



UNIVERSIDAD  
**NACIONAL**  
DE COLOMBIA

# **ESTUDIO DEL EFECTO DEL CLIMA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE UN HATO BOVINO LECHERO DESDE LA DINÁMICA DE SISTEMAS**

**Ana Karina Cuartas Orozco**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agropecuarias  
Palmira, Valle del Cauca, Colombia

2021



# **ESTUDIO DEL EFECTO DEL CLIMA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE UN HATO BOVINO LECHERO DESDE LA DINÁMICA DE SISTEMAS**

**Ana Karina Cuartas Orozco**

Tesis de grado presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ciencias Agrarias**

Director:  
Magister y Zootecnista Hugo Sánchez Guerrero  
Codirector:  
PhD., Magister y Zootecnista Raúl Andrés Molina

Línea de Investigación: Producción Animal Tropical

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Ciencias Agropecuarias  
Palmira, Valle del Cauca, Colombia

2021



*Lo interesante del miedo es cuando el miedo te ha acompañado más veces de las que te ha salvado. Pues mira, salvarte lo hace una o dos veces, pero te cobra no dejándote saber que pudo pasar si lo intentabas. Y es distinto a cuando llega contigo al final del viaje, te abraza y se despide. Gracias miedo por acompañarme y permitirme llegar donde estoy.*

*Genrus*



# Declaración de obra original

Yo declaro lo siguiente:

He leído el Acuerdo 035 de 2003 del Consejo Académico de la Universidad Nacional. «Reglamento sobre propiedad intelectual» y la Normatividad Nacional relacionada al respeto de los derechos de autor. Esta disertación representa mi trabajo original, excepto donde he reconocido las ideas, las palabras, o materiales de otros autores.

Cuando se han presentado ideas o palabras de otros autores en esta disertación, he realizado su respectivo reconocimiento aplicando correctamente los esquemas de citas y referencias bibliográficas en el estilo requerido.

He obtenido el permiso del autor o editor para incluir cualquier material con derechos de autor (por ejemplo, tablas, figuras, instrumentos de encuesta o grandes porciones de texto).

Por último, he sometido esta disertación a la herramienta de integridad académica, definida por la universidad.

Ana Karina Cuartas Orozco

Nombre

Fecha 09/03/2021

## **Agradecimientos**

Agradezco a mis padres por ser una inspiración para mi vida, por todo el amor, por todo el apoyo y por las porras, a mis hermanos que siempre han estado al lado mío alentándome a seguir. Completo y especial agradecimiento a mi amor bonito, Armando Vargas quien depositó toda su confianza en mí y fue mi soporte en este camino hacia mi posgrado, quien me apoyó, me animó y me corrigió cuando fue necesario.

Los amigos, la familia que se escoge en vida, millones de gracias a todos, a mi sis de las velas, a mi amiga la viajera, a mis amigas de la U, a mis amigos de la fuente de soda, a Harold M. por toda la compañía durante el tiempo de cuarentena y pandemia, a vos gracias por todos los consejos, apoyo y aportes.

Especialmente agradezco a mi codirector PhD. Raúl Andrés Molina por la confianza depositada, por su apoyo y paciencia, por animarme a seguir y no desfallecer en el camino, por su tiempo y dedicación, gracias.

Gracias a mi director Hugo Sánchez Guerrero por su ánimo y aportes al desarrollo de mi documento de tesis.

Gracias al proyecto “Cuantificación de los impactos del clima en sistemas bovinos lecheros en el trópico bajo a través de minería de datos y modelación”, Convocatoria: 776-2017 Conformación de un banco de proyectos elegibles de generación de nuevo conocimiento – 2017 del programa nacional de ciencia, tecnología e innovación en ciencias agropecuarias, que aportó la información necesaria para el desarrollo de este trabajo.

## Resumen

### **Estudio del efecto del clima sobre la producción de un hato bovino lechero desde la dinámica de sistemas**

La influencia del clima sobre los sistemas ganaderos en condiciones de pastoreo es una realidad. Sin embargo, dadas las múltiples interacciones entre las diferentes variables climáticas: temperatura ( $T$ , °C), radiación solar ( $R_s$ , W/m<sup>2</sup>), precipitación ( $P_p$ ) y velocidad del viento ( $V_v$ , m.s-1)) y las variables asociadas a los hatos ganaderos (consumo de forraje, temperatura corporal, entre otros), hacen que su entendimiento y análisis en pro de buscar estrategias encaminadas a la sostenibilidad sean complejos. El objetivo de este trabajo es estudiar la relación, a través de un enfoque sistémico que permita integrar el mayor número de variables asociadas al problema de estudio. El modelo de simulación construido se formuló con información primaria (sensores) y secundaria (encuestas semiestructuradas) de un hato bovino dedicado a la producción de leche, ubicado en el departamento del Valle del Cauca. Los resultados mostraron como las variables climáticas afectan el comportamiento ingestivo de las vacas, la calidad del forraje consumido y la respuesta fisiológica de los animales (temperatura corporal). Adicionalmente, al implementar escenarios de cambio climático (RCP8,5 para los años 2030 y 2050) con respecto al actual del sistema ganadero de estudio, se pudo estimar el efecto sobre la producción del sistema. En conclusión, la metodología de dinámica de sistemas permitió entender las relaciones existentes entre el sistema biológico analizado y las variables atmosféricas incluidas, demostrando el efecto negativo del clima y posibles escenarios de cambio climático sobre la producción del sistema ganadero.

**Palabras clave:** bovinos, pastoreo, dinámica de sistemas, sensores, trópico.

## Abstract

### **Study of the effect of climate on the production of a dairy herd from the dynamics of systems**

The influence of climate on livestock systems under grazing conditions is a reality. However, given the multiple interactions between the different climatic variables: temperature ( $T$ , ° C), solar radiation ( $R_s$ , W / m<sup>2</sup>), precipitation ( $P_p$ ) and wind speed ( $V_v$ , ms<sup>-1</sup>) and the variables associated with livestock herds (forage consumption, body temperature, among others), make their understanding and analysis in favor of seeking strategies aimed at sustainability complex. The objective of this work is to study the relationship, through a systemic approach that allows integrating the largest number of variables associated with the study problem. The simulation model built was formulated with primary (sensors) and secondary (semi-structured surveys) information from a cattle herd dedicated to milk production, located in the department of Valle del Cauca. The results showed how the climatic variables affect the ingestive behavior of the cows, the quality of the forage consumed and the physiological response of the animals (body temperature). Additionally, by implementing climate change scenarios (RCP8.5 for the years 2030 and 2050) with respect to the current livestock system under study, the effect on the system's production could be estimated. In conclusion, the system dynamics methodology allowed understanding the existing relationships between the biological system analyzed and the atmospheric variables included, demonstrating the negative effect of the climate and possible climate change scenarios on the production of the livestock system..

**Keywords cattle, grazing, system dynamics, sensors, tropics.**

# Contenido

	Pág.
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XIII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XV</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas</b> .....	<b>XVI</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>1</b>
<b>1. Capítulo 1</b> .....	<b>5</b>
1.1 Planteamiento del problema.....	5
1.2 Hipótesis .....	5
1.3 . Objetivos .....	6
1.3.1 General.....	6
1.3.2 Específicos .....	6
<b>2. Revisión de literatura</b> .....	<b>7</b>
2.1 Clima y cambio climático .....	7
2.1.1 Variabilidad climática .....	8
2.1.2 Gases de efecto invernadero .....	9
2.1.3 Cambio climático .....	10
2.1.4 Modelos de circulación global (MSG) y Escenarios de Trayectorias de Concentración Representativas (RCP).....	11
2.2 Producción ganadera en el mundo.....	15
2.3 Ganadería en Colombia .....	16
2.3.1 Ganadería en el Valle del Cauca .....	18
2.4 Ganadería y clima .....	20
2.4.1 Relación del clima con la ganadería .....	20
2.4.2 Factores climáticos: .....	22
2.5 Sistema .....	25
2.6 Pensamiento Sistémico.....	26
2.6.1 Modelo.....	29
2.6.2 Tipos de modelos .....	29
2.7 Dinámica de sistemas .....	31
2.7.1 Metodología de modelación.....	31
2.7.2 Elementos para modelar en dinámica de sistemas .....	34
2.8 Software de programación de dinámica de sistemas.....	41
<b>3. Materiales y Métodos</b> .....	<b>43</b>

## XII ESTUDIO DEL EFECTO DEL CLIMA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE UN HATO BOVINO LECHERO DESDE LA DINÁMICA DE SISTEMAS

---

3.1	Localización .....	43
3.2	Datos del sistema productivo .....	44
3.3	Información climática .....	47
3.4	Información temperatura timpánica .....	47
3.5	Construcción del modelo.....	48
3.5.1	Componentes del modelo.....	49
3.6	Hipótesis dinámica.....	50
3.7	Diagramas de flujos y niveles.....	53
3.7.1	Submodelo: Estimación de consumo de pasto (MS) .....	53
3.7.2	Submodelo: Estimación de producción de leche por animal .....	54
3.7.3	Submodelo: Submodelo de hato lechero .....	57
3.7.4	Submodelo: temperatura timpánica .....	60
3.8	Validación y pruebas del modelo .....	64
3.8.1	Prueba de valoración de la estructura .....	64
3.8.2	Prueba de condiciones extremas .....	65
3.8.3	Prueba de análisis de sensibilidad.....	65
3.8.4	Análisis de políticas y escenarios .....	67
<b>4.</b>	<b>Resultados y Discusión.....</b>	<b>69</b>
4.1	Línea base.....	69
4.1.1	Componente hato lechero – alimentación.....	69
4.2	Escenario 1. Aumento FDN .....	74
4.3	Escenario 2. Efecto del cambio climático sobre la temperatura timpánica .....	75
<b>5.</b>	<b>Conclusiones .....</b>	<b>81</b>
	<b>Bibliografía .....</b>	<b>84</b>

## Lista de figuras

	Pág.
<b>Figura 2-1:</b> Emisiones antropógenos de CO2 anuales.....	13
<b>Figura 2-2:</b> <b>Orientación productiva de la ganadería en Colombia, 2018.</b> .....	17
<b>Figura 2-3:</b> Orientación productiva de la ganadería en el Valle del Cauca, 2018. ....	19
<b>Figura 2-4:</b> Esquema de condiciones ambientales para bovinos.....	21
<b>Figura 2-5:</b> Marco conceptual de un sistema básico. ....	27
<b>Figura 2-6:</b> Ejemplo de un sistema complejo. ....	28
<b>Figura 2-7:</b> Proceso interactivo del modelamiento. ....	32
<b>Figura 2-8:</b> Relaciones de causa y efecto .....	34
<b>Figura 2-9:</b> Bucle de retroalimentación positiva .....	35
<b>Figura 2-10:</b> Bucles de retroalimentación positiva y negativa.....	36
<b>Figura 2-11:</b> Bucles de retroalimentación positiva y negativa.....	37
<b>Figura 2-12:</b> Símbolo de nivel .....	37
<b>Figura 2-13:</b> Símbolo de flujo.....	38
<b>Figura 2-14:</b> Esquematación de niveles, flujos y retrasos usados en dinámica de sistemas	38
<b>Figura 2-15:</b> Ejemplo de un diagrama de bucle causal completo que enfatiza la importancia de usar señales de polaridad e indicadores de bucle para comprender el comportamiento del sistema.....	39
<b>Figura 2-16:</b> Diagrama formal .....	40
<b>Figura 2-17:</b> Valores iniciales y ecuaciones de la modelación .....	41
<b>Figura 2-18:</b> Comportamiento de la Población .....	41
<b>Figura 3-1:</b> Ubicación del sistema referencia donde se realizó el estudio dentro del departamento Valle del Cauca. ....	44
<b>Figura 3-2:</b> Diagrama causal de interacción de variables climáticas con el sistema de producción bovino de leche .....	51
<b>Figura 3-3:</b> Submodelo estimación consumo de pasto.....	53
<b>Figura 3-4:</b> Submodelo: estimación producción de leche por animal.....	55
<b>Figura 3-5:</b> Submodelo de hato ganadero lechero .....	58
<b>Figura 3-6:</b> Submodelo temperatura timpánica .....	61
<b>Figura 3-7:</b> Comportamiento de la precipitación y temperatura ambiental en el modelo	63
<b>Figura 3-8:</b> Prueba de Valoración de la estructura del modelo.....	64
<b>Figura 3-9:</b> Prueba de condiciones extremas a terneras de ordeño .....	65
<b>Figura 3-10:</b> Prueba de análisis de sensibilidad por ingreso de venta de leche .....	67

## XIV ESTUDIO DEL EFECTO DEL CLIMA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE UN HATO BOVINO LECHERO DESDE LA DINÁMICA DE SISTEMAS

---

<b>Figura 4-1:</b>	Línea base del comportamiento del componente hato lechero durante un año	70
<b>Figura 4-2:</b>	Producción de leche Vaca/día durante un año con alimentación únicamente con forraje.....	71
<b>Figura 4-3:</b>	Producción de leche Vaca/día durante un año con alimentación con forraje y suplementación de concentrado (4Kg/día) .....	71
<b>Figura 4-4:</b>	Comportamiento de ingresos y producción de leche .....	73
<b>Figura 4-5:</b>	Temperatura corporal timpánica hora a hora.....	77
<b>Figura 4-6:</b>	Temperatura timpánica como línea base y aplicando un escenario RCP8.5 a mediano plazo (2030) .....	79
<b>Figura 4-7:</b>	Temperatura timpánica como línea base y aplicando un escenario RCP8.5 a largo plazo (2050).....	79

## Lista de tablas

	Pág.
<b>Tabla 2-1:</b> Potencial de calentamiento global de los gases de efecto invernadero .....	10
<b>Tabla 2-2:</b> Escenarios RCP con Forzamiento Radiactivo para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones GEI en el mundo.....	14
<b>Tabla 2-3:</b> Producción de leche en Colombia (2016-2020).....	18
<b>Tabla 3-1:</b> Principales variables utilizadas en modelo con sus respectivas unidades de medida y valores iniciales.....	45
<b>Tabla 3-2:</b> Tabla nutricional de concentrado comercial “Leche Standard 75” de Finca56	
<b>Tabla 4-1:</b> Tabla de resultados de producción de leche con la FDN en 64% y 66% (litros/vaca/día).....	74

# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Abreviaturas

### Abreviatura Término

Abreviatura	Término
FR	Fuerza radiactiva
GEI	Gases de efecto invernadero
FAO	Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
CMS	Consumo de materia seca
GWP	Potencial de calentamiento global
EB	energía bruta
RCP	Trayectorias de concentración representativas (siglas en ingles)
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático
PIB	Producto Interno Bruto
FEDEGAN	Federación Colombiana de Ganaderos
ICA	Instituto Colombiano Agropecuario
PS	Pensamiento sistémico
SSD	Sistemas de soporte de decisiones
TGS	Teoría general de sistemas
Cenicaña	Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia
FDN	Fibra detergente neutra
T	Temperatura ambiente
Hr	Humedad relativa
HL	Horas luz
Rs	Radiación solar
Vv	Velocidad del viento
Pp	Precipitación
CNCPS	Cornell Net Carbohydrate and Protein System
EM	Energía metabolizable
EN	Energía neta
NEm	Energía neta de mantenimiento (siglas en ingles)
NEa	Energía neta de actividad (siglas en ingles)
To	Terneras de ordeño
TI	Terneras de levante
Nv	Novillas de vientre

**Abreviatura Término**

---

$\bar{T}_m$	Tasa de mortalidad
LB	Línea base
CC	Cambio climático
$T_c$	Temperatura corporal

**Abreviatura Término**

---

<i>1.LT</i>	Primera ley de la termodinámica
<i>DF</i>	Dimension fundamental
<i>RFF</i>	Racimos de fruta fresca



# Introducción

La actividad antropogénica durante varios siglos ha dado como resultado aumentos significativos en niveles de dióxido de carbono atmosférico (CO<sub>2</sub>), algunas alteraciones biológicas en las propiedades del suelo por el uso continuo y cambios de uso de la tierra, entre otros; resultado de ello es la variabilidad climática, lo cual es un fenómeno que genera fluctuaciones del clima en cortos periodos, principalmente aumento de temperatura ambiental, cambios en la distribución de las precipitaciones, entre otros; y que al final se ve reflejado en la agricultura tanto a nivel local y como a nivel global (Arias et al., 2008; Nardone et al., 2010)

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático con sus siglas en ingles IPCC afirma que entre 1880 – 2012 la temperatura ha incrementado en promedio 0,85 °C en el planeta, y afirma que el calentamiento en el planeta es inequívoco, y que el resultado que produce la actividad humana continuará en el tiempo en escalas que son asociadas con los procesos climáticos y las retroalimentaciones, por ultimo propone unos escenarios de trayectorias de concentración representativas (RCP) (Una trayectoria de concentración representativa es una trayectoria de concentración de gases de efecto invernadero adoptada por el IPCC) para los años 2050 y 2100 donde el aire en la superficie del planeta podría cambiar, proponiendo un escenario bajo donde la temperatura varia de 1,1 a 2,9 °C y de 2,4 a 6,4 en escenarios conservador y extremo respetivamente (IPCC, 2007). Estos cambios ya se empiezan a evidenciar en tanto en sistemas físicos como humanos, ejemplo de ello es el deshielo del permafrost, aumento en el nivel de mar, la contracción de los glaciares y en el caso de este trabajo de investigación, el efecto que produce el aumento de la temperatura a los sistemas de producción agropecuaria y las consecuencias que ellos trae (Lorente Saiz, 2010).

La variabilidad climática no solo afecta el bienestar de los animales, afecta el desempeño productivo y reproductivo en los sistemas de producción. En las próximas décadas se espera un aumento en la demanda de productos de origen animal. Por lo tanto, la

preocupación actual por el confort térmico en los sistemas de producción se evidencia principalmente en países que ocupan zonas tropicales y en países de zonas templadas donde la alta temperatura ambiental se está convirtiendo en un problema (Bertocchi et al., 2014).

A nivel mundial, la ganadería es una actividad económica que se destaca principalmente por combatir la pobreza y más en zonas rurales de países en desarrollo ya que aporta a nivel de estrategia, de sostenibilidad y subsistencia familiar. Acorde a lo anterior, la creciente preocupación por los efectos del clima a los sistemas agropecuarios es justificable ya que no solo afecta a países en zonas tropicales si no a países en zonas templadas, convirtiéndose en un problema, afectando la producción de forraje y cultivos, el desempeño productivo, reproductivo, el estado metabólico y de salud y la respuesta inmunológica en los animales. (Nardone et al., 2010).

Según FEDEGAN (2016), el 95% de los sistemas de producción lechera en Colombia se encuentran en pastoreo, y sin duda, una de las preocupaciones más evidentes son los efectos de la variabilidad climática sobre estos sistemas y por supuesto sobre la seguridad alimentaria. Estos efectos producen cambios en la temperatura, humedad, radiación solar, velocidad del viento, afectando de forma directa a los animales y condicionando los pastizales y cosechas para alimentación de estos. Desde hace medio siglo, aproximadamente, se han venido estudiando estos efectos logrando entender la respuesta fisiológica y comportamental de los animales frente a esta situación ya que ejercen un impacto significativo en la economía de los productores por el efecto que ocurre en la eficiencia reproductiva, salud y bienestar animal pero principalmente en la producción y calidad de la leche (Arias et al., 2008; Lorente Saiz, 2010; Pezo, 2019).

Sin embargo los sistemas de producción son complejos y para entenderlos se requiere de herramientas que permitan comprender el comportamiento de todos los elementos y las interacciones que existen entre ellos, entonces, aparecen herramientas metodológicas como el pensamiento sistémico, que a través de la metodología de dinámica de sistemas permite estudiar y entender cómo se relacionan los animales con el entorno permitiendo incorporar variables que permitan el aprendizaje y comportamientos de estos.

---

La investigación finalmente propone, además de la construcción de un modelo de simulación mediante la metodología de dinámica de sistemas, recopilar información climática, comportamental y fisiológica del sistema ganadero incluido en el estudio para brindar las bases necesarias a futuro, siendo una forma de incentivar a mayor profundidad este tipo de investigaciones para así evaluar el impacto real del ambiente sobre los sistemas de producción y de esta manera establecer estrategias de adaptabilidad a la variabilidad climática, es por ello que el objetivo principal que se ha planteado la presente investigación es el comprender el efecto de las variables climáticas (temperatura ambiental, radiación solar, precipitación y velocidad del viento) sobre la producción de un hato bovino lechero bajo condiciones de pastoreo desde la construcción de un modelo de simulación a partir de la metodología de la dinámica de sistemas.



# 1. Capítulo 1

## 1.1 Planteamiento del problema

La ganadería en Colombia se basa en gran medida en sistemas de pastoreo (Chará et al., 2016) en su gran mayoría de forma extensiva, generando sistemas ineficientes con bajos índices de rentabilidad. El clima tiene una influencia fuerte sobre la producción ganadera. Durante todo el año los animales se encuentran expuestos directamente a las variables climáticas (temperatura ambiente, radiación solar, precipitación y viento), lo cual tiene un efecto directo sobre la respuesta de los animales (salud, fisiología, producción y reproducción) e indirectamente sobre la calidad de las pasturas que consumen (baja producción y calidad de material forrajero) (Gaughan et al., 2009; Scharf et al., 2011).

La principal limitante para afrontar las problemáticas antes mencionadas y plantear estrategias de sostenibilidad acordes con las condiciones productivas de cada sistema, es la manera reduccionista en que se han abordado los problemas encontrados, enfocándose en respuestas individuales ignorando la interdependencia de las variables asociadas al sistema (Haro Reyes & Gómez Bravo, 2018).

Por lo anteriormente expuesto, surge la necesidad de recurrir a nuevos enfoques de estudio, cómo, por ejemplo, el pensamiento sistémico y su lenguaje de dinámica de sistemas, el cual permite entender el comportamiento de los sistemas en función de la estructura de investigación propuesta, y su respuesta a posibles políticas y escenarios

## 1.2 Hipótesis

A través del uso de herramientas como los modelos mecanísticos de simulación se podrá entender y analizar la relación existente entre el clima (temperatura ambiente, radiación

solar, precipitación y velocidad del viento) y los bovinos dedicados a la producción de leche bajo condiciones de pastoreo evaluando las respuestas de producción de leche y consumo de forraje.

## **1.3 . Objetivos**

### **1.3.1 General**

Estudiar el efecto de las variables climáticas (temperatura ambiental, radiación solar, precipitación y velocidad del viento) sobre la producción de un hato bovino lechero bajo condiciones de pastoreo a través de un modelo de simulación utilizando la metodología de dinámica de sistemas.

### **1.3.2 Específicos**

1. Diseñar diagramas causales y formales del sistema ganadero bovino que permita la incorporación de variables ambientales, fisiológicas y productivas asociadas al problema de estudio.
2. Formular el modelo con el uso de información obtenida de un sistema bovino dedicado a la producción de leche en el Valle del Cauca
3. Evaluar escenarios de cambio climático para evaluar la respuesta del sistema productivo y su desempeño

## **2.Revisión de literatura**

### **2.1 Clima y cambio climático**

Antes de abordar el tema de cambio climático, se hace importante definir la diferencia entre tiempo y clima y otros conceptos. Según la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio de Estados Unidos (Nasa), la diferencia entre ambos términos es la medida del tiempo. Mientras que el tiempo atmosférico son las condiciones en un lapso corto, el clima se mide por periodos más largo (hasta años).

Ahora, el tiempo atmosférico es el estado físico de la atmósfera caracterizado valores instantáneos de las variables atmosféricas (presión, humedad, temperatura, velocidad del viento, entre otras) en un lugar o instante determinado, o por los cambios y valores medios de dichas variables durante un plazo de tiempo relativamente corto, (días semanas). El clima representa las condiciones medias del tiempo atmosférico, es el conjunto fluctuante de las condiciones atmosféricas, caracterizado por la evolución de los estados del tiempo observados en una porción determinada de tiempo, abarca desde un año hasta millones de años. La descripción estadística permite comparar valores de las variables que se repiten cada año, cada mes o cada día, y caracterizar el clima del área geográfica seleccionada: seco, húmedo, árido, templado, etc. (Garea Moreda et al., 2014).

Las variables climáticas se relacionan con la atmosfera, básicamente y los procesos predominantes en ella de un lugar o región están relacionados con la superficie terrestre, incluidas las cortezas continental y oceánica y parte del manto superior (litosfera), los océanos, mares interiores, ríos y aguas subterráneas (hidrosfera) y las zonas terrestres cubiertas por hielo (criósfera) (Costantini et al., 2018).

### **2.1.1 Variabilidad climática**

Históricamente el clima ha presentado variaciones en diferentes escalas (años, milenios) y estas variaciones se han originado por cambios en la forma de interacción entre los diferentes componentes del sistema climático y en los factores forzantes (Benavides & Leon, 2007).

El término variabilidad se utiliza para indicar desviaciones de las estadísticas climatológicas en períodos de meses, estaciones o años, con respecto a estadísticas de largo plazo referidas al mismo período y se mide por esas desviaciones conocidas como anomalías. La variabilidad por tanto constituye las variaciones en el estado medio o en otros parámetros estadísticos del clima en todas las escalas temporales y espaciales que sobrepasen eventos individuales del estado del tiempo. El clima presenta una variabilidad interna debido a procesos internos naturales del sistema climático y una variabilidad externa como consecuencia de variaciones en las fuerzas externas naturales o antropogénicas (Rohrer & Chauwecker, 2016).

La variación del clima ha sido constante durante toda la historia del planeta, modificando periodos secos y de lluvias, haciéndolos más prolongados o cortos y esto ha hecho que el hombre, los animales y los sistemas de producción se habitúen a los diferentes cambios que ha tenido la naturaleza (Buitrago-Guillen et al., 2018).

Cambio climático se le denomina a la variación del clima observada en períodos sucesivos de varias décadas. El cambio climático determina las diferencias en los valores medios de un elemento climático a lo largo del tiempo; esto significa que cualquier cambio climático significativo puede conducir a la creación de un nuevo clima normal y, por lo tanto, al ajuste de la actividad humana. Los procesos externos, como las fluctuaciones de la radiación solar, las fluctuaciones de los parámetros orbitales de la Tierra, los movimientos y la actividad de la corteza, pero también los procesos internos del sistema climático produce fluctuaciones y son factores de gran importancia en el cambio climático y en procesos internos (Benavides & Leon, 2007) .

Diferentes sustancias, procesos naturales son impulsores del cambio climático ya que logran alterar el balance de energía en la tierra, la que entra y la que sale, conllevando a un desequilibrio radioactivo teniendo como resultado las bajas o altas temperaturas en la tierra (Linsey, 2009).

### **2.1.2 Gases de efecto invernadero**

El efecto invernadero es un proceso natural que hace que sea posible la vida en la superficie terrestre es así que para mantener un balance energético la tierra remite al espacio, en forma de calor o radiación infrarroja la energía recibida del sol que calienta la superficie del planeta (IDEAM et al., 2015).

Desde la era preindustrial se ha experimentado que todas aquellas actividades que la humanidad ejecutaba generaron y pusieron en la atmosfera gran cantidad de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), Metano ( $\text{CH}_4$ ), Óxido Nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ) y otros gases de efecto invernadero (GEI), más de lo que la Biosfera y los océanos pueden asimilar, causando grandes incrementos de las concentraciones atmosféricas de los GEI conllevando a cambios climáticos (IDEAM et al., 2015), es así como estos GEI reducen la pérdida neta de radiación infrarroja hacia el espacio y evita la absorción solar, lo que provoca que la temperatura en la superficie sea más cálida (Ballesteros, 2007).

