados, y el aumento de ácidos grasos no esterificados puede poner en peligro el sistema inmunológico, esencialmente por la reducción de la función de neutrófilos antes del parto. El objetivo de este mismo es de explicar los efectos de acortar el período seco en reproducción y tratamientos post-parto temprano que conlleva a mejorar la fertilidad.

Pratiksha Saxena y Neha Khanna [32] presentan dos modelos para hacer raciones para rumiantes en diferentes etapas de peso. El modelo lineal se formuló para un costo mínimo y el máximo beneficio de alimentación. El segundo modelo es estocástico y se desarrolló para incluir la variabilidad de nutrientes en los modelos de dieta. A continuación se presentan estos dos modelos. El primer tiene como objetivo obtener un alimento a base de una mezcla de ingredientes, que contenga componentes para diferentes pesos. De acuerdo a esto, el aumento de peso se puede lograr mediante la maximización de el valor nutritivo de la alimentación. Lo anterior se puede lo-

gar eligiendo los componentes de la alimentación que contienen alto ingredientes de digestibilidad, esto garantiza una mayor ganancia de peso que reduce los costos de alimentación. Otro objetivo es maximizar la calidad de mezcla de alimentación en términos de su vida útil, la vida se puede incrementar mediante la reducción del contenido de agua en el alimento. Seis nutrientes y dieciséis ingredientes de alimentos tienen que ser utilizados en este modelo para la optimización de la mezcla. La composición de los ingredientes de los alimentos y el contenido de agua se tomaron de recomendación del NRC.

El segundo modelo es similar al anterior, la función objetivo es la misma que el antes descrito.  $\sigma_{ij}$  representa la variación de nutrientes  $i$  en el ingrediente  $j$  y se incluye con una cierta probabilidad, el resto de las variables se definieron anteriormente. El modelo fue formulado con un 80 % de probabilidad, asumiendo que toma la variabilidad nutricional de los componentes de alimentación. Esto implica que hay un 80 % de probabilidad de que una ración contenga el nivel deseado de nutrientes. Ésta probabilidad solicitada determina la concentración de nutrientes para la formulación de la ración. La variabilidad de nutrientes es tomada en cuenta como un término no lineal con una varianza en cada componente de alimentación.

Además existen trabajos que estiman las curvas de lactancia de producción de leche de las vacas, ésta curva describe la producción de leche de un animal desde su inicio hasta el momento del secado. Ésta curva trata de demostrar cuando se alcanza el pico de producción de leche, la persistencia que ésta tiene durante cierto periodo y tiene como finalidad principal pronosticar el desempeño productivo de los animales en un futuro. Wood en 1967 [33] desarrolló ésta ecuación  $y_n = an^b e^{cn}$ , que utiliza una transformación logarítmica de una curva de gamma incompleta para obtener estimaciones de mínimos cuadrados de tres constantes:  $a$ , es el factor de escala asociado a un rendimiento medio diario;  $b$ , relacionado con la curvatura prepico; y  $c$ , relacionado con la curvatura post pico. Dicha ecuación fue utilizada en el trabajo de Fadlilmoula et al. [34] como un método para determinar el rendimiento de una manada de vacas mestizas Friesian y Ayrshire en el país de Sudan. Otro trabajo es

el Wasike en el 2011[35], en donde propone como objetivo el de describir la curva de lactancia del ganado lechero en Kenya, una vez más utilizando el modelo de Wood. En el trabajo de Vinay-Vadillo et al.[36] estudian la lactancia de vacas Holstein X Zebu en regiones trópico húmedo en Veracruz, México. El objetivo es de caracterizar la curva en éste tipo de cruza de holando cebú, utilizando los modelos de función de gamma, Wilmink, Dijkstra, Ali y Schaeffer[33, 37, 38, 39].

De acuerdo a la revisión de literatura que se describió anteriormente, se puede concluir que ninguno de los trabajos abordan una metodología para agrupar a las vacas, la mayoría de los trabajos citados se enfocan en hacer dietas y su principal función objetivo es la de minimizar el costo por la dieta. Lo cuál éste trabajo viene a suplir una necesidad latente en las fincas ganaderas, y el impacto se verá reflejado en sus activos, además de tener un mejor control de los animales. Aunado a lo anterior, los periodos de planeación que se maneja en éste trabajo es útil para los tomaderes de decisiones de las fincas el poder prepararse en un tiempo determinado la cantidad de los alimentos que necesitarán. En el campo de investigación es de muchas trascendencia poder estudiar ésta problemática con enfoques de investigación de operaciones.

## CAPÍTULO 3

# FORMULACIÓN MATEMÁTICA

---

### Bosquejo

---

<b>3.1. FORMULACIÓN MATEMÁTICA . . . . .</b>	<b>29</b>
3.1.1. Descripción del modelo . . . . .	30
3.1.2. Función Objetivo . . . . .	32
3.1.3. Restricciones . . . . .	32

---

En el presente capítulo se describe el modelo matemático, éste evalúa los requerimientos en base a kilogramos de materia seca de forraje y de concentrados que demanden para una posterior agrupación.

## 3.1 FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El presente modelo de agrupación se basa en los requerimientos de las vacas, dicha demanda se mide bajo kilogramos de materia seca de forraje y de concentrado. Una vez realizado el calculo de requerimientos, el modelo procederá a agruparlas de acuerdo a alguna similitud que tengan en cuanto a consumo (forraje y concentrado). Las vacas que pertenezcan a un grupo determinado van a consumir la misma cantidad de alimentos en toda los periodos de planeación en la que se encuentran. Cabe señalar

que éste modelo es multiperíodo, debido a que se contemplan periodos de 12, 24 y 36. Así también se cuenta con vacas en los distintos casos de estudio que están en distintas semanas de lactancia, lo que permite aproximar aún más los casos que se tienen en un finca ganadera.

Un punto primordial de ésta metodología es hacer el cálculo de los requerimientos de cada una de las vacas, es importante mencionar que cada vaca cuenta con un consumo total, también un porcentaje de concentrado y forraje. Por lo tanto el consumo de forraje y concentrado proviene de multiplicar para cada vaca el porcentaje de concentrado o forraje en dicho período por el consumo total.

### 3.1.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

#### Índices

- i*. Corresponde a vacas.
- j*. Corresponde a alimentos.
- k*. Corresponde a grupos.
- p*. Corresponde a periodos.

#### Conjuntos

- V*. Conjunto de vacas.
- K*. conjunto de Grupos.
- P*. Conjunto de Periodos.
- C*. Conjunto de alimentos de Concentrados.
- F*. Conjunto de alimentos de Forrajes.
- $A = C \cup F$ : Conjunto de alimentos

#### Parámetros

- $C_{ip}$ . Kilogramos de concentrado de la vaca *i* en el periodo *p*, esto es (Porcentaje con-

centrado \* consumo/100)

$F_{ip}$ . Kilogramos de forraje de la vaca  $i$  en el periodo  $p$ , (Porcentaje forraje \* consumo/100)

$c_j$ . Costo del alimento  $j$ .

