

Evaluación productiva de sistemas de cría bovina en función de la tecnología
aplicada en la región Centro-Sur de Corrientes

*Tesis presentada para optar al título de Magister de la Universidad de Buenos Aires,
Área Producción Animal*

María Gabriela Hug

Médica Veterinaria – UNNE- 2011

Lugar de trabajo: Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria- INTA- Mercedes Corrientes



Escuela para Graduados Ing. Agr. Alberto Soriano
Facultad de Agronomía – Universidad de Buenos Aires



COMITÉ CONSEJERO

Director de Tesis

Cristian R. Feldkamp

Ing. Agrónomo (UNER)

Doctor (Universidad Humboldt de Berlín, Alemania.)

Co-director de Tesis

José A. Nasca

Ing. Zootecnista (UNT)

Doctor (UBA)

Consejero de Estudios

Diego Bendersky

Ing. Agrónomo (UNER)

Magister (UNMP)

JURADO DE TESIS

JURADO

Burges, Julio

Méd. Veterinario

Magister (UNMP)

Balbuena, Osvaldo

Méd. Veterinario

Doctor (Universidad de Florida, USA)

JURADO

Wallau, Marcelo

Ing. Agrónomo

Doctor (Universidad Federal de Rio Grande do Sur)

Agradecimientos

Agradezco al INTA (Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria) por brindar el espacio y las herramientas necesarias para mi capacitación. Al Ing. Daniel Sampedro, quién se preocupó y ocupó de mi formación profesional. A mis compañeros de trabajo, a los Ing. Rafael Pizzio, Diego Bendersky y Bqca. Jorgelina Flores, quienes generosamente me facilitaron los datos útiles para el desarrollo del modelo de simulación. Una mención especial al Sr. Antonio Pereyra bibliotecario de la EEA Mercedes que cordialmente estuvo a disposición en la búsqueda de material de estudio.

Mi respeto y agradecimiento al Dr. Cristian Feldkamp, por su orientación, aliento permanente y presencia aún en momentos difíciles.

Un reconocimiento especial al Dr. José Nasca, quien estuvo presente incondicionalmente durante todo el tiempo de investigación, y que amablemente me guio en el desarrollo y éxito de este trabajo. Su ayuda fue el pilar fundamental de esta tesis.

A mi familia, mis padres, Orlando y Nélide, mis hermanos, Alejandra, Wilson y Gastón, mis amigos, Mercedes, Joselo y Eugenia que siempre estuvieron presentes con su apoyo en los momentos en que el trabajo parecía cansar, mi más sincero agradecimiento y cariño.

Finalmente, un profundo agradecimiento a quién me acompaña y sostiene todos los días, Pablo. Por su comprometida dedicación en ayudarme a ser mejor profesional, esta tesis es dedicada a él.

Declaro que el material incluido en esta tesis es, a mi mejor saber y entender, original producto de mi propio trabajo (salvo en la medida en que se identifique explícitamente las contribuciones de otros), y que este material no lo he presentado, en forma parcial o total, como una tesis en ésta u otra institución.

María Gabriela Hug.

Publicaciones derivadas de la tesis

Evaluación de submodelo de producción forrajera en el Centro de Corrientes., 2017. Hug, M. G., Nasca, J., Feldkamp, C.R., Bendersky, D. Revista Argentina de Producción Animal Vol 37 Supl. 1: 173-243.

Evaluación del submodelo de crecimiento animal para el Centro de Corrientes., 2017. Hug, M. G., Nasca, J.A., Feldkamp, C.R., Pizzio, R. Revista Argentina de Producción Animal Vol 37 Supl. 1: 173-243.

Aplicación de modelos de simulación en producción forrajera., 2017. Hug, M. G. Noticias y comentarios N° 554.ISSN N° 0327-3059. Publicaciones INTA. Pág. 5.

Índice general

CAPÍTULO 1. Introducción general	1
1.1 Introducción general	2
1.1.1 Definición de sistema	4
1.1.2 Límites	4
1.1.3 Jerarquía	4
1.1.4 Propiedades emergentes	5
1.1.5 Modelos de simulación	5
1.1.6 Hipótesis y objetivos del trabajo	5
1.1.7 Organización de la tesis	6
CAPÍTULO 2 Desarrollo y evaluación de los submodelos	7
2.1 Descripción general del modelo	8
2.2 Características del modelo de crecimiento animal	10
2.2.1 Componentes del peso vivo vacío	11
2.2.2 Curva de crecimiento potencial	11
2.2.3 Condición Corporal y modelo reproductivo	13
2.2.4 Producción de leche	13
2.2.5 Evaluación del modelo	14
2.2.6 Resultados y discusión	15
2.3 Caracterización del modelo de pasturas	16
2.3.1 Funcionamiento y supuestos	17
2.3.2 Calibración y evaluación del modelo de pasturas	18
2.3.3 Calidad de las pasturas	19
2.3.4 Resultados y discusión	19
2.4 Modelo de consumo animal	21
2.4.1 Límites metabólicos	22
2.4.2 Límites físicos	22
2.4.3 Evaluación por un experto del modelo adoptado	23
2.4.4 Resultados obtenidos	23
CAPÍTULO 3. Evaluación de la eficiencia y estabilidad	25
3.1 Introducción general	26
3.2 Materiales y métodos	26
3.2.1 Sitio de estudio	26
3.2.2 Modelo de simulación y sistemas representados	27
3.2.3 Propiedades emergentes y salidas	29
3.2.4 Supuestos y reglas de decisión	30
3.3 Resultados y discusión	31
3.4 Conclusiones	39
CAPÍTULO 4. Conclusiones generales	41
4.1 Introducción general	42
4.2 Comportamiento emergente de los sistemas evaluados	42

4.3 Importancia y aspectos a mejorar del modelo de cría bovina desarrollado _____	43
4.4 Observaciones finales: modelos de simulación en la agenda de investigación _____	45
BIBLIOGRAFÍA _____	46
APÉNDICE 1 _____	59
APÉNDICE 2 _____	61
APÉNDICE 3 _____	62

Índice de figuras

Figura 2.1. Representación simplificada del modelo de sistema de cría utilizado (Adaptado de Nasca, 2016).....	8
Figura 2.2.1. Descripción simplificada del sistema ganadero representando los modelos que proporcionan y adquieren información del modelo de crecimiento animal (Feldkamp, 2004). CS: condición corporal; PVV: peso vivo vacío; CEM: consumo de energía metabolizable.....	10
Figura 2.2.2. Valores de peso vivo (kg PVV.cab ⁻¹) observados y simulados de novillitos de 8 a 20 meses a base pastoril. Período 1981-1985.....	15
Figura 2.2.3. Valores de peso vivo promedio (kg PVV.cab ⁻¹) observados y simulados de novillitos a base pastoril en cada ciclo productivo. Período 1981-1985.....	15
Figura 2.2.4. Relación entre valores observados y simulados de peso vivo promedio (kg PVV.cab ⁻¹) de vacas adultas al inicio y al fin del servicio. Período 2006-2010.....	16
Figura 2.3.1. Crecimiento de forraje impulsado por radiación incidente (I) con la eficiencia de fotosíntesis neta determinado por el parámetro α . La tasa de desarrollo es modificada por el efecto de la temperatura del aire (gT), el agua del suelo (gw), eficiencia fotosintética por fase fenológica(gt) y la capacidad de intercepción de la luz de la canopia (c(G)).....	17
Figura 2.3.2. Representación de la dinámica de la digestibilidad (%) de los pastizales a lo largo del año.....	20
Figura 2.3.3. Producción de pastizal natural (kg MS ha ⁻¹ mes ⁻¹) observado y simulado para el período 2007-2010.....	20
Figura 2.3.4. Producción de forraje en kg MS ha ⁻¹ mes ⁻¹ observado y simulado para el período 2007-2010. Línea 1:1.....	20
Figura 2.3.5. Relación producción de forraje (kg. MS ha ⁻¹ año ⁻¹) y precipitación anual (mm) para el período 2007- 2010.....	20
Figura 2.4.1. Representación simplificada de la interacción entre el modelo de consumo y su influencia en la dinámica de los componentes animal y el pastizal. Recuadro simboliza variable de estado; líneas gruesas determinan flujos de información; óvalo representan variables de tasas y líneas discontinuas influencias entre modelos (Adaptado de Feldkamp, 2004).....	21
Figura 2.4.2. Consumo promedio (kg MS.cab ⁻¹ .día ⁻¹) simulado de novillitos de 8-20 meses de edad (n=24) en un ciclo productivo. Peso vivo promedio inicial 190 kg y peso vivo promedio final 290 kg.....	24