En el sector agropecuario los principales GEI emitidos son el dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), Metano ( $\text{CH}_4$ ) y el óxido nitroso ( $\text{NO}_2$ ) donde durante varios años mantuvieron sus niveles relativamente estables, pero sólo hasta cerca del siglo XVIII se incrementaron las emisiones de estos gases, alcanzando en el siglo XX un incremento de mayor magnitud, y esto es difícil de contradecir observando la temperatura media del planeta como se ha incrementado los últimos 150 años (Benavides & Leon, 2007; Romaniuk R et al., 2018).

El  $\text{CO}_2$  es el más importante de los gases de efecto invernadero de larga duración de la Tierra, absorbe menos calor por molécula que el metano u óxido nitroso, pero es más abundante y permanece en la atmósfera por mucho más tiempo. Y aunque el dióxido de carbono es menos abundante y menos poderoso que el vapor de agua en una base de molécula por molécula, absorbe longitudes de onda de energía térmica que el vapor de

agua no hace, lo que significa que se suma al efecto invernadero de una manera única (Lindsey & Dlugokencky, 2020), en la tabla 2-1 se puede observar el potencial de calentamiento global de los GEI, tiempo de permanencia en la atmosfera y la fuerza radiactiva que ejercen.

**Tabla 2-1:** Potencial de calentamiento global de los gases de efecto invernadero

GEI	Formula Química	Tiempo de permanencia en la atmosfera (años)	Fuerza Radiativa (Watt/m <sup>2</sup> ppb)	Potencial de calentamiento mundial para 100 años
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	Arriba de 100 años	1.4 x 10 <sup>5</sup>	1
Metano	CH <sub>4</sub>	12	3.7 x 10 <sup>4</sup>	21
Óxido Nitroso	N <sub>2</sub> O	114	3.03 x 10 <sup>3</sup>	310

*Fuente: (Naqvi & Sejian, 2011)*

El forzamiento radiativo (FR) o forzamiento climático es la diferencia entre la energía que ingresa o es absorbida por la tierra y la energía que es irradiada de vuelta. Quiere decir que un FR positivo calienta la tierra, ósea, recibe más energía de la luz solar que la que irradia al espacio, y un FR negativo significa que la tierra pierde más energía al espacio de la que está recibiendo del sol, lo que se traduce en enfriamiento. Típicamente, el forzamiento radiativo se cuantifica en unidades de vatios por metro cuadrado (Rohrer & Chauwecker, 2016).

### 2.1.3 Cambio climático

Cualquier cambio que altere la composición de la atmosfera, generando variabilidad en el clima a través del tiempo ya sea de forma natural o como resultado de actividades antropogénicas se le denomina cambio climático (IPCC, 2007). Diferentes sustancias y procesos naturales son impulsores del cambio climático ya que logran alterar el balance de energía en la tierra, la que entra y la que sale, conllevando a un desequilibrio radiativo, teniendo como resultado las bajas o altas temperaturas en la tierra (Steinfeld et al., 2007).

Las causas del cambio climático se deben principalmente al uso y quema de combustibles fósiles (carbón, petróleo, gas natural y otros), a la deforestación a gran escala (los árboles contienen mucho carbono y al quemarlos se libera CO<sub>2</sub>), pero también los cambios en las prácticas agrícolas, pecuarias y del uso del suelo (Benavides & Leon, 2007).

El cambio climático es, en parte, producto del incremento de las emisiones de GEI. Sin embargo, existe una diferencia entre variabilidad climática (ejemplo: el fenómeno del Niño) y cambio climático. La variabilidad climática se presenta cuando con cierta frecuencia un fenómeno genera un comportamiento anormal del clima, pero es un fenómeno temporal y transitorio. El cambio climático, por otra parte, denota un proceso que no es temporal y que puede verificarse en el tiempo revisando datos climáticos (ejemplo: la temperatura) (Corpoica & Barragán, 2015).

#### **2.1.4 Modelos de circulación global (MSG) y Escenarios de Trayectorias de Concentración Representativas (RCP)**

Según (IPCC, 2014) “La emisión continua de gases de efecto invernadero causará un mayor calentamiento y cambios duraderos en todos los componentes del sistema climático, lo que hará que aumente la probabilidad de impactos graves, generalizados e irreversibles para las personas y los ecosistemas”. Y plantea que es necesario reducir de manera sustancial la emisión de GEI a nivel mundial ya que depende principalmente del tamaño de la población, su estilo de vida, las actividades que se desarrollan, la forma en que es usada la energía, el suelo y otros recursos naturales.

Es así como aplicando modelos climáticos se puede generar una proyección del clima a futuro, en escenarios de emisiones o concentración de GEI como respuesta simulada de un sistema climático y estos se hacen empleando una jerarquía desde los simples hasta modelos climático integrales y modelos del sistema Tierra (IPCC, 2013).

Existen varios tipos de modelos climáticos utilizados atendiendo a su cobertura geográfica, se pueden clasificar en dos grandes tipos, **Modelos de Circulación Global** (MCG o GCM por sus siglas en ingles) que cubren todo el planeta y existen **Modelos Regionales** (MCR o RCM por sus siglas en ingles) que lo hacen es abarcar una región climática un poco más

limitada. En los GCM normalmente tienen una resolución entre 1000 y 200 km de cuadrícula (especialmente) lo que permite soportar la toma de decisiones a escala internacional (ejemplo, IPCC) pero no resulta igual a nivel regional o local principalmente en zonas donde el clima es altamente afectado por topografía y el uso del suelo. Lo que se suele realizar en estos casos son los RCM, que pueden llegar a tener resoluciones de entre 50 km y menos. Estos modelos suelen ser alimentados, en cuanto a condiciones de entorno de iniciación con datos de modelos globales (IPCC, 2013).

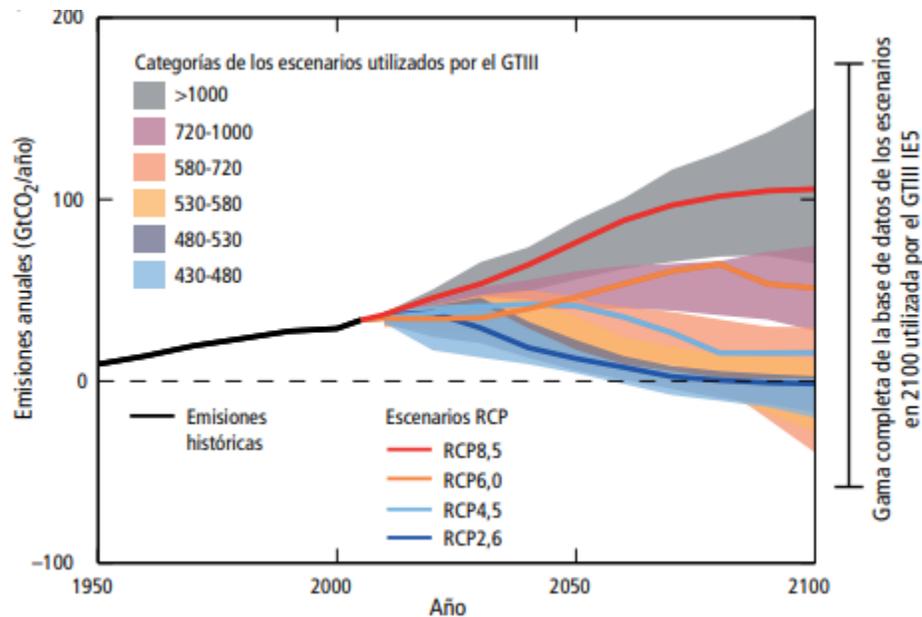
En los estudios de cambio climático, el recurso empleado son los Modelos de Circulación Global (MCG) y se utilizan para simular el clima a futuro y con ello se generan escenarios climáticos. Estos son una representación numérica tridimensional de la dinámica atmosférica y de la circulación global alrededor de la Tierra; en ellos, se simulan procesos físicos de la atmósfera, océanos y la superficie terrestre, y constituyen una herramienta para pronosticar la respuesta del clima a futuro ante los aumentos de los gases efecto invernadero en la atmósfera (Quiñones et al., 2018).

Los escenarios son descripciones donde se estiman, por medio de variables y gran número de información, un posible estado del clima en el futuro. Permite como objetivo principal anticiparse a un evento, proporcionando herramientas de apoyo para planificar y tomar decisiones a futuro (IDEAM et al., 2015).

Al emplearse en los estudios de cambio climático, se convierten en escenarios de dicho fenómeno, los cuales son proyectados a diferentes horizontes de tiempo. Un nuevo conjunto de escenarios de trayectoria de concentraciones representativas, se usaron para las nuevas simulaciones del modelo climático llevadas a cabo en el marco del Proyecto de inter-comparación de modelos de clima acoplados Proyecto Fase 5 (CMIP5 por sus siglas en inglés) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas. Estos escenarios se definen como escenarios que incluyen series de tiempo de las emisiones y concentraciones de la gama completa de gases de efecto invernadero y de aerosoles y gases químicamente activos, así como el uso del suelo y cobertura de la tierra (2013a IPCC, Glosario).

El IPCC en el reporte del 2013 presenta estos escenarios RCP los cuales se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total, para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5 Watt/m<sup>2</sup>; que usan para realizar proyecciones mediante escenarios donde describen ciertas trayectorias para la emisión y concentración de GEI en la atmosfera (Rohrer & Shauwecker, 2016). En la figura 2-1 se pueden observar las trayectorias que presentan 4 escenarios, el primer escenario presenta esfuerzos de mitigación mínimo o estricto (RCP 2.6), presenta dos escenarios intermedios o de estabilización (RCP 4.5 y RCP 6.0) y un último escenario con niveles muy altos de GEI (RCP 8.5):

**Figura 2-1:** Emisiones antropógenas de CO2 anuales



Fuente: Tomado de la guía resumida del quinto informe de evaluación del IPCC.WGI. "Cambio Climático: Bases Físicas"<sup>1</sup> 2013 (Rohrer & Shauwecker, 2016)

Los escenarios RCP permiten tener un punto de partida para investigaciones futuras, pero es prudente tener en cuenta los usos y limitaciones que estos acarrearán, son predicciones

<sup>1</sup> "Emisiones de dióxido de carbono (CO2) únicamente en las trayectorias de concentración representativas (RCP) (líneas) y las categorías de escenarios asociados utilizados por el Grupo de trabajo III (las áreas coloreadas muestran el rango del 5% al 95%). Las categorías de escenarios del GTIII resumen los diversos escenarios de emisiones presentados en las publicaciones científicas y se definen sobre la base de niveles de concentraciones totales de CO2-equivalente (en ppm) en 2100" (Rohrer & Shauwecker, 2016).

## 14 ESTUDIO DEL EFECTO DEL CLIMA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE UN HATO BOVINO LECHERO DESDE LA DINÁMICA DE SISTEMAS

---

a partir de un historial climatológico del siglo pasado basado en las concentraciones atmosféricas de dióxido de carbono y de gases de efecto invernadero (IDEAM et al., 2017).

En la tabla 2-2 se muestra los cuatro escenarios de FR que presenta el IPCC que permiten evaluar el comportamiento y la concentración de los GEI a nivel mundial:”

**Tabla 2-2:** Escenarios RCP con Forzamiento Radiactivo para evaluar el comportamiento de la concentración de emisiones GEI en el mundo.

Escenario	Forzamiento Radiactivo (W/m <sup>2</sup> )	CO <sub>2eq</sub> atmosférico (ppm)	Anomalia de temperatura	Trayectoria
RCP8.5	8.5	>1370	4.9	2100, en aumento
RCP6.0	6.0	850	3	Estabilización después de 2100
RCP4.5	4.5	650	2.4	Estabilización después de 2100
RCP2.6	2.6	490	1.5	Picos antes de 2100 y después declina

Fuente: tomado del documento “Nuevos escenarios de cambio climático para Colombia 2011-2100” (IDEAM et al., 2015).

Trabajar con escenarios de cambio climático no significa predecir el futuro del clima, es una herramienta que permite realizar evaluaciones de amplio espectro respecto al comportamiento del clima a futuro, con el fin de tomar decisiones importantes permitiendo anticiparse a los hechos con el fin de realizar cambios sociales, ambientales, económicos y políticos (IPCC, 2013).

Según (Rohrer & Chauwecker, 2016) el cambio de temperatura en la superficie del planeta a finales del siglo XXI tiene una probabilidad que exceda de 1,5°C con respecto a los años 1850-1900 en todos los escenarios RCP’s sin incluir el escenario 2,6. Para los escenarios 6,0 y 8,5 tiene una probabilidad que la temperatura exceda los 2°C y para el escenario 4,5 es probable que no exceda los 2°C.

## 2.2 Producción ganadera en el mundo

A nivel mundial la ganadería ha desempeñado un papel muy importante porque por medio de ella se provee de alimentos a gran parte de la población mundial y a su vez ha ayudado a la economía de grandes y pequeños productores, pues esta proporciona el 33% de consumo a nivel mundial en proteínas (Buitrago-Guillen et al., 2018; Castaño Quintana et al., 2019).

En un informe de la FAO, (2018), titulado “Ganadería mundial: Transformar el sector ganadero con los Objetivos de Desarrollo Sostenible” (“World Livestock: Transforming the livestock sector through the Sustainable Development Goals”), surge un debate en el cual los sistemas ganaderos seguirán creciendo debido a la gran demanda a nivel mundial para satisfacer el consumo de productos de origen animal en función de la seguridad alimentaria de cada país, pero a su vez, estas mismas producciones están obligadas a reducir la huella ambiental haciéndolas más sostenibles en el tiempo.

Según la FAO (Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO., 2020) Los sistemas ganaderos contribuyen con casi el 40% de toda la producción agropecuaria en países desarrollados y en países en vía de desarrollo con un 20%, aportando en la economía de al menos 1300 millones de personas a nivel mundial, además estos sistemas son los responsables de suministrar a nivel mundial casi el 34% de proteínas alimentaria.

En los sistemas ganaderos el consumo anual de materia seca es de aproximadamente 600 millones de toneladas para la alimentación, y se estima que la mitad de ese consumo es proveniente de pastos, asimismo la FAO (2020) calcula que el 86% de los alimentos que consumen los bovinos no son comestibles para los seres humanos y, el porcentaje restante (14%) proviene de granos y cereales que representan cerca de un tercio de la producción mundial.

El sistema digestivo de los rumiantes, bovinos, ovinos, bufalinos y caprinos son especiales debido a que tienen la capacidad de convertir material forrajero en alimento nutritivo para su dieta mediante procesos digestivos normales (fermentación entérica) que ocurren en condiciones anaeróbicas por acción de la microbiota que vive en el rumen; sin embargo,

este mismo sistema digestivo tan especial al realizar estas funciones tiene la capacidad de producir CH<sub>4</sub>, un gas de efecto invernadero que contribuye en gran medida al cambio climático global (Chhabra et al., 2009). Estas especies poseen un grado de fermentación microbiana a nivel digestivo de los alimentos que también varía dependiendo de la especie, tamaño, digestibilidad del alimento que los animales consumen, etc., y en consecuencia de esto también varía la cantidad de metano emitido por cada uno de estos (Naqvi & Sejian, 2011).

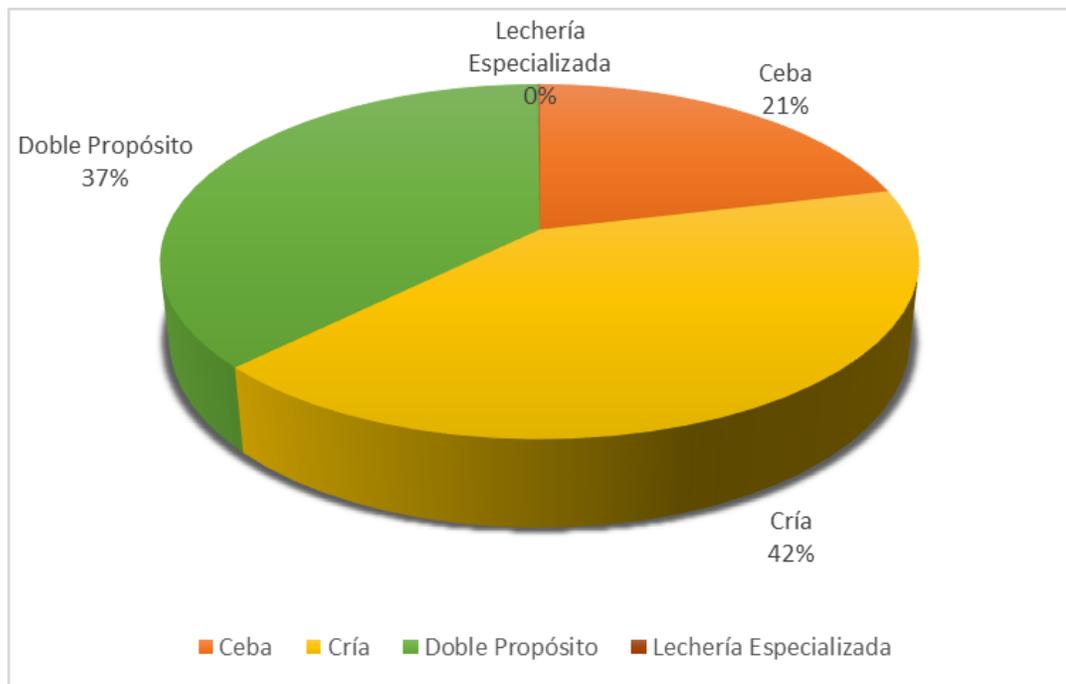
## 2.3 Ganadería en Colombia

En Colombia la ganadería es una de las actividades económicas con más contribución al desarrollo del sector agropecuario, ocupando aproximadamente del 75 a 80% de la superficie agropecuaria donde aproximadamente el 62.2% está distribuido en pastos y forrajes para la alimentación bovina (Arango et al., 2016; Durango et al., 2017).

La ganadería constituye una de las mayores actividades productivas del país, principalmente en el sector rural, ya que aporta el 48.7% del producto Interno Bruto (PIB) pecuario, el 21.8% del PIB agropecuario y el 1.6 del PIB nacional; genera 910.000 empleos directos, lo cual representa 19% del empleo agropecuario y el 6% de empleo nacional (FEDEGAN, 2018).

La ganadería tiene una gran incidencia en el suministro de alimentos y mueve grandes ingresos al país por medio de las exportaciones. En promedio, el consumo por persona al año es de 148 litros de leche y 18 kilos de carne, producto del trabajo de aproximadamente 910.000 personas que tienen empleos directos en el sector ganadero en Colombia, contribuyendo de esa forma a un 4,1% de la cifra de empleo nacional (FEDEGAN, 2018).

La orientación productiva de la ganadería bovina en Colombia (Figura 2-2) se encuentra distribuida entre las actividades de doble propósito, cría y ceba (37,3%, 41,4%, 21,2% del hato, respectivamente), mientras que la orientación de leche especializada sólo abarca el 1% del hato (FEDEGAN, 2019).

**Figura 2-2: Orientación productiva de la ganadería en Colombia, 2018.**

*Fuente: Realización propia con datos de Fedegán – Fondo Nacional del Ganado., Oficina de Planeación, 2018.*

Según el Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) (2019), el hato ganadero bovino a nivel nacional cuenta con 27.234.027 cabezas de ganado dedicados a la producción de carne y leche, y los departamentos con mayor cantidad de cabezas de ganado son Antioquia y Casanare con 3.090.631 y 2.134.723 respectivamente. En el año 2019 se reportó una producción de 935 millones de toneladas de carne (4183 cabezas de ganado) y 7184 millones de litros en el año (tabla 2-3) (Fedegan, 2021). Así mismo en Colombia estos sistemas de producción vacuno se sustentan de diferente apropiación tecnológica,

principalmente pastoreo, pastoreo suplementado, y lechería especializada, esta última corresponde al 1% de orientación productiva pero representa el 45% de la producción nacional (Morales Vallecilla & Ortiz Grisales, 2018) y se desarrolla en zonas alto andinas de clima frío, principalmente, mientras que los sistemas de doble propósito en su gran mayoría se encuentran en el trópico bajo

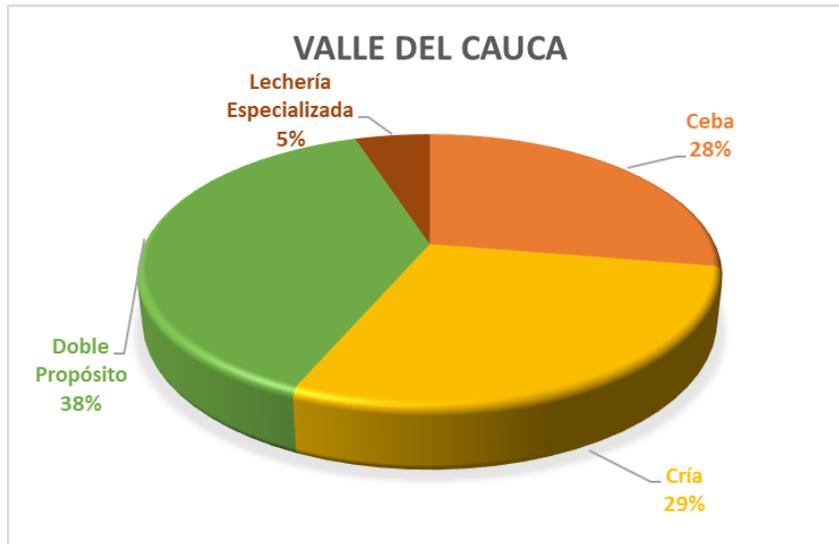
**Tabla 2-3:** Producción de leche en Colombia (2016-2020)

<b>Año</b>	<b>Sacrificio Bovino (miles cabezas)</b>	<b>Producción leche cruda (millones litros)</b>
2016	4.188	6.391
2017	4.053	7.094
2018	4.177	7.257
2019	4.183	7.184
2020	3.881	7.393

*Fuente: Fondo Nacional del Ganado., (Fedegan, 2021).*

### **2.3.1 Ganadería en el Valle del Cauca**

El departamento del Valle del Cauca participa con 538.101 animales que se encuentran distribuidos de la siguiente forma, terneras <1 año 57.285; terneros <1 años 41.335; hembras de 1-2 años 79.335; machos de 1-2 años 72.506; hembras 2-3 años 73.194; machos de 2-3 años 58.116; hembras >3 años 141.097; machos >3 años 15.233, distribuidos en 13.057 predios dedicados a esta actividad (ICA, 2019). La orientación productiva del Valle del Cauca se puede observar en la figura 2-3 teniendo solo el 5% con lecherías especializada y 38% en lecherías doble propósito en el departamento (FEDEGAN, 2018)

**Figura 2-3:** Orientación productiva de la ganadería en el Valle del Cauca, 2018.

Fuente: Realización propia con datos de Fedegán – Fondo Nacional del Ganado., Oficina de Planeación, 2018.

El hato ganadero del Valle del Cauca se encuentra disperso en 3 categorías según Fedegan (2018), los municipios con un inventario alto y que abarcan aproximadamente el 40% del total del departamento son: Tuluá, Cartago, La Victoria, Bugalagrande, Buga, Zarzal, Palmira y Ansermanuevo (6,8%, 5,5%, 5,2%, 4,9%, 4,9%, 4,6%, 4,4% y 4,3% respectivamente); con un nivel de inventario intermedio (34,9%), están: Sevilla, Yotoco, El Dovio, Versailles, Bolívar, Obando, Jamundí, El Cerrito, Toro, Riofrío, Restrepo, San Pedro y Calima; y finalmente municipios con un inventario bajo, de 24,4%) repartidos en 21 municipios (Fedegán & FNG, 2014).

En el departamento se encuentran dos sistemas de producción principalmente, están los sistemas intensivos y de doble propósito, del primer sistema tiene como característica principal que solo se conservan las crías hembras y los machos son descartados inmediatamente al nacimiento, la frecuencia de ordeño es dos veces al día, el nivel de tecnificación es alto, en el segundo sistema las vacas se ordeñan en compañía de su ternero, se encuentran ubicados en laderas del valle y tienen un mínimo nivel de tecnificación, y presentan baja producción de leche (6,25 kg de leche vaca/día) (Q. García & Ramírez, 2011).

La base forrajera de las ganaderías en el departamento contiene especies de pasto como: *Cynodon plestostachyus*, *Panicum máximo* y en menor grado *Brachiaria decumbens* o *Brachiaria Brizantha*, algunas gramas nativas *Paspalum spp.*; también se encuentran algunos sistemas silvopastoriles (SSP) en lo que se integran especies arbóreas como *Leucaena leucocephala* con pasto estrella. En zonas montañosas (hasta 1800 msnm) se observa en mayor cantidad pasto estrella y el puntero (*Hyparrhenia rufa*), y a mayores altitudes predomina el pasto kikuyo (*Pennisetum clandestinum*) (Mahecha et al., 2000).

## 2.4 Ganadería y clima

### 2.4.1 Relación del clima con la ganadería

En los sistemas de producción ganadera se emiten otros GEI como el óxido nitroso, y el dióxido de carbono, aunque el CH<sub>4</sub> es considerado el GEI que más contribuye al calentamiento global, se considera que gran parte de las emisiones de GEI provienen principalmente de la fermentación entérica y el estiércol de los animales en pastoreo (Golub et al., 2013).

La relación de la ganadería con el clima y el efecto que este tiene sobre los animales es inestable y un poco complejo a la hora de estudiarlo ya que debido a su variabilidad en el tiempo condiciona de alguna forma el medio ambiente en que los animales se alimentan, se desarrollan y se reproducen. Durante muchos años se ha estudiado la influencia del ambiente sobre el bienestar y producción de los animales en los sistemas ganaderos (Arias et al., 2008).

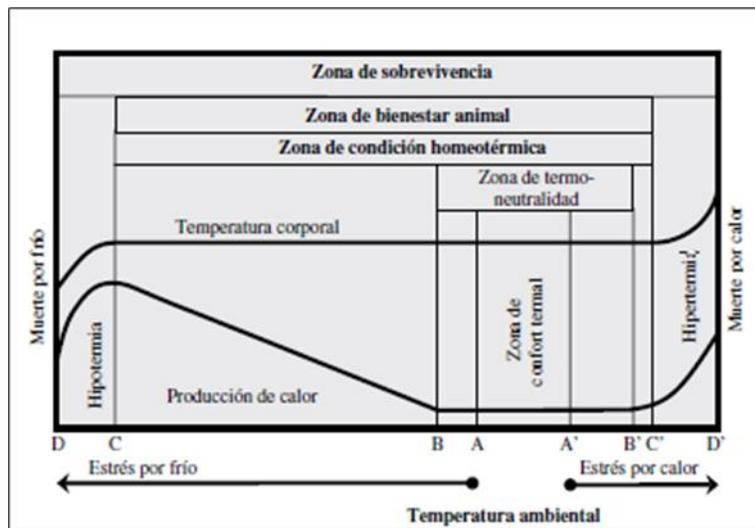
Es así como se evidencia que los cambios en el clima también afectan la ganadería, de forma directa e indirecta, primero, porque modifican la cantidad y calidad de los forrajes de consumo para los animales, consecuencia de esto se encuentran forrajes más lignificados y con menor porcentaje de digestibilidad, a nivel fisiológico modifica sus mecanismos y el comportamiento de los animales con el fin de mantener su temperatura corporal en rangos normales; también afecta los requerimientos de energía (energía consumida y el uso de

ella) y la cantidad de agua de consumo, entre otros aspectos, conllevando finalmente a afectar los índices productivos y reproductivos de los animales (Alayón-Gamboa et al., 2018; Arias et al., 2008; Garzón Alfonso, 2011). Por lo tanto, al estar los animales tan fuertemente influenciados por el ambiente en el que se encuentran rodeados, el desempeño económico de los sistemas ganaderos también se ve afectado negativamente (Muriel et al., 2000).