### Variables de decisión

$yc_{ip}$ . Kilogramos requeridos de concentrado de la vaca  $i$  en el periodo  $p$

$yc'_{kip}$ . Kilogramos requeridos de concentrado de la vaca  $i$  en el período  $p$

$ec_{kp}$ . Kilogramos de concentrado para cada vaca en el grupo  $k$  en el período  $p$

$yc'_{kp}$ . Total de kilogramos concentrado en el grupo  $k$  en el período  $p$

$yf_{ip}$ . Kilogramos requeridos de forraje de la vaca  $i$  en el período  $p$

$yf'_{kip}$ . Kilogramos asignados de forraje de la vaca  $i$  en el período  $p$

$ef_{kp}$ . Kilogramos de forraje para cada vaca en el grupo  $k$  en el período  $p$

$yf'_{kp}$ . Total de kilogramos de forraje en el grupo  $k$  en el período  $p$

$N_k$ . Cantidad de vacas en grupo  $k$

$z_j$ . Cantidad de alimento  $j$

### Variables Binarias

$$w_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si la vaca } i \text{ esta en el grupo } k \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

Minimizar

$$\sum_{j \in A} c_j z_j \quad (3.1)$$

Sujeto a:

$$C_{ip} = yc_{ip} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P} \quad (3.2)$$

$$yc'_{kip} \geq ec_{kp} - M(1 - w_{ik}) \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}, k \in \mathcal{K} \quad (3.3)$$

$$yc'_{kp} = \sum_{i \in \mathcal{V}} yc'_{kip} \quad \forall k \in \mathcal{K}, p \in \mathcal{P} \quad (3.4)$$

$$yc_{ip} \leq \sum_{k \in \mathcal{K}} yc'_{kip} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P} \quad (3.5)$$

$$yc'_{kip} \leq ec_{kp} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}, k \in \mathcal{K} \quad (3.6)$$

$$yc'_{kip} \leq Mw_{ik} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}, k \in \mathcal{K} \quad (3.7)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{C}} z_j \geq \sum_p \sum_k yc'_{kp} \quad (3.8)$$

$$Fip = yf_{ip} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P} \quad (3.9)$$

$$yf'_{kip} \geq ef_{kp} - M(1 - w_{ik}) \quad \forall i \in \mathcal{I}, p \in \mathcal{P}, k \in \mathcal{K} \quad (3.10)$$

$$yf'_{kp} = \sum_{i \in \mathcal{V}} yf'_{kip} \quad \forall k \in \mathcal{K}, p \in \mathcal{P} \quad (3.11)$$

$$yf_{ip} \leq \sum_{k \in \mathcal{K}} yf'_{kip} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P} \quad (3.12)$$

$$yf'_{kip} \leq ef_{kp} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}, k \in \mathcal{K} \quad (3.13)$$

$$yf'_{kip} \leq Mw_{ik} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}, k \in \mathcal{K} \quad (3.14)$$

$$\sum_{j \in \mathcal{F}} z_j \geq \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{k \in \mathcal{K}} yc'_{kp} \quad (3.15)$$

$$\sum_{k \in \mathcal{K}} w_{ik} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{V} \quad (3.16)$$

$$N_k = \sum_{i \in \mathcal{V}} w_{ik} \quad \forall k \in \mathcal{K} \quad (3.17)$$

### 3.1.2 FUNCIÓN OBJETIVO

Minimizar el costo por compra de los alimentos

$$\sum_{j \in \mathcal{A}} c_j z_j$$

### 3.1.3 RESTRICCIONES

Esta primer restricción evalúa lo que requiere una vaca de concentrado en Kilogramos de materia seca para cada vaca  $i$  en un período  $p$ . Dicho producto proviene del cálculo: Porcentaje de concentrado \* Consumo.

$$C_{ip} = y_{c_{ip}} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}$$

La segunda restricción dice que los kilogramos de concentrado que se le asigna a la vaca  $i$  en el grupo  $k$  en el período  $p$  debe de ser mayor o igual a los kilogramos asignado al grupo  $k$  en el período  $p$ .

$$y'_{c_{kip}} \geq ec_{kp} - M(1 - w_{ik}) \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}, k \in \mathcal{K}$$

La tercera restricción evalúa el total de kilogramos de concentrado que hay en un grupo, esto es a suma de kilogramos de una vaca en un período determinado en un grupo

$$y'_{c_{kp}} = \sum_{i \in \mathcal{V}} y'_{c_{kip}} \quad \forall k \in \mathcal{K}, p \in \mathcal{P}$$

En esta restricción del modelo nos hace referencia ah que la cantidad de kilogramos que requiere la vaca  $i$  en un período  $p$  tienes que ser menor o igual a la cantidad de kilogramos asignado a esa vaca en un grupo  $k$  en un determinado período  $p$ .

$$y_{c_{ip}} \leq \sum_{k \in \mathcal{K}} y'_{c_{kip}} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}$$

La cantidad de kilogramos asignado a una vaca  $i$  en un grupo  $k$  en un periodo  $p$  debe ser menor o igual a la cantidad de kilogramos para cada vaca en un grupo  $k$  en un período  $p$ .

$$y'_{c_{kip}} \leq ec_{kp} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}, k \in \mathcal{K}$$

Ésta restricción dice que la cantidad de kilogramos de concentrado que se le debe asignar a la vaca  $i$  debe de ser sólo si ésta vaca se encuentra en el grupo  $k$ .

$$yc'_{kip} \leq Mw_{ik} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}, k \in \mathcal{K}$$

La cantidad de kilogramos de concentrado tiene que ser mayor o igual a lo que requiere en un grupo de vacas en un período.

$$\sum_{j \in \mathcal{C}} z_j \geq \sum_{p \in \mathcal{P}} \sum_{k \in \mathcal{K}} yc'_{kp}$$

La octava restricción evalúa lo que necesita una vaca de forraje en kilogramos de materia seca para la vaca  $i$  en el período  $p$ . Éste producto resulta del cálculo: Porcentaje de forraje \* Consumo.

$$Fip = yf_{ip} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}$$

La novena restricción dice que los kilogramos de forraje que se le asigna a la vaca  $i$  en el grupo  $k$  en el período  $p$  debe de ser mayor o igual a los kilogramos asignado al grupo  $k$  en el período  $p$ .

$$yf'_{kip} \geq ef_{kp} - M(1 - w_{ik}) \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}, k \in \mathcal{K}$$

La décima restricción evalúa el total de kilogramos de concentrado que hay en un grupo, esto es a suma de kilogramos de una vaca en un período determinado en un grupo

$$yf'_{kp} = \sum_{i \in \mathcal{V}} yf'_{kip} \quad \forall k \in \mathcal{K}, p \in \mathcal{P}$$

Ésta restricción del modelo nos hace referencia a que la cantidad de kilogramos que requiere la vaca  $i$  en un período  $p$  tiene que ser menor o igual a la cantidad de kilogramos asignado a esa vaca en un grupo  $k$  en un determinado período  $p$ .

$$f_{ip} \leq \sum_k yf'_{kip} \quad \forall i \in \mathcal{V}, i \in \mathcal{P}$$

La cantidad de kilogramos asignado a una vaca  $i$  en un grupo  $k$  en un período  $p$  debe ser menor o igual a la cantidad de kilogramos para cada vaca en un grupo  $k$  en un período  $p$ .

$$yf'_{kip} \leq ef_{kp} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}, k \in \mathcal{K}$$

Ésta restricción dice que la cantidad de kilogramos de forraje que se le debe asignar a la vaca  $i$  debe de ser sólo si ésta vaca se encuentra en el grupo  $k$ .

$$yf'_{kip} \leq Mw_{ik} \quad \forall i \in \mathcal{V}, p \in \mathcal{P}, k \in \mathcal{K}$$

La cantidad de kilogramos de forraje tiene que ser mayor o igual a lo que requiere en un grupo de vacas en un período.

$$\sum_{j \in F} z_j \geq \sum_{p \in P} \sum_k y c'_{kp}$$

Una vaca solo puede pertenecer a un sólo grupo.

$$\sum_k w_{ik} = 1 \quad \forall i \in \mathcal{V}$$

Finalmente restricción nos dice el número de vacas que están en cada grupo.

$$N_k = \sum_{i \in V} w_{ik} \quad \forall k \in \mathcal{K}$$

## CAPÍTULO 4

# METODOLOGÍA

---

### Bosquejo

---

<b>4.1. Equipo computacional</b>	<b>38</b>
<b>4.2. Implementación Computacional</b>	<b>38</b>
<b>4.3. Creación de Instancias</b>	<b>38</b>
4.3.1. Instancias del Modelo	38
4.3.2. Instancia de alimentos	39
<b>4.4. Diseño de experimentos</b>	<b>40</b>
4.4.1. Costo	40
4.4.2. Gap	40
<b>4.5. Resultados obtenidos del Modelo</b>	<b>41</b>
<b>4.6. Variación entre lo requerido contra lo asignado</b>	<b>43</b>
<b>4.7. Resumen de resultados obtenidos</b>	<b>47</b>
<b>4.8. Resultados Diseños de experimetos</b>	<b>49</b>

---

En este capítulo se describen las herramientas computacionales que se utilizaron para darle solución al modelo matemático, además las características y consideraciones que se tomaron en cuenta para la creación de los casos de estudio. También se presenta los resultados que se obtuvieron del modelo con instancias de distinto

tamaño, además se exhibe el resultado del análisis estadístico para las variables de respuesta de costo y gap.