Figura 2.4.3. Consumo promedio (kg MS. cab ⁻¹ . día ⁻¹) de 60 años de simulación del rodeo general, vacas adultas, y vaquillona de cada sistema.....	24
Figura 3.2.1 Características generales y comunes a los sistemas (Adaptado de Nasca, 2016)	28
Figura 3.2.2. Carga animal en EV. ha ⁻¹ . año ⁻¹ y cab. ha ⁻¹ . año ⁻¹ de los cuatro sistemas. Líneas verticales indican desvío estándar. CV son los coeficientes de variación (%).....	32
Figura 3.3.3. Valores medios de peso vivo vacío vendido (A) (n = 5) (kg PVV.ha ⁻¹ . año ⁻¹) y eficiencia de stock (B) para los diferentes sistemas. Barras indican desvíos estándar. Letras diferentes indican diferencias entre tratamientos con una probabilidad de P < 0,05.....	33
Figura 3.3.4. Peso medio de ternero destetado (kg PV) y días medios de destete para los 4 sistemas. Barras verticales corresponde al desvío estándar. Cuadrados pertenecen a kg de peso vivo del ternero destetado de cada sistema y círculos a los días medios de destete.....	34
Figura 3.3.5. A) Índices reproductivos y B) Distribución de partos para los cuatro sistemas promedio de 60 años de simulación. Barras indican desvío estándar.....	35
Figura 3.3.6. A) Producción media de forraje anual en kg MS.ha ⁻¹ .año ⁻¹ para los 4 sistemas y B) Producción de forraje de campo natural (barras azules) y campo natural fertilizado (barras rojas). Barras verticales indican el desvío estándar y letras diferentes indican diferencias entre tratamientos con una probabilidad de P <0,05.....	36
Figura 3.3.7. Dióxido de carbono equivalente por hectárea (CO ₂ eq. ha ⁻¹). Las barras verticales indican el desvío estándar y valores entre paréntesis los coeficientes de variación (%) y letras diferentes indican diferencias entre tratamientos con una probabilidad de P <0,05.....	36
Figura 3.3.8. Margen bruto medio anual (\$. ha ⁻¹ . año ⁻¹). Puntos representan los valores medios (n = 5), y las barras verticales los desvíos estándar. Letras diferentes indican diferencias entre tratamientos con una probabilidad de P < 0,05.....	38
Figura 3.3.9. Frontera de riesgo eficiente para el margen bruto. Los valores fueron calculados a partir de los 60 años de corrida del modelo.....	39
Figura 4.2.1. Comportamiento de los sistemas mediante propiedades como: eficiencia (A) y estabilidad (B), evaluados a través de tres indicadores: kg PVV vendido (kg PVV.ha-1), Margen Bruto (MB, \$. ha-1) y Dióxido de carbono equivalente por hectárea (CO ₂ eq. ha-1) y sus coeficientes de variación en 60 años de simulación.....	43

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Comparación de índices productivos promedio de la provincia de Corrientes de productores pertenecientes a los grupos CREA (Consortio Regional de Experimentación Agrícola) y GUIA (Grupo Unido INTA Asesorados)	3
Cuadro 2.2.1. Valores de parámetros para los componentes de peso vivo vacío, (Janoschek, 1957)	12
Cuadro 2.3.1. TB temperatura base (°C); T _{opt} temperatura óptima; T _r temperatura de referencia; α eficiencia de uso de la radiación (gr MS.Mj ⁻¹); ν proporción de la eficiencia de crecimiento durante el período vegetativo en relación al reproductivo.....	18
Cuadro 3.2.1. Características de los sistemas representados en el modelo de simulación de cría bovina.....	28
Cuadro 3.2.2. Propiedades emergentes con sus correspondientes indicadores productivos, económicos y energéticos.....	29
Cuadro 3.3.3. Utilización de suplemento en los diferentes sistemas.....	38
Cuadro A.1.1. Factores de corrección para requerimientos de mantenimiento (Adaptado de Feldkamp, 2004).....	59
Cuadro A.3.1. Características de los insumos agropecuarios utilizados.....	63
Cuadro A.3.2. Consumo de energía fósil de las actividades realizadas.....	64

Lista de abreviaturas

CAO	Carga animal objetivo
CEM	Consumo de energía metabolizable
CS	Condición corporal
CNA	Censo nacional agropecuario
CV	Coefficiente de variación
DE	Desvío estándar
EFMO	Eficiencia del modelo
ErM	Error medio
EV	Equivalente vaca
FS	Frame score
GEI	Gases de efecto invernadero
GRAex	Grasa exceso
GRAn	Grasa normal
Gtn	Gigatoneladas
Ha	Hectárea
IB	Ingreso bruto
INDEC	Instituto de estadísticas y censos de la República Argentina
MAE	Error máximo admisible
MAG	Materia libre de grasa
MB	Margen bruto
nRMSE	RMSE relativa
PVV	Peso vivo vacío
RMSE	Raíz cuadrada del cuadrado medio
Sx	Factor corrección sexo
Ym	Factor de conversión de metano

Título: Evaluación productiva de sistemas de cría bovina en función de la tecnología aplicada en la región Centro-Sur de Corrientes

Resumen

La ganadería bovina ocupa la mayor parte del territorio de la provincia de Corrientes, siendo la cría la actividad principal. En los últimos años, se presenta acompañada en proporciones variables de recría y terminación de novillos, como consecuencia del avance de la agricultura en áreas pampeanas y la necesidad de diversificar el sistema. Promover la intensificación en estos sistemas ganaderos, puede ser una mejora potencial del comportamiento global del sistema o sólo mejorar alguna propiedad en detrimento de otras. Las múltiples interacciones en los sistemas ganaderos requieren de un enfoque sistémico, con evaluación de diferentes propiedades o aspectos de su comportamiento, en respuesta a estrategias de intensificación. En este tipo de sistemas complejos, los modelos de simulación son herramientas que permiten su estudio con un enfoque integrado.

El objetivo de este trabajo es contribuir al desarrollo de un enfoque integral en la evaluación del comportamiento de un sistema de cría bovina con diferentes estrategias de intervención. La hipótesis de trabajos sostiene que los sistemas de cría bovina del Centro-Sur de la provincia de Corrientes que incorporan al menos una de las estrategias de intervención de manejo permiten mejorar la eficiencia y la estabilidad de los mismos. El sistema de cría se desarrolló a partir de un modelo compuesto por cinco submodelos: producción de forraje, crecimiento animal, consumo de alimento, reproductivo y manejo del sistema. Las estrategias de intervención a evaluar fueron: mejora del campo natural con fertilización fosfórica, suplementación alimenticia y edad de primer entore.

La evaluación del modelo se realizó en base a pruebas cuantitativas y cualitativas. Las estrategias de intervención fueron evaluadas por simulación de un rodeo Braford sobre pastizal durante 80 años con la base climática de EEA Mercedes, Corrientes. Los hallazgos de este trabajo indican que las tecnologías generadas en investigación de los sistemas agropecuarios, generan impactos positivos y negativos sobre el comportamiento de los sistemas de producción. La productividad en kg PVV vendido difiere entre sistemas, siendo el Sist 4 el más productivo y el Sist 1 el más inestable. Esto sugiere que no necesariamente un sistema menos intensificado es más estable. En conclusión, no es posible establecer fehacientemente un componente cuya intensidad sea responsable de los resultados que se dan en sistemas complejos.

Palabras Clave: ganadería, sistemas, modelo de simulación, eficiencia, estabilidad.

Title: Evaluation of cow calf productions systems based on applied technology the South Central of Corrientes.

Abstract

Beef cattle production is the main economic activity of the province of Corrientes, especially the cow-calf production. In the last years, rearing and finishing activities increased in the region, due to the need for diversification and to changes in the land use in the Pampean region. When promoting intensification, the use of a singular technology could benefit the farm system globally, or could only improve one of its attributes in detriment of other. Given that there are multiple interactions in the cow-calf operation systems, the systemic focus is needed when evaluating the effect of single intervention strategies. The use of simulation models allows the developing of this integrated focus.