Si bien los animales tienden a desarrollar adaptación a las condiciones del medio ambiente por el que están rodeados, existen períodos en que los animales sufren de estrés por los cambios bruscos de temperatura o por la combinación de varios factores negativos en cortos periodos de tiempo, obligando a cambiar los requerimientos fisiológicos y de comportamiento. Donde es más evidente la respuesta de los animales frente a estos cambios en cortos periodos de tiempo, son los requerimientos nutricionales, principalmente la energía y el agua son los afectados cuando los animales están por fuera de la zona térmica neutral (Conrad, 1985).

La figura 2-4 muestra la relación que existe entre la temperatura ambiental y la temperatura corporal de los animales y en qué rangos pueden expresar su potencial productivo. La zona termoneutral es el rango en el que los animales se encuentran en confort y no afecta su salud, pero las vacas lecheras tienen un valor termoneutral un poco sensible en un rango de 5 a 21 °C (Gordon, 2005) y es el rango en que los animales pueden expresar el máximo potencial de productividad.

**Figura 2-4:** Esquema de condiciones ambientales para bovinos



Fuente: Adaptado de (Bianca, 1968; Silanikove, 2000)<sup>2</sup>

## 2.4.2 Factores climáticos:

Los factores climáticos que más afectan a los animales y con los que tienen una constante interacción son: la temperatura ambiente, humedad relativa, radiación solar, velocidad del viento y precipitación; estos causan ciertos efectos negativos sobre la producción de los sistemas ganaderos.

**Temperatura ambiente (TA):** Es una de las variables que más se ha estudiado y quizá la más usada como indicador de estrés en los animales. Como anteriormente se mencionaba existe una zona que refleja el rango de temperatura ambiente efectiva o de confort para el ganado y en cual pueden expresar su potencial genético y de producción. Existen numerosas investigaciones que reflejan la relación directa que tiene la temperatura

<sup>2</sup> 1 “las zonas A→B para condiciones frías y A'→B' para condiciones de calor representan cambios en la temperatura efectiva ambiental que demanda esfuerzos mínimos en el animal para mantener su temperatura corporal (la descripción de las zonas restantes sigue la misma estructura siendo válida también para la condición de calor). En la zona B→C los animales requieren activar mecanismos termo regulatorios (fisiológicos y de comportamiento) para conservar la temperatura corporal. En la zona C→D los animales infructuosamente intentan hacer frente al desbalance energético para tratar de mantener las condiciones homeotérmicas; la temperatura corporal es afectada pudiendo conducir al animal a la muerte por hipotermia o hipertermia” (Bianca, 1968; Silanikove, 2000).

ambiente con el consumo diario de agua (CDA) y una inversa con consumo de materia seca (CMS) y es más evidente en ganado bovino de leche (Arias et al., 2008).

**Humedad Relativa (HR):** Se considera que esta variable posee un factor alto de estrés en el ganado, ya que permite acentuar condiciones desfavorables de altas temperaturas. “Los principales efectos de la HR están asociados con una reducción de la efectividad en la disipación de calor por sudoración y respiración y están asociados negativamente al CDA”, es así como una alta HR disminuye el potencial de disipación de calor tanto de la piel como del aparato respiratorio (jadeo), afectando a los animales especialmente en medioambientes en los que la reducción del calor por vías evapo-transpirativas es crucial para mantener la condición homeoterma (Barros, 2017).

**Velocidad del viento (VV):** El viento ayuda a disminuir la respuesta de estrés por calor en los animales por medio de vías evaporativas, mejorando el bienestar y el desempeño productivo. Es importante resaltar que un factor a tener en cuenta respecto a lo anterior es si la piel de los animales se encuentra húmeda o seca, ya que en presencia de humedad la transferencia de calor es más eficiente que estando seca. En periodos de invierno la VV tiene efectos negativos ya que ayuda a la pérdida de calor en los animales y vale recordar que también la hipotermia también modifica mecanismos en los animales negativos (Arias et al., 2008; Mader & Davis, 2006). Es importante saber que la calidad del aire y la ventilación son factores relevantes para la sanidad y el bienestar animal.

**Radiación solar (RS):** Es considerada como uno de los factores más importantes en el balance térmico en los animales, tanto la directa como la indirecta. Se ha demostrado que la RS influye directamente en la temperatura rectal y tasa de respiración del ganado (Silanikove, 2000). El color del pelaje también es un factor para tener en cuenta ya que se ha demostrado que animales oscuros irradian y absorben más calor que aquellos que tienen pelaje o piel más clara en una misma condición ambiental (Kadzere et al., 2002).

Es así como las variaciones en las condiciones ambientales inducen al estrés térmico, activando en los animales mecanismos fisiológicos como: **a).** Jadeo o aumento de la frecuencia respiratoria, este es un mecanismo de los animales que puede aumentar los requisitos en vacas lecheras hasta del 20% (West, 2003) alterando el equilibrio ácido-base debido a un aumento de dióxido de carbono excretado; **b).** Aumento de la frecuencia

cardiaca, salivación excesiva y aumento de la sudoración, **c**). Disminución de flujo sanguíneo en los órganos internos llevando a disminuir la actividad del sistema digestivo como rumen e intestinos haciendo que el movimiento de partículas de alimento sea lento llevando a que las vacas pierdan del apetito y la también disminuye la producción de ácidos grasos volátiles.

**d**). Baja producción de leche: este es quizá el aspecto más estudiado y algunos autores reportan que por desde y por encima de 27°C se evidencia baja producción de leche por calor, Toda *et al.*, (2002) sugiere una ecuación para calcular la relación de temperatura ambiente y la leche Según esta ecuación, existe una relación significativa entre el nivel de producción de leche (X, kg / día) y la disminución de la producción de leche con el aumento en la temperatura ambiental media diaria (Y, kg / día / °C). Esta ecuación muestra que la disminución en la producción de leche observada en vacas Holstein lactantes con cada aumento en la TA de 1°C fue de 0.6 kg/día en vacas que produjeron 20 kg de leche/día, 1 kg/día en vacas que produjeron 30 kg/día, y 1,4 kg/día en vacas que producen 40 kg/leche/día. Se estima que, por cada 1 kg de disminución en la ingesta de materia seca, se pierden 2 kg de producción de leche. Aunque depende del manejo del hato lechero, la disminución en la producción de leche puede variar (West, 2003). Según Solano, (2010), en vacas Holstein disminuye entre 50 y 75% en ambientes con temperaturas superiores a 26.5°C y en vacas Jersey y Pardo Suizo, a temperaturas superiores a 29.5°C se da el mismo efecto. En vacas Brahman no se observan efectos negativos a temperaturas de 32°C.

**e**). Cambios en la calidad de la leche, otro de los efectos del estrés por calor y uno de los más importantes es la baja calidad de la leche haciendo que disminuya el porcentaje de grasa y proteína en la leche (Atrian & Shahryar, 2012). **f**). Rendimiento reproductivo deficiente, disminuye la fertilidad en vacas productoras y en novillas retrasa la primera ovulación. La disminución puede ir desde el 75% hasta el 100% del hato, la causa principal de esta disminución se debe a fallas en la implantación del embrión, ya que a causa de estrés térmico las hembras presentan “vasodilatación periférica (para reducir el calor); por lo cual, el aporte sanguíneo a los órganos como el útero, disminuye. Además, cualquier tipo de estrés determina liberación de Prostaglandinas y entre ellas la prostaglandina F2

(PgF2), la cual tiene efecto luteolítico y agrava más el cuadro de infertilidad” (Dollah et al., 1990).

**g).** Los requerimientos energéticos de mantenimiento aumentan, esto es otra consecuencia del estrés por calor ya que las vacas requieren de niveles de energía para permitir la pérdida de calor del cuerpo, es así como resultado de lo anterior, es la disminución de la producción en los sistemas de (Echeverri Echeverri, 2016).**h).** Baja ingesta de alimento, cuando los animales sufren de estrés por calor, aumentan el consumo de agua (por encima de lo normal, hasta 200 litros al día) haciendo que su tracto digestivo se llene y pierdan apetencia por alimentos (reducción de 8 a 12%) (Atrian & Shahryar, 2012).

Es así que el consumo de forraje está determinado por varios factores: en los animales (peso, edad, estado productivo, condición corporal, entre otros), el tipo de pasturas (MS, FDN, entre otros), y el medio ambiente (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar), y este a su vez tiene variaciones según la oferta forrajera y factores que limitan su consumo como lo es el comportamiento ingestivo como: tiempo de pastoreo, tamaño y peso de bocado, elementos que se consideran que tiene una gran incidencia sobre el consumo y la producción animal (Chacon et al., 1978; Ocampos et al., 2000).

Al modificarse la ingestión de MS en los animales, resulta una pérdida de producción y los factores de ajuste de la ración puede suponer un incremento o reducción de la ingestión, siendo las vacas adultas más sensibles al calor en comparación con las novillas de primer parto (reducción de ingestión del 22% y 9% respectivamente) (Calsamiglia et al., 2009). Es así como los animales tienden a cambiar conducta de pastoreo realizándolo en horas de la noche donde se encuentra la temperatura un poco más fresca, y supone la necesidad de suministrar pasto en horas de la noche a animales que deben soportar más de 26°C en el día (Cedeño., 2011)

## 2.5 Sistema

Un sistema se entiende como una colección de elementos que se encuentran en una relación dinámica, los cuales están ordenados para cumplir con un objetivo o propósito específico común. Un sistema posee límites determinados, entradas y salidas, y en él se

producen cambios como respuesta a los estímulos (externos e internos). Un sistema puede incluir componentes físicos, económicos, sociales, biológicos, tecnológicos y políticos, y dicho sistema es altamente complejo (Gómez, 2014).

Un sistema de producción agropecuario abarca todas aquellas acciones o actividades que los productores organizan y dirigen en función de sus objetivos, saberes y recursos con diferentes niveles de tecnología, estos combinan varios factores de producción incluidos, tierra, trabajo, capital, gestión, maquinaria, animales, entre otros, para la obtención de beneficios económicos (Bala et al., 2017).

Componentes que interactúan en un Sistema de Producción Agropecuario:

Físico: clima (temperatura, velocidad del viento, radiación solar), suelos.

Biótico: plantas, animales.

Tecnológicos: Maquinaria

Económico: capital empleado, inestabilidad de precios, financiación, comercialización.

Social: valores, costumbres.

Sistemas dinámicos: Son aquellos en los que se evidencia cambios en la estructura o en las relaciones entre sus elementos a través del tiempo. Existen dos tipos, discretos y continuos, en el primero, el tiempo se mide en pequeños lapsos y el segundo, el tiempo se mide de forma continua (Martínez Hernández & García Guardado, 2008).

## 2.6 Pensamiento Sistémico

“En los años sesenta Ludwing Von Bertalanffy creo el concepto de pensamiento sistémico (PS) intentando integrar diferentes ciencias para tener una visión holística de todo el entorno”. En esencia el PS es la idea de poder visualizar como se interrelacionan los elementos de un sistema para lograr objetivos específicos, en lugar de verlos como elementos estáticos (Pereira Guimarães et al., 2009).

El pensamiento sistémico permite que las organizaciones se puedan ver como un sistema complejo e integrado en el que algún cambio realizado en cualquier momento afectará el

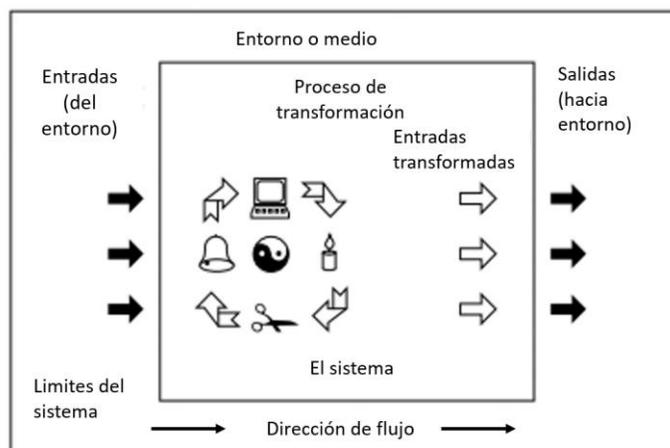
sistema e impactara otras variables inmediatamente o en el tiempo, ya que todas se conectan de alguna forma, permitiendo comprender su funcionamiento para la resolución de problemas a causa de variables que lo componen (Tedeschi et al., 2011).

Según Cusins, (1994), existen 5 factores a que pueden considerarse la base del PS:

- (1) Un sistema se define a partir de su entorno por un límite arbitrario.
- (2) Las entradas de su entorno cruzan la frontera hacia el sistema.
- (3) Dentro del sistema, las entradas interactúan en un proceso de transformación.
- (4) Las entradas transformadas dejan el sistema como salidas.
- (5) La dirección del flujo indica el flujo de energía, materiales, información, etc.

En todos los sistemas existe una ley natural, ya sean los naturales o creados por el hombre, en la figura 2-5 se observa el marco conceptual de un sistema básico, si las salidas no satisfacen el entorno, las entradas acabarían y en algún momento el sistema deja de funcionar. Lo que determina la satisfacción o no finalmente la hace el entorno, en toda su complejidad de alternativas, elecciones, criticidad, etc. Estos componentes básicos del PS tanto de forma y funcionamiento (anatomía o fisiología por así decirlo) proporcionan información para para considerar la complejidad, desperdicios, resultados y retroalimentación de un sistema.

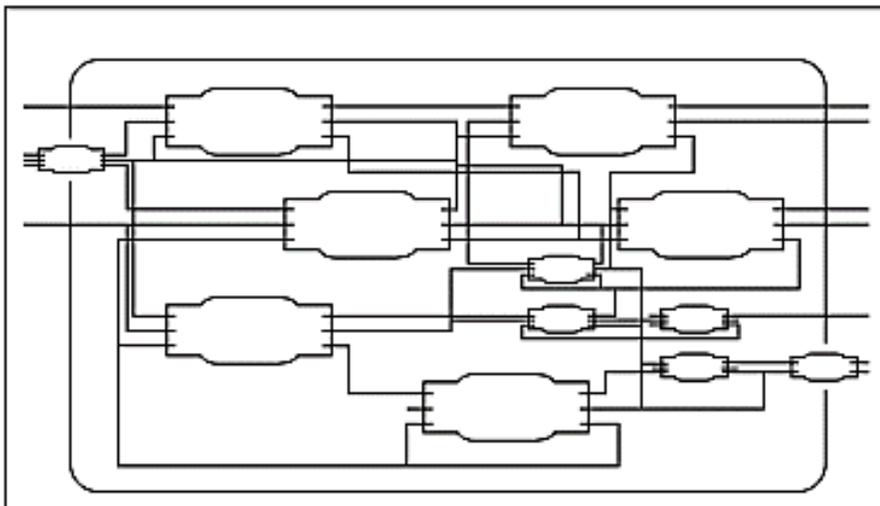
**Figura 2-5:** Marco conceptual de un sistema básico.



*Fuente: Elaboración propia con datos de (Cusins, 1994)*

El primer concepto accesorio en el PS se centra en "el entorno", o sea, todo lo que esta fuera de los límites del sistema. Lo que quiere decir, la fuente de las entradas y el destino de las salidas (Cusins, 1994). Si el caso es que queremos centrarnos en las todas las ganaderías de leche del Valle del Cauca como un sistema, en este caso el entorno sería un entorno pecuario, o la población a quien se le ofrece los productos de estas empresas ganaderas. Es posible que queramos solo enfocarnos en un solo sistema ganadero del valle del cauca, entonces el entorno seria la población de la zona donde se encuentre el sistema ganadero o quien adquiera sus productos, o también es posible que nos centremos solo en una determinada área del sistema ganadero, una labor, un grupo de animales, etc.; y en todo caso lo que se quiere evidenciar es que cuando se colocan límites a un sistema lo que hace es definir como todo un sistema también hace parte de otros sistemas quizá un poco más complejos, en la figura 2-6 se puede observar a manera de ejemplo lo descrito anteriormente.

**Figura 2-6:** Ejemplo de un sistema complejo.



Fuente: tomado de "Understanding Quality through Systems Thinking" de (Cusins, 1994)

En contraste, el PS abarca: a) la conceptualización que, lo que necesita ser entendido, es parte del todo, b) buscar comprender un sistema más amplio, c) buscar explicar el comportamiento y las propiedades del sistema en términos de la función del sistema. sistema en su conjunto (Ackoff, 1994).

Una de las formas más valiosas de utilizar el pensamiento sistémico es el lenguaje de dinámica de sistemas, ya que muchas de las herramientas utilizadas en el pensamiento sistémico, como los bucles de retroalimentación y el modelado de flujo e inventario, se basan en la dinámica de sistemas. Utilizando el Pensamiento Sistémico, es posible realizar una evaluación generalizada del sistema productivo con la visión de los puntos cruciales para su funcionamiento, permitiendo al productor o técnico tomar decisiones encaminadas a una mejora conjunta y de largo plazo (Pereira Guimarães, 2007).

### 2.6.1 Modelo

Un modelo es una representación imprecisa de la realidad que tiene por objetivo fundamental ilustrar los componentes y las relaciones responsables de un fenómeno dado, representan o describen algo real (Gómez Loarces et al., 2019).

La creación de un modelo tiene el propósito de hacer algún tipo de cálculo o predicción de cómo se comportará el fenómeno de estudio (Williams, 2002). También es un conjunto de generalizaciones y suposiciones sobre el mundo en busca de claridad y comprensión (O'Regan & Moles, 2001).

Los diseños de los modelos son construidos con el objetivo de identificar y mostrar las relaciones complejas entre si y tener la posibilidad de pasar de modelos reales a modelos representados en gráficos siendo la esencia misma sistémica la simplificación de ello (Arnold Cathalifaud & Osorio, 1998).

### 2.6.2 Tipos de modelos

Según (Meadows & Robinson, 1985) el trabajo de los modeladores es diferente de acuerdo a la relaciones que los mismos modelos usan y pueden ser:

**Estocástico:** los elementos están relacionados a través de relaciones de probabilidad (aleatorio). Las técnicas estocásticas se han utilizado ampliamente en varios campos tales como investigación operativa, teoría de credibilidad, estadísticas, biología y teoría económica; Ejemplo: El clima, un gigantesco conjunto de procesos estocásticos

interrelacionados (velocidad del viento, humedad del aire, etcétera) que evolucionan en el espacio y en el tiempo.

**Determinista:** los elementos están relacionados por relaciones absolutas. No está determinado por el azar y se pretende que las mismas entradas o condiciones iniciales sean las mismas de salida. Ejemplo: normalmente se apoyan de un sistema de gestión, la creación de un lote de camisetas se tiene en cuenta las materias primas exactamente para la cantidad de camisetas que se requieren.

**Continuo:** ningún paso, salto o ruptura ocurre repentinamente, está representado gráficamente por una línea suave y continua. **Discreto:** el modelo tiene límites, discontinuidades o puntos. Individual.

**Mental:** “Es una representación de una realidad en la que los elementos que la componen deben ser aquellos considerados los más relevantes para la estructura del modelo, este modelo representa solamente una parte de la realidad” (Flores Ayala & Trucios Quispe, 2014).

También hay modelos **mecanísticos o teóricos**, y estos si presentan una hipótesis asociada al fenómeno de estudio y su objetivo es intentar describir y explicar todos los mecanismos y como se involucran desde las leyes físicas, químicas o bioquímicas para lograr entender todos los procesos presentes en el.

**Modelos dinámicos:** Son una representación de la conducta dinámica de un sistema; mientras un modelo estático involucra la aplicación de una sola ecuación, los modelos dinámicos, por otro lado, son reiterativos, constantemente aplican sus ecuaciones considerando cambios de tiempo, la característica fundamental que interesa considerar es la evolución del sistema en el tiempo (Martínez Hernández & García Guardado, 2008).

## 2.7 Dinámica de sistemas

La Dinámica de Sistemas (DS) fue desarrollada a principios de la década de 1960 por Jay Forrester, ingeniero de sistemas de la "MIT Sloan School of Management (Escuela de Administración Sloan, del Instituto Tecnológico de Massachusetts) con el establecimiento del MIT System Dynamics Group (Grupo de dinámica de sistemas del I.T. de Massachusetts)" (Martínez Hernández & García Guardado, 2008).

La DS es una metodología que tiene como objetivo modelar sistemas complejos cambiantes en el tiempo y su comportamiento. Para entenderlos, se requiere conocer los componentes de cada uno de los sistemas y la interacción que existe entre ellos (Sterman, 2000).

La DS es un método que usa la modelación y la conceptualización de problemas basado en comentarios que proporciona un marco útil para la investigación y el análisis de estos. Puede ser usada para optimizar el potencial de decisiones políticas a largos plazos y las estrategias de desarrollo (Clay McRoberts, 2010). Nicholson (2005) realizó una de las pocas exploraciones en aplicaciones de desarrollo agrícola y rural utilizando DS y sugirió que la modelización de la dinámica de sistemas podría ser un mecanismo eficaz para la evaluación de problemas complejos en entornos de desarrollo rural internacional.

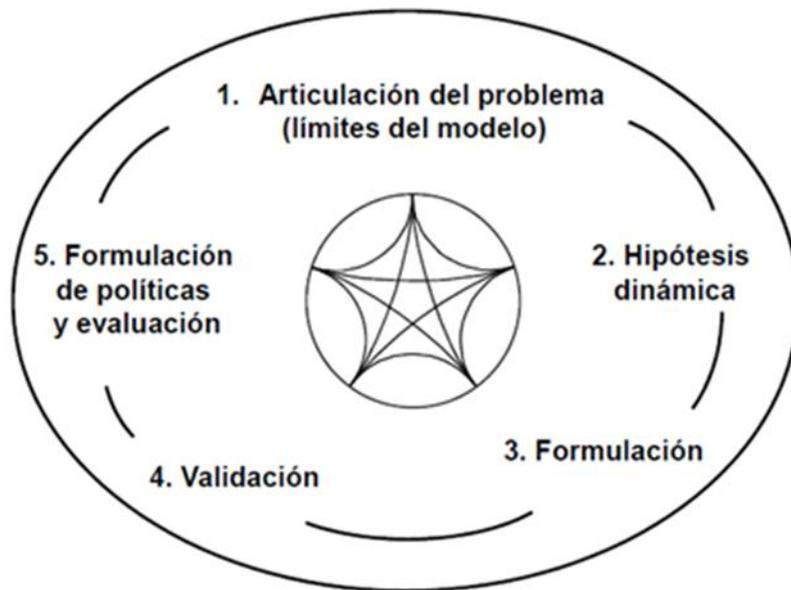
### 2.7.1 Metodología de modelación

Sterman (1991) señaló: "Para que un modelo sea útil, debe abordar un problema específico y debe simplificar en lugar de intentar reflejar en detalle un sistema completo". Por tanto, los modelos útiles son una simplificación de la realidad, que abordan un problema específico dentro del marco del sistema más amplio. La representación de un sistema en lugar de un problema con límites definidos daría como resultado un modelo demasiado complejo para interpretarlo o definir sus supuestos.

Con esta metodología se pueden realizar modelos informáticos y analizar de forma racional la estructura, las interacciones y el modo de comportamiento de diferentes sistemas complejos. Se basa en sistemas de retroalimentación y no está restringida a sistemas lineales; maneja retrasos de tiempo y diferentes estructuras con múltiples bucles de los

sistemas complejos (Bala et al., 2017; Sterman, 2000). En la figura 2-7 se representa las fases para modelar bajo esta metodología que también busca analizar racionalmente las diferentes interacciones y comportamientos dentro de los sistemas proporcionando estrategias que ayuden a balancear el sistema.

**Figura 2-7:** Proceso interactivo del modelamiento.



*Fuente: (Sterman, 2000)*

### 1. Articulación del problema

Este es el paso más importante en la modelación. Para iniciar la construcción de un modelo se debe identificar el problema, luego se establecen los **límites** del sistema y se trazan objetivos específicos y se define la línea de tiempo. Por lo tanto, la identificación del problema debe incluir una descripción clara basada en diferentes informes, registros históricos y estadísticos y estudios previos. El problema debe describir claramente los principales factores que influyen en la dinámica del comportamiento del sistema con hechos y cifras. Se debe incluir el propósito y los objetivos claramente definidos.

El horizonte de tiempo debe ser amplio y suficiente en la historia para mostrar el inicio del problema y la descripción de este y debe extenderse lo suficiente en el futuro para entender los efectos indirectos y retardados de las políticas potenciales.

Limites:

Los límites básicamente dependerán del objetivo del modelo y sus necesidades. La caracterización de los modelos en la dinámica de sistemas son los límites impuestos y se definen mediante diagramas de límites explícitos y esto comprende variables endógenas, exógenas y excluidas, pero principalmente en dinámica sistemas se usan límites amplios y se entran en factores endógenos e ignora la complejidad de los detalles; los límites estrechos del modelo son la principal fuente de resistencia política en los sistemas (Clay McRoberts, 2010). Cuando se construyen los modelos resulta complejo incluir todas las variables que lo componen, por lo tanto, los límites del modelo se deben especificar en función de su respectiva evaluación (Thornton et al., 2003).

## **2. Hipótesis dinámica**

Una vez identificado el problema de debe desarrollar una teoría que se le denominara hipótesis dinámica para explicar el comportamiento del problema en un horizonte de tiempo. La hipótesis dinámica busca definir los circuitos de retroalimentación críticos que impulsan el comportamiento del sistema. Cuando se cuantifica en un modelo de simulación, la estructura de retroalimentación endógena de un modelo conceptual debe ser capaz de reproducir el modo de comportamiento de referencia basado en la afirmación de que "la estructura causa el comportamiento". que se representa en un gráfico de comportamiento en el tiempo. La hipótesis es provisional y está sujeta a revisión y rechazo, lo que depende únicamente del modo de comportamiento de referencia observado y simulado en un horizonte de tiempo (Sterman, 2000).

## **3. Formulación**

La formulación de un modelo de simulación es la transformación del modelo conceptual en una estructura explícita de flujo de existencias. Se realiza la formulación del modelo formal, representada internamente como ecuaciones diferenciales. Se obtienen los flujos físicos, se valoran las funciones que conectan las variables, las unidades con las que se trabajara y se parametriza cada una de ellas.

## **4. Validación**

La validación del modelo consiste en una serie de pruebas para evaluar la solidez del modelo. Por lo general, la evaluación integral revela errores que hacen que uno regrese a

las fases anteriores en el proceso de modelado iterativo. Aquí también se realizan pruebas de sensibilidad para evaluar la estructura y las variables con alta incertidumbre. Las sensibilidades numéricas, de comportamiento y de políticas a los cambios en los parámetros y la estructura se evalúan en relación con el propósito del modelo.

## **5. Formulación de Políticas y evaluación**

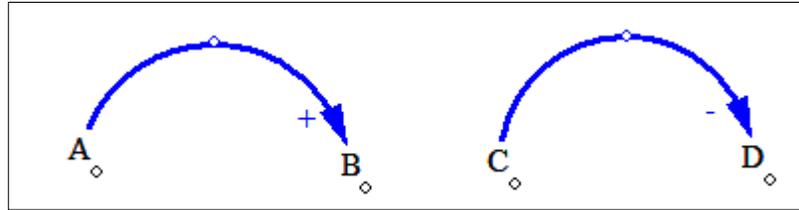
En esta etapa a menudo se determina si el modelo es útil para el propósito específico de creación. En esta etapa, una vez construido, evaluado y corregido el modelo se procede formular escenarios y estrategias que permitirán tomar decisiones o establecer reglas de decisión para dar respuestas respecto al problema. Esto debería conducir a mejor toma de decisiones.