## 4.1 EQUIPO COMPUTACIONAL

Los experimentos computacionales se realizaon en un ordenador con un procesador Intel (R) Xeon (R) CPU-E3-1245 v3 @ 3.4GHz con 8 nucleos, con una memoria RAM de 16 GB bajo el sistema operativo de Windows 7 de 64 bits.

## 4.2 IMPLEMENTACIÓN COMPUTACIONAL

La implementación del modelo matemático se desarrolló bajo el entorno de desarrollo integraddo (IDE) de Visual Studio 2012, en el lenguaje de programación C++, usando como optimizador la libreria de CPLEX 12.61.

## 4.3 CREACIÓN DE INSTANCIAS

### 4.3.1 INSTANCIAS DEL MODELO

Las instancias del modelo se crearon bajo patrones reales señidos bajo la dirección del Doctor Hugo Bernal Barragan, experto en el área de ganadería.

A partir de los datos de la curva de lactancia de una vaca que cuenta con cincuenta y dos semanas, se crearon diferentes escenarios para ser analizados de diversos tamaños (llamadas como instancias). Dichos escenarios contemplan 100, 500 y 1000 vacas, cada una de éstos casos tiene 12, 24, 36 periodos de planeación. A continuación se explica cómo y que consideraciones se hicieron par crearlas.

Se generó un número aleatorio con distribución uniforme entre 0 y 15. Este número aleatorio representará las semanas de lactancia de la vaca, a la cual se le está haciendo la dieta. Posicionado en el número aleatorio se cuenta doce filas de manera ascendente al número de fila, completando los 3 meses de planeación para la vaca. Usando la información suministrada que nos proporcionó el experto en el área se realizaron pequeños cambios, los cuales se enlistan a continuación:

- Para el peso corporal se contempló una ganancia y una pérdida de 5 kg del peso original.
- Para el consumo de materia seca se tuvo en cuenta una desviación del 10 %
- Para la producción de leche en kg se le agrego una desviación del 10 %.

Las estimaciones anteriores fueron realizados para no perder coherencia en cuanto a peso, producción y consumo. Estas consideraciones se hicieron pretendiendo modelar el fenómeno de consumo de concentrado y forraje de la vaca en distintas semanas de lactancia. Para los escenarios creados las vacas estarán uniformemente distribuidas en un rango de planeación con referencia a su periodo de lactancia.

#### 4.3.2 INSTANCIA DE ALIMENTOS

Se consideran dos tipos de forrajes y 6 tipos de concentrados. Cada uno de éstos tiene el aporte energético que proporcionan por cada kilogramo de materia seca, tales como el porcentaje de materia seca (DM %), energía metabolizable (ME), energía neta para mantención (Nem), energía neta para lactancia (NEl), proteína cruda (CP), Fibra detergente neutro (NDF) y el precio para cada uno de éstos.

## 4.4 DISEÑO DE EXPERIMENTOS

### 4.4.1 COSTO

Se utilizó un diseño factorial completo con tres factores de control. La variable de respuesta es el Costo y los factores de control son los siguientes:

1. Número de grupos con cinco niveles (grupo 1, grupo 2, grupo 3, grupo 4, grupo 5).
2. El horizonte de planeación que corresponde a los periodos con tres niveles (12, 24 y 36 periodos respetivamente).
3. Número de vacas con tres niveles (100, 500 y 100 vacas).

### 4.4.2 GAP

Se realizó un diseño factorial completo con tres factores de control. La variable de respuesta es el Gap y los factores de control son los siguientes:

1. Número de grupos con cinco niveles (grupo 1, grupo 2, grupo 3, grupo 4, grupo 5).
2. El horizonte de planeación que corresponde a los periodos con tres niveles (12, 24 y 36 periodos respetivamente).
3. Número de vacas con tres niveles (100, 500 y 100 vacas).

## 4.5 RESULTADOS OBTENIDOS DEL MODELO

El resultado que se muestran a continuación se obtuvo después de haber puesto en ejecución el modelo por un tiempo de dos horas para cada instancia. Existen 3 conjuntos de instancias (que contienen 12, 24, 36 semanas o periodos respectivamente), cada conjunto contiene tres tipos de tamaño para cada una (100, 500 y 1000 vacas). Para cada instancia se corrió de uno a cinco grupos para ver el efecto que tiene en la función objetivo la creación de éstos.

En la figura 4.1 se muestra el resultado para el tamaño de 100 vacas, con periodos de 12, 24 y 36 periodos. El eje «x» corresponde a los grupos y el eje «y» corresponde al costo promedio. En la gráfica de 12 periodos se puede observar la frontera de pareto, en donde por cada grupo creado representa un objetivo distinto, se puede apreciar que conforme se crean más grupos el costo se reduce, obteniendo con cinco grupos el mínimo costo de ese caso. Lo mismo pasa para la gráfica de 24 periodos y 36. El costo se reduce por crear más grupos, dado que cuando sólo existe un grupo, el modelo evalúa los requerimientos para todas las vacas y fija la misma cantidad de kilogramos para todas las vacas de acuerdo a la vaca que resulta con mayor demanda, dando como resultado un costo alto. Con dos grupos el modelo agrupa a las vacas evaluando las vacas que tienen una similitud en consumo, denotando claramente la reducción del costo. Lo mismo pasa por crear tres, cuatro y cinco grupos, siendo éste último el de menor costo. Lo anterior resulta similar en 24 y 36 periodos.