The objective of this work is to contribute to the systemic focus, by the evaluation of the effect of different intervention strategies in the behavior of the cow-calf system. The hypothesis is that the inclusion of at least one intervention strategy increases the efficiency and stability of a cow-calf operation system of the South Center of Corrientes. The cow-calf model consisted of five sub-models: forage production, animal growth, animal feed intake, reproduction and manage sub-models. The intervention strategies evaluated were grassland fertilization, supplementary feeding and age of first mating.

The model was evaluated by quantitative and qualitative tests. The intervention strategies were evaluated by the simulation of a Braford herd, over natural grassland in an 80 year period and with climatic parameters provided by EEA INTA Mercedes. The findings of this work show that the intervention strategies evaluated produced both positive and negative effects on the behavior of the system. System 4 had the higher productive efficiency and System 1 had the lower stability, which means that not necessarily a more intensified system is also less stable. It was not possible to identify a high intensity component responsible of the global result of this complex system.

Key words: Beef cattle production, systems, simulation models, efficiency, stability.

CAPÍTULO 1. Introducción general

1.1 Introducción general

La ganadería bovina ocupa siete millones de hectáreas de la provincia de Corrientes (INDEC, CNA2002) con un total de seis millones de cabezas (SENASA, 2016). La principal actividad es la cría, aunque en los últimos años, dicha actividad se presenta acompañada en proporciones variables de recría y terminación de novillos. Incluso algunos establecimientos se dedican exclusivamente a la recría y terminación de novillos como consecuencia del avance de la agricultura en áreas pampeanas (Rearte, 2010) y la necesidad de diversificar el sistema (Pizzio, 2010).

En la provincia de Corrientes la ganadería vacuna representa una parte fundamental de los ingresos prediales (Macarrein *et al.*, 2006). Históricamente se ha caracterizado por la producción de terneros, con una relación ternero/vaca 0,47 a nivel provincial (SENASA, 2016). La producción media anual del campo natural es de 4400 kg de MS. ha⁻¹.año⁻¹, siendo el factor de utilización del 50% (Sampedro, 2015). Esto genera una receptividad animal media anual de 0,60 Equivalente Vaca por hectárea (EV. ha⁻¹) y una producción media anual de 52 kg peso vivo. ha⁻¹. El recurso forrajero por excelencia es el pastizal natural. El mismo posee una gran diversidad estructural con predominio de gramíneas y relativamente baja participación de leguminosas (Nabinger y Carvalho, 2009). Estos pastizales presentan un marcado crecimiento estacional, siendo la producción estival cuatro veces superior a la invernal (Arias Usandivaras, 2006). Esta situación dificulta la ganancia de peso por animal si no se ajusta la carga animal en los momentos críticos. Esto se traduce, en general, en una baja rentabilidad del sistema en su conjunto. Si bien existe un desarrollo importante de tecnologías disponibles para la ganadería de la región, se observa, una baja adopción de tecnologías, situación que se evidencia en la brecha productiva entre los bajos índices obtenidos y el potencial (Giancola *et al.*, 2013). Entre las tecnologías propuesta para mejorar los índices productivos de la ganadería provincial se pueden mencionar: mejora del campo natural con fertilización y/o introducción de especies invernales, diferimiento de forraje por clausura de potreros, modificación de la edad del primer servicio de las vaquillonas, diagnóstico de ciclicidad y evolución de la condición corporal de los vientres, tratamiento de la lactancia y suplementación estratégica (Giancola *et al.*, 2013).

La implementación de tecnologías de procesos e insumos permitiría incrementar la carga animal y el porcentaje de destete en las diferentes regiones de la provincia (Cuadro 1).

Cuadro 1. Comparación de índices productivos promedio de la provincia de Corrientes de productores pertenecientes a los grupos CREA (Consortio Regional de Experimentación Agrícola) y GUIA (Grupo Unido INTA Asesorados).

Región	Asesoram.	Sup.Gan. Ha¹.	Existencia vacuna	Carga EV/ha².	Destete %	Terneros /1000ha.³
Centro-Sur	CREA-GUIA	426.339	256.809	0,61	76	254
	MediaProv			0,45	53	174
Lomadas	CREA-GUIA	125.758	64.478	0,59	70	224
Arenosas	MediaProv			0,47	55	168
Malezal	CREA-GUIA	117.000	57.624	0,45	65	183
	MediaProv			0,35	46	111

Fuente: Chiossone, 2006. 1. Hectárea. 2. Equivalente vaca por hectárea. 3. Terneros cada 1000 hectárea.

Las tecnologías mencionadas están relacionadas con los procesos de intensificación que involucran aumentos en la eficiencia del uso de la tierra. Es decir, a incrementos en la cantidad de productos obtenidos por unidad de superficie en un tiempo dado (Bungenstab, 2005). Bungenstab (2005) considera que, en el caso de los sistemas de producción ganadera, la intensificación está relacionada con aumentos de carga animal, producción de forraje y uso de insumos externos. Gonella (2000) señala que la intensificación de los sistemas de producción deberá implementarse en el marco de la conservación de los recursos naturales, especialmente el suelo y el ambiente.

La intensificación es promovida como una forma de mejorar los resultados productivos y económicos de los sistemas ganaderos de la región, por lo cual es pertinente evaluar si el proceso de intensificación realmente mejora el comportamiento de los sistemas, o si mejora algunas propiedades en detrimento de otras (Nasca, 2015). Viglizzo (1999) propone tres categorías de tecnologías: 1) tecnología de insumos (e.g. suplementos, fertilizantes), 2) tecnología de procesos: representada principalmente por la gestión y las normas, y 3) la tecnología de la información: apoyada en el uso de sistemas informáticos para la toma de decisiones.

No siempre los resultados de la intensificación son los deseados, sin embargo, es posible generar información que permita evaluar aspectos positivos y negativos ligados a estos procesos. Por ejemplo, el aumento de la producción agropecuaria viene acompañada por un

incremento en la utilización de insumos, lo que ocasiona una mayor emisión por unidad de superficie. Además, es posible que presenten efectos secundarios negativos a la intensificación de la producción como enfermedades animales, insuficiente bienestar animal y alternación del suelo.

Para evaluar el impacto de este proceso es necesario un abordaje integrador, basado en una visión sistémica y en un mayor conocimiento del rol que los componentes tienen en la producción agropecuaria (Sarandón, 2002). Lugo y Morris (1982) señalan que es imposible interpretar el comportamiento de un sistema sólo en base a estudios sobre el comportamiento de sus partes. El enfoque de sistemas es útil para aplicar, dado que la característica esencial es que reconoce que el comportamiento de un sistema debe ser entendido desde sus componentes integrados y no de manera aislada.

El comportamiento de un sistema es accionado por influencias del medio ambiente en interacción con su estructura interna (Romera, 2004). Desde una perspectiva sistémica, las respuestas a las intervenciones en los sistemas agropecuarios deben ser estudiadas evaluando el impacto de cada decisión en el comportamiento de todo el sistema (Nasca, 2016). La teoría general de sistemas y la visión sistémica ofrecen el marco para estudiar sistemas complejos, como los son los sistemas agropecuarios. Por ello definir conceptos como sistemas, límite, jerarquía del sistema y propiedades emergentes ayudará a la comprensión de dicho análisis.

1.1.1 Definición de sistema

Un sistema se define como un conjunto de elementos contenidos dentro de un límite de tal manera que los elementos dentro de una frontera tienen fuertes relaciones funcionales entre sí (Conway, 1986). Un sistema es el resultado de su composición (elementos), relaciones entre componentes (estructura), entorno y cambios de estado en función del tiempo (mecanismos) (Bunge, 2004). La estructura de un sistema determina su comportamiento, generando flujos de retroalimentación y retardos en el tiempo (Sterman, 2000).

1.1.2 Límites

El establecimiento de lo que pertenece al sistema y lo que no pertenece al sistema es el primer paso en un enfoque de sistemas (Spedding, 1988). El concepto de límite no se refiere para límites físicos, en realidad no existe tal límite en cualquier sistema. Dent y Blackie (1979) mencionan que “el límite de un sistema es un componente artificial diseñado para ayudarla comprensión de la función del sistema”. Sin embargo, la frontera del sistema no supone que no hay interacción.