### **2.7.2 Elementos para modelar en dinámica de sistemas**

La metodología de DS requiere herramientas que permitan representar los modelos mentales y la comprensión que tienen los participantes de la investigación de la situación problema. Para lo anterior se hace uso de diagramas explicativos conocidos como Diagramas de Bucles Causales y Modelos de Niveles y Flujos. Los primeros “representan de forma cualitativa interacciones entre variables y los ciclos de realimentación que caracterizan la complejidad del sistema, los últimos describen el sistema en términos cuantitativos de acumulaciones y tasas de cambio” (Otero, 2008).

La relación entre una variable y otra puede ser positiva (+) o negativa (-). Una relación positiva ocurre si una variable aumenta, entonces la otra también aumenta y se representa con una flecha, al final de ella se coloca el signo (+). Quiere decir que, si una variable A disminuye, la variable B también disminuirá (Ver Figura 2-8) y, por el contrario, si una relación de causa y efecto es negativa, quiere decir que si una variable aumenta la otra disminuye y se representa con el signo (-) al final de la flecha, si la variable C aumenta, entonces la variable D disminuirá:

**Figura 2-8:** Relaciones de causa y efecto

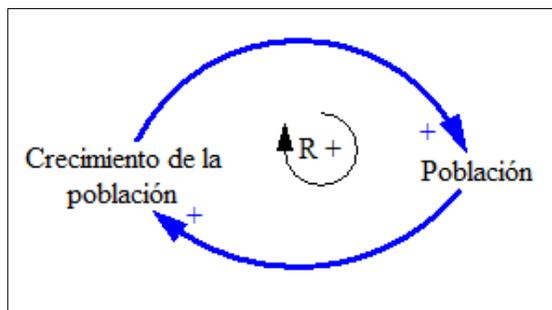


Fuente: Fuente: Elaboración propia basado en el libro “System Dynamics Modelling and Simulation” (Bala et al., 2017)

**Retroalimentación:**

La retroalimentación, bucle o feedback es una cadena cerrada de relaciones causales. El diagrama de bucle causal simple (figura 2-9), consta de dos variables: población en crecimiento y población. Aquí se ilustra un circuito de retroalimentación positiva simple que consta de dos relaciones causa-efecto en donde el aumento de la variable crecimiento de la población provocara un aumento en la variable población. La relación causa-efecto es positiva y se indica mediante una flecha con un signo (+) que comienza en crecimiento de la población y termina en población. El bucle que se forma desde la población hasta el crecimiento de la población y de regreso a la población es un bucle de refuerzo y se indica mediante un signo (+) con una flecha dentro del diagrama de bucle causal. La figura 2-9 muestra un ejemplo de diagrama de bucle causal con notación.

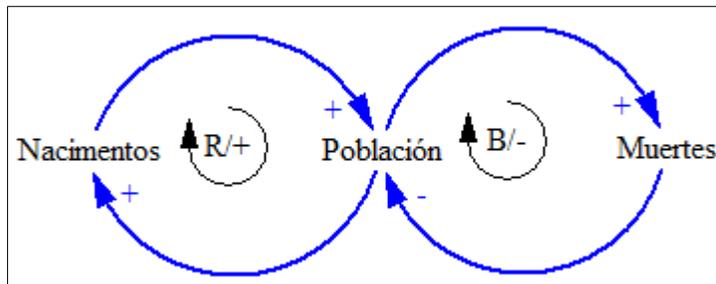
**Figura 2-9:** Bucle de retroalimentación positiva



Fuente: Fuente: Elaboración propia basado en el libro "System Dynamics Modelling and Simulation" (Bala et al., 2017)

En la figura 2-10 se observa dos ciclos de retroalimentación, en el primer ciclo, los nacimientos aumentan con la población y, a su vez, los nacimientos aumentan la población y estas relaciones son positivas y se representan con las flechas y el signo (+), en el primer bucle hay dos relaciones positivas (+) por lo tanto se le denomina bucle de refuerzo (Bala et al., 2017).

**Figura 2-10:** Bucles de retroalimentación positiva y negativa



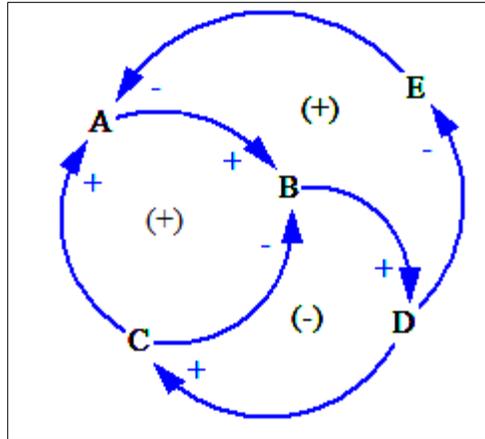
Fuente: Fuente: Elaboración propia basado en el libro "System Dynamics Modelling and Simulation" (Bala et al., 2017)

En el segundo ciclo las muertes aumentan con la población, pero a su vez la población disminuye a medida que aumentan las muertes, la primera relación que se observa es positiva y se representa con una flecha y el signo (+) mientras que en la segunda relación que se ve negativa o de balance y se representa con la flecha y el signo (-). Para determinar si un ciclo es negativo se deberá hacer un conteo de número de relaciones, si este número total es par en el ciclo de retroalimentación entonces el ciclo será positivo y si el número es impar en el total de relaciones, el bucle será negativo, de hecho, los ciclos de retroalimentación positiva generan crecimiento, es decir, el ciclo se refuerza y los ciclos de retroalimentación negativa actúan como estabilizadores de los sistemas al dirigirlos hacia los objetivos determinados. En el bucle 2, el número de relaciones negativas es impar, es decir, 1. Por lo tanto, este bucle es negativo (Bala et al., 2017).

Cuando se construye un modelo van surgiendo varios bucles, en la figura 2-11 podemos observar que se pueden formar varios, por ejemplo: ABDCA, CBDC y también ABDEA. Los sistemas tienen ambos bucles (positivo y negativo) y el comportamiento final

dependerá de cuál es el dominante en un caso determinado. Estos bucles son útiles porque permiten observar la estructura del sistema que se está analizando hasta llegar a su comportamiento dinámico. Pero lo más importante, sin duda es “comprender como la estructura de los sistemas provoca su comportamiento” (Martín García, 2003).

**Figura 2-11:** Bucles de retroalimentación positiva y negativa



*Fuente: Elaboración propia basado en el libro “Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas: Dinámica de Sistemas con VENSIM PLE” (Martín García, 2003)*

Es importante el concepto de bucle porque permite observar desde la estructura del sistema analizado, hasta llegar a ver su comportamiento dinámico. Los sistemas pueden oscilar, estar en equilibrio, o decaer con rapidez y a partir de esto se puede identificar las razones estructurales y tomar decisiones de como modificar los bucles causales que lo están alterando y lo más importante, comprender como la estructura de los sistemas provoca su comportamiento (Martín García, 2003; Sterman, 2000).

### **Niveles, flujos y retrasos:**

Los niveles son considerados elementos que fácilmente muestran la situación de los modelos, son acumulaciones de material o de información y su variación dependerá de otros elementos llamados flujos. Los niveles no afectan a otros niveles directamente y son representados con rectángulos (figura 2-12) (J. M. García, 2017; Martínez Hernández & García Guardado, 2008).

**Figura 2-12:** Símbolo de nivel



Los flujos son aquellos que determinaran la variabilidad en los niveles de los sistemas, se definen también como funciones temporales y caracterizan las acciones que se toman en el sistema las cuales quedan acumuladas en los niveles correspondientes (figura 2-13) (Martín García, 2003; Martínez Hernández & García Guardado, 2008)

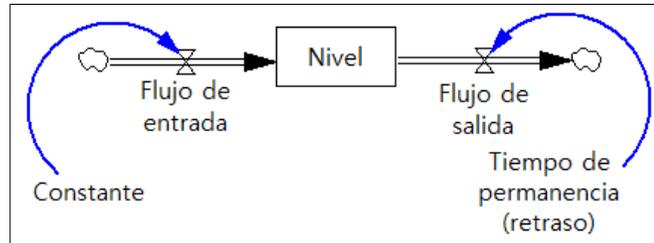
**Figura 2-13:** Símbolo de flujo



Los retrasos simulan retardos en el tiempo, puede ser de información o de material. Los retrasos de material provocan el retraso en el suministro del material, y el retraso de la información es el retraso en el procesamiento de la información (Martín García, 2003).

Los retrasos pueden tener una marcada influencia en el comportamiento de un sistema. Cuando se tienen bucles de alimentación positiva, estos, establecen que el crecimiento no se dé de forma rápida y en los de retroalimentación negativa el efecto se ve más evidente (Aracil, 1995).

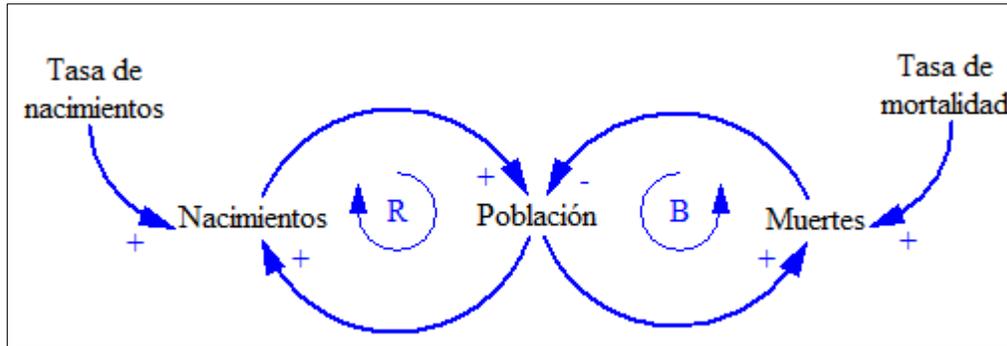
**Figura 2-14:** Esquemmatización de niveles, flujos y retrasos usados en dinámica de sistemas



### Modelado causal y simulación formal:

La comprensión de los bucles proporciona una información muy valiosa pero adicional a ello se debe realizar la modelación y la simulación de estas estructuras. Es así como la modelación o los diagramas causales permiten observar todas las variables involucradas y como se conectan por medio de flechas entre ellas (figura 2-15). Para todos los diagramas de bucle causal siempre se debe seguir una lógica causal, de modo que las relaciones se entiendan como posibles y relevantes. Las relaciones o correlaciones entre variables reflejan el comportamiento del sistema y no la estructura del sistema. Esto se debe a que, si se toma alguna medida/acción, puede conducir a un reordenamiento de las correlaciones entre las variables, y el modelo solo reflejará las relaciones entre las variables determinadas inicialmente (Figueiredo Viera Da Cunha, 2008; Martín García, 2003; Sterman, 2000).

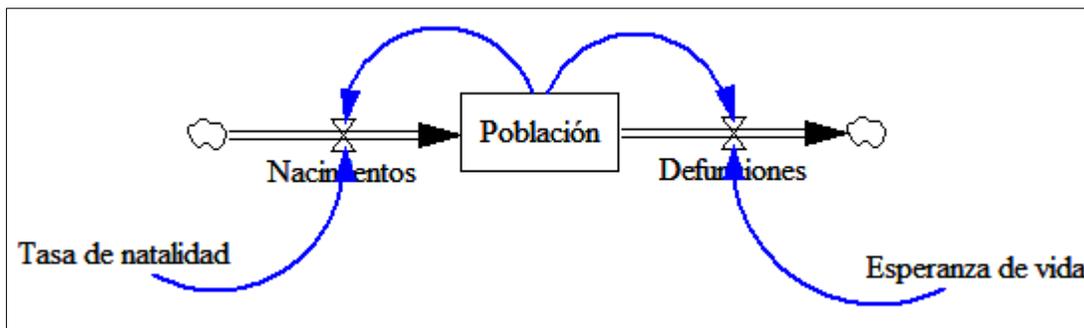
**Figura 2-15:** Ejemplo de un diagrama de bucle causal completo que enfatiza la importancia de usar señales de polaridad e indicadores de bucle para comprender el comportamiento del sistema.



Fuente: creación propia

Los diagramas formales (figura 2-16) permiten representar los modelos en DS como una serie de ecuaciones diferenciales de primer orden, un conjunto de parámetros y un vector de funciones no lineales. Según García, (2003) “la simulación numérica del sistema fuerza el rigor algebraico sobre el modelo y apoya el examen de los efectos del cambio paramétrico y estructural en el sistema”. Esto permite la simulación del modelo y el comportamiento de este a través del tiempo (Tedeschi et al., 2011).

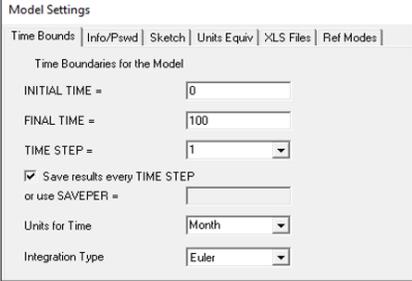
**Figura 2-16:** Diagrama formal



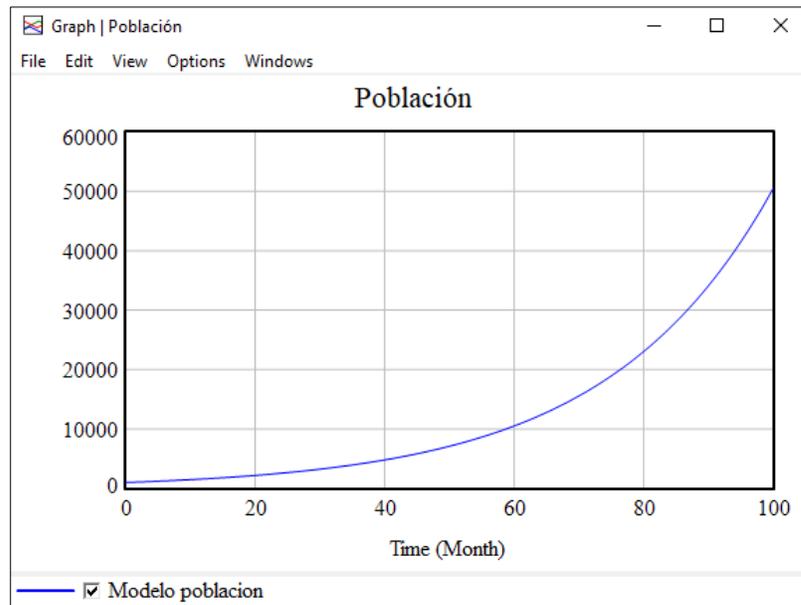
Luego, este diagrama se traduce a través de un lenguaje específico aplicado al método, donde se establecen ecuaciones para las variables en cuestión (Figura 2-17), lo que posibilita la simulación del comportamiento del sistema y la verificación de su comportamiento en el tiempo, si las condiciones iniciales siguen siendo las mismas durante toda la simulación. Esto se puede ver a través del comportamiento de la variable de población (Figura 2-18). En esta simulación, la población comienza con 1000 individuos. El número de nacimientos viene dado por la tasa de natalidad multiplicada por nivel de

población, donde la tasa de natalidad es una constante igual a 0.05. En cada intervalo de tiempo  $dt$ , el stock de población aumenta por el flujo del número de nacimientos.

**Figura 2-17:** Valores iniciales y ecuaciones de la modelación

<p>Nacimientos= Población*Tasa de Natalidad                  Defunciones= Población*Esperanza de Vida                  Población= [Nacimientos-Defunciones]+Población                  Tasa de Natalidad=0.05                  Población= Valor inicial (1000)</p>	
--	---

**Figura 2-18:** Comportamiento de la Población



## 2.8 Software de programación de dinámica de sistemas

Los modelos de DS generalmente se preparan utilizando un paquete informático basado en una interfaz esquemática. La construcción del modelo requiere que el analista construya las relaciones entre las variables, con ecuaciones para estas relaciones incrustadas dentro de las variables en el diagrama. Existen varios paquetes de uso popular: Stella / iThink (High Performance Systems Inc. 1996), Powersim (Modeldata AS, Bergen, Noruega, 1993 y posteriores) y Vensim (Ventane Systems Inc. 1988 y posteriores). Pero todos estos usan

la misma lógica de DS, usando tres tipos de variables. Su representación real en los diagramas depende del paquete utilizado.

Para esta investigación en particular se trabaja con el apoyo del software de gestión Vensim® PLE Plus, versión 7. Este software es similar a otros que existen en el mercado (p.ej. Stella, ModelMaker o Simile, Powersim) que se basan en la programación a partir del diagrama causal. Todos están pensados para que el usuario no necesite ser experto en informática y en programación, por que trabajan en forma visual. “El programa fue producido por Ventana Systems®. Vensim y provee una forma simple y flexible de construir modelos de simulación mediante diagramas de influencias y diagramas de Forrester”. El programa utiliza una interface grafica de símbolos que representan elementos del proceso (Parsons et al., 2011).

## **3. Materiales y Métodos**

El modelo para estudiar la relación entre el clima y el sistema ganadero bovino dedicado a la producción de leche se construyó siguiendo la metodología de dinámica de sistemas y se desarrolló utilizando los principales componentes de la herramienta: flujos, niveles, retrasos, bucles de retroalimentación, entre otros (Molina B, 2015).

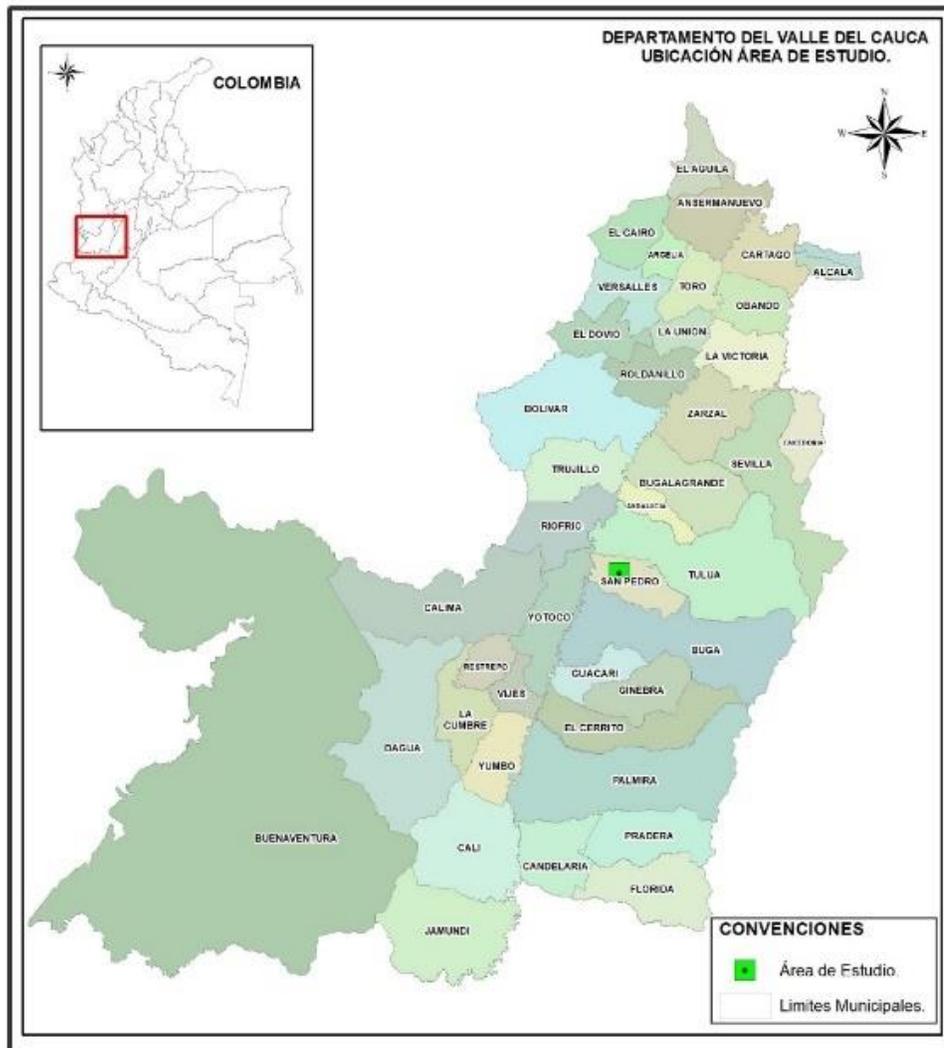
### **3.1 Localización**

La simulación se realizó en un hato bovino dedicado a la producción que se encuentra ubicado en el municipio de San Pedro, en el centro del departamento del Valle del Cauca (figura 3-1), suroccidente colombiano. Sus coordenadas: Longitud: -76.242062, Latitud: 4.004125; este sistema se encuentra entre los 900 y 1000 msnm, con una temperatura promedio de 23°C, precipitaciones anuales promedio 1000 mm y humedad relativa promedio entre 76 a 94% (IDEAM, 2020).

El sistema de producción escogido para esta simulación se hizo bajo dos criterios, primero la disposición del propietario ya que accedió a hacer parte del ejercicio, segundo por la calidad de información que se lleva y se tiene del sistema ganadero, siendo este un aspecto muy importante ya que la mayoría de los sistemas ganaderos carecen de información histórica y actual.

## 44 ESTUDIO DEL EFECTO DEL CLIMA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE UN HATO BOVINO LECHERO DESDE LA DINÁMICA DE SISTEMAS

**Figura 3-1:** Ubicación del sistema referencia donde se realizó el estudio dentro del departamento Valle del Cauca.



### 3.2 Datos del sistema productivo

Este sistema de producción bovino está dedicado a la producción de leche de forma intensiva y en condiciones de pastoreo (trópico bajo), cuenta con 55 ha total de las cuales el 87% se encuentran en pasturas (*Cynodon plectostachium*) destinadas a pastoreo rotacional de los animales, el 13% restante se encuentra en coberturas de bosque. El

componente racial del hato ganadero es Jersey (imagen 3-1), con producciones diarias para las vacas en ordeño que oscilan entre 12 y 16 litros.

**Imagen 3-1** Vacas de la raza Jersey que constituyen el hato ganadero



La información del sistema se obtuvo de la siguiente forma: información primaria, a través de mediciones en campo (sensores inalámbricos), aforos entre otros; y la secundaria se obtuvo por medio de una encuesta semiestructurada con el encargado de la finca y de la base de datos del software ganadero que maneja la finca (datos productivos y reproductivos del sistema). En la tabla No 3-1, se muestra la información más relevante del sistema, la cual se usó para la formulación del modelo.

**Tabla 3-1:** Principales variables utilizadas en modelo con sus respectivas unidades de medida y valores iniciales

Tipo de Variable	Nombre	Descripción	Hato ganadero	Unidades
Nivel	Terneras ordeño	Número de animales que conforman el grupo etario	100	Animales

46 ESTUDIO DEL EFECTO DEL CLIMA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE UN HATO BOVINO LECHERO DESDE LA DINÁMICA DE SISTEMAS

<b>Nivel</b>	Terneras Levante	Número de animales que conforman el grupo etario	80	Animales
<b>Nivel</b>	Novillas Vientre	Número de animales que conforman el grupo etario	60	Animales
<b>Nivel</b>	Vacas Ordeño	Número de animales que conforman el grupo etario	200	Animales
<b>Nivel</b>	Vacas Secas	Número de animales que conforman el grupo etario	50	Animales
<b>Auxiliar</b>	Destete terneras ordeño	Tiempo que permanecen las terneras amantadas por sus madres	4	Meses
<b>Auxiliar</b>	Edad a primera monta	Tiempo requerido para que la novilla sea servida por primera vez por el toro	20	Meses
<b>Auxiliar</b>	Tasa de venta Terneras ordeño	Porcentaje de animales que se venden	1.66%	Mes <sup>(-1)</sup>
	Tasa de muerte Terneras ordeño	Porcentaje de animales que se mueren	0.666%	Mes <sup>(-1)</sup>
	Tasa de venta Terneras levante	Porcentaje de animales que se venden	0.833%	Mes <sup>(-1)</sup>
	Tasa de muerte Terneras levante	Porcentaje de animales que se mueren	0.416%	Mes <sup>(-1)</sup>
	Tasa de venta Novillas vientre	Porcentaje de animales que se venden	0.0833%	Mes <sup>(-1)</sup>
	Tasa de muerte Novillas vientre	Porcentaje de animales que se mueren	0.0833%	Mes <sup>(-1)</sup>
	Tasa de muerte Vacas ordeño	Porcentaje de animales que se mueren	0.083%	Mes <sup>(-1)</sup>

	Tasa de venta Vacas secas	Porcentaje de animales que se venden	1.66%	Mes <sup>^</sup> (-1)
	Tasa de muerte Vacas secas	Porcentaje de animales que se mueren	0.083%	Mes <sup>^</sup> (-1)
<b>Auxiliar</b>	Concentrado comercial (Leche Estándar 70)	Cantidad de concentrado ofrecido por animal	4	Kg/vaca/día
<b>Auxiliar</b>	FDN (asociado al forraje)	Fibra Detergente Neutra	64	%
<b>Auxiliar</b>	Venta de leche	Precio de venta de leche	\$1.200	Litro

*Fuente: Elaboración propia con datos tomados de sistema de producción de estudio.*

### 3.3 Información climática

La información climática asociada al modelo se obtuvo de la estación “Buga”, de la red del Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña), que se encuentra a 5.4 km de distancia de la unidad productiva de estudio. Se obtuvo información histórica de 20 años la cual se le entregó al programa DAPA (Decision and Policy analysis) del CIAT los cuales son especialistas en modelos de proyección climática, y realizaron proyecciones de acuerdo con los escenarios RCP del IPCC. Las variables incluidas y sus respectivas unidades de medida en el modelo fueron: temperatura ambiental (°C), radiación solar (W/m<sup>2</sup>), humedad relativa (%), precipitación (mm) y velocidad del viento (m.s<sup>-1</sup>).

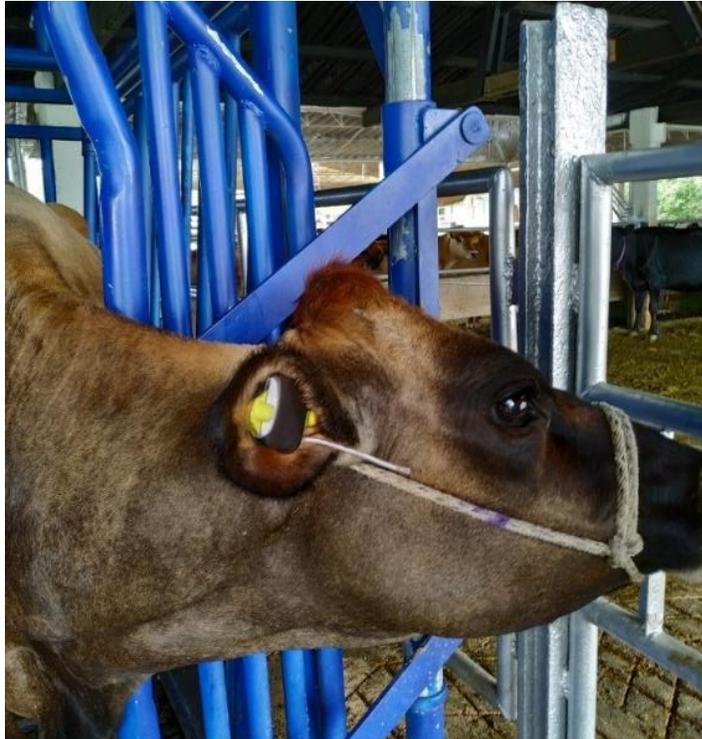
La información climática futura se obtuvo de los modelos de cambio climático del último ensamble de modelos del IPCC, con una respectiva corrección de sesgo que permite poner la información en una escala y condición apta (Navarro-Racines et al., 2015; Ramirez-Villegas & Jarvis, 2010).