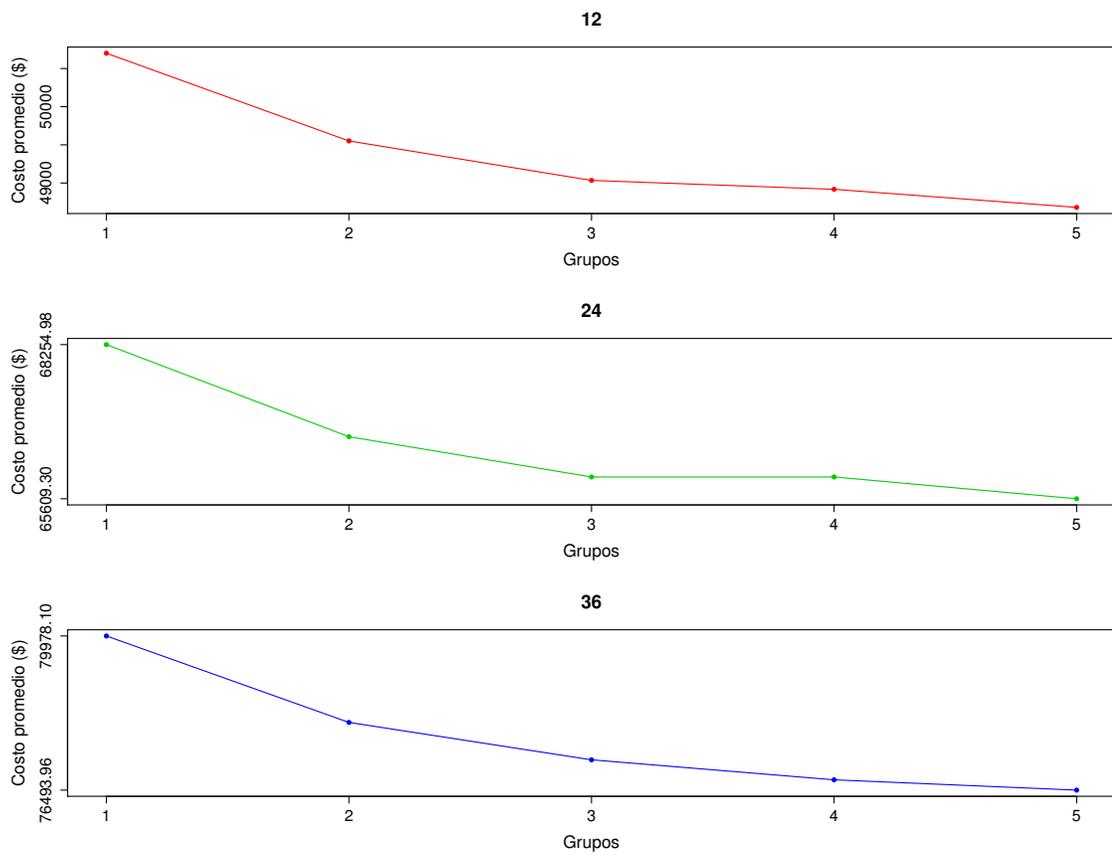


Figura 4.1: Costo por grupo

## 4.6 VARIACIÓN ENTRE LO REQUERIDO CONTRA LO ASIGNADO

Es importante volver a reiterar que uno de los puntos trascendentales de éste trabajo es asignarle a los animales los requerimientos que demanden, en cuanto más cerca esté lo asignado a lo requerido es significativo para el costo (menor) y también para la salud del animal (productividad). Es por eso que a continuación se mostrará la variación porcentual de lo requerido por grupos creados contra lo que se le asignó de forraje y concentrado respectivamente.

En la tabla 4.1 se logra apreciar que para el caso en donde sólo se usa un grupo, la asignación tiene un 18.58 % más de lo que se requiere de forraje en dicho grupo, así también se puede distinguir que con dos grupos éste porcentaje tiende a disminuir un 3 %. Para el caso de cinco grupos se logra tener un porcentaje menor del 14 % en algunos grupos. De igual forma se puede ver para concentrado que con un grupo inicia con 14.12 %, mientras que con cinco grupos se logra obtener un porcentaje menor del 11 %.

En la tabla 4.2 se puede ver que con un grupo se le asigna un 18.71 % más de lo que requieren de forraje, con dos grupos se logra disminuir ese porcentaje en relación con un grupo, obteniendo con 5 grupos porcentajes menores del 14 %. En lo que respecta a concentrado con un grupo se logra un 14.7 %, y con 5 grupos de logra porcentajes menores del 11 %.

En la tabla 4.3 con un grupo se asigna un 18.21 % más de lo que requieren, logrando con cinco grupos un porcentaje menor del 12 %, disminuyendo de un grupo a cinco un 6 %. Para concentrado con cinco grupos se puede ver el porcentaje está por debajo del 10 %.

Concluyendo que entre mayor sea el número de grupos se encontrará una mejor asignación de los requerimientos nutricionales de los animales.

Tabla 4.1: Variación porcentual para 100 vacas en 12 periodos

<b>Forraje</b>					
Grupos	Variación para 100 vacas en 12 periodos				
1	18.58				
2	15.49	15.48			
3	14.19	14.26	13.48		
4	14.37	12.89	13.08	12.49	
5	13.81	11.91	13.08	12.54	13.10
<b>Concentrado</b>					
Grupos	Variación para 100 vacas en 12 periodos				
1	14.13				
2	10.86	11.48			
3	10.60	10.50	10.31		
4	10.68	10.10	9.95	14.99	
5	9.78	8.78	9.99	9.64	10.11

Tabla 4.2: Variación porcentual para 100 vacas en 24 periodos

<b>Forraje</b>					
Grupos	Variación para 100 vacas en 24 periodos				
1	18.71				
2	15.49	15.48			
3	13.41	13.54	14.09		
4	13.77	13.14	12.88	12.32	
5	13.22	13.63	11.84	11.59	11.31
<b>Concentrado</b>					
Grupos	Variación para 100 vacas en 24 periodos				
1	14.17				
2	11.45	15.19			
3	10.40	10.22	10.00		
4	10.48	9.79	9.75	9.61	
5	10.01	7.88	11.26	9.05	9.01

Tabla 4.3: Variación porcentual para 100 vacas en 36 periodos

<b>Forraje</b>					
Grupos	Variacion para 100 vacas en 36 periodos				
1	18.21				
2	14.87	14.66			
3	12.37	12.81	12.33		
4	12.74	12.08	12.19	11.84	
5	11.81	11.26	11.60	11.36	11.53
<b>Concentrado</b>					
Grupos	Variacion para 100 vacas en 36 periodos				
1	14.04				
2	11.20	11.66			
3	9.97	9.93	9.86		
4	10.49	9.42	9.66	9.34	
5	9.45	9.00	8.96	8.69	8.99

## 4.7 RESUMEN DE RESULTADOS OBTENIDOS

Se presenta a continuación un resumen de los resultados, conteniendo para el costo y el gap un promedio de un total de 10 casos por cada conjunto, cada costo y gap son dados por Cplex. Las tablas se pueden ver en el Apéndice B.

En la tabla B.1 se emplearon tres conjuntos de instancias, las cuáles son: DairyCattle-100-12, DairyCattle-500-12 y DairyCattle-1000-12, esto refiriéndose a 100, 500 y 1000 como el total de vacas contenidas en cada caso de estudio y, 12 aludiendo al número de periodos para cada vaca. Cada conjunto de instancias contiene 10 casos y se ejecutaron cada una de estas por un tiempo de dos horas. Cada resultado que se muestra es el promedio de un total de 10 casos y cada una de estas se corrieron desde 1 hasta 5 grupos. Sin hacer un análisis estadístico se puede notar que de uno a cinco grupos con un número de vacas de 100, el costo disminuye por cada grupo que se crea, pero el gap aumenta considerablemente por cada grupo creado. Para 500 vacas el costo disminuye de uno a tres grupos, por consiguiente para cuatro y cinco grupos se ve un incremento en el costo; el porcentaje del gap disminuye de uno a tres grupos y, para 4 y 5 grupos el gap tiene un incremento, lo que hace efecto en el costo a que aumente en dichos grupos. Similarmente pasa con el costo y el gap con 1000 vacas. Es notorio que por hacer un grupo reporta un gap promedio de 0.00%, esto se debe a que el modelo sólo calcula los requerimientos para todas las vacas y se basa en el cálculo del requerimiento de la vaca con mayor necesidad nutrimental y en base a ésta le asigna a las demás la misma cantidad, lo que da lugar a un costo alto. De igual manera se puede observar el mismo comportamiento con un grupo para 24 y 36 periodos en las tablas B.2 y B.3 respectivamente. También se puede ver que a partir de dos grupos en adelante se puede ver el incremento del gap notablemente. Se puede apreciar que de 100, 500 a 1000 en número de vacas, el costo aumenta con referencia a la cantidad de elementos en la población trabajada, lo anterior se puede observar también en las tablas B.2 y B.3. También se percibe que entre 100 y 500 vacas, el gap aumenta ampliamente, aunque pareciera estar en equilibrio para 500 y

1000 vacas, similarmente pasa en los casos de 24 y 36 periodos.