1.1.3 Jerarquía

Podemos considerar al mundo como una jerarquía anidada de sistemas que abarca desde los genes hasta el ecosistema (Conway, 1986). Los ejemplos de los niveles de esta jerarquía, también llamados niveles de agregación o de complejidad, son: macromoléculas, células, tejidos, órganos, organismos, colección de organismos de los ecosistemas. El nivel de agregación seleccionado depende de los objetivos del estudio (Feldkamp, 2004). De acuerdo al objetivo del investigador puede ser de interés el animal individual, el rodeo, el sistema productivo o una región.

1.1.4 Propiedades emergentes

El comportamiento se puede describir a través de ciertas propiedades que se denominan emergentes porque surgen como consecuencia de la interacción de todos los componentes del sistema (Feldkamp, 2004). La estabilidad y la eficiencia son ejemplos de dichas propiedades del sistema que combinan un gran número de procesos individuales (Feldkamp, 2004, Viglizzo, 1994). Marten (1988) utiliza el término estabilidad para medir el grado de variación de los rendimientos por un factor perturbador (clima, enfermedades y mercado). Aquellos sistemas que presenten menor variabilidad pueden ser considerados más estables. Por otro lado, la eficiencia es definida como la relación entre un factor objetivo (e.g. kg de carne) y un factor limitante (e.g. hectáreas) (Conway, 1985). Es posible ver el desarrollo ganadero a través de una progresión de los cambios en los valores relativos de las propiedades indicadas.

1.1.5 Modelos de simulación

El análisis multidisciplinario e integrador en los sistemas ganaderos complejos requiere de una herramienta que contemple dicha complejidad. En este marco, los modelos de simulación son una representación simplificada de una porción de la realidad, efectuada a partir de ecuaciones matemáticas que permiten emular la evolución de las variables del sistema a través del tiempo. Los modelos se diseñan y construyen generalmente con el propósito de aprender, explicar o mejorar el funcionamiento del sistema real, concepto u objeto que está representado (Aguilar González *et al.*, 2007). Están compuestos por una serie de operaciones aritméticas y lógicas que, en conjunto, representan la estructura (estado) y el comportamiento (cambio de estado) del sistema de interés (Nasca, 2016).

La simulación permite estudiar las interacciones entre los componentes individuales como también la inclusión de complejidades del mundo real. Una vez construido el modelo se puede modificar de una manera rápida con el fin de analizar diferentes escenarios y economizar recursos del sistema real.

La aplicación de modelos de simulación para el análisis de un sistema de cría constituye una adecuada herramienta para evaluar una o más estrategias de intervención sin perder de vista el impacto sobre el comportamiento del sistema. Esto facilitaría la detección de estrategias que mejoren la productividad ganadera.

1.1.6 Hipótesis y objetivos del trabajo

El propósito del siguiente trabajo es contribuir al desarrollo de un enfoque integral en la evaluación del comportamiento de un sistema de cría bovina en la región Centro-Sur de la provincia de Corrientes con diferentes estrategias de intervención. Los resultados y herramientas a desarrollar en el trabajo deben colaborar en la definición de temas de investigación en el área de sistemas ganaderos.

La hipótesis de trabajo sostiene que los sistemas de cría bovina del Centro-Sur de la provincia de Corrientes que incorporen al menos una de las estrategias de intervención de manejo permiten mejorar la eficiencia y la estabilidad de los mismos.

El trabajo propone evaluar el efecto de: mejora de campo natural con fertilización fosfórica, suplementación estratégica, y edad de entore de la vaquillona.

Los objetivos específicos son:

- Calibrar un modelo de producción de forraje para ser integrado a un modelo de simulación de cría bovina, con el fin de evaluar el efecto de estrategias de intervención, en la región Centro-Sur de la provincia de Corrientes.
- Evaluar el impacto de, fertilización del campo natural, adelantar la edad de entore de las vaquillonas y suplementación estratégica, sobre la eficiencia y estabilidad de un sistema de cría bovina.

Se trabajó con un modelo dinámico y determinístico. Se utilizó el programa Powersim Studio 9® para simular los sistemas de cría de la región del centro de Corrientes, Argentina.

1.1.7 Organización de la tesis

La tesis está organizada en:

Capítulo 1: Introducción general.

Capítulo 2: Desarrollo y evaluación de los submodelos de simulación.

Capítulo 3: Evaluación de la eficiencia y estabilidad.

Capítulo 4: Conclusiones generales.

CAPÍTULO 2. Desarrollo y evaluación de los submodelos

1.2 Descripción general del modelo

En función de la hipótesis y los objetivos planteados, se utilizó un modelo de producción de cría bovina aplicando diferentes estrategias de intervención. Para el desarrollo del modelo se utilizó una serie de datos registrados por los grupos de trabajo de producción animal y vegetal de la EEA Mercedes del INTA, Argentina. Durante los años comprendidos entre 2007 y 2015, el equipo de producción vegetal de la EEA Mercedes realizó mediciones de productividad primaria en campo natural. En el período 2006-2010, la Unidad Demostrativa de Cría Bovina registró el manejo del rodeo bovino, obteniendo datos de condición corporal, porcentaje de preñez y peso vivo. Con los datos recogidos durante ese período se calibró un modelo de cría base pastoril. Para ello se utilizó el software Power sim Studio 9. Se parametrizó un modelo determinístico, por lo cual sus salidas son el resultado de las condiciones iniciales establecidas, las variables climáticas (entradas al modelo) y las estrategias de manejo utilizadas (Romera *et al.*, 2006; Nasca, 2016). Consiste en un modelo de producción y un modelo de manejo (Feldkamp, 2004). El modelo de producción comprende procesos biofísicos correspondientes al crecimiento de los animales, el crecimiento de las pasturas, el consumo animal y la reproducción animal. El modelo de manejo incluye procesos regulados por la intervención humana (Figura 2.1.).

Se adaptaron modelos preexistentes: crecimiento animal (Feldkamp, 2004), consumo de alimento (Feldkamp, 2004), reproductivo (Kahn y Lehrer, 1984) y producción de forraje (McCall y Bishop-Hurley, 2003). El modelo de manejo actúa como vínculo entre el modelo de producción, las entradas y el criterio incorporado por el usuario en el manejo del sistema de producción (Feldkamp, 2004).

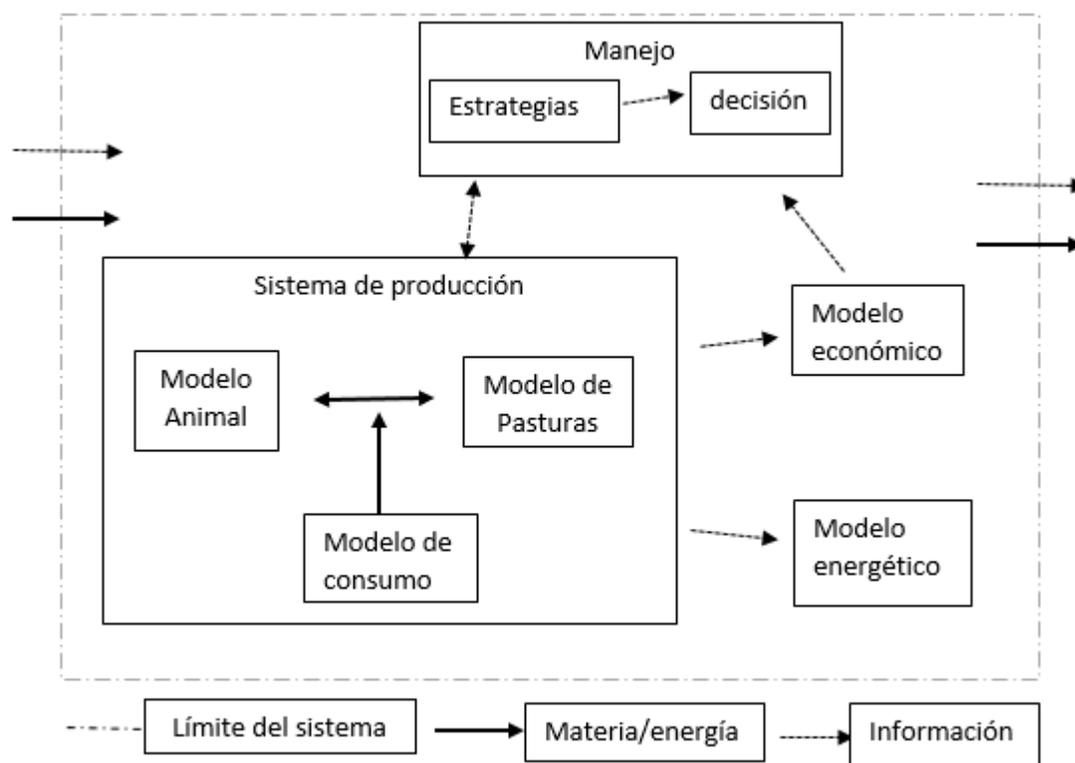


Figura 2.1. Representación simplificada del modelo de sistema de cría utilizado (Adaptado de Nasca, 2016).