### 3.4 Información temperatura timpánica

La información de temperatura timpánica fue usada como indicador de la temperatura corporal de los animales. A través de un sensor inalámbrico, el cual fue instalado manualmente en el canal timpánico de las vacas (Imagen 3-2), a través de estos sensores se recopiló información diaria (temperatura timpánica de los animales), con intervalo de

una hora entre registros. La transmisión de los datos se realizó vía bluetooth a una aplicación de celular. Los resultados utilizados para este submodelo provienen de la tesis de maestría de Perilla Duque, (2020).

**Imagen 3-2** Sensores timpánicos para medición de temperatura timpánica en animales



### 3.5 Construcción del modelo

El modelo fue construido considerando el mayor número de elementos asociados al problema de estudio (dinámica del hato, variables climáticas, producción de leche, consumo de forraje y suplementación). Se tomó la unidad productiva (finca) como límite del modelo. Dado que la información de los sensores timpánicos, etología de las vacas y variables climáticas fueron registradas horariamente, las unidades de tiempo del modelo fueron horas. Esto se hizo con el fin de no perder la respuesta a las variaciones diarias. El horizonte de tiempo del modelo fue de 8760 horas, equivalentes a un año.

### 3.5.1 Componentes del modelo

El modelo de simulación estuvo compuesto por cuatro submodelos: i) consumo de forraje, ii) producción de leche, iii) hato ganadero y iv) temperatura timpánica.

El primer submodelo se construyó con el fin de estimar el consumo de materia seca (CMS) por parte de los animales sobre las pasturas donde permanecen. Para esta estimación se utilizó la ecuación propuesta por Spedding et al., (1966) (Ecu. 3-1)

$$CMS = T * TB * PB \quad (3.1)$$

Donde:

CMS: consumo de materia seca

T: tiempo de pastoreo

TB: número de bocados por unidad de tiempo

PB: peso del bocado

El segundo submodelo se elaboró considerando las características de los alimentos ofrecidos y consumidos por los animales, (forraje y concentrado comercial) energía y proteínas de los alimentos, requerimientos de mantenimiento y producción de leche (Tedeschi & Fox, 2017)

El tercer submodelo se planteó utilizando los parámetros zootécnicos de la finca (intervalo entre partos, edad al destete, edad a la primera monta, tasas de venta y mortalidades y número de animales por grupo etario) que permitían estimar la dinámica poblacional del hato. Adicionalmente, este submodelo incluyó la producción de leche del hato y los ingresos percibidos por la venta del producto, en función del precio pagado al productor.

Temperatura timpánica, es el cuarto submodelo, el cual se encuentra en función de las variables climáticas, temperatura ambiente ( $T$ , °C), precipitación ( $P_p$ , mm), radiación solar ( $R_s$ , cal/cm<sup>2</sup>), y velocidad del viento ( $V_v$ , m/s<sup>-1</sup>) y permite observar los cambios de temperatura corporal de los animales, de acuerdo con las variables climáticas en condición

actual y en escenarios a futuro. La temperatura timpánica fue obtenida a través de sensores inalámbricos puestos en el canal timpánico de las vacas.

En el ítem de diagramas de flujos y niveles se hará más explícita la descripción de cada submodelo.

### **3.6 Hipótesis dinámica**

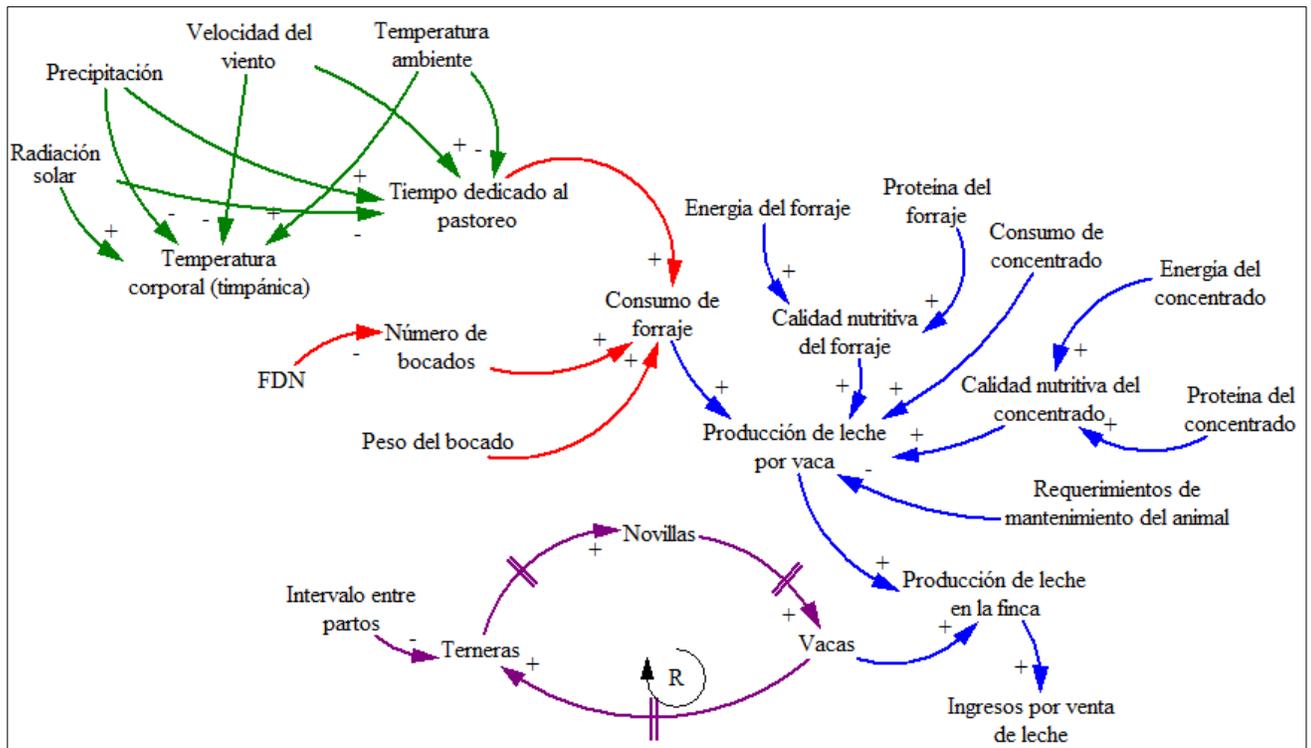
Un punto importante en la construcción de un modelo es definir cuál será el foco principal de la modelación del sistema, de tal forma que las variables y otros componentes se conecten y creen las estructuras del modelo. A partir de esta variable principal se crea el modelo agregando a su vez variables auxiliares para lograr simular los eventos que ocurren dentro del sistema y así encontrar una dinámica consistente con la realidad.

Con el fin de explicar el comportamiento del sistema a través de la estructura de realimentación construida (hipótesis dinámica), se realizó un diagrama causal (figura 3-2) que permitió identificar las variables asociadas al problema de estudio y sus múltiples interacciones, claves para comprender los patrones y comportamientos del sistema.

Para entender este tipo de diagramas es necesario tener en cuenta la polaridad de la relación causal que existe entre dos variables (+ o -) ya que determina la relación entre ellas y adicionalmente a esto se debe identificar su naturaleza si son de refuerzo (R) o balance (B).

Un enlace negativo o de balance significa que, si la causa aumenta, el efecto disminuye por debajo de lo que hubiera sido de otra manera, y si la causa disminuye, el efecto aumenta por encima de lo que hubiera sido de otra manera.

**Figura 3-2:** Diagrama causal de interacción de variables climáticas con el sistema de producción bovino de leche



El diagrama causal está orientado principalmente a estudiar como las variables climáticas afectan de forma directa el comportamiento en los animales en el consumo de materia seca y en la producción de leche en un sistema de producción bovina.

El diagrama causal está distribuido por 4 componentes: El primero componente, temperatura corporal (timpánica) de los animales está relacionado a las variables climáticas y como el tiempo dedicado al pastoreo. Las variables climáticas que son factores externos al hato lechero tienen relación directa con los animales afectando constantemente el desempeño de ellos. Hay 4 variables climáticas que componen esta sección y son: radiación solar, temperatura ambiente, precipitación y velocidad del viento, las 2 primeras al tener el signo (+) y las dos siguientes (-) nos dice que, a mayor radiación solar y temperatura ambiente, menos precipitaciones y menor velocidad del viento la temperatura corporal (timpánica) de los animales se va a elevar o va a ser mayor afectando negativamente el desempeño de los animales, modificando primero, los requerimientos

nutricionales de mantenimiento, y segundo reduciendo el tiempo dedicado a pastoreo y esto se traduce a bajo el consumo de forraje y materia seca.

El segundo componente: consumo de forraje (MS) involucra la variable, tiempo dedicado a pastoreo con otras variables como: la FDN del forraje, el número de bocados y el peso el bocado, para estimar el consumo de forraje por parte de los animales. Al reducir La FDN de los forrajes aumentara el número de bocados, y a mayor número de bocados, mayor peso de bocado y más tiempo en pastoreo, se espera que el consumo de forraje aumente.

El tercer componente tiene que ver con la producción de leche de la finca, aquí encontramos las variables que se tuvieron en cuenta para estimarla, primero, se tiene en cuenta la calidad nutricional del forraje y del concentrado, si la proteína y la energía aumentan, aumentará la calidad nutritiva tanto del forraje como del concentrado provocando un aumento de producción de leche por vaca. En este componente se encontró que si aumentan los requerimientos de mantenimiento de los animales se consideran que la producción de leche por animal disminuye, ya que tendrán que usar energía que estaría destinada para producción de leche en energía para mantener su homeostasis o equilibrio térmico.

Y el cuarto y último componente es donde observamos la dinámica del hato, aquí encontramos un bucle de refuerzo (R) caracterizado por generar crecimiento, en este caso la población del hato. Inicia con la variable: intervalo entre partos siendo este quizá la más importante para hacer que la población del hato refleje un crecimiento a largo plazo del número de animales. En el bucle se observa unos retrasos y estos tienen que ver con los tiempos de permanencia de las hembras en cada ciclo productivo, por ejemplo, el tiempo que requiere una ternera para ser novilla y posterior para ser una vaca.

Con un menor tiempo entre parto y parto se espera que haya un mayor número de terneras que luego pasaran a ser novillas y finalmente llegaran a ser vacas aumentando primero la población y segundo la producción de leche del sistema ganadero.

En este diagrama se evidencia que las mejoras directas en nutrición conducirán a un aumento de producción de leche e indirectamente mejorara la eficiencia reproductiva del

hato. A medida que el sistema de producción aborda la actividad láctea, y cuando los esfuerzos se centran en mayor eficiencia en la producción de leche hay una consecuente mejora en el ingreso al productor.

### 3.7 Diagramas de flujos y niveles

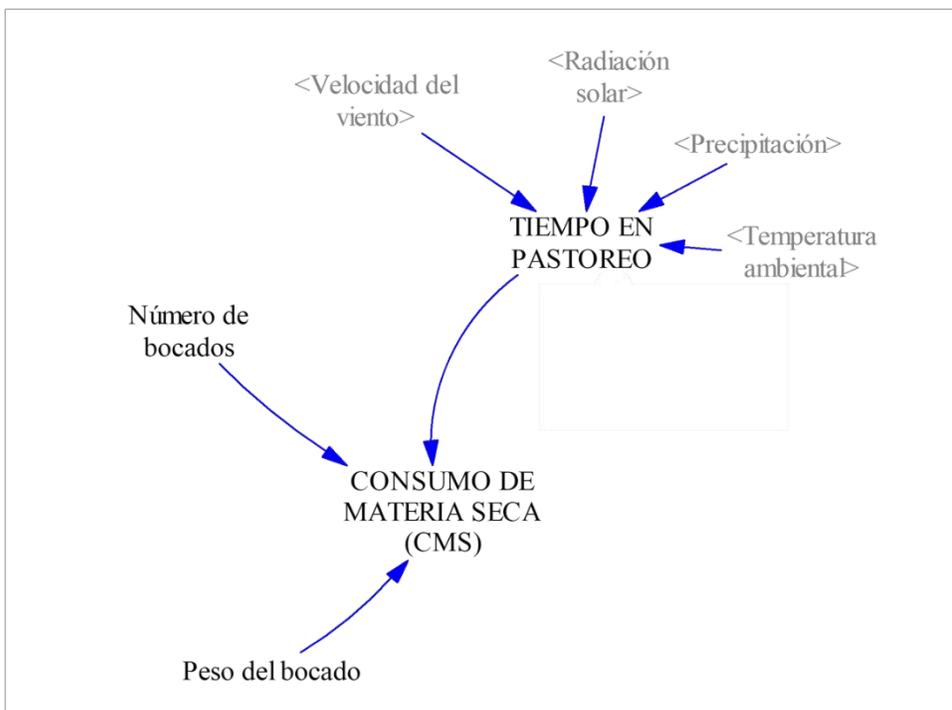
A continuación, se describe cada uno de los submodelos que componen el modelo anteriormente descrito, con sus variables y ecuaciones

#### 3.7.1 Submodelo: Estimación de consumo de pasto (MS)

En los sistemas de producción lechera la alimentación es un factor importante para obtener buenos resultados de productividad, sin embargo es una limitante ya que las condiciones climáticas afecta la disponibilidad, la calidad y la producción de los forrajes, fuente principal de la alimentación de los sistemas ganaderos de leche (Betancourt et al., 2012).

En la figura 3-3 se observa el submodelo de estimación de consumo de pasto propuesto para evaluar el consumo de materia seca por parte de los animales.

**Figura 3-3:** Submodelo estimación consumo de pasto



El submodelo propuesto para el consumo de pasto surge de la ecuación propuesta por Spedding *et al.*, (1966).

$$CMS = T * TB * PB$$

Donde:

CMS: consumo de materia seca

T: tiempo de pastoreo

TB: número de bocados por unidad de tiempo

PB: peso del bocado

La estimación del tiempo de pastoreo en función de las variables climáticas, como lo muestra la figura anterior, se obtuvo a través de una ecuación de regresión múltiple ( $R^2:0.30$ ), construida por Ríos y Solarte (2015) (Ecuación 3-2) con información comportamental e información climática recuperada de la estación meteorológica más cercana al sistema de producción analizado. Al final, se utilizaron 432 datos horarios de comportamiento (actividad de pastoreo) y clima (temperatura ambiente, radiación solar, precipitación y velocidad del viento).

$$\begin{aligned} \text{Tiempo en pastoreo} = \\ -0.720729 - (0.007136 * \text{Radiación solar}) - (0.092785 * \text{Precipitación}) + (0.043159 * \\ \text{Temperatura ambiental}) + (0.043905 * \text{Velocidad del viento}) \end{aligned} \quad (3.2)$$

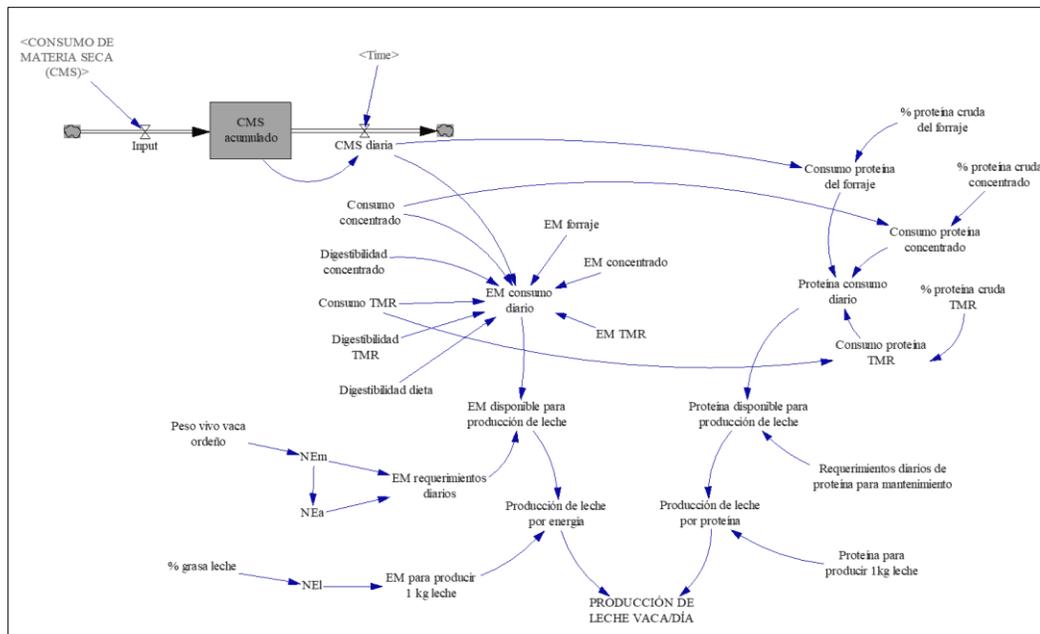
### 3.7.2 Submodelo: Estimación de producción de leche por animal

Los sistemas de producción ganaderos de leche bajo condiciones de pastoreo dependen estrechamente de la disponibilidad y calidad del forraje suministrado a los animales y este a su vez este depende en gran medida de las condiciones climáticas en la zona. (Mertens, 1994) afirma que existen una fuerte correlación entre ingesta de materia seca, el consumo de energía metabolizable (EM) o energía neta (EN), y el rendimiento general de los animales, cuando son alimentados con forraje. Según Sanchez, (2000); y West, (2003) En promedio, la reducción en la producción de leche puede ser explicada en un 40% por la reducción en el consumo de materia seca, 30% por el incremento de energía de

mantenimiento y el 30% restante por una serie de factores entre los cuales están un flujo de sangre menor a la vena porta, una reducción en la captación de nutrientes en el tracto gastrointestinal y una menor irrigación de la glándula mamaria. Adicionalmente, bajo las condiciones descritas, los requerimientos de agua se incrementan de 68 litros por animal por día a 20°C, a 120 litros a 35°C.

En submodelo de estimación de producción de leche por animal, figura 3-4 muestra todas las variables que se tienen en cuenta para dicha estimación, donde la producción está en función de la energía y la proteína ofrecida a los animales, tanto la contenida en los forrajes como la contenida en el suplemento que se les brinda, concentrado comercial (Standard 75 de Finca, tabla 3-2).

**Figura 3-4:** Submodelo: estimación producción de leche por animal



**Tabla 3-2:** Tabla nutricional de concentrado comercial “Leche Standard 75” de Finca

<b>Proteína</b>	<b>18% Min</b>
<b>Grasa</b>	4% Min
<b>Fibra Cruda</b>	12% Max
<b>Cenizas</b>	12% Max
<b>Humedad</b>	13% Max
<b>Calcio</b>	75% Min

Fuente: Elaboración propia con datos de <https://www.finca.co/lineas-de-producto/ganaderia/leche-standard-75>

A continuación, se describen las fórmulas matemáticas que se usaron para la simulación del submodelo de estimación producción de leche por animal, estas fórmulas son comunicaciones personales y apuntes de la clase “Nutrición de rumiantes avanzada” (Cuartas O, n.d.)(figura 3-4).

El flujo de entrada para obtener los requerimientos diarios de energía metabolizable (EM) está influenciado por diferentes variables como: la energía neta de mantenimiento (NEM), energía neta de actividad (NEa) y el peso vivo de los animales.

Para estimar el consumo diario de energía por parte de los animales EM (ecuación 3.3) se tuvieron en cuenta variable asociadas al contenido energético tanto del pasto como del concentrado suministrado a los animales.

$$\begin{aligned} \text{Consumo de EM dia} = & ((\text{"CONSUMO DE PASTO (MS)"} * \text{EM forraje}) * \\ & \text{Digestibilidad dieta} * 0.85 + ((\text{Consumo concentrado} * \text{EM concentrado} * \\ & \text{Digestibilidad concentrado} * 0.85) \end{aligned} \quad (3.3)$$

Para estimar el consumo diario de proteína, se tuvieron en cuenta las variables asociadas, provenientes de forrajes y concentrado

$$\begin{aligned} \text{Consumo de proteina por concentrado} = & (\text{Consumo concentrado} * 0.9) * \\ & \text{"\% proteina cruda concentrado"} \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\text{Consumo de proteína día} = (\text{Consumo proteína del forraje} + \text{Consumo proteína concentrado}) * 1000 \quad (3.5)$$

$$\text{Proteína disponible para producir leche} = \text{Proteína consumo diario} - \text{Requerimientos diarios de proteína para mantenimiento} \quad (3.6)$$

Y finalmente para estimar la producción de leche del hato que está en función de la energía y de la proteína de la dieta que se les suministra a los animales se muestran algunas fórmulas matemáticas que se usaron para correr el modelo. La energía total depende del contenido energético del forraje y el del concentrado suministrado y se muestra en las ecuaciones

$$\text{Producción de leche por energía} = \text{EM disponible para producción de leche} / \text{EM para producir 1 kg leche} \quad (3.7)$$

$$\begin{aligned} &\text{Produccion de leche por proteina} = \\ &\text{IF THEN ELSE (Proteína disponible para producción de leche} > \\ &0; \text{AND: Proteína para producir 1kg leche} > \\ &0, \text{Proteína disponible para producción de leche} / \\ &\text{Proteína para producir 1kg leche, 0)} \end{aligned} \quad (3.8)$$

\*La función IF THEN ELSE, es un condicional que permite obtener un resultado si se cumple una condición preestablecida, de lo contrario el resultado será otro (García, 2011).

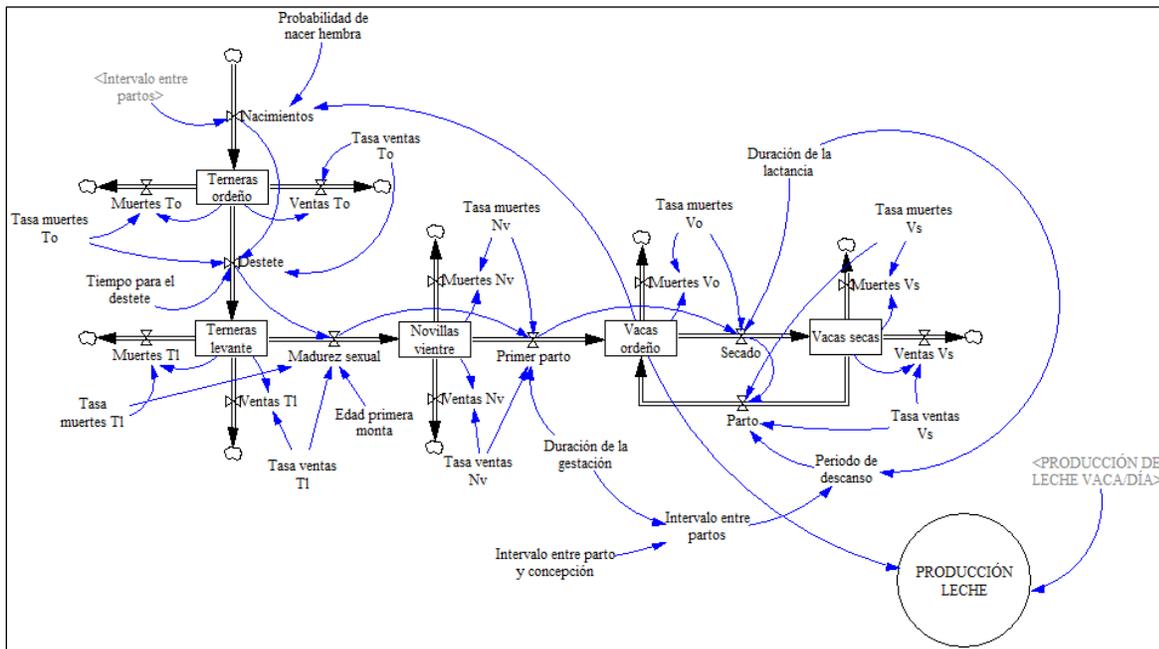
### 3.7.3 Submodelo: Submodelo de hato lechero

Generalmente en un sistema de producción lechero bovino los animales se encuentran distribuidos de acuerdo a su edad, etapa fisiológica o productiva, y aunque en los animales no se encuentre uniformidad del potencial productivo, este submodelo lo que intenta es tomar grupos de animales y no individuos haciendo promedios en cada etapa para simplificar la simulación, considerando que todos los animales en los mismos grupos tienen

el mismo nivel productivo y las mismas características sin que esto afecte el desempeño del sistema.

En el submodelo de hato ganadero lechero, que se observa en la figura 3-5, se pretende describir cómo funciona la dinámica de un sistema productivo, con flujo de animales pertenecientes a cada categoría o estado productivo como: terneras ordeño, terneras levante, novillas de vientre, vacas ordeño, vacas secas; en este diagrama solo se tuvo en cuenta las hembras ya que los terneros machos una vez nacen, solo pasan dos días dentro del sistema de producción y se dan a la venta.

**Figura 3-5:** Submodelo de hato ganadero lechero



Este submodelo está compuesto por niveles, flujos de entrada y salida, retrasos y variables asociadas a tasas de venta y mortalidad. A continuación, se detallará las ecuaciones que se usaron para la simulación:

Este submodelo está compuesto por 5 niveles (terneras de ordeño, terneras de levante, novillas de vientre, vacas ordeño y vacas secas) y cada uno de los niveles tiene sus

respectivos flujos de entrada y de salida, los flujos tienen unas variables que los afectan y se llaman tasas, y en cada nivel hay tasas por ventas y por muertes, pero para hacer que los animales pasen de un nivel a otro, esos flujos de salida tienen unas variables que representan unos retrasos y tienen que ver con el tiempo de permanencia en cada grupo. De terneras de ordeño a terneras de levante, está la variable tiempo de destete que dura 4 meses; de terneras de levante a novillas de vientre está la variable edad a primera monta que dura 20 meses; de novilla de vientre a vacas ordeño está afectada por duración de la gestación y la duración es de 9 meses y de vacas de ordeño a vacas secas el flujo de salida está afectado por la duración de la lactancia que son 10 meses.