En la tabla B.2 se emplearon tres conjuntos de casos de estudio, las cuales las tres contemplan 24 periodos con tamaños de 100, 500 y 1000 vacas cada una. En la tabla se puede observar que de uno a cinco grupos con un número de vacas de 100, el costo disminuye por cada grupo que se crea; el gap aumenta por cada grupo que se crea, obteniendo con cinco grupos un gap menor en referencia de dos a cuatro grupos y, se obtiene en éste el de menor costo. Para 500 vacas el costo se reduce de uno a tres grupos, para cuatro grupos mantiene el costo del tercer grupo y con cinco grupos es cuando tiende a aumentar; el gap aumenta de uno a cuatro grupos y con cinco grupos disminuye en relación con el de cuatro grupos, dicho efecto se ve reflejado en el costo. Para 1000 vacas el costo disminuye de uno a dos grupos, con tres y cuatro grupos mantiene el mismo costo pero éste a su vez aumentó en relación al de dos grupos, con cinco grupos si aumenta considerablemente el costo; para el gap de uno a dos grupos aumenta en un 12%, pero con tres grupos disminuye, pero se mantiene en incremento para cuatro y cinco grupos.

En la tabla B.3 se emplearon los casos de estudio que contemplan 36 periodos con tamaños de 100, 500 y 1000 vacas cada una. En la tabla se puede observar que de uno a cinco grupos con un número de vacas de 100, el costo disminuye por cada grupo que se crea, el gap aumenta por cada grupo, obteniendo con cinco grupos el menor costo para ese tamaño. En el caso de 500 vacas el costo se reduce de uno a dos grupos, para el tercer y cuarto grupo mantiene el mismo costo pero con un incremento, pero con cinco grupos se ve claramente que el costo disminuye, siendo éste el de menor costo; en cuanto al gap aumenta de uno a cuatro grupos y con el quinto grupo disminuye en relación con el de cuatro grupos. Para 1000 vacas el costo disminuye de uno a dos grupos, con tres y cuatro grupos mantienen el mismo costo pero que es más costoso que con el de dos grupos, con cinco grupos si hay una reducción de costo; para el gap de uno a dos grupos hay un aumento considerable, pero con tres grupos disminuye al porcentaje que marcó el segundo grupo, sin embargo de ese grupo al cuatro y cinco se mantiene en incremento.

Se puede concluir a partir de los resultados que se mostraron anteriormente que la creación de los grupos minimizan el costo y esto a su vez son objetivos totalmente opuestos cada uno respectivamente. Además el modelo da grupos homogéneos de animales en cuanto a su consumo. También el modelo se resuelve en 2 horas con un gap menor del 13%. Así mismo la complejidad de éste aumenta por cada grupo que se crea y también con el número de periodos.

## 4.8 RESULTADOS DISEÑOS DE EXPERIMENTOS

En la tabla 4.4 se logra apreciar que los factores Grupos, Periodos, Vacas, Periodos\*Vacas y Grupos\*Vacas son significativos con Valor  $p = 0$ , teniendo como hipótesis nula  $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ , donde todas las medias son iguales, mientras la hipótesis alternativa  $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ . Con ello se acepta con una confianza del 95% y un  $\alpha$  del 0.05 la hipótesis alternativa. En este caso se podría concluir que al menos uno de los factores es diferente estadísticamente. Además se comprobó la distribución de los residuos del modelo estadístico usado, se utilizó la prueba de Anderson-Darling obteniendo un valor  $P$  de 0.669, por lo tanto se afirma que los residuos siguen una distribución normal.

Con respecto a las operaciones que existen en una finca ganadera, se evidencia claramente que las vacas que pertenecen a un grupo tienen la similitud en cuanto a consumo de alimentos, facilitando las labores de asignación de alimentos, ordeña, además de disminuir el desperdicio de forrajes y concentrados que a menudo se tiene. En este trabajo investigativo se demostró matemáticamente que al costo de alimentación de las vacas generando diferentes grupos, sí afecta significativamente con Valor  $P < 0.05$ , por lo cual se aconseja tener cinco grupos de vacas para poder controlar mejor el proceso de alimentación y producción de leche de las mismas.

Para las ventanas de planeación de la hacienda ganadera, se encontró que estadísticamente es significativo con Valor  $P < 0.05$  el periodo de planeación, por

lo cual se aconseja tener un lapso de 12 periodos. Como era de esperarse el costo de operación aumenta significativamente con el aumento de vacas (Valor  $p < 0.05$ ), por lo que es aconsejable un número no mayor de 100 vacas.

Además otra contribución de la agrupación que puede ser interesante, es que los grupos pueden facilitar labores de planeacion como aumento de peso vivo de las reses, producción de leche, palpación, suministro de vitaminas, entre otros.

En la tabla 4.5 los factores Grupos, Vacas, Grupos\*Vacas son significativos con valor  $p = 0$ , considerando como hipótesis nula  $H_0 : \mu_1 = \mu_2$ , donde todas las medias son iguales, mientras la hipótesis alternativa  $H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$ . Con ello se acepta con una confianza del 95% y un  $\alpha$  del 0.05 la hipótesis alternativa. Concluyendo que al menos uno de los factores es diferente estadísticamente.

Respecto al Gap, generar de uno a cinco grupo sí afecta significativamente Valor  $P < 0.05$ , ya que el gap va en aumento por cada grupo creado. También el número de vacas con Valor  $P < 0.05$  afecta significativamente en el Gap. El número de periodos con  $ValorP > 0.05$  no afecta en lo absoluto al Gap, debido a que se puede tener 12, 24, o 36 periodos sin tener incremento en el Gap.

Tabla 4.4: Anova Costo

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor p</b>
Grupos	4	18310550	4577637	19.73	0.00
Periodo	2	1.86E+11	93177544298	401677.81	0.00
Vacas	2	2.59E+12	1.30E+12	5586539.09	0.00
Interacciones de 2 términos	20	90216102064	4510805103	19445.57	0.00
Grupos*Periodo	8	860731	107591	0.46	0.864
Grupos*Vacas	8	9666890	1208361	5.21	0.002
Periodo*Vacas	4	90205574443	22551393611	97216.5	0.00
Error	16	3711534	231971		
Total	44	2.87E+12			

Tabla 4.5: Anova Gap

<b>Fuente</b>	<b>GL</b>	<b>SC Ajust.</b>	<b>MC Ajust.</b>	<b>Valor F</b>	<b>Valor P</b>
Grupos	4	967.59	241.897	16761.34	0.00
Periodo	2	0.05	0.023	1.58	0.237
Vacas	2	73.01	36.507	2529.62	0.00
Interacciones de 2 términos	20	19.61	0.981	67.95	0.00
Grupos*Periodo	8	0.1	0.012	0.84	0.582
Grupos*Vacas	8	19.12	2.39	165.62	0.00
Periodo*Vacas	4	0.39	0.098	6.82	0.002
Error	16	0.23	0.014		
Total	44	1060.49			

## CAPÍTULO 5

# CONCLUSIONES

---

## Bosquejo

---

### 5.1. Trabajo futuro . . . . . 53

---

En ésta investigación se puede concluir que el método exacto nos da resultados de gran trascendencia real para la nutrición de los animales en un finca ganadera bovina, dando resultados que minimizan costos de nutrición y operación de éstas, dado que la alimentación de las vacas es muy sustancial, porque de ésto depende la productividad de los animales y también el costo por alimentarlas. El modelo da resultados importantes para los diferentes casos de estudio, tal es el caso de cumplir con el objetivo de minimizar el costo por crear cinco grupos en los casos de estudio de 100 vacas en periodos de 12, 24 y 36. En tamaños de 500 y 1000 en los distintos periodos no se pudo obtener el valor óptimo con cinco grupos, sin embargo se obtuvieron buenos resultados con tres grupos. El modelo se resolvió en 2 horas promedio y arrojó un gap promedio menor del 13 %.