El software utilizado para el desarrollo del modelo de simulación utiliza un lenguaje de gráfico, que conectados entre sí configuran un sistema dinámico. Requiere identificar las variables de estado del sistema (stocks), flujos, parámetros (variables auxiliares y constantes) y establecer las conexiones entre ellos (Constanza, *et al.*, 1998). El estado del modelo en un tiempo dado específico es definido por el estado de cada componente. En el próximo intervalo de tiempo, los cambios en el estado del sistema de producción, son calculados considerando las interacciones entre los componentes (Feldkamp, 2004). Para lo cual, es necesario establecer y especificar, el largo de la simulación y el paso de integración tiempo (Constanza, *et al.*, 1998). El modelo utiliza un período de tiempo que se compone de 1 de enero de 1981-1987 y 2006-2015, a partir del cual se genera al azar 80 años de simulación con un paso de integración diario.

A continuación, deben ser especificadas las características del sistema, las condiciones iniciales, los valores de los parámetros, reglas de decisión y relaciones funcionales (Nasca, 2016). Las condiciones dependen de los atributos de los animales, el rodeo, los potreros, el ambiente y las decisiones de manejo. Las reglas consideran objetivos de largo plazo (e.g., carga animal), así como también acciones de manejo tácticas y operativas (e.g., ventas de vacas, vaquillonas y terneros) (Nasca, 2016).

Una vez que un modelo se ha completado, la tarea siguiente es determinar la confianza que tiene el modelo (Woodward *et al.*, 2008). Rykiel (1996) reconoce tres criterios para probar y mejorar los modelos ecológicos. Los dos primeros son que la representación matemática del modelo sea correcta (parámetros, ecuaciones y supuestos) y que el modelo funcione bien, es decir, que las salidas del modelo se correspondan a los datos reales. El tercer criterio es el estudio integrado de todo el modelo. Los términos verificación, validación y evaluación están relacionados a los tres criterios (Rykiel, 1996). Los tres términos son ambiguos y se superponen entre ellos (Rykiel, 1996; Oreskes *et al.*, 1994). Para evitar dichos inconvenientes, en el presente trabajo se utilizará el término evaluación del modelo, entendiéndose como un conjunto de herramientas que permiten generar confianza en el funcionamiento del modelo (Woodward *et al.*, 2008).

La evaluación del modelo se realizó utilizando los estadísticos de diagnóstico propuestos por Yang *et al.*, (2014): el error medio (ErM), raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), RMSE relativa (nRMSE), la eficiencia (EFMO), error máximo admisible (MAE) y la prueba de *t* de Student (Yang *et al.*, 2014). Los estadísticos señalados son apropiados para la evaluación de modelos, ya que los datos experimentales utilizados en muchos casos no cumplen con los supuestos (normalidad, homocedasticidad e independencia) necesarios en otro tipo de evaluación estadística (Yang *et al.*, 2014). Los estadísticos de desviación RMSE y MAE son buenos para el uso en el modelo tanto en la etapa de calibración y evaluación dado que ambos tienen la misma unidad que las variables observada y simulada (Yang *et al.*, 2014). El ErM es un buen índice que determina si el modelo sobreestima (valores positivos del estadístico) o subestima (valores negativos del estadístico) los valores observados. $EF \geq 0$ es una condición fundamental para concluir en la "bondad de ajuste" entre lo simulado y lo observado (Yang *et al.*, 2014).

La comparación entre modelos que fueron desarrollados con el mismo fin es útil como complemento en el proceso de evaluación (Rykiel, 1996). Sumado también, a las evaluaciones subjetivas que consisten en presentar a un experto o grupo de expertos, los resultados de simulaciones de casos similares a su campo de conocimiento (Bennett *et al.*, 2013).

Este tipo de evaluación indicaría si la lógica del modelo y las entradas y salidas son razonables de acuerdo al propósito para el cual fue diseñado el modelo (Rykiel, 1996).

1.3 Características del modelo de crecimiento animal

El modelo de crecimiento animal es central en el modelo de sistemas ganaderos. El modelo de crecimiento animal interactúa con otros modelos de todo el sistema a través del intercambio de información. Proporciona información de peso vivo y condición corporal de los animales y se alimenta de información de otros modelos (Feldkamp, 2004), (Figura 2.2.1).

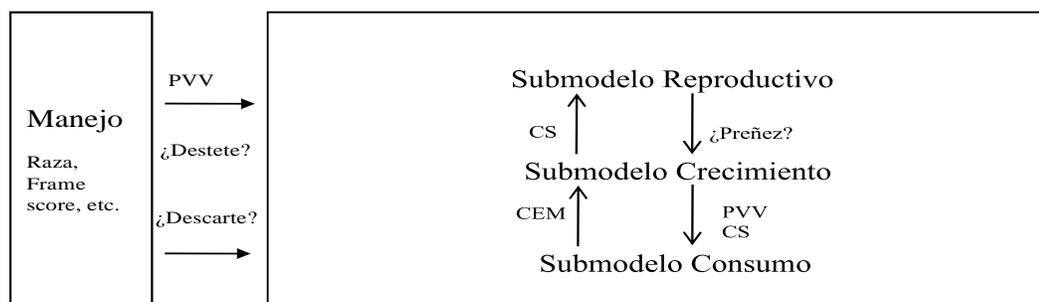


Figura 2.2.1. Descripción simplificada del sistema ganadero representando los modelos que proporcionan y adquieren información del modelo de crecimiento animal (Feldkamp, 2004). CS: condición corporal; PVV: peso vivo vacío; CEM: consumo de energía metabolizable.

Los conceptos del modelo de crecimiento animal en esta investigación fueron tomados del modelo propuesto por Feldkamp (2004). Este modelo tiene como unidad elemental al animal individual de un rodeo, suministra información sobre el peso vivo vacío y la condición corporal de los animales. A continuación, se presentan las características más importantes y las principales ecuaciones utilizadas en el modelo. Sin embargo, en el Apéndice 1 se puede encontrar en más detalle algunos conceptos que ayudarán a comprender los procesos.

Desarrollo del modelo

Asumiendo que las condiciones de alimentación de los animales no son restrictivas y que no existen problemas sanitarios, el crecimiento está completamente determinado por el genotipo. La curva de crecimiento potencial permite determinar composición corporal potencial y el peso animal en cualquier momento de su vida. El modelo de crecimiento animal asigna la energía disponible de la ingesta siguiendo un proceso de priorización relacionados con la diferencia entre el estado actual y potencial del animal.

Este modelo asume tres supuestos principales. En primer lugar, el crecimiento animal es conducido solamente por la ingesta de energía. En segundo lugar, el modelo supone que el peso vivo vacío (PVV) se compone de tres componentes: (1) la materia libre de grasa (MAG); (2) grasa normal (tejido adiposo cuando la condición corporal es moderada, CS = 5); y, (3) grasa en exceso (tejido graso adicional, CS superior a 5). Y tercero, cada componente del PVV da una curva de crecimiento potencial determinada por el tamaño adulto y sexo del animal.

1.3.1 Componentes del peso vivo vacío

Conceptualmente, el peso vivo vacío (PVV) se divide en dos componentes: materia grasa (GRA) y materia libre de grasa (MAG). El componente graso incluye: (1) la grasa incluida en el tejido magro; (2) la grasa en el tejido adiposo. El tejido adiposo está compuesto por dos fracciones: tejido graso normal (GRAn) y tejido graso en exceso (GRAex). El primero es el peso del tejido graso de un animal con una condición moderada (CS=5). El exceso de tejido adiposo es la diferencia entre el peso del tejido graso de un animal en condición corporal mayor a 5 (escala del 1- 9) y del mismo animal en CS igual a 5.