Se detallan a continuación las ecuaciones matemáticas usadas:

$$\text{Terneras ordeño} = \text{Nacimientos} - \text{Destete} - \text{Muertes To} - \text{Ventas To} \quad (3.9)$$

$$\text{Destete (terneras)} = \text{DELAY FIXED} (\text{Nacimientos} \times (1 - (\text{Tasa muertes To} + \text{Tasa ventas To})), \text{Tiempo para el destete}, 0) \quad (3.10)$$

$$\text{ETerneras levante} = \text{Destete} - \text{Madurez sexual} - \text{Muertes Tl} - \text{Ventas Tl} \quad (3.11)$$

$$\text{Destete} = \text{DELAY FIXED} (\text{Nacimientos} \times (1 - (\text{Tasa muertes To} + \text{Tasa ventas To})), \text{Tiempo para el destete}, 0) \quad (3.12)$$

$$\text{Tasa muerte} = 5\% \text{ año } (0.05/12 = 0.00416)$$

$$\text{Tasa venta} = 5\% \text{ año } (0.05/12 = 0.00416)$$

$$\text{Madurez sexual} = 20 \text{ meses } (14.400 \text{ horas})$$

$$\text{Novillas de vientre} = \text{Madurez sexual} - \text{Muertes Nv} - \text{Primer parto} - \text{Ventas Nv} \quad (3.13)$$

$$\text{Maduración sexual} = \text{DELAY FIXED} (\text{Destete} \times (1 - (\text{Tasa muertes Tl} + \text{Tasa ventas Tl})), \text{Edad primera monta}, 0) \quad (3.14)$$

$$\text{Duración de la gestación} = 285 \text{ días } (6840 \text{ horas})$$

Tasa de muerte = 2%  $0.02/12 = 0.00166$

Tasa de venta = 5% año ( $0.05/12 = 0.00416$ )

$$\text{Vacas ordeño} = \text{Parto} + \text{Primer parto} - \text{Muertes Vo} - \text{Secado} \quad (3.15)$$

$$\text{Vacas secas} = \text{Secado} - \text{Muertes Vs} - \text{Parto} - \text{Ventas Vs} \quad (3.16)$$

$$\begin{aligned} \text{Secado} = & \text{DELAY FIXED} (\text{Primer parto} \times (1 - \\ & \text{Tasa muertes Vo}), \text{Duración de la lactancia}, 0) \end{aligned} \quad (3.17)$$

$$\begin{aligned} \text{Parto} = & \text{DELAY FIXED} (\text{Secado} \times (1 - (\text{Tasa muertes Vs} + \\ & \text{Tasa ventas Vs})), \text{Periodo de descanso}, 0) \end{aligned} \quad (3.18)$$

Intervalo entre parto y concepción = 120 días (2880 horas)

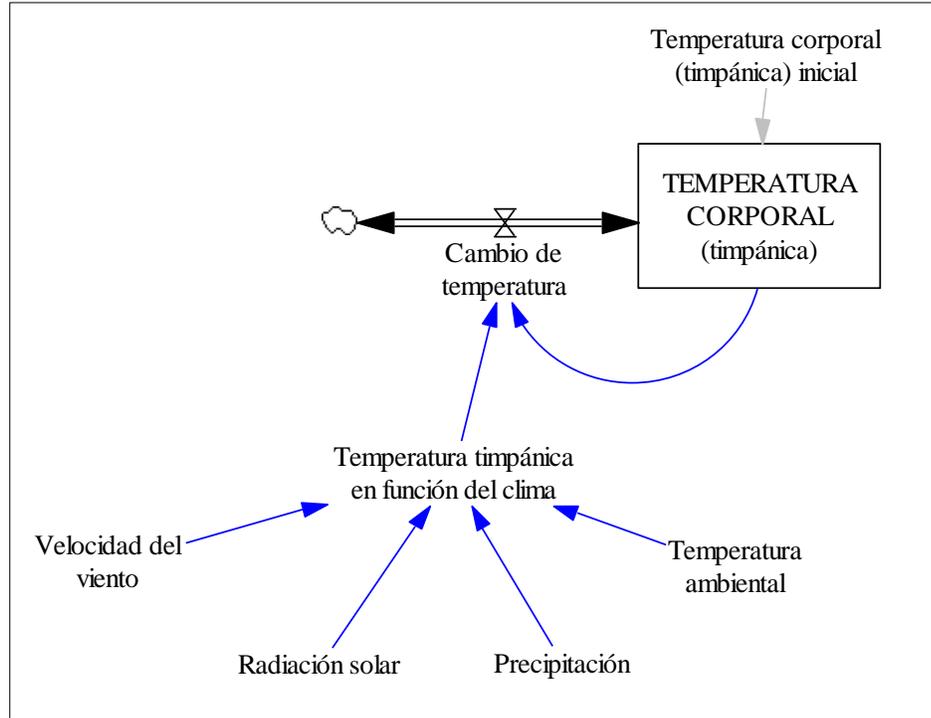
Duración de la lactancia = 300 días (7200 horas)

Tasa venta o porcentaje de despaje = 20% ( $0.20/12 = 0.01666$ )

### 3.7.4 Submodelo: temperatura timpánica

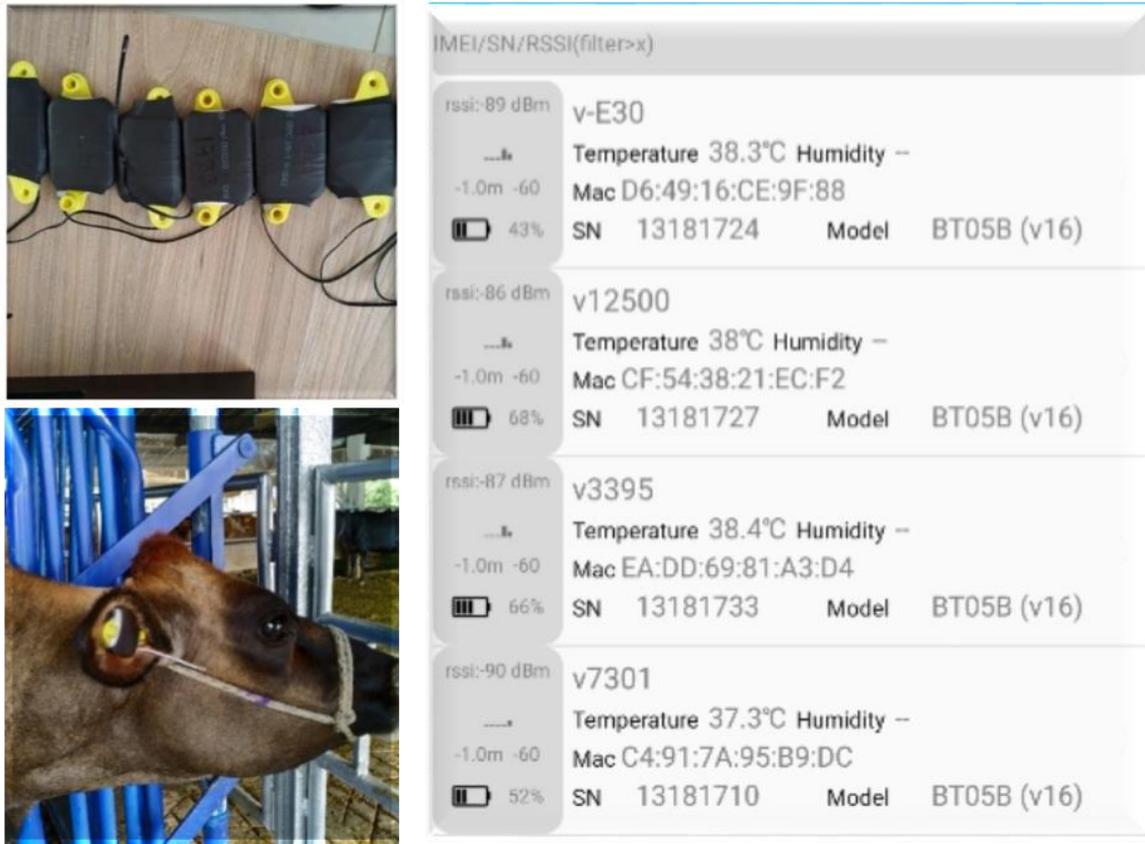
Para estimar la temperatura timpánica de los animales (figura 3-6), se construyó una ecuación de regresión múltiple ( $R^2:0.40$ ) (ecu 3.19), construida por (Perilla Duque, 2020), utilizando 1266 datos de temperatura timpánica y de las diferentes variables climáticas obtenidas del hato ganadero en estudio. La información del clima se obtuvo a través de las estaciones que conforman la red meteorológica del centro de investigación para la caña de azúcar (Cenicaña).

**Figura 3-6:** Submodelo temperatura timpánica



Los datos de temperatura corporal se obtuvieron a través de un sensor inalámbrico, instalado manualmente en el canal timpánico de las vacas, el cual recopiló información permanente cada hora, a través de un mecanismo de colecta de datos electrónico tipo orejera. La transmisión de los datos se realizó vía bluetooth a una aplicación de celular (Imagen 3-3)

**Imagen 3-3** Sensores inalámbricos tipo orejeras (izquierda) e información enviada a teléfono celular (derecha)



La ecuación de regresión se muestra a continuación:

$$\text{Temperatura timpánica} = 36.38 + (0.10 * T) - (0.01 * Hr) - (0.05 * Pp) - (0.0029 * Rs) - (0.03 * Vv) \quad (3.19)$$

Al analizar el modelo lineal de regresión múltiple, se encontró que el coeficiente de determinación generado explica poco la variación de la temperatura timpánica en función de las variables climáticas analizadas (temperatura ambiente, radiación solar, velocidad del viento y precipitación), similar hallazgo en condiciones tropicales, fue informado por (Gomes da Silva & Campos Maia, 2013). Es posible que las condiciones bioclimáticas de la zona no sean extremas, cercanas a la zona de confort propuesta para bovinos, por lo

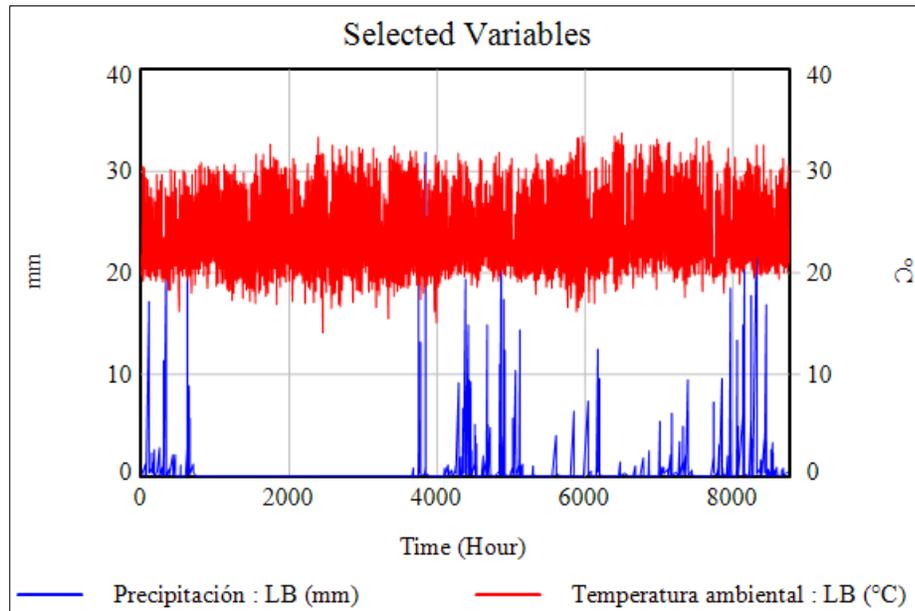
cual los mecanismos de adaptación animal ya están en total funcionamiento y no presentan modificaciones extremas sobre las variables climáticas.

### Variables climáticas incluidas al modelo

Los datos de las variables climáticas que fueron obtenidos de Cenicaña, se introdujeron al modelo por medio de la función “GET XLS DATA ({'filename'} , {'tabname'} , {'time\_row\_or\_col'} , {'first\_data\_cell'})<sup>3</sup> de Vensim PLE.

En la figura 3-7 se muestra el comportamiento de la precipitación y temperatura ambiental introducidas al modelo:

**Figura 3-7:** Comportamiento de la precipitación y temperatura ambiental en el modelo



<sup>3</sup> “GET XLS DATA ({'filename'} , {'tabname'} , {'time\_row\_or\_col'} , {'first\_data\_cell'})”.

Esta función devuelve datos de series de tiempo de Microsoft Excel para una variable de datos o un vector de variables de datos.

Restricciones: Debe aparecer directamente después del signo igual a los datos: = y no debe ir seguido de nada.

La función GET XLS DATA se invoca durante la configuración de la simulación, antes de que comience la simulación activa. Si Microsoft Excel no se está ejecutando, Vensim intentará iniciarlo. Si Microsoft Excel no tiene abierto el archivo especificado, Vensim intentará que Microsoft Excel lo abra. Si Vensim no puede obtener valores de Microsoft Excel, informa de un error. Si Vensim tiene problemas para obtener valores con esta función, primero debe intentar abrir el archivo con nombre en Microsoft Excel (VENSIM Ventana System, 2020).

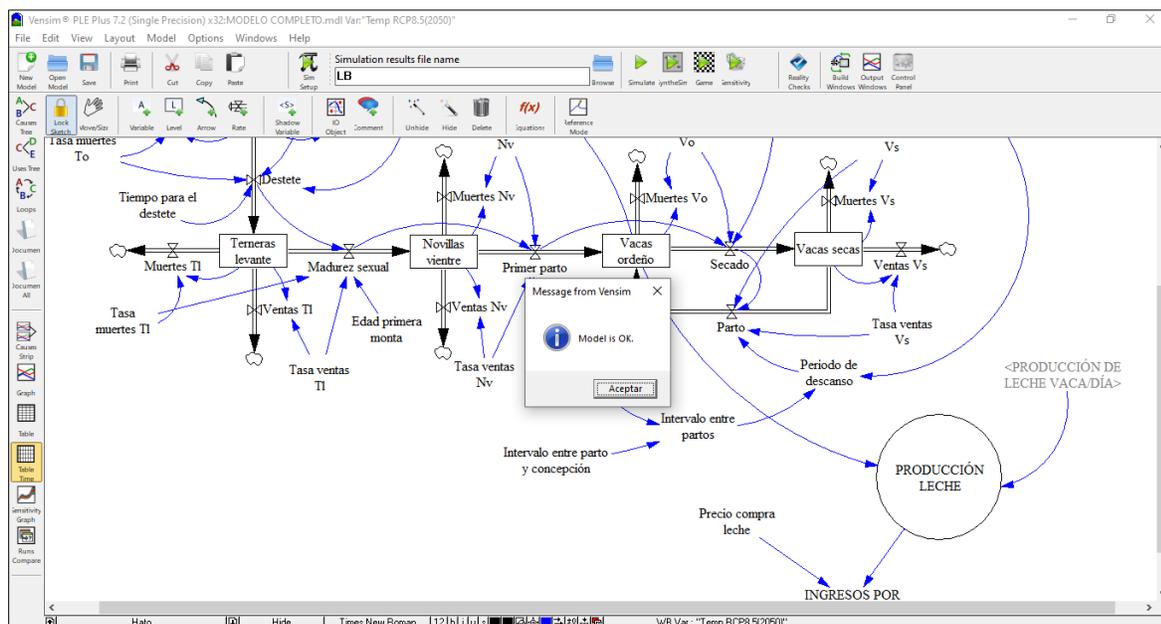
### 3.8 Validación y pruebas del modelo

La validación engloba a la verificación. Un modelo no puede ser válido si no ha sido verificado. Sin embargo, un modelo verificado puede ser inválido si representa un propósito erróneo, aunque sea sintácticamente correcto. No existen un método universal para validar los modelos de simulación dinámica porque cada modelo se valida con respecto a sus objetivos, por lo que no se puede afirmar que un modelo válido para un contexto deba serlo necesariamente para otros. Además, aunque en teoría, un modelo puede ser válido o no, probar esto en la práctica en una cuestión muy diferente.

#### 3.8.1 Prueba de valoración de la estructura

El modelo respeta las condiciones metodológicas sobre la estructura construida, cumpliendo lo siguiente: i) los niveles solo son afectados por las variables de flujo, ii) los flujos son afectados por los niveles y por variables auxiliares, iii) las variables auxiliares pueden ser afectadas por los niveles y los flujos (Schaffernicht, 2009).

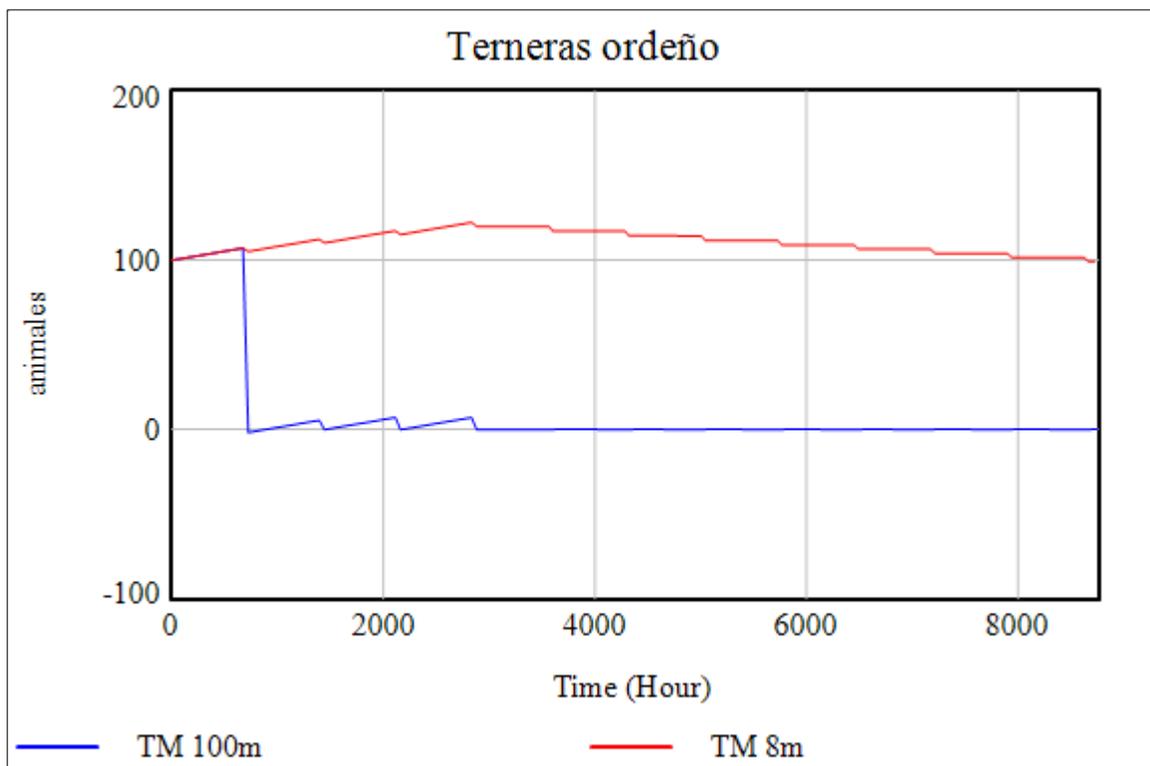
Figura 3-8: Prueba de Valoración de la estructura del modelo



### 3.8.2 Prueba de condiciones extremas

El objetivo de esta prueba es escoger alguna variable de estudio y someterla con datos, a condiciones extremas para verificar si el comportamiento de la simulación es acorde a la situación de estudio o si en cambio permite mostrar errores cuando se realiza la simulación. Por ejemplo, cuando se introdujeron valores extremos en la tasa de mortalidad de las terneras de ordeño (100%), el inventario de este grupo etario respondió al cambio realizado, y como se observa en la figura 3-9.

**Figura 3-9:** Prueba de condiciones extremas a terneras de ordeño



### 3.8.3 Prueba de análisis de sensibilidad

La finalidad de esta fase es examinar la consistencia del modelo ante cambios en los valores de los parámetros. Se busca constatar si posibles cambios en los parámetros del modelo pueden causar, o no, desviaciones en las pruebas de comportamiento ya realizadas. Se emplea para analizar el impacto que causan los diferentes valores de los parámetros sobre el comportamiento del sistema. Esta prueba ofrece la oportunidad de

hallar aquellos componentes del sistema a los cuales las variables de interés presentan mayor sensibilidad.

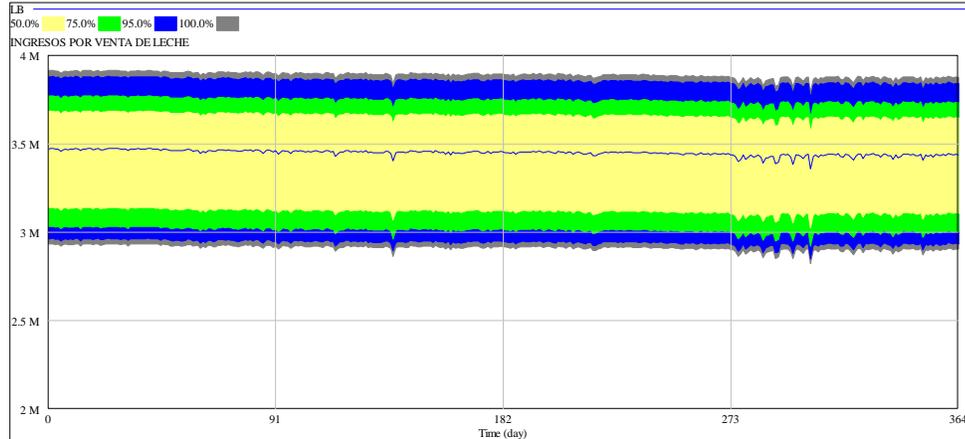
Para este caso se usó la función de análisis de sensibilidad multivariable de Monte Carlo<sup>4</sup> ofrecida por el software Vensim PLE plus. La función anteriormente descrita realizó 200 simulaciones bajo una distribución RANDOM UNIFORM para observar el comportamiento de las variables de respuesta a alteraciones en la variable donde se realizaron los cambios de valores. En la figura 3-10, se observa cómo actuaron los ingresos por venta de leche a cambios en los valores iniciales de la fibra detergente neutra del pasto ofrecido a los animales, este último utilizando un rango entre los 58 y 73%.

La configuración predefinida para esta herramienta es trazar los límites de confianza. Se generó un gráfico mostrando los límites de confianza para todos los valores de *producción de leche* que se generaron cuando los tres parámetros fueron variados al azar alrededor de sus distribuciones. La línea azul es la línea base (3.5 millones de pesos), los límites exteriores de incertidumbre (100%) muestran los valores máximos de aproximadamente 4 millones de pesos y un valor del mínimo de aproximadamente 2.9 millones de pesos al final de la simulación. Se nota la posibilidad de una disminución en la *producción de leche*. El periodo de tiempo se realizó de 1 año (365 días).

---

<sup>4</sup> “La simulación de Monte Carlo, también conocida como simulación de sensibilidad multivariable (MVSS, por su nombre en inglés), hace este procedimiento automáticamente. Cientos o incluso miles de simulaciones pueden realizarse, con Constantes muestreadas a lo largo de un rango de valores y guardar la salida para análisis posterior” (Causal Tracing et al., 2018).

**Figura 3-10:** Prueba de análisis de sensibilidad por ingreso de venta de leche



### 3.8.4 Análisis de políticas y escenarios

Uno de los beneficios al trabajar con modelos de simulación es que permite observar las reacciones del modelo de acuerdo con una o varias medidas tomadas. De esta manera se estableció una política técnica relacionada a la FDN de los pastos y un escenario de cambio climático (RCP 8.5), adicional al escenario base, en los cuales se modificaron parámetros importantes para el sistema con el fin de analizar la respuesta a dichas alteraciones.

En dinámica de sistemas, se habla de política a las estrategias y decisiones que el productor puede controlar, por otro lado, los escenarios se refieren a condiciones en donde el hombre no tiene injerencia.

#### Línea Base (LB)

Escenario en el cual se proyectó el comportamiento actual del sistema sin influencia de nuevas intervenciones.

#### Escenario 1. Fibra Detergente Neutro (FDN)

En este escenario se pretendió observar el comportamiento productivo del sistema ganadero cuando se modifica el porcentaje de FDN en el pasto ofrecido a los animales y su efecto sobre el consumo de materia seca. Cuando la temperatura aumenta, la FDN aumenta, el consumo disminuye y la producción de leche se reduce (Vélez et al.,

2003). Para este caso la relación se efectuó sobre la variable número de bocados (NB). Para este trabajo, se aumentó en dos puntos porcentuales el valor de la fibra, pasando de 64 a 66%, reduciendo en 20% el NB.

## **Escenario 2. Cambio climático (CC)**

Escenario en el que se quiso observar la respuesta de la temperatura corporal de las vacas lactantes bajo dos escenarios RCP 8.5, uno futuro 2030 y otro a 2050. Para realizar este proceso se realizaron los siguientes pasos:

1. Extracción de los valores de 15 Modelos Climáticos Globales (GCM) para cada RCP desde 1990 hasta 2070. Se hizo un promedio multi-modelo (ensemble average) por RCP.
2. Promedio mensual multianual (climatológico) de 20 años para tres periodos: histórico (1998-2028), futuro 2030s (2025-2045) y futuro 2050s (2045-2065). El periodo histórico tiene como año central 2018, que es el año en que se obtuvo la información climática referencia de la finca.

## 4. Resultados y Discusión

Una vez desarrollado y probado el modelo de simulación fue viable reproducir las dinámicas del sistema productivo evaluado. Los resultados de los escenarios y políticas se muestran a continuación respecto a componentes hato lechero - alimentación, producción e ingresos por venta de leche.

### 4.1 Línea base

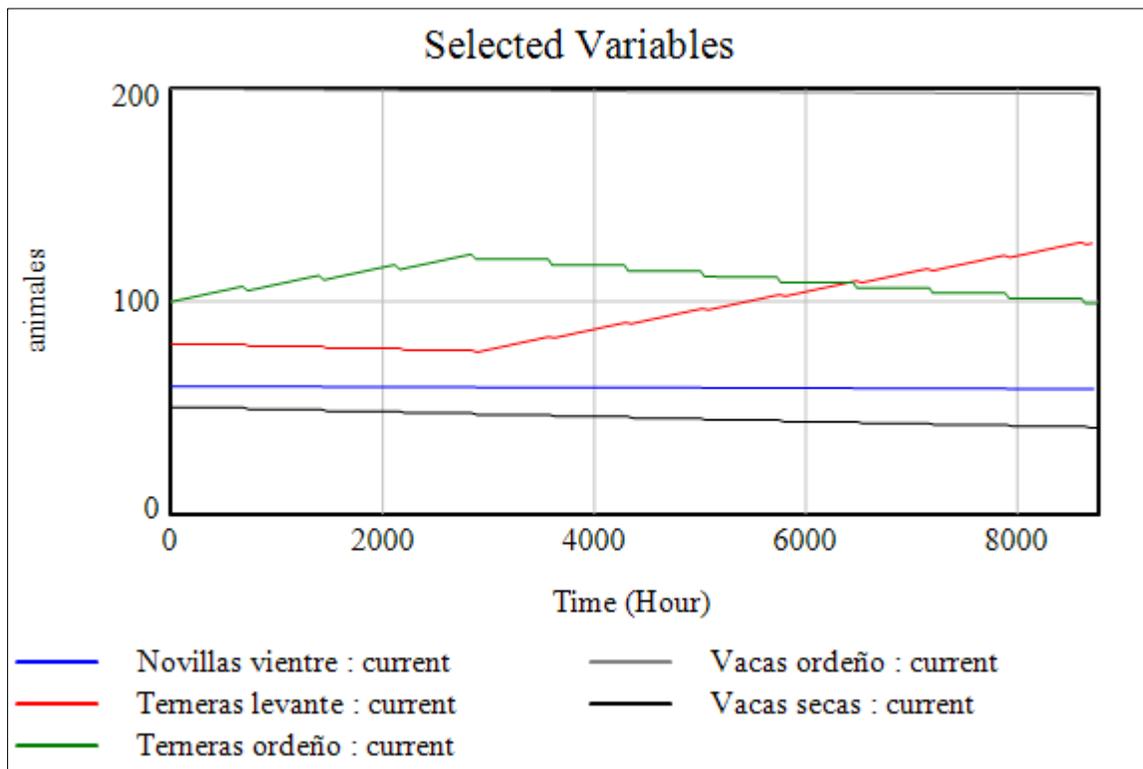
La línea base o valores iniciales que se introdujeron para la simulación son los del sistema productivo de estudio, con el fin de observar el comportamiento actual del sistema y a futuro.

#### 4.1.1 Componente hato lechero – alimentación

Para este componente se trabajaron 3 indicadores, i). comportamiento del hato lechero, ii). producción de leche y requerimientos de energía metabolizable de mantenimiento en los animales, y iii). producción e ingresos por venta de leche.