En el análisis estadístico en la variable de respuesta de «costo» se pudo observar que el factor «grupo» sí afecta significativamente, por lo que con cinco grupos se puede encontrar el valor óptimo en algunos casos. Así también para los «periodos» resultó significativo, lo que traduce incremento en el costo por aumento en los periodos. Respecto a la variable de respuesta «gap», crear grupos si afecta significativamente

el crecimiento de éste y por ende se vuelve más complejo resolverlo.

Es importante destacar que la contribución de éste trabajo es la herramienta que se desarrolló para los tomadores de decisiones en las fincas ganaderas, para mejorar la eficiencia de los recursos financieros y agrícolas del establecimiento, además de facilitar las actividades de alimentación y ordeña.

Es valioso señalar también que en el estado del arte no se encontraron trabajos que resuelvan éste tipo de problemas en específico, contemplando vacas con distintos pesos, vacas en distintos periodos o semanas de lactancia, además de la técnica de agrupación que se desarrolló, haciendo más dinámico la asignación, por lo cuál éste trabajo viene a suplir una necesidad latente en las fincas ganaderas, también el avance en el área de investigación de operaciones sobre éste nicho.

## 5.1 TRABAJO FUTURO

Como trabajo futuro se espera considerar más características de la vacas, tales como días de preñez, número de parto que tiene cada vaca, entre otros. El número de parto que tiene cada animal es importante, debido a que vacas que están en los dos primeros partos necesitan distintos tipos de alimentación, lo anterior dado que estas aún se encuentran en etapas de crecimiento. También implementar estrategias matemáticas que nos permitan disminuir los tiempos de ejecución para obtener mejores resultados que el modelo exacto. Así como implementar una metaheurística al problema de agrupamiento para poder comparar los resultados obtenidos por el método exacto. También ampliar el modelo formando grupos con la finalidad de aumentar producción de leche.

## APÉNDICE A

# GENERALIDADES DE OPTIMIZACIÓN

---

### Bosquejo

---

<b>A.1. Generalidades de Optimización . . . . .</b>	<b>55</b>
A.1.1. Antecedentes de Optimización . . . . .	55
A.1.2. Técnicas para resolver los modelos de optimización . . . . .	56
A.1.3. Algoritmos para la resolución de problemas de optimiza- ción lineal . . . . .	57
A.1.4. Heurística y Metaheurística . . . . .	57
<b>A.2. NRC . . . . .</b>	<b>58</b>

---

Este capítulo se aborda el significado de optimización matematicamente, una breve reseña sobre investigación de operaciones y algunas de sus aplicaciones. También los métodos clásicos que existen para resolver este tipo de problemas.

## A.1 GENERALIDADES DE OPTIMIZACIÓN

### A.1.1 ANTECEDENTES DE OPTIMIZACIÓN

Desde la prehistoria, los seres humanos han tenido un interés permanente en la optimización (buscar mejores resultados) del rendimiento de los sistemas que utilizan. Hoy en día, a todas las decisiones que se toman en el trabajo, y lo que afectan a la vida cotidiana, por lo general tienen el objetivo de seleccionar una opción de acuerdo a ciertos criterios, que muchas de las veces son limitados; lo anterior de acuerdo con Murty[40].

En el libro de Hiller[41] nos menciona que el inicio de la actividad llamada investigación de operaciones (IO) es atribuible a la necesidad de los servicios militares prestados al inicio de la Segunda Guerra Mundial. Debido a los esfuerzos bélicos, existía la urgente necesidad de asignar recursos escasos a las distintas maniobras militares así como a las actividades que componían cada operación de la manera más eficaz. Por esta necesidad, las administraciones militares estadounidense y británica conformaron grupos de trabajo con un gran número de científicos para que aplicaran su conocimiento para así tener una ventaja táctica para éste como otros problemas estratégicos y operativos. Estos grupos de científicos fueron los primeros equipos de IO, debido al desarrollo de métodos eficaces para utilizar la nueva herramienta que representaba el radar, los científicos contribuyeron al triunfo en la batalla aérea que libró Gran Bretaña .

Actualmente, la optimización ha tenido un efecto impresionante en el mejoramiento de la eficiencia de numerosas organizaciones de todo el mundo. Sus aplicaciones son de carácter multidisciplinario y se pueden obtener reducciones o incrementos, dependiendo del objetivo del tomador de decisión.

### Estructura matemático de un problema de Optimización

Una estructura matemática se puede considerar como un conjunto de delimitaciones que dan como origen un modelo matemático. Donde un problema de Optimización puede representarse matemáticamente de acuerdo con el libro de Murty [42], un ejemplo de éste se describe a continuación:

$$\begin{aligned} &\text{Minimizar } f(x) \\ &\text{Sujeto a } g(x) = 0 \\ &x \in G \end{aligned}$$

En el libro Murty[40] expone que las diversas medidas de desempeño suelen llamarse función objetivo en el modelo matemático. Para optimizar una función objetivo significa encontrar la combinación de parámetros que maximicen o minimicen lo deseado. Si sólo hay una medida de rendimiento (por ejemplo, el beneficio total anual, o costo de producción por unidad, etc.), el modelo será con único objetivo (mono-objetivo). Cuando hay varias medidas de rendimiento, se obtiene un modelo multiobjetivo. Las variables de decisión representan las decisiones que se pueden tomar para afectar el valor de la función objetivo. Las restricciones del modelo son aquellas situaciones en donde se presentan limitaciones tangibles o intangibles.

#### A.1.2 TÉCNICAS PARA RESOLVER LOS MODELOS DE OPTIMIZACIÓN

Para resolver los modelos de optimización no se cuenta con una técnica general única, pero de acuerdo al tipo y la complejidad del modelo, los tomadores de decisiones determinan el método de solución acorde a éste. La técnica de IO más utilizada es la **programación lineal**. En Bazaraa et al.[43] enuncia que un problema de programación lineal es un problema de maximizar o minimizar una función lineal en presencia de restricciones lineales del tipo de desigualdad, igualdad o ambas.

La **programación no lineal** (en la cual las funciones o restricciones del modelo son no lineales) según Bazaraa et al.[44]. En el libro de Wolsey[45] expresa que la **Programación entera** se enfoca de generar estrategias matemáticas para resolver los problemas con variables discretas (enteros). Estas variables se utilizan para modelar indivisibilidades, y las variables 0/1 se utilizan para representar decisiones de encendido/apagado para comprar, invertir, contratar, en caso particular tomar una decisión y así sucesivamente. La **programación dinámica** (en la cuál el modelo original puede descomponerse en subproblemas más pequeños y manejables) es un procedimiento de optimización que es particularmente aplicable a problemas que requieren una secuencia de decisiones interrelacionadas. En Dreyfus et al.[46] señala que cada decisión transforma la situación actual a una nueva situación. Una secuencia de decisiones es generalmente igual a la suma de los valores de las decisiones y situaciones individuales en la secuencia. Otra técnica es la **programación estocástica** donde a los parámetros del modelo se les incorpora incertidumbre. Éstas son sólo algunas de las muchas herramientas de Investigación de Operaciones con que se cuenta para resolver un abanico amplio de situaciones.

### A.1.3 ALGORITMOS PARA LA RESOLUCIÓN DE PROBLEMAS DE OPTIMIZACIÓN LINEAL

Algunos algoritmos para solucionar problemas de optimización lineal son: método simplex, método simplex dual, algoritmo de punto interior, por mencionar algunos.