1.3.2 Curva de crecimiento potencial

En los animales alimentados ad libitum, PVV y sus componentes crecen hasta llegar a un tamaño máximo a la madurez. Los animales de diferentes razas o biotipos difieren en su talla adulta. Esta variabilidad de tamaño está incluida en el modelo a través de un valor tamaño adulto o *frame score*. El *frame score* (FS) es una medida lineal del tamaño potencial adulto que va por lo general entre valor 1 a 9. Su valor viene de una ecuación basada en la evaluación subjetiva o medición real de la altura de la cadera y la edad (BIF, 1986). La ecuación 1 propuesta por el NRC (1996) permite estimar el PVV a la madurez en CS = 5, modificado por el efecto del sexo.

$$PVV_{mat} = 366,7 + 33,3 *FR*Sx \quad (Ec.1)$$

Donde, Sx adopta un valor de 1 para las vacas, 1,5 los toros y 1,25 para los novillos.

El tamaño máximo de los componentes se estimó como fracciones del peso vivo a la madurez (Ec.2). Los porcentajes de GRAn, GRAex y MAG son 22,5%, 29,2% y 77,5% del PVV a la madurez ($frMATX$), respectivamente.

$$X_{MAT} = frMATx * PVV_{MAT} \quad (Ec.2)$$

El tamaño potencial de los componentes sigue una curva sigmoidea entre el nacimiento y la madurez (Owens *et al.*, 1993). En este modelo, se utiliza la curva propuesta por Janoschek (1957) para describir el crecimiento de los componentes (Ec.3). Una de las ventajas de esta curva es la flexibilidad de las coordenadas del punto de inflexión. El término "potencial" se utiliza para observar la diferencia entre la cantidad actual de, por ejemplo, GRAn y la cantidad potencial de GRAn que se pueden acumular en un momento dado.

$$X_{pot, t} = X_{MAT} - (X_{MAT} - X_{Bi}) * e^{-kxtPx} \quad (Ec.3)$$

Donde, $X_{pot,t}$ (kg) es el tamaño del componente X a tiempo t; X_{MAT} y X_{Bi} son los tamaños de los componentes X a la madurez y al nacimiento respectivamente. X puede ser GRAn, GRAex o MAG (kg. día⁻¹); K_X y P_X son parámetros (Cuadro 2.2.1.)

Cuadro 2.2.1. Valores de los parámetros para los componentes de peso vivo vacío Janoschek (1957).

Parámetros		Hembras	Toros
MAG	P_{MAG}	1,246	1,652
	K_{MAG}	0,000767	0,000060
GRA_n	P_{GRA_n}	1,883	1,883
	K_{GRA_n}	$2,884 \times 10^{-6}$	$3,021 \times 10^{-6}$
GRA_x	P_{GRA_x}		
	K_{GRA_x}		

La primera derivada de la curva de crecimiento, da la tasa de cambio del tamaño de cada componente Ec. (4) y (5) muestran la tasa de cambio de PVV potencial como resultado de la suma de cada componente.

$$\frac{dX_{pot}}{dt} = (X_{MAT} - X_{pot, t}) * k_x * P_x * t (P_x - 1) \quad (\text{Ec. 4})$$

$$\frac{dPVV_{pot}}{dt} = \frac{dGRA_{n_{pot}}}{dt} + \frac{dPROT_{pot}}{dt} * fr_{PROT_{MAG}^{-1}} \quad (\text{Ec.5})$$

Donde, $fr_{PROT_{MAG}^{-1}}$ es la fracción de proteína MAG.

Estimación de la tasa de crecimiento actual

La tasa de cambio PVV actual es la suma de las tasas de cambio de los diferentes componentes. En un tiempo dado, la tasa de crecimiento máximo de cualquier componente depende de su tamaño potencial, tamaño actual y la tasa de crecimiento del tamaño potencial (Ec.6).

$$\frac{dX_{mx}}{dt} = X_{pot, t} - X_t + \frac{dX_{pot}}{dt} \quad (\text{Ec.6})$$

Donde, dX_{mx}/dt es la máxima tasa de cambio del componente X (MAG, GRA_n o GRA_x) expresada en $kg. día^{-1}$.

La ecuación (7) se utiliza para estimar las tasas de ganancia de los componentes, dada por una cierta cantidad de energía disponible para el crecimiento de ese componente.

$$\frac{dX}{dt} = \frac{E_{forX} * k_{dfe \rightarrow X}}{G_{Ex}} \quad (\text{Ec.7})$$

Donde, dX/dt es la tasa estimada de ganancia del componente X (MAG, GRAn y GRAex) en kg. día⁻¹; EforX es la energía disponible para crecimiento del componente X; GEx es la energía bruta de X; y $k_{dfe \rightarrow X}$ es la eficiencia de uso de la energía metabolizable consumida para formar el componente X.

Cuando la energía disponible para el crecimiento es menor de lo necesario para el máximo crecimiento del magro y graso, entonces se utiliza un esquema de priorización de la asignación de energía. Básicamente, si la energía disponible para el crecimiento es baja, la mayor parte de la energía se asigna para el crecimiento del tejido magro. A medida que la disponibilidad de energía se incrementa, la proporción de energía destinada a magro decrece, y la destinada a grasa incrementa.

La ganancia máxima de tejido magro y la ganancia máxima de GRAn se consiguen al mismo nivel de consumo energía. Por lo tanto, un animal que aumenta su CS por encima de 5, está ganando GRAex y tejido magro a velocidad máxima. Cuando el consumo de energía no cumple con los requisitos de mantenimiento, gestación o producción de leche, los tejidos grasos y magros podrían movilizarse. El tejido magro se moviliza para cubrir requerimientos de mantenimiento.

1.3.3 Condición Corporal y modelo reproductivo

La condición corporal (CS) de la vaca, una herramienta sencilla y factible de realizar en el potrero ya que no está afectada por el tamaño, el llenado ruminal y preñez, sino que, mediante la apreciación visual, se puede estimar las reservas corporales (grasa y músculo) (Stahinger, 2003). La escala propuesta por Lowman *et al.*, (1976) y Herd y Sprott (1986), está conformada por una escala que va del 1 al 9, siendo los valores 1 a 3 los animales flacos y animales con una condición mayor igual a 6 se consideran con exceso de tejido graso. Existe una estrecha relación entre CS y PVV (Wright y Russel, 1984; Northcutt *et al.*, 1992). Animales con diferentes tamaños adultos difieren en el PVV a condición corporal moderada (CS = 5). La relación entre el PVV actual y el PVV a CS igual a 5 puede ser utilizado para representar el grado de gordura de un animal (Sanders, 1974). Para la estimación de la condición corporal actual se utilizó la ecuación 8 (Feldkamp, 2004).

$$CS = \frac{PVV}{PVV_{pot} - 0,6362} - 0,0682 \quad (Ec.8)$$

Las variaciones en la CS de las vacas tienen numerosas implicancias prácticas (Cooper, 2001). La CS de las vacas al momento del servicio afecta el desempeño reproductivo en términos de concepción, intervalo entre partos y porcentaje de vacas vacías (Vargas *et al.*, 1999).

El modelo reproductivo utilizado en este trabajo es determinístico, basado en Oltenacu *et al.* (1980) y Kahn y Lehrer (1984). La condición corporal de los animales domina la aparición y evolución del ciclo estral de las vaquillonas y vacas, lo que determina la posibilidad de que las mismas se preñen.

1.3.4 Producción de leche

El enfoque de simulación de rendimiento de leche es similar al utilizado en la simulación PVV. Primero la curva de rendimiento potencial de la leche es estimada, y la demanda de energía para el rendimiento potencial es calculada asumiendo cierta composición de la leche y eficiencia de la producción de leche. NRC (1996) adoptó una ecuación propuesta por Jenkins y Ferrell (1984), cuyo procedimiento de ajuste requiere sólo unos pocos puntos

de datos. La ecuación (9) muestra la adoptada en el modelo propuesto, para estimar rendimiento diario de leche a la semana n [kg día⁻¹] (NRC,1996).