**Comportamiento de hato lechero:** En la figura 4-1 se muestra la simulación de un año para el submodelo hato lechero y el comportamiento de acuerdo con los parámetros de la finca. La figura muestra los grupos etarios que conforman el hato ganadero (terneras ordeño, terneras levante, novillas de vientre, vacas ordeño y vacas secas) y se observa el comportamiento en el tiempo de estos. Se puede observar que las vacas de ordeño presentan un equilibrio dinámico y en general se mantienen 200 vacas en ordeño para esta finca y los otros grupos se mueven de acuerdo con las tasas de mortalidad y ventas, propias de la finca.

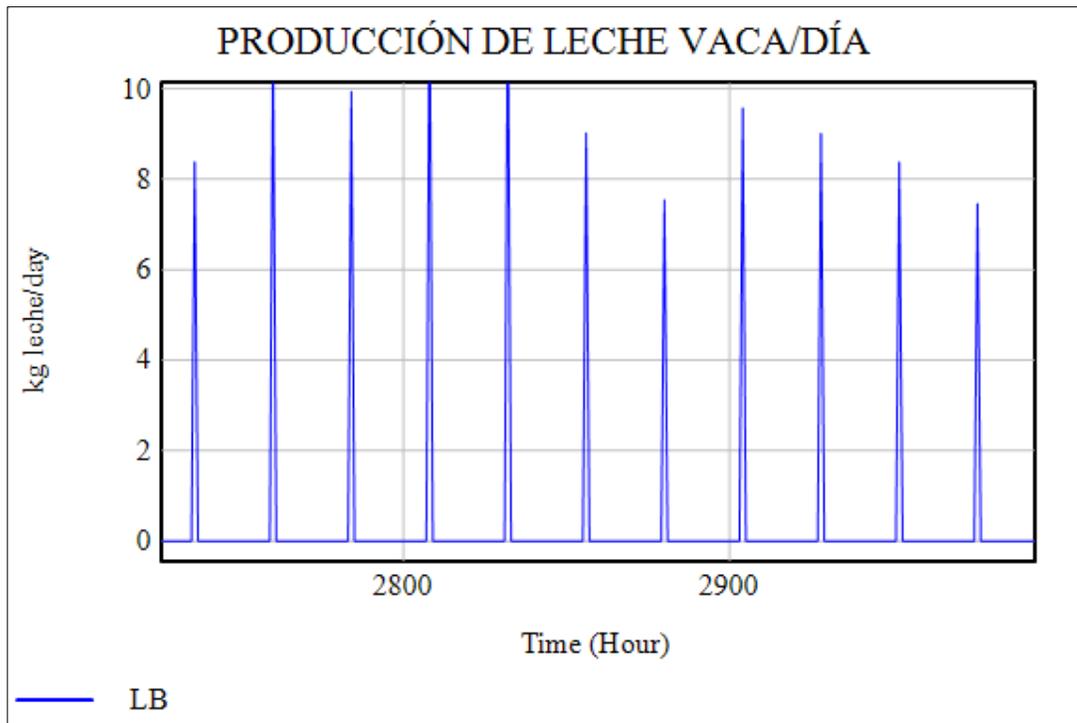
**Figura 4-1:** Línea base del comportamiento del componente hato lechero durante un año



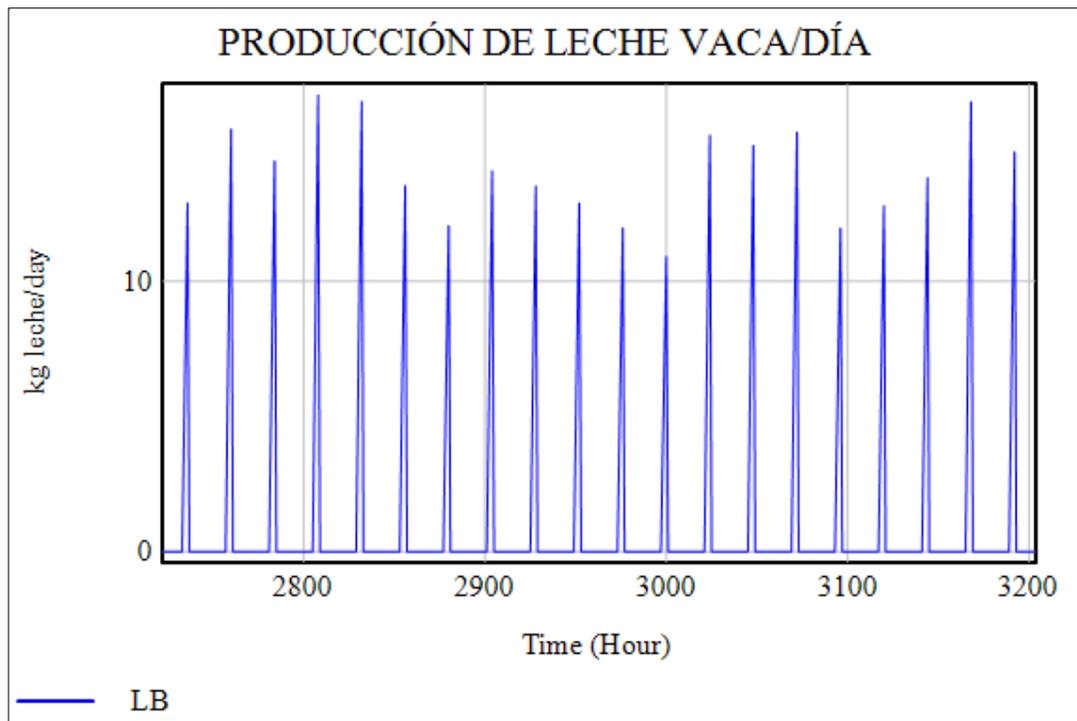
#### Producción de leche:

La primera simulación que se realizó fue la producción de leche de una vaca consumiendo únicamente forraje (pasto estrella) (figura 4-2) en un periodo de tiempo de 1 año, mostrando una producción promedio entre 7.2 hasta 10 litros/vaca/día; y en la figura 4-3 se observa la producción de leche de una vaca de la finca consumiendo forraje y suplementación de 4 Kg de concentrado/día y presentó una producción promedio entre 12 y 16 litros/vaca/día.

**Figura 4-2:** Producción de leche Vaca/día durante un año con alimentación únicamente con forraje



**Figura 4-3:** Producción de leche Vaca/día durante un año con alimentación con forraje y suplementación de concentrado (4Kg/día)



## 72 ESTUDIO DEL EFECTO DEL CLIMA SOBRE LA PRODUCCIÓN DE UN HATO BOVINO LECHERO DESDE LA DINÁMICA DE SISTEMAS

---

En el sistema de producción, el consumo promedio de materia seca por animal es 8 a 9 kg/día provenientes del forraje y tienen una suplementación de concentrado comercial (leche Estándar 70 de Finca) en promedio, 4 kg/vaca/día, lo que estima que en total los animales están consumiendo de 11 a 12 kg de MS al día, esto representa el 2,4 al 2,6 % del peso vivo de los animales y sus producciones en promedio de leche están alrededor de 15 a 16 litros/vaca/día, estos datos se asemejan a consumos y producciones observadas y reportadas por (Morales Vallecilla & Ortiz Grisales, 2018) donde encuentran que en fincas con características similares a la de estudio, reportan consumos de MS por parte en los animales en promedio de 9 kg/vaca/día provenientes del forraje y un suministro de 4 kg de concentrado comercial (2,4% del PV de los animales), mostrando una producción de leche de 16 litros/vaca/día.

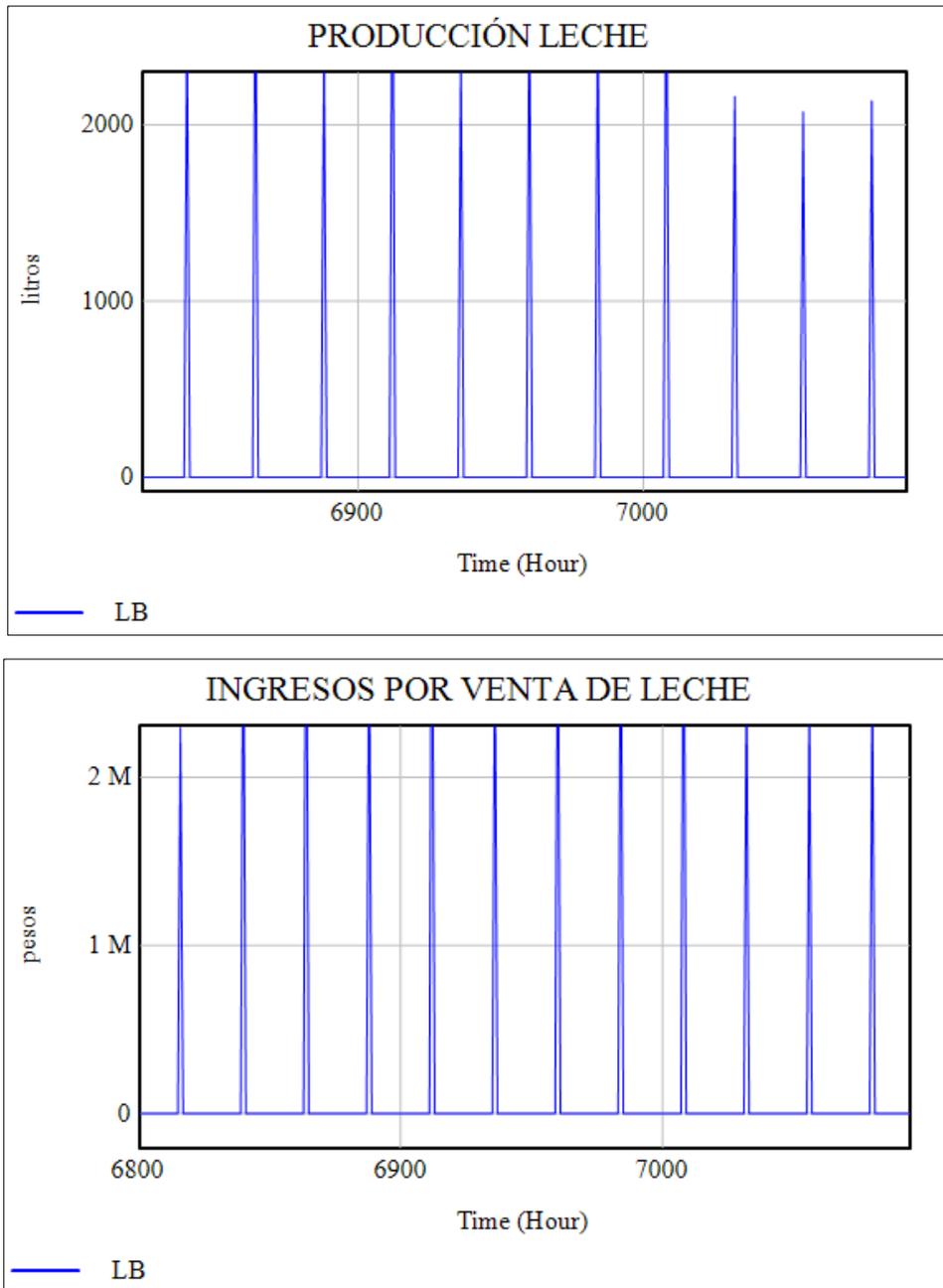
En otro estudio en Veracruz México, también muestra una ganadería doble propósito muestra valores similares a los de este estudio mostrando que el consumo de materia seca en promedio era de 13.96 Kg/vaca/día (proveniente de forrajes tropicales y concentrado comercial 3.0 kg/día) para vacas en producción y con una producción de leche promedio de 12.8 a 13.9 litros/vaca/día dependiendo de la época del año (periodos secos o de lluvias) (Juárez et al., 2011), sin embargo comparando estos valores con los reportados por (Kolver y Muller 1998) son valores bajos ya que reportan 19 kg de MS/día/vaca (3,4% de PV) con vacas en pasturas de alta calidad como el *Rey Grass*. Sin embargo suponen que la asimetría del consumo de materia seca en pastoreo por parte de las vacas que tiene un alto potencial lechero se ve reflejado en producciones moderadas y son susceptibles a mejoras por medio de forrajes de mayor valor biológico y sugieren los autores que de acuerdo a estos valores en los sistemas de producción de la región se deberá mejorar en la calidad de los forrajes si se quiere permanecer competitivos frente a la llegada de leche de otras regiones o países, ya que un aumento en la producción de leche por animal ayudara a sobrellevar los costos de producción en el los sistemas ganaderos del Valle del Cauca, (Morales Vallecilla & Ortiz Grisales, 2018). .

### **Ingresos por venta de leche**

Los ingresos por venta de leche están en función de la producción individual de los animales y la cantidad de estos mismos en etapa de producción, en la figura 4-4 se observa

la producción de leche durante el año y los ingresos por venta. En promedio la producción de leche/año, está entre 2200 y 2700 litros/día y los ingresos entre 2 y 3 millones de pesos día. Es importante tener en cuenta que los ingresos también se ven afectados por el precio que se paga por litro de leche, para este caso fue de \$ 1200 litro recogido en finca.

**Figura 4-4:** Comportamiento de ingresos y producción de leche



## 4.2 Escenario 1. Aumento FDN

La FDN del forraje en el sistema de producción de estudio presentó valores de 64% (datos de la finca), pero se evidenció que en épocas secas la FDN de los forrajes aumenta. En la tabla 4-1 se observa una pequeña muestra<sup>5</sup> de los resultados de la simulación en la producción de leche (por animal) cuando consumen forraje con FDN de 64% y de 66%. En la tabla se observa que las producciones con un consumo de forraje teniendo la FDN con 64% (LB) presentan producciones promedio entre 12 y 16 litros de leche/vaca/día y al realizar la simulación con la FND de 66% presenta una baja producción de leche/día. En las épocas donde la FDN de los forrajes aumenta ya sea por manejo, épocas secas u otros, no solo se ve reflejado es una disminución en la producción de leche, sino que también afecta el consumo por parte de los animales. La literatura reporta que existe una correlación entre el consumo de forraje y la productividad de los animales y esa correlación se ve afectada por diferentes factores según Hodgson & Illius, (1997) estos factores son: “Factores intrínsecos: Producto de la variabilidad del animal (raza, hábitos alimenticios, potencial productivo). - Factores extrínsecos: Producto de la calidad de la dieta ofrecida, prácticas de manejo (suplementación, carga animal, dietas, frecuencia de alimentación, etc.) y el estrés calórico”.

**Tabla 4-1:** Tabla de resultados de producción de leche con la FDN en 64% y 66% (litros/vaca/día)

Día	Producción de leche litros/vaca/día		
	FDN 64%	FDN 66%	Diferencia
1	16,41	12,35	-4,06
2	13,71	10,16	-3,55
3	12,38	9,08	-3,3
4	13,91	10,32	-3,59
5	15,91	11,94	-3,97
6	13,35	9,87	-3,48
7	12,29	9,02	-3,27

---

<sup>5</sup> Pequeña muestra ya que todos los modelos y las simulaciones que se realizaron se corrieron con esta unidad de tiempo (hora) ya que así mismo se recolectaron los datos para este estudio.

<b>8</b>	12,48	9,17	-3,31
<b>9</b>	14,44	10,75	-3,69
<b>10</b>	12,84	9,46	-3,38
<b>11</b>	14,16	10,53	-3,63
<b>12</b>	12,62	9,28	-3,34
<b>13</b>	12,39	9,1	-3,29
<b>14</b>	12,5	9,18	-3,32
<b>15</b>	12,45	9,14	-3,31

La tabla anterior evidencia que, al presentar un valor alto (66%) en la FDN de forrajes de consumo para los animales, la producción de leche disminuye en promedio 4 litros vaca/día, esto implicaría bajos ingresos por venta de leche al productor. Se considera que una FDN muy alta limita a los animales tanto en consumo como en digestión, según Van Soest (1982), los forrajes con un contenido de FDN menor que 40% son considerados de buena calidad, mientras que aquellos con FDN mayor que 60 pueden influir con la digestión y consumo. Mertens 1985 y Belyea et al., 1996 afirman que un alto contenido de FDN en los forrajes está correlacionado positivamente con la densidad del forraje y el llenado del rumen, de tal manera que un mayor contenido de FDN significa un menor CMS. Esto implica que podría existir un límite para el CMS en función de la concentración de FDN de la dieta. En otro estudio de (Juárez Lagunes et al., 1999) afirma que las predicciones de la cantidad de leche que podría producirse en función de la cantidad de energía metabolizable suministrada por la dieta disminuyeron un 35% cuando la FDN aumentó del 60 al 80% y aumentaron un 88% cuando la tasa de digestión la FDN aumentó del 3 al 6%.

Así mismo como varía la producción de leche en el sistema de producción, fluctúa en los ingresos al productor conllevando a tener pérdidas significativas. El cambio del porcentaje en la FDN de los forrajes puede ser consecuencia de varios factores como: manejo de praderas (rotación de potreros, tiempo de permanencia), manejo agronómico de las praderas, variabilidad climática, entre otras.

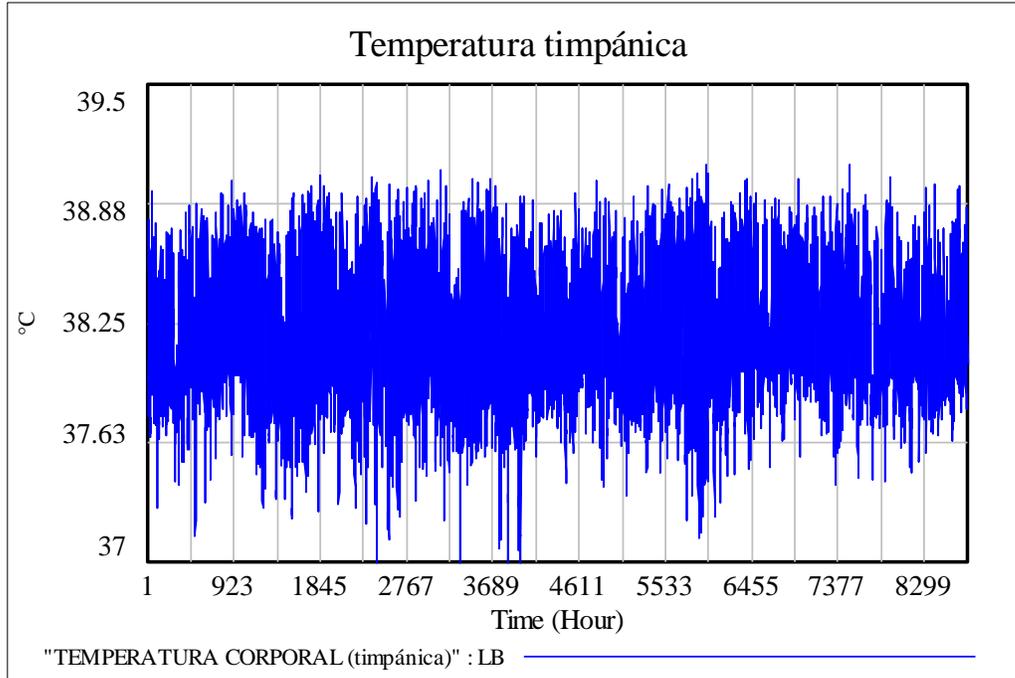
### **4.3 Escenario 2. Efecto del cambio climático sobre la temperatura timpánica**

En este segundo escenario, se realizó la simulación del comportamiento de la temperatura de los animales en dos escenarios de cambio climático a futuro, (RCP 8,5), uno en el 2030

y otro en el 2050, teniendo como línea base (LB) el registro de temperatura que se realizó a los animales del sistema de producción durante 1 año, (2018-2019).

En la figura 4-5 se observa el comportamiento de la temperatura timpánica de los animales hora a hora, denominado LB. Existen diferentes formas o métodos de toma de temperatura en bovinos y para esta investigación el método de toma temperatura timpánica con sensores mostró una gran ventaja ya que por la cercanía de la cavidad timpánica al hipotálamo, permitió recibir cambios de temperatura más rápidamente y con mayor sensibilidad y mejor manejo para el tiempo de investigación que se hacía; (Bergen & Kennedy, 2000; Chue et al., 2012) reportan que esta toma de temperatura interna resulta ser un referente confiable, porque la sangre que fluye a través de los vasos de la membrana timpánica viene de la rama de la arteria carótida que también irriga al hipotálamo.

En otro estudio realizado por Ybañez et al., (2015) encontró una correlación moderada ( $R=0.61$ , regresión lineal valor de  $P < 0.05$ ) entre la temperatura timpánica y rectal en el ganado. También es similar a los resultados de Yaron et al., (1995) donde la correlación entre las lecturas de temperatura rectal y temperatura timpánica fue excelente, En otros estudios realizados por Prendiville et al., (2002) donde también se estudió la temperatura corporal en animales con temperatura rectal y timpánica, encontraron que no hubo diferencia ( $P > 0.05$ ) entre la temperatura timpánica y rectal.

**Figura 4-5:** Temperatura corporal timpánica hora a hora

La temperatura corporal de los animales esta expresada en °C y como se mencionó anteriormente fue registrada hora a hora; en la gráfica se evidencia las oscilaciones de cambios de temperatura a través de tiempo mostrando un mínimo de temperatura entre 36,6 °C y 37% y una máxima entre 37,8 y 39 °C; la temperatura corporal (TC) de los animales es el mejor indicador si los animales se encuentran en homeotermia. Los rangos ajustados de temperatura corporal que reporta la literatura según Hillman, (2009) son de 38 – 39 °C, y esta temperatura se puede ver influenciada por diferentes factores, externos como variables climáticas e internos como actividades propias de los animales, como fisiología, consumo de alimento, producción de leche, entre otras (Arias et al., 2017)

### Escenarios RCP 8,5 para 2030 y 2050

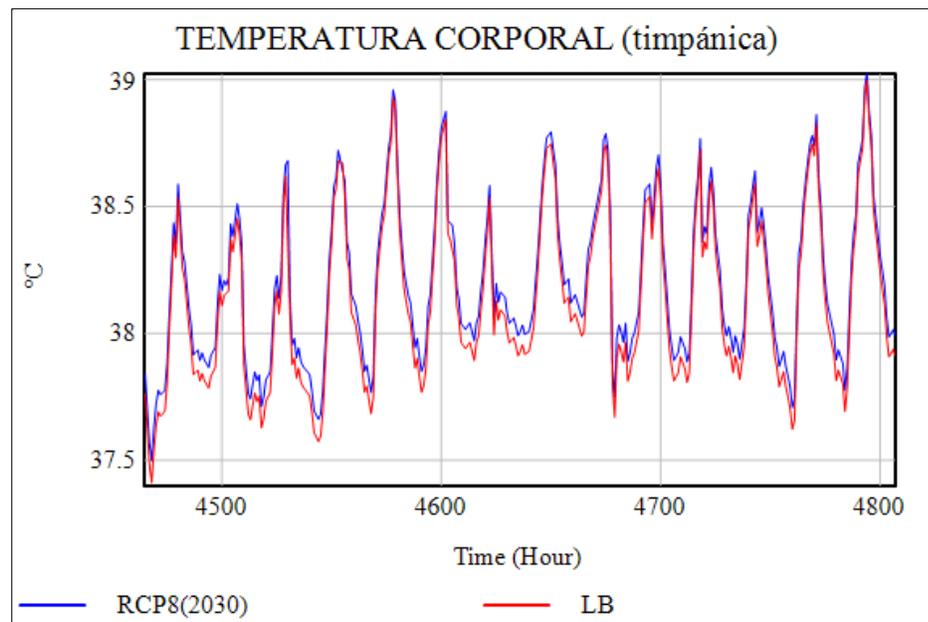
Aplicando los escenarios RCP 8.5 propuestos por el IPCC para los años 2030 y 2050, donde se espera que la temperatura global en superficie sea mayor a 2°C, se realizó la simulación de estos dos escenarios teniendo como LB la temperatura de los animales del sistema de estudio. En las dos gráficas (4-6 y 4-7) se observa como la temperatura corporal de los animales aumenta respecto a la actual, siendo más marcada en la gráfica 4-7 correspondiente al escenario para el año 2050. Este comportamiento es derivado de los

aumentos de temperatura ambiental proyectados por el IPCC donde en sus informes menciona que es prácticamente seguro que se produzcan temperaturas extremas calientes más frecuentes y frías menos frecuentes en la mayoría de las zonas continentales, en escalas temporales diarias y estacionales. Afirma que, conforme vaya aumentando la temperatura media global en superficie es muy probable que haya olas de calor con mayor frecuencia y más duraderas. Si bien el aumento de temperatura corporal de los animales no se ve tan alto en las medidas de temperatura timpánica, a nivel fisiológico si podría llegar a presentar cambios de otro tipo que se podrían evaluar en otra investigación.

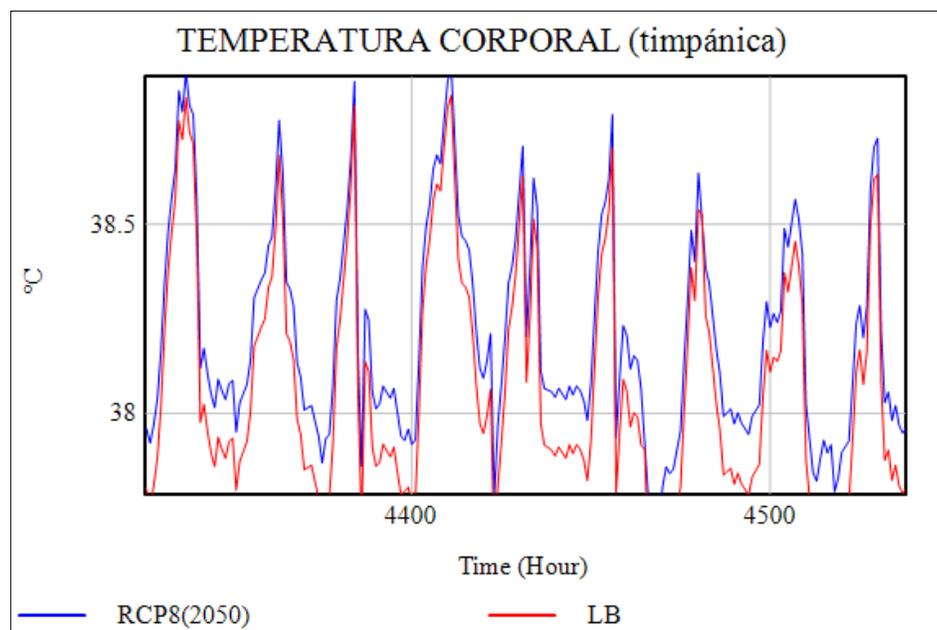
Así como estos cambios afectan a los animales directamente, todos los cambios que ocurran a nivel climático afectaran seriamente todo el sistema en general; es así como los efectos de cambio climático producen cambios en variables como la temperatura, las precipitaciones, radiación solar y estos condicionan el alojamiento, los forrajes y cosechas para la alimentación ganadera (Pezo, 2019). Pitesky et al., (2009) afirma que las modificaciones ambientales que se producirán afectaran principalmente a las ganaderías extensivas o de pastoreo ya que estas se encuentran más ligadas a condiciones naturales del medio.

Desde el punto de vista de la alimentación del ganado, el aumento de temperaturas influirá principalmente en zonas tropicales, producto de esto el ganado consumirá menos alimento. Su producción, por lo tanto, será menor, dando lugar a una situación de estrés fisiológico. En cuanto a los pastos y los forrajes, la ausencia de precipitaciones hará que los pastos se desarrollen más lentamente (Durango et al., 2017).

**Figura 4-6:** Temperatura timpánica como línea base y aplicando un escenario RCP8.5 a mediano plazo (2030)



**Figura 4-7:** Temperatura timpánica como línea base y aplicando un escenario RCP8.5 a largo plazo (2050)





## 5. Conclusiones

La construcción y el posterior desarrollo del modelo por medio de la dinámica de sistemas resultó ser una herramienta valiosa y útil para entender las múltiples interacciones que influyen sobre un sistema, y para este caso permitió entender el efecto que tienen las variables climáticas sobre el sistema ganadero en aspectos comportamentales como consumo de forraje y en la producción de leche, en tal sentido el presente proyecto permitió estimar variables productivas actuales y la simulación a futuro en los dos escenarios propuestos.

Bajo las condiciones en las que se desarrolló el presente estudio, los resultados obtenidos sugieren que:

Conocer y evaluar el comportamiento ingestivo de las vacas en pastoreo permite generar datos para construir una estimación de consumo de materia seca y posterior estimación de producción de leche de acuerdo con ello, sin embargo, este método no es exacto y puede generar dudas acerca de los valores que pueden variar. La estimación por medio de este método en esta investigación fue un promedio de 8 a 9 kg de MS/vaca/día proveniente del forraje y 4 Kg del concentrado (2,4% – 2,6% de su peso vivo).

A propósito de lo anterior se realizó una simulación de alimentación a una vaca con solo forraje durante 1 año y se obtuvo que, los animales al consumir solo 8 o 9 kg de MS provenientes del forraje la producción de leche fue de 7 a 10 litros/día, lo cual para el potencial genético que presenta los animales de la finca (Jersey) se espera un poco más, asumiendo que solo dependiera de ello. Finalmente se realizó la simulación de los animales de la finca consumiendo la MS proveniente del forraje más la suplementación que les suministra y se obtuvo que, la producción de leche aumenta y está en promedio

entre 12 a 16 litros/vaca/día obteniendo que estos datos se asemejan más a los del sistema de producción de estudio.

Es claro que con las producciones de leche que se estimaron anteriormente los ingresos, producto de la venta de leche al productor se encuentra entre 2 y 3 millones de pesos al día con producciones diarias total de 2400 a 3200 litros de leche.

Tenemos que al proponer la política de la FDN pasándola de 64% a 66% y realizando la simulación correspondiente se encontró que: el aumentar 2 puntos porcentuales afecta el consumo de los animales, reduciendo hasta un 20% el número de bocados por animal, descendiendo así el consumo de MS al día, resultado que se reflejará en la producción de leche disminuyendo en promedio 4 litros por animal al día y por ende los ingresos por venta de leche. Con esto es importante afirmar que la calidad y cantidad de forraje influye en la producción de leche de los animales.

Los resultados de las simulaciones bajo dos escenarios RCP 8.5, uno futuro 2030 y otro a 2050 revelaron que la respuesta de la temperatura corporal de las vacas lactantes aumenta a medida que también lo hace la temperatura ambiente y se espera que sea más representativa en 2050 teniendo en cuenta que se espera que la temperatura ambiental global aumente 2°C. Ciertamente esto sugiere que se realicen investigaciones para mitigar los daños que podrán causar a futuro las variables climáticas a los sistemas de producción ganadera ya que producto también de estos cambios en las variables ambientales viene problemas indirectos que afectan los sistemas y son la aparición de enfermedades, escases de agua y la producción y calidad de los forrajes.

En el caso de los recursos forrajeros, el efecto de estos cambios hará que estos estén expuestos a temperaturas mayores, a una mayor demanda de agua por aumento de la evapotranspiración y también tendrán que enfrentar las variaciones de las épocas de lluvia y de sequía prolongadas, en el caso de exceso de lluvias los forrajes podrían enfrentarse a eventos un poco más severos como inundaciones y desarrollo de enfermedades.

---

Se requieren futuros estudios en donde el análisis de la temperatura corporal y la etología de los animales no solo sea en función del clima, si no, incluir otras variables fisiológicas y productivas como peso metabólico, tamaño, condición corporal, raza, color del pelo, entre otras, las cuales podrían ser analizadas y así poder estudiar mecanismos de adaptación y estrategias para mitigar los efectos del cambio climático y conocer procesos de respuesta al estrés calórico en sistemas ganaderos bovinos bajo pastoreo en condiciones de trópico bajo.

## Bibliografía

- Ackoff, R. L. (1994). Systems thinking and thinking systems. *System Dynamics Review*, 10(2), 175–188. <https://doi.org/10.1002/sdr.4260100206>
- Alayón-Gamboa, J. A., Jiménez-Ferrer, G., Piñeiro-Vázquez, Á. T., Canul-Solís, J., Albores-Moreno, S., Villanueva-López, G., Nahed-Toral, J., & Ku-Vera, J. . (2018). Greenhouse Gas Mitigation Strategies in Livestock Production. *Agroproductividad*, 11(2), 9–15. <https://go.gale.com/ps/anonymous?id=GALE%7CA537267566&sid=googleScholar&v=2.1&it=r&linkaccess=fulltext&issn=&p=IFME&sw=w>
- Aracil, J. (1995). Dinámica de sistemas. *Publicaciones de Ingeniería de Sistemas*, 88. [http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30937935/Aracil\\_Gordillo\\_DS.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1459994585&Signature=RWjAdKFm/D+Aeud+2RUzsgqpCmw=&response-content-disposition=inline; filename=Dinamica\\_de\\_sistemas.pdf](http://s3.amazonaws.com/academia.edu.documents/30937935/Aracil_Gordillo_DS.pdf?AWSAccessKeyId=AKIAJ56TQJRTWSMTNPEA&Expires=1459994585&Signature=RWjAdKFm/D+Aeud+2RUzsgqpCmw=&response-content-disposition=inline; filename=Dinamica_de_sistemas.pdf)
- Arias, R., Mader, T., & Escobar, P. (2008). Factores climáticos que afectan el desempeño productivo del ganado bovino de carne y leche. *Archivos de Medicina Veterinaria*, 40(1), 7–22. <https://doi.org/10.4067/s0301-732x2008000100002>
- Arias, R., Velásquez, A., Alvarado-Gilis, C., Keim, J., & Gandarillas, M. (2017). Efecto del transporte de novillos gordos, alimentados con dos niveles de energía metabolizable, sobre su temperatura timpánica como un indicador de bienestar. *Agro Sur*, 45(1), 11–18.

- <https://doi.org/10.4206/agrosur.2017.v45n1-03>
- Arnold Cathalifaud, M., & Osorio, F. (1998). Introducción a los Conceptos Básicos de la Teoría General de Sistemas. *Cinta de Moebio*, 3, 12.  
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10100306>
- Atrian, P., & Shahryar, H. A. (2012). Heat Stress in Dairy Cows (A Review). *Research in Zoology*, 2(4), 31–37.  
<https://doi.org/10.5923/j.zoology.20120204.03>
- Bala, B. K., Arshad, F. M., & Noh, K. M. (2017). System Dynamics Modelling and Simulation. In *Dealing with Real-World Complexity*. Springer Science + Business Media. [https://doi.org/10.1007/978-3-8349-8074-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-8349-8074-8_6)
- Barros, M. (2017). *Los indicadores del bienestar animal y su importancia relación con la producción del ganado de leche*. 35.
- Benavides, H. O., & Leon, G. E. (2007). Información técnica sobre Gases de Efecto Invernadero y el cambio climático. *Ideam-Meteo*, 1–102.  
<https://doi.org/IDEAM-METEO/008-2007>
- Bergen, R. D., & Kennedy, A. D. (2000). Relationship between vaginal and tympanic membrane temperature in beef heifers. *Canadian Journal of Animal Science*, 80(3), 515–518. <https://doi.org/10.4141/A00-033>
- Betancourt, J., Cuastumal, H., Rodríguez, S., Navia, J., & Insuasty, E. (2012). Alimentación de vacas Holstein con suplemento de papa de desperdicio (*solanum tuberosum*) y acacia negra (*acacia decurrens*), y su efecto en la calidad de leche. *INVESTIGACIÓN PECUARIA*, 41, 41–51.
- Bianca, W. (1968). Thermoregulation. In: Hafez ES (ed). *Adaptation of Domestic Animals*. Lea & Febige; Philadelphia, USA, 97–118.
- Buitrago-Guillen, M. E., Ospina-Daza, L. A., & Narváez-Solarte, W. (2018). Silvopastoral systems: An alternative in the mitigation and adaptation of bovine production to climate change. *Boletín Científico Del Centro de Museos*, 22(1), 31–42. <https://doi.org/10.17151/bccm.2018.22.1.2>
- Calsamiglia, S., Bach, A., De Blas, C., Fernández, C., & García-Rebollar, P. (2009). Necesidades Nutricionales para Rumiantes de Leche Normas

- FEDNA. In *Ediciones Peninsular SL*. (Vol. 53, Issue 9).
- Castaño Quintana, K., Chará, J., Giraldo, C., & Calle, Z. (2019). *Manejo integrado de insectos herbívoros en sistemas ganaderos sostenibles* (K. C. Quintana, J. C. Orozco, C. Giraldo, & Z. Calle (eds.); CIPAV).  
[https://www.researchgate.net/profile/Karen\\_Castano3/publication/340447532\\_El\\_nuevo\\_libro\\_titulado\\_Manejo\\_integrado\\_de\\_insectos\\_herbivoros\\_en\\_sistemas\\_ganaderos\\_sostenibles\\_puede\\_ser\\_descargado\\_gratuitamente\\_a\\_traves\\_del\\_siguiete\\_enlace\\_httpwwwcipavorgcop](https://www.researchgate.net/profile/Karen_Castano3/publication/340447532_El_nuevo_libro_titulado_Manejo_integrado_de_insectos_herbivoros_en_sistemas_ganaderos_sostenibles_puede_ser_descargado_gratuitamente_a_traves_del_siguiete_enlace_httpwwwcipavorgcop)
- Causal Tracing, Check, R., & SyntheSim. (2018). *Vensim*.  
<http://www.vensim.com/documentation/vensim.htm>. Los
- Cedeño., A. J. R. (2011). Efecto Del Estres Calorico En El Bienestar Animal, Una Revision En Tiempo De Cambio Climatico. *Espanciencia*, 2(82), 15–25.  
<http://espanciencia.edu.ec/revista/2011/V2N1/8.pdf>
- Chacon, E. A., Stobbs, T. H., & Dale, M. B. (1978). Influence of sward characteristics on grazing behaviour and growth of Hereford steers grazing tropical grass pastures. *Australian Journal of Agricultural Research*, 29(1), 89–102.
- Chhabra, A., Manjunath, K. R., Panigrahy, S., & Parihar, J. S. (2009). Spatial pattern of methane emissions from Indian livestock. *Current Science*, 96(5), 683–689. <https://www.jstor.org/stable/24104562>
- Chue, A. L., Moore, R. L., Cavey, A., Ashley, E. A., Stepniwska, K., Nosten, F., & McGready, R. (2012). Comparability of tympanic and oral mercury thermometers at high ambient temperatures. *BMC Research Notes*, 5.  
<https://doi.org/10.1186/1756-0500-5-356>
- Clay McRoberts, K. (2010). *Rural Development Challenges: System Dynamics Ex Ante Decision Support For Agricultural Initiatives In Southern Mexico* (Issue January). Cornell University.
- Conrad, J. H. (1985). *Feeding of farm animals in hot and cold environments*.  
<https://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US8630982>

- Costantini, A., Perez, G., Cosentino, V., & Miguel, A. (2018). Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la Producción. *Ciencia e Investigacion*, 5, 8.
- Cuartas O, A. K. (n.d.). *Comunicacion personal*.
- Cusins, P. (1994). Understanding Quality through Systems Thinking. *The TQM Magazine*, 6(5), 19–27. <https://doi.org/10.1108/09544789410067853>
- Dollah, M. A., Fradhululah, A. M., Nordin, H. M., & Ibrahim, C. E. (1990). Alleviation of environmental heat stress for improvement of reproduction of exotic sheep in humid tropics. *In Proceedings, the 5th AAAP Animal Science Congress*.
- Durango, S., Gaviria, X., Gonzalez-Quintero, R., Sotelo, M., Gutierrez, F., Chirinda, N., Arango, J., & Barahona, R. (2017). Iniciativas de mitigación al cambio climático en sistemas de producción de carne bovina en países tropicales. *Info Note*, 6. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.28642.73923>
- Echeverri Echeverri, D. M. (2016). *Efectos de las condiciones meteorológicas sobre el desempeño productivo, comportamental y temperatura corporal superficial de vacas holstein, en dos hatos lecheros del departamento de Antioquia*. (Vol. 3, Issue 2). <http://hdl.handle.net/10495/5641>
- Fedegan. (2021). *Produccion de leche y carne en Colombia*. <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/produccion-0>
- FEDEGAN. (2018). Cifras de referencia del sector ganadero colombiano. *Fedegan*, 49.
- Fedegán, & FNG. (2014). Foro ganadería regional visión 2014 -2018 Valle del Cauca. *Federacion Nacional de Ganadero*, 60.
- Figueiredo Viera Da Cunha, D. de N. (2008). *Avaliação de Sistemas de Produção de Leite por Meio de Modelo Dinâmico de Simulação* (Issue 1) [Universidad Federal de Vicosa]. <https://doi.org/10.11113/jt.v56.60>
- Flores Ayala, J. C., & Trucios Quispe, Y. R. (2014). *Modelo de simulación bajo la dinámica de sistemas para determinar los factores que intervienen en la contaminación del rio Opamayo -Tayacaja* [UNIVERSIDAD NACIONAL DE HUANCVELICA]. <http://repositorio.untumbes.edu.pe/bitstream/handle/UNITUMBES/1042/QUILI>

CHE CABANILLAS%2C IRMA.pdf?sequence=1&isAllowed=y

- García, J. M. (2017). *Teoría y ejercicios prácticos de Dinámica de Sistemas: Dinámica de Sistemas con VENSIM PLE* (García, J.).
- García, Q., & Ramírez, L. (2011). Tipificación de la producción ganadera en el Municipio de Bolívar, Valle del Cauca, Colombia. *Revista Col Ciencia Animal*, 4.
- Garea Moreda, B., Pichs Madruga, R., & Gonzáles Espino, Z. (2014). *El cambio climático, sus consecuencias e impactos principales*.
- Garzón Alfonso, J. E. (2011). Climatic change : How affect the livestock production. *Redvet*, 12(8), 1–8.  
<https://www.redalyc.org/pdf/636/63621920007.pdf>
- Golub, A. A., Henderson, B. B., Hertel, T. W., Gerber, P. J., Rose, S. K., & Sohngen, B. (2013). Global climate policy impacts on livestock, land use, livelihoods, and food security. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(52), 20894–20899. <https://doi.org/10.1073/pnas.1108772109>
- Gomes da Silva, R., & Campos Maia, A. S. (2013). Principles of animal biometeorology. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(Springer), 1–261. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5733-2>
- Gómez Loarces, R., Fernández Ferrer, G., & González García, F. (2019). Evolución de los modelos mentales sobre fosilización tras el proceso de enseñanza-aprendizaje. *Revista Eureka Sobre Enseñanza y Divulgación de Las Ciencias*, 16.
- Gómez, U. E. (2014). *Learning Environment for Decision Making In Complex Dynamic Systems*. 8.
- Gordon, C. J. (2005). *Temperature and toxicology: an integrative, comparative, and environmental approach*. (CRC press). Taylor & Francis Group.  
<https://books.google.com.co/books?hl=es&lr=&id=4nnLBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=Temperature+and+toxicology:+an+integrative,+comparative,+and+environmental+approach.&ots=OsthIcauuf&sig=IEi8Ah9k->

- Hse6uFYyyOoBmgNIKg&redir\_esc=y#v=onepage&q=Temperature and toxico
- Hillman, P. E. (2009). Thermoregulatory physiology, in: Deshazer, J.A. (Ed.), *Livestock Energetics and Thermal Environmental Management*. In *ASABE* (pp. 23–48).
- Hodgson, J. G., & Illius, A. W. (1997). *The ecology and management of grazing systems*. C.A.B. International.
- ICA. (2019). *Censo Nacional Bovino por Departamentos*.  
<https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLEERÍA. (2015). Nuevos Escenarios de Cambio Climático para Colombia 2011-2100 Herramientas Científica para los Tomadores de Decisione- Enfoque Nacional - Departamental: Tercera Comunicacion Nacional de Cambio Climatico. In *BMC Genetics* (Vol. 13, Issue 114). <https://doi.org/10.1186/1471-2156-13-58>
- IDEAM, PNUD, MADS, DNP, & CANCELLEERÍA. (2017). *Resumen ejecutivo Tercera Comunicación Nacional De Colombia a La Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático (CMNUCC). Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático*.
- IPCC. (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. In *Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON*.  
<https://doi.org/10.1109/MELCON.2008.4618473>
- IPCC. (2013). “Resumen para responsables de políticas. En: *Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*.”
- IPCC. (2014). Cambio climático 2014: Informe de Síntesis. In *Contribución de los Grupos de trabajo I,II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo*

*Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.*

- Juárez, L. F. I., Montero, L. M., & Núñez, H. G. (2011). Limitaciones y potencial de los forrajes para mejorar la nutrición de bovinos en regiones tropicales. *In Genómica y Modelación En Los Nuevos Escenarios de La Ganadería Bovina Tropical*, 49–69.
- Juárez Lagunes, F. I., Fox, D. G., Blake, R. W., & Pell, A. N. (1999). Evaluation of tropical grasses for milk production by dual-purpose cows in Tropical Mexico. *Journal of Dairy Science*, 82(10), 2136–2145.  
[https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302\(99\)75457-3](https://doi.org/10.3168/jds.s0022-0302(99)75457-3)
- Kadzere, C. T., Murphy, M. R., Silanikove, N., & Maltz, E. (2002). Heat stress in lactating dairy cows: A review. *Livestock Production Science*, 77(1), 59–91.  
[https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(01\)00330-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(01)00330-X)
- Lindsey, R., & Dlugokencky, E. (2020). *Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide*. 6–10. <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>
- Mader, T. L., & Davis, M. S. (2006). Environmental factors influencing heat stress in feedlot cattle 1 , 2. *Global Environmental Change*, 712–719.
- Mahecha, L., Durán, C. V, Rosales, M., Molina, C. H., & Molina, E. (2000). Consumo de pasto estrella africana (*Cynodon plectostachyus*) y leucaena (*Leucaena leucocephala*) en un sistema silvopastoril. *Pasturas Tropicales*, 22(1), 26–30.
- Martín García, J. (2003). *Teoría y ejercicios prácticos de dinámica de sistemas*.  
[https://books.google.com/books?id=RQ5BDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=dinamica+de+sistemas&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiRleey4ZPeAhUBHzQIHU\\_mB9sQ6AEIJzAA#v=onepage&q=dinamica de sistemas&f=false](https://books.google.com/books?id=RQ5BDwAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=dinamica+de+sistemas&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiRleey4ZPeAhUBHzQIHU_mB9sQ6AEIJzAA#v=onepage&q=dinamica%20de%20sistemas&f=false)
- Martínez Hernández, V. G., & García Guardado, S. D. L. Á. (2008). *Dinámica de Sistemas* [UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA].  
<http://riul.unanleon.edu.ni:8080/jspui/bitstream/123456789/2498/1/208494.pdf>
- Meadows, D. H., & Robinson, J. M. (1985). *The electronic oracle : computer*

*models and social decisions.*

- Mertens, D. R. (1994). *Regulation of forage intake. Forage quality, evaluation, and utilization*, (pp. 450–493). <https://doi.org/10.1201/9781351070218>
- Molina B, R. A. (2015). *Estudio de la Sostenibilidad en Cuatro Sistemas Ganaderos con Diferentes Niveles de Intensificación Mediante Dinámica de Sistemas*. Universidad Nacional de Colombia.
- Morales Vallecilla, F., & Ortiz Grisales, S. (2018). Productividad y eficiencia de ganaderías lecheras especializadas en el Valle del Cauca (Colombia). *Revista de La Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia*, 65(3), 252–268. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v65n3.76463>
- Muriel, P., Downing, T., Hulme, M., Harrington, R., Lawlor, D., Wurr, D., & Parsons, D. J. (2000). Climate change and agriculture in the United Kingdom. *Climate Change and Agriculture in the United Kingdom*.
- Naqvi, S. M. K., & Sejian, V. (2011). Global climate change: role of livestock. *Asian Journal of Agricultural Sciences*, 3(1), 19–25.  
[https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/42126705/Global\\_Climate\\_Change\\_Role\\_of\\_Livestock20160205-30232-b0xjmt.pdf?1454664629=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DGlobal\\_Climate\\_Change\\_Role\\_of\\_Livestock.pdf&Expires=1611769655&Signature=eKGsETJR](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/42126705/Global_Climate_Change_Role_of_Livestock20160205-30232-b0xjmt.pdf?1454664629=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DGlobal_Climate_Change_Role_of_Livestock.pdf&Expires=1611769655&Signature=eKGsETJR)
- Navarro-Racines, C. ., Tarapures-Montenegro, J. ., & Ramirez-Villegas, J. . (2015). Bias-correction in the CCAFS-Climate portal: a description of methodologies. *Decision and Policy Analysis (DAPA) Research Area. International Center for Tropical Agriculture (CIAT). Cali, Colombia.*, 11.
- O'Regan, B., & Moles, R. (2001). A system dynamics model of mining industry investment decisions within the context of environmental policy. *Journal of Environmental Planning and Management*, 44(2), 245–262.
- Ocampos, D., Allende, R., García, F., & Aguilar, C. (2000). 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. <https://www.redalyc.org/pdf/495/49518803.pdf>

Organización de la Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura FAO.

(2020). *Producción animal*. El Papel de La FAO En La Producción Animal.

<http://www.fao.org/animal-production/es/?cv=1>

Parsons, D., Nicholson, C. F., Blake, R. W., Ketterings, Q. M., Ramírez-Aviles, L.,

Fox, D. G., Tedeschi, L. O., & Cherney, J. H. (2011). Development and

evaluation of an integrated simulation model for assessing smallholder crop-livestock production in Yucatán, Mexico. *Agricultural Systems*, 104(1), 1–12.

<https://doi.org/10.1016/j.agry.2010.07.006>

Pereira Guimarães, V. (2007). *Vinícius Pereira Guimarães Modelagem De Uma*

*Unidade De Produção Para Caprinos Leiteiros Utilizando a Dinâmica De*

*Sistemas*. Universidade Federal de Viçosa.

Pereira Guimarães, V., Tedeschi, L. O., & Teixeira Rodrigues, M. (2009).

Development of a mathematical model to study the impacts of production and management policies on the herd dynamics and profitability of dairy goats.

*Agricultural Systems*, 101(3), 186–196.

<https://doi.org/10.1016/j.agry.2009.05.007>

Perilla Duque, S. M. (2020). *Cuantificación del Efecto del Clima en Sistemas*

*Bovinos Lecheros bajo Pastoreo en el Valle del Cauca*. Universidad Nacional de Colombia - Palmira.

Pitesky, M. E., Stackhouse, K. R., & Mitloehner, F. M. (2009). Clearing the air:

livestock's contribution to climate change. *Advances in Agronomy*, 103, 1–40.

Prendiville, D. J., Lowe, J., Earley, B, Spahr, C., & Kettlewell, P. (2002).

Radiotelemetry Systems for Measuring Body Temperature. *Beef Production Series No. 57*, 57, 1–14.

<http://www.teagasc.ie/research/reports/beef/4806/eopr-4806.pdf>

Quiñones, U., Alberto, Ó., Calderón, A., & Pérez, J. (2018). *Climate change*

*scenarios ( CMIP-5 ) for three protected natural areas in the Transversal*

*Neovolcanic belt Abstract : Introducción El concepto de cambio climático*

- describe las modificaciones en el clima atribuidos de. 9(50).*
- Ramirez-Villegas, J., & Jarvis, A. (2010). *Downscaling Global Circulation Model Outputs: The Delta Method Decision and Policy Analysis Working (Issue 1).*
- Rohrer, M., & Shauwecker, S. (2016). *Cambio climático Global. Resumen para responsables de políticas - Compilación de los principales resultados de la temperatura y cambios en las precipitaciones y el forzamiento radiativo. 12.*
- Romaniuk R, Cosentino, V., Costantini A, & Lupi, A. 1. (2018). Emisiones de Gases de Efecto Invernadero desde el sector Forestal. *Ciencia e Investigacion, 68(5), 55–61.*  
<http://repositorio.inta.gob.ar/handle/20.500.12123/4388#>
- Sanchez, J. (2000). Nutrición Energetica del Ganado Lechero. *Nutricion Animal Tropical, 6(1), 97–128.*
- Schaffernicht, M. (2009). Learning from rediscovering system dynamics models. *Systèmes d'information & Management, 14(4), 87.*  
<https://doi.org/10.3917/sim.094.0087>
- Silanikove, N. (2000). Effects of heat stress on the welfare of extensively managed domestic ruminants. *Livestock Production Science, 67(1–2), 1–18.*  
[https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(00\)00162-7](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(00)00162-7)
- Solano, G. (2010). Programa de transferencia tecnológica cooperativa de productores de leche dos pinos rl, Costa Rica/. *Articulo Balance de Nutrientes Para Sistemas Agropecuarios Sustentables.*
- Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., de Haan, C., & FAO. (2007). Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options. In *Frontiers in Ecology and the Environment (Vol. 5, Issue 1)*. FAO.  
[https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[4:D\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[4:D]2.0.CO;2)
- Sterman, J. D. (2000). Business dynamics : systems thinking and modeling for a complex world. In McGraw-Hill Higher Education (Ed.), *New Business Models for the Knowledge Economy*. Jeffrey J. Shelstad.  
<https://doi.org/10.4324/9781351152723-7>
- Tedeschi, L. O., & Fox, D. (2017). *The ruminant nutrition system: an applied*

*model for predicting nutrient requirements and feed utilization in ruminants* (I. XanEdu Publishing (ed.); 2nd ed.).

- Tedeschi, L. O., Nicholson, C. F., & Rich, E. (2011). Using System Dynamics modelling approach to develop management tools for animal production with emphasis on small ruminants. *Small Ruminant Research*, 98(1–3), 102–110. <https://doi.org/10.1016/j.smallrumres.2011.03.026>
- Thornton, P. K., Kristjanson, P. M., & Thorne, P. J. (2003). Measuring the potential impacts of improved food-feed crops: methods for ex ante assessment. *Field Crops Research*, 84(1–2), 199–212.
- Vélez, M., Marcucci, J., Vila, J., & Santillán, R. (2003). Variaciones estacionales en la producción y composición del pasto guinea (*Panicum maximum*) cv. Tobiatá en El Zamorano, Honduras. *El Zamorano*, 44(1), 77–86.
- VENSIM Ventana System, I. (2020). *Ayuda Vensim*. <https://vensim.com/>
- West, W. (2003). Effects of Heat-Stress on Production in Dairy Cattle. *Journal of Dairy Science*, 86(6), 2131–2144. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73803-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73803-X)
- Williams, T. (2002). *Modelling Complex Projects*.
- Ybañez, A. P., Mutya, V. G., Abela, J. V, Taveros, A. A., & Milla, N. E. (2015). Correlation of infrared tympanic and rectal body temperatures in lactating Bulgarian Murrah buffaloes in the Philippines. *International Research Journal of Interdisciplinary & Multidisciplinary Studies (IRJIMS) A Peer-Reviewed Monthly Research Journal*, ISSN(30), 788711. <http://oaji.net/articles/2015/1707-1438673045.pdf>