### A.1.4 HEURÍSTICA Y METAHEURÍSTICA

Cuando algunos modelos matemáticos no se les puede dar solución con cualquiera de los algoritmos de optimización disponibles. Para esos casos es necesario

abandonar la búsqueda de la solución óptima y simplemente buscar una buena solución aplicando una heurística o metaheurística. Las **heurísticas**, según Zanakis y Evans[47] son procedimientos simples, guiadas por el sentido común, y están destinados a proporcionar buenas soluciones, pero no necesariamente óptimas a problemas difíciles, de una manera fácil y rápido. El término **metaheurísticas** fue usado por primera vez en el trabajo de Glover [48]. En ese trabajo se menciona que una metaheurística puede ser visto como un método superpuesta sobre otra heurística. Y de acuerdo a esa definición podemos decir que las metaheurísticas son aquellas que buscan una solución más allá de la simple optimalidad local.

## A.2 NRC

El NRC (Nutrient Requirements of Dairy Cattle) [4] nos proporciona ecuaciones para poder predecir los requerimientos nutricionales de vacas, así como de otros animales domésticos. Hoy en día existen 7 ediciones de ésta, siendo la más reciente la edición del año 2001 para vacas lecheras. El contenido de ésta edición consta de 13 secciones. La primer sección nos presenta ecuaciones para poder predecir la ingesta de materia seca.

## APÉNDICE B

# RESUMEN DETALLADOS DE RESULTADOS DEL MODELO

---

Tabla B.1: Costo y gap promedio de 12 periodos para 100, 500 y 1000 vacas

<b>Grupos</b>	<b>Periodo</b>	<b>Vacas</b>	<b>Costo</b>	<b>GAP</b>
1	12	100	50700.54	0.00
2	12	100	49551.23	9.539321
3	12	100	49034.28	9.637954
4	12	100	48917.37	9.659594
5	12	100	48680.65	9.234109
1	12	500	244731.9	0.00
2	12	500	242733.5	12.19926
3	12	500	242348	12.08549
4	12	500	242366.5	12.57191
5	12	500	242929.6	12.36023
1	12	1000	490533.7	0.00
2	12	1000	489454	12.78661
3	12	1000	489985.1	12.88967
4	12	1000	490063.2	12.90876
5	12	1000	490385.5	12.96581

APÉNDICE B. RESUMEN DETALLADOS DE RESULTADOS DEL MODELO60

Tabla B.2: Costo y gap promedio de 24 periodos para 100, 500 y 1000 vacas

<b>Grupos</b>	<b>Periodo</b>	<b>Vacas</b>	<b>Costo</b>	<b>GAP</b>
1	24	100	68254.98	0.00
2	24	100	66673.82	9.616919
3	24	100	65983.1	9.72936
4	24	100	65983.1	9.354105
5	24	100	65609.3	8.933944
1	24	500	336011.4	0.00
2	24	500	333266.5	12.24306
3	24	500	333390.1	12.58624
4	24	500	333390.1	12.83772
5	24	500	335152.2	12.67988
1	24	1000	680959	0
2	24	1000	680104.3	12.94908
3	24	1000	680668.7	12.92663
4	24	1000	680668.7	12.95143
5	24	1000	680841.1	12.9554

Tabla B.3: Costo y gap promedio de 36 periodos para 100, 500 y 1000 vacas

<b>Grupos</b>	<b>Periodo</b>	<b>Vacas</b>	<b>Costo</b>	<b>GAP</b>
1	36	100	79978.1	0.00
2	36	100	78024.3	9.247551
3	36	100	77178.65	9.468829
4	36	100	76726.81	9.041037
5	36	100	76493.96	8.771937
1	36	500	390855.6	0.00
2	36	500	387560.5	12.2145
3	36	500	389790.6	12.73042
4	36	500	389834.5	12.77933
5	36	500	389427.4	12.68671
1	36	1000	782490	0.00
2	36	1000	781741.3	12.90032
3	36	1000	781886.5	12.92201
4	36	1000	782186.3	12.95616
5	36	1000	782252.9	12.96318

# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] G.V. Durán, A.B. Medina, and L.O. Prado. *La ganadería en México*. Temas selectos de geografía de México. Instituto de Geografía, UNAM, 2001.
- [2] Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera México. Boletín de leche enero-marzo de 2015. Recurso libre disponible en [http://www.siap.gob.mx/wp-content/uploads/boletinleche/boletinlechenero-marzo\\_2015.pdf](http://www.siap.gob.mx/wp-content/uploads/boletinleche/boletinlechenero-marzo_2015.pdf).
- [3] Juan A Rivera, Onofre Muñoz-Hernández, Martín Rosas-Peralta, Carlos A Aguilar-Salinas, Barry M Popkin, and Walter C Willett. Consumo de bebidas para una vida saludable: recomendaciones para la población mexicana. *Boletín médico del Hospital Infantil de México*, 65(3):208–237, 2008.
- [4] NRC (National Research Council). Nutrient requirements of dairy cattle. *7th rev. ed.*, page 381, 2001.
- [5] Frederick V Waugh. The minimum-cost dairy feed (an application of "linear programming"). *Journal of Farm Economics*, pages 299–310, 1951.
- [6] Walter D Fisher and Leonard W Schruben. Linear programming applied to feed-mixing under different price conditions. *Journal of Farm Economics*, 35(4):471–483, 1953.
- [7] Donald L Bath and Loren F Bennett. Development of a dairy feeding model for maximizing income above feed cost with access by remote computer terminals. *Journal of Dairy Science*, 63(8):1379–1389, 1980.

- 
- [8] National Research Council (US). Subcommittee on Dairy Cattle Nutrition. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle*. Number 3. National Academies, 1978.
- [9] VE Cabrera. A large markovian linear program to optimize replacement policies and dairy herd net income for diets and nitrogen excretion. *Journal of dairy science*, 93(1):394–406, 2010.
- [10] FJ Kleyn. Mathematical programming model for the optimisation of nutritional strategy for a dairy cow.
- [11] M Akif Şahman, Mehmet Çunkaş, Şeref İnal, Fatma İnal, Behiç Coşkun, and Uğur Taşkıran. Cost optimization of feed mixes by genetic algorithms. *Advances in Engineering Software*, 40(10):965–974, 2009.
- [12] O Samuel Olugbenga, O Olusegun Abayomi, A Adebimpe Oluseye, and T Akinbowale Taiwo. Optimized nutrients diet formulation of broiler poultry rations in nigeria using linear programming. *J Nutr Food Sci S*, 14:2, 2015.
- [13] VO Oladokun and A Johnson. Feed formulation problem in nigerian poultry farms: a mathematical programming approach. *American Journal of Scientific and Industrial Research*, 2012.
- [14] CT Whittemore and RH Fawcett. Theoretical aspects of a flexible model to stimulate protein and lipid growth in pigs. *Animal Production*, 22(01):87–96, 1976.
- [15] RH Fawcett, CT Whittemore, and CM Rowland. Towards the optimal nutrition of fattening pigs: Part ii-least cost growth and the use of chemical value in diet formulation. *Journal of Agricultural Economics*, 29(2):175–182, 1978.
- [16] RH Fawcett, CT Whittemore, and CM Rowland. Towards the optimal nutrition of fattening pigs: Part i-isoquants and isocomposition functions. *Journal of Agricultural Economics*, 29(2):165–173, 1978.