(Ec.9)

$$Y_n = \frac{n * Y_p * e * K_{edad}}{Y_p * e^{TY_p}}$$

Donde, Y_n producción de leche (kg día⁻¹); n semanas de lactancia; TY_p semanas en alcanzar el pico de lactancia; Y_p producción de leche en el pico de lactancia; K_{edad} factor de corrección por edad.

El factor de ajuste por edad (K_{edad}) toma valores de 0,74 y 0,88 para vacas de 2 años y 3 años respectivamente (NRC, 1996). La ecuación 10 muestra la estimación de la demanda energética para el potencial de producción de leche (Mj.día⁻¹), asumiendo una constante de la densidad energética de la leche de 3,012 MJ.kg⁻¹ (AFRC,1994).

$$E_{reqmxleche} = \frac{3,012 * Y_n}{K_{fe \rightarrow lac}}$$

(Ec.10)

Donde, $E_{reqmxleche}$ energía para producción potencial de leche; Y_n producción de leche; $K_{fe \rightarrow lac}$ eficiencia de utilización de la energía metabolizable para lactancia.

1.3.5 Evaluación del modelo

El objetivo de esta sección es facilitar información de PVV y CS de manera precisa a otros modelos. Ambos son importantes para la toma de decisiones en el manejo del rodeo de cría bovina, ya sea para, categorización de los vientres y estrategias de tratamiento de lactancia, entre otras. El modelo tiene como unidad elemental al animal individual. Contempla la raza, el tamaño adulto, la edad, el peso vivo inicial y el estado corporal inicial. El consumo animal se estimó a partir de un submodelo que requiere conocer la digestibilidad (datos mensuales de bibliografía), y la disponibilidad forrajera (datos medidos durante el ensayo), la temperatura media diaria (datos diarios de la EEA), la raza, el momento de lactancia y gestación. Se implementó en el programa Powersim Studio 9. Para la evaluación se utilizaron dos conjuntos de datos de la EEA INTA Mercedes (29° 12' 0'' S y 58° 5' 00'' O). El primer conjunto, período 1981-85, incluye 24 novillitos entre 8 y 20 meses, Braford, que fueron pesados con frecuencia mensual. El segundo conjunto, período 2006-2010, peso vivo y condición corporal de vacas adultas ($n=75$, $n=68$, $n=56$, $n=49$, $n=32$ en cada año) al inicio y fin del servicio. En este caso, la disponibilidad de forraje se estimó a través del uso del modelo de pasturas por no contar con los datos observados. El recurso forrajero fue un pastizal natural con *Andropogon lateralis* y *Paspalum notatum* como especies dominantes. Para la evaluación del modelo se utilizó los siguientes estadísticos (Yang *et al.*, 2014): raíz cuadrada del cuadrado medio del error (RMSE), el error medio absoluto (MAE), error medio (ErM) y la eficiencia del modelo (EFM).

1.3.6 Resultados y discusión

Los gráficos resultantes (Figuras 2.2.2. y 2.2.3.) permiten observar el grado de ajuste del peso vivo individual (kg PVV.cab⁻¹) de los datos observados y simulados (Bennett *et al.*, 2013).

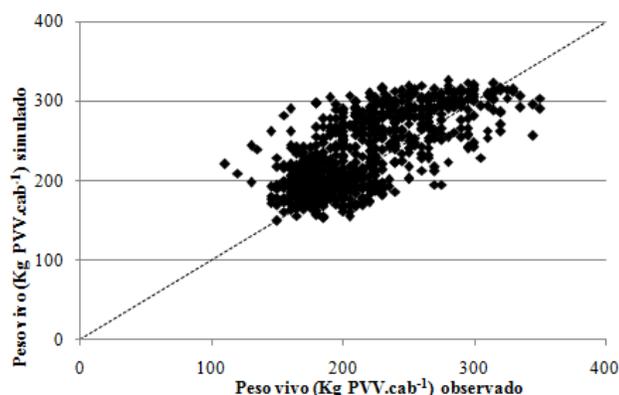


Figura 2.2.2. Valores de peso vivo (kg PVV.cab⁻¹) observados y simulados de novillitos de 8 a 20 meses a base pastoril. Período 1981-1985. Peso medio de inicio 190 kg PV y peso medio final 290 kg PV.

Los parámetros estadísticos (RMSE: 38,8 kg PVV.cab⁻¹; MAE: 29,6 kg PVV.cab⁻¹) muestran una buena estimación del peso vivo para los novillitos. Es probable que estos animales en condiciones reales hayan sufrido limitaciones en calidad (proteína y fibra) y cantidad del pastizal disponible que restringió su crecimiento. La situación descrita, explicaría una ligera sobreestimación del modelo como se observa en la Figura 2.2.2. y 2.2.3., además un valor positivo de ErM (18) determina la sobreestimación. No obstante, una EFM de 0,18 cumple con el criterio establecido para aceptar su utilidad. Siendo que, una eficiencia (EFMO) mayor a 0 es una condición crítica para poder concluir que el modelo cumple adecuadamente con su propósito (Yang *et al.*, 2014).

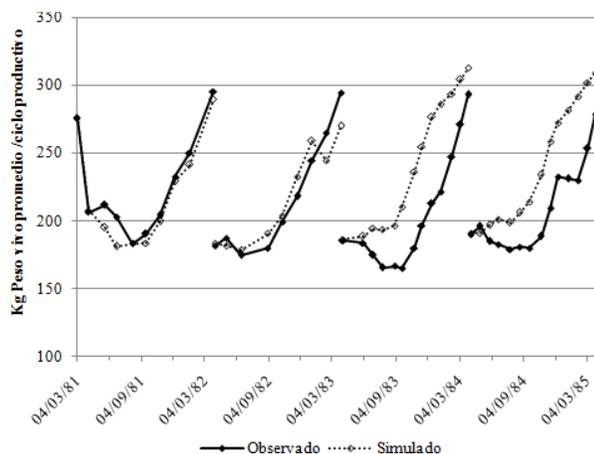


Figura 2.2.3. Valores de peso vivo promedio (kg PVV.cab⁻¹) observados y simulados de novillitos a base pastoril en cada ciclo productivo. Período 1981-1985.

En vacas adultas, tanto el peso vivo (kg PVV.cab^{-1}) como la condición corporal (CS) observada vs simulada, han demostrado un buen ajuste en el modelo (Figura 2.2.4.). Los desvíos estadísticos para ambas variables apoyan esa afirmación, tomando valores de RMSE: $23,36 \text{ kg PVV.cab}^{-1}$; MAE: $10,86 \text{ kg PVV.cab}^{-1}$ y RMSE: $0,39 \text{ CS}$; MAE: $0,25 \text{ CS}$. La bondad del modelo en estimar el peso vivo y la condición corporal se verifica con una EFM de $0,99$ y $0,97$ respectivamente. La condición corporal es un factor crítico ya que contribuye en la determinación de la preñez en el modelo reproductivo.

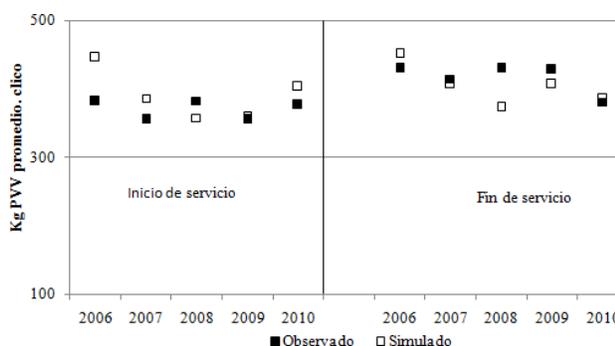


Figura 2.2.4. Relación entre valores observados y simulados de peso vivo promedio (kg PVV.cab^{-1}) de vacas adultas al inicio y al fin del servicio. Período 2006-2010.

Se concluye que el modelo de crecimiento evaluado es consistente para simular la evolución de peso vivo y condición corporal en pastizales del Centro Sur de Corrientes.

1.4 Caracterización del modelo de pasturas

Los pastizales naturales son un ecosistema complejo compuesto por una gran variedad de familias que coexisten e interactúan entre ellas. El grado de complejidad depende de la integración de los componentes del sistema sujetos a estímulos climáticos y de manejo (Tainton *et al.*, 1996). La comprensión del conocimiento de las bondades y limitaciones del recurso pastizal es la clave del manejo (Pizzio, 2001). Las pasturas naturales de la región poseen una gran diversidad estructural con un predominio de gramíneas y relativamente baja participación de leguminosas (Nabinger y Carvalho, 2009). Las variaciones de la productividad en el tiempo están determinadas por la variación climática. En cambio, la respuesta a esa variación se establece por el tipo de comunidad forrajera adaptada a climas subtropicales, especies C3 y C4 (Nabinger y Carvalho, 2009). Determinar su crecimiento y desarrollo permitiría realizar una planificación más ajustada de los sistemas productivos.

Considerando la necesidad de evaluar la respuesta de las acciones de manejo en el sistema de producción y las limitaciones de los modelos conceptuales (Romera *et al.*, 2004) surge la modelación como una herramienta importante de exploración. La modelación permite estudiar aspectos cualitativos y cuantitativos de la dinámica compleja de los ecosistemas pastoriles. En los últimos años han tomado mayor fuerza la utilización de modelos de simulación en la gestión empresarial. Aunque, son pocos los antecedentes de modelos de simulación con pasturas tropicales (Nabinger y Carvalho, 2009, Nasca, 2016). En cambio, la mayoría de los modelos forrajeros fueron desarrollados con pasturas templadas, como es el caso de McCall y Bishop- Hurley (2003) y Herrero *et al.*, (2000). El desarrollo de tal herramienta puede ser muy útil para explorar la dinámica de la producción de forraje y la desaparición en condiciones ambientales variables. En el siguiente trabajo se tomó de referencia el modelo desarrollado por McCall y Bishop- Hurley (2003) para producción de forraje, incorporando modificaciones pertinentes a la región subtropical en

estudio. Dicho modelo fue elegido puesto que considera las influencias principales en la producción de pastos y la calidad en los sistemas de pastoreo durante todo el año. El modelo describe producción de materia seca y dinámica de flujo de tejido vivo y muerto de pasturas bajo pastoreo (Figura 2.3.1.). Durante el trabajo se utilizó el concepto de rasgos funcionales para agrupar especies de respuesta similar a las características ambientales y los regímenes de defoliación (Cruz *et al.*, 2012; Diaz *et al.*, 2004). El uso de grupos funcionales para representar comunidades de vegetación es un enfoque ampliamente reconocido para la comprensión de la diversidad, carente de datos más detallados sobre la composición de las especies o cuando el entorno estudiado es complejo o poco conocido (Díaz y Cabido, 2001).

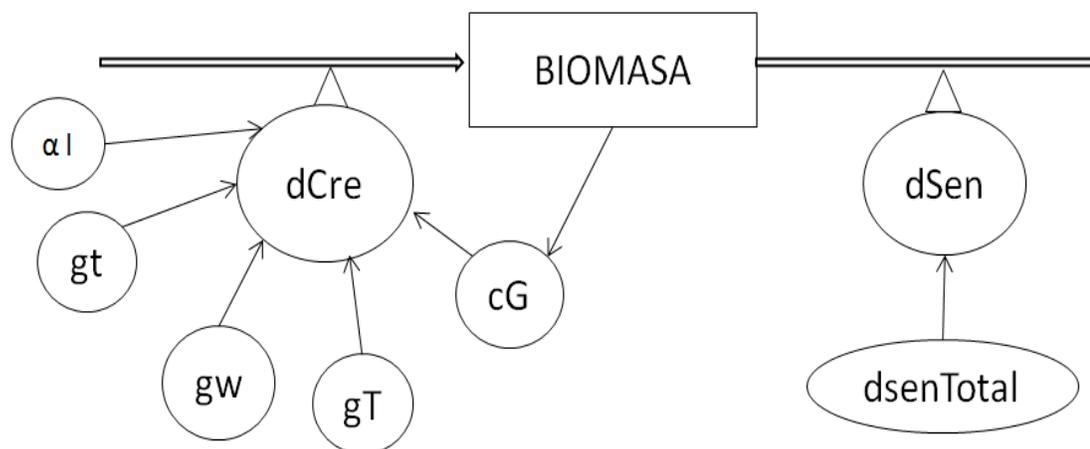


Figura 2.3.1. Crecimiento de forraje impulsado por radiación incidente (I) con la eficiencia de fotosíntesis neta determinado por el parámetro α . La tasa de desarrollo es modificada por el efecto de la temperatura del aire (gT), el agua del suelo (gw), eficiencia fotosintética por fase fenológica (gt) y la capacidad de intercepción de la luz de la canopia (c(G)).

1.4.1 Funcionamiento y supuestos

El crecimiento de la pastura está determinado por las variables eficiencia de uso de la radiación (α) y la radiación incidente (I), donde I es una variable de entrada al modelo. La radiación solar incidente ($\text{Mj.m}^2 \cdot \text{día}$) se registra en la casilla meteorológica de INTA Mercedes. En cambio, el parámetro α es una constante que está influenciada por la composición de especies y fertilidad del suelo. Por lo tanto, para obtener es necesario calibrar según el tipo de especie de la región. El modelo toma un valor de $0,40 \text{ gr MS} \cdot \text{Mj}^{-1}$ (McCall y Bishop-Hurley, 2003, Wallau, 2017). Asimismo, factores como temperatura (gT), agua en el suelo (gw) y estado fenológico de la planta, pueden afectar el potencial fotosintético del pasto (Dos Santos Difante, 2003).

La eficiencia fotosintética está influenciada con el estado fenológico de la planta (gt). La transición de la eficiencia de crecimiento pasto entre las fases vegetativa y reproductivas representan como una función de la época del año en grados días.

El pastizal natural posee un filocrono que va desde 151° a 395° grados días, una elongación foliar de 400° a 436° grados días y una duración de vida foliar 1012° a 1188° grados días para *Paspalum notatum* y *Adropogon lateralis*, respectivamente (Dos Santos *et al.*, 2014). En función de la fase fenológica se establece un factor de corrección que varía entre 0,6 y 1 para las fases vegetativas (v) y reproductivas respectivamente.

La temperatura (gT) es otro factor que influye en el crecimiento del pastizal, observándose temperaturas base de 9 grados centígrados ($^\circ\text{C}$) (Agnusdei, 1999, Jones, 1985, Wallau, 2017), óptima de 30°C (Machado, 2010, Del Pozo, 2004, Dos Santos Difante, 2003)

y temperatura de referencia de 20°C (Herrero *et al.*, 2000). En el modelo se llevó a cabo a partir de la ecuación 11, propuesta por Thornley y France (2007).

$$gT = \frac{(T - T_{mn}) q * ((1 + q * T_{opt} - T_{mn}q) - T)}{Tr - T_{mn} (1 + q * T_{opt} - T_{mn}q) - Tr} \quad (\text{Ec.11})$$

Donde, T_{mn} es la temperatura mínima donde $g(T^\circ)$ se hace 0, q es un parámetro de curvatura con valor de 2, T_{opt} es la temperatura óptima, Tr es la temperatura de referencia y T es la temperatura media diaria.

El factor agua en el suelo (g_w) fue modelado a partir de la propuesta de Cros *et al.*, (2003). El mismo relaciona la disponibilidad de agua y la capacidad de retención de agua en el suelo, tomando valores de 0 a 1. El factor $c(G)$ es la capacidad de intercepción de la canopia y es influenciada por el remanente luego de un pastoreo.

Para la tasa de senescencia se utilizaron valores de referencia de 0,0065 y 0,0131 para el estado vegetativo y reproductivo, respectivamente (McCall y Bishop-Hurley, 2003). Además, está directamente afectada por el contenido de agua en el suelo.

1.4.2 Calibración y evaluación del modelo de pasturas

Para la calibración del modelo fue necesario realizar una exhaustiva revisión bibliográfica con el fin de obtener los valores de los parámetros necesarios para las especies en cuestión (Del Pozo Rodríguez, 2002; Dos Santos Difante, 2003; Romero, 2010; Eggers *et al.*, 2004, entre otros). Durante la parametrización del modelo se agrupó las especies con características similares, tomando de referencia las especies *Paspalum notatum* y *Andropogon lateralis* (Cruz *et al.*, 2010). El modelo fue evaluado con un conjunto de datos obtenido por el grupo de producción vegetal de la EEA INTA Mercedes. Durante el período de observación 2007-2010 se realizaron mediciones mensuales de crecimiento de un pastizal dominado por *Paspalum notatum