- 
- [17] Dipti Singh and Pratiksha Saxena. Optimization of livestock feed by blend of linear programming and somga. In *Proceedings of Fourth International Conference on Soft Computing for Problem Solving*, pages 341–352. Springer, 2015.
- [18] Gerald W Dean. Production functions and linear programming models for dairy cattle feeding. 1972.
- [19] PR Tozer. Least-cost ration formulations for holstein dairy heifers by using linear and stochastic programming. *Journal of dairy science*, 83(3):443–451.
- [20] D Ocampos, R Allende, F García, and C Aguilar. Producción de leche a pastoreo en el subtrópico con ganado cruza holando cebú: Desarrollo y validación de un modelo de simulación. *Archivos de zootecnia*, 49(188):457–468, 2000.
- [21] AS Kalantari, H Mehrabani-Yeganeh, M Moradi, AH Sanders, and A De Vries. Determining the optimum replacement policy for holstein dairy herds in iran. *Journal of dairy science*, 93(5):2262–2270, 2010.
- [22] Tahir Rehman and Carlos Romero. Goal programming with penalty functions and livestock ration formulation. *Agricultural systems*, 23(2):117–132, 1987.
- [23] NR St Pierre and WR Harvey. Incorporation of uncertainty in composition of feeds into least-cost ration models. 1. single-chance constrained programming. *Journal of Dairy Science*, 69(12):3051–3062, 1986.
- [24] NR St Pierre and WR Harvey. Incorporation of uncertainty in composition of feeds into least-cost ration models. 2. joint-chance constrained programming. *Journal of Dairy Science*, 69(12):3063–3073, 1986.
- [25] NR St Pierre and WR Harvey. Uncertainty in composition of ingredients and optimal rate of success for a maximum profit total mixed ration1. *Journal of Dairy Science*, 69(12):3074–3086, 1986.
- [26] Pablo Lara. Multiple objective fractional programming and livestock ration formulation: a case study for dairy cow diets in spain. *Agricultural Systems*, 41(3):321–334, 1993.

- [27] Tahir Rehman and Carlos Romero. Multiple-criteria decision-making techniques and their role in livestock ration formulation. *Agricultural Systems*, 15(1):23–49, 1984.
- [28] A García Martínez, JJ Rodríguez Alcaide, and DEM Ruiz. Optimización del engorde de bovinos en pastoreo en la pampa argentina mediante programación lineal. *Investigación agraria: Producción y sanidad animales*, 13:99, 1998.
- [29] EE Wildman, GM Jones, PE Wagner, RL Boman, HF Troutt, and TN Lesch. A dairy cow body condition scoring system and its relationship to selected production characteristics. *Journal of Dairy Science*, 65(3):495–501, 1982.
- [30] RJ Grant and JL Albright. Effect of animal grouping on feeding behavior and intake of dairy cattle. *Journal of dairy science*, 84:E156–E163, 2001.
- [31] A Gumen, A Keskin, G Yilmazbas-Mecitoglu, E Karakaya, and MC Wiltbank. Dry period management and optimization of post-partum reproductive management in dairy cattle. *Reproduction in domestic animals*, 46(s3):11–17, 2011.
- [32] Pratiksha Saxena and Neha Khanna. Formulation and computation of animal feed mix: Optimization by combination of mathematical programming. In *Emerging ICT for Bridging the Future-Proceedings of the 49th Annual Convention of the Computer Society of India (CSI) Volume 1*, pages 621–629. Springer, 2015.
- [33] PDP Wood. Algebraic models of the lactation curves for milk, fat and protein production, with estimates of seasonal variation. *Anim. Prod*, 22(1):35–40, 1976.
- [34] AA Fadlelmoula, IA Yousif, and AM Nikhaila. Lactation curve and persistency of crossbred dairy cows in the sudan. *J Appl Sci Res*, 3(10):1127–1133, 2007.
- [35] CB Wasike, AK Kahi, and KJ Peters. Modelling of lactation curves of dairy cows based on monthly test day milk yield records under inconsistent milk recording scenarios. *Animal*, 5(11):1780, 2011.

- [36] M. Rebeca Acosta-Rodríguez J. César Vinay-Vadillo, J. Alfredo Villagómez-Cortés and Clément Rocher. Shapes of lactation curves of f1 (holstein x zebu) cows in the humid tropic of veracruz, méxico. *International Journal of Animal and Veterinary Advances*, 4(6):370–377, 2012.
- [37] JBM Wilmink. Adjustment of test-day milk, fat and protein yield for age, season and stage of lactation. *Livestock Production Science*, 16(4):335–348, 1987.
- [38] J Dijkstra, J France, MS Dhanoa, JA Maas, MD Hanigan, AJ Rook, and DE Beaver. A model to describe growth patterns of the mammary gland during pregnancy and lactation. *Journal of Dairy Science*, 80(10):2340–2354, 1997.
- [39] TE Ali and LR Schaeffer. Accounting for covariances among test day milk yields in dairy cows. *Canadian Journal of Animal Science*, 67(3):637–644, 1987.
- [40] Katta G Murty. Optimization models for decision making: Volume. *University of Michigan, Ann Arbor*, 2003.
- [41] Hillier Lierberman. *Introducción a la Investigación de Operaciones*. McGraw-Hill, México, DF, 8 edition, 2006.
- [42] Katta G Murty. *Optimization for decision making*. Springer, 2009.
- [43] Mokhtar S Bazaraa, John J Jarvis, and Hanif D Sherali. *Linear programming and network flows*. John Wiley & Sons, 2011.
- [44] Mokhtar S Bazaraa, Hanif D Sherali, and Chitharanjan M Shetty. *Nonlinear programming: theory and algorithms*. John Wiley & Sons, 2013.
- [45] Laurence A Wolsey. *Integer programming*, volume 42. Wiley New York, 1998.
- [46] Stuart E. Dreyfus and Averill M. Law. *Art and Theory of Dynamic Programming*. Academic Press, Inc., Orlando, FL, USA, 1977.
- [47] Stelios H Zanakis and James R Evans. Heuristic “optimization”: Why, when, and how to use it. *Interfaces*, 11(5):84–91, 1981.

- [48] Fred Glover. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research*, 13(5):533–549, 1986.
- [49] Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación. Situación actual y perspectiva de la producción de leche de ganado bovino en México. Recurso libre disponible en <http://www.sagarpa.gob.mx/ganaderia/Publicaciones/Lists/Estudios%20de%20situacion%20de%20leche>
- [50] George J Stigler. The cost of subsistence. *Journal of farm economics*, 27(2):303–314, 1945.
- [51] George Bernard Dantzig. *Linear programming and extensions*. Princeton university press, 1998.
- [52] George B Dantzig. The diet problem. *Interfaces*, 20(4):43–47, 1990.
- [53] Susan Garner Garille and Saul I Gass. Stigler’s diet problem revisited. *Operations Research*, 49(1):1–13, 2001.
- [54] Katta G Murty. *Linear programming*. 1983.
- [55] Hamdy A Taha. *Investigación de operaciones*. Pearson Educación, 2004.
- [56] Sushmita Mitra and Tinku Acharya. *Data mining: multimedia, soft computing, and bioinformatics*. John Wiley & Sons, 2005.
- [57] Hernández Valadez Edna and Ingeniería Eléctrica. Algoritmo de clustering basado en entropía para descubrir grupos en atributos de tipo mixto.
- [58] Khaled S Al-Sultan. A tabu search approach to the clustering problem. *Pattern Recognition*, 28(9):1443–1451, 1995.
- [59] Hrishikesh D Vinod. Integer programming and the theory of grouping. *Journal of the American Statistical Association*, 64(326):506–519, 1969.
- [60] Shokri Z Selim and K1 Alsultan. A simulated annealing algorithm for the clustering problem. *Pattern recognition*, 24(10):1003–1008, 1991.

# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

---

Romel Wilmar Pérez González

Candidato para obtener el grado de  
Maestría en Ciencias  
en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

ASIGNACIÓN DE RECURSOS ALIMENTICIOS EN GANADERÍA  
BOVINA

Nací en la Colonia El Consuelo Ulapa el día 8 de Septiembre del año de 1988. Mis padres son Bertoldo Pérez Ramírez y Luz González Gabriel. Estudié la Licenciatura en Informática en el Instituto Tecnológico de Tapachula Chiapas en el periodo 2006 a 2010. En Enero del 2014 ingresé a la Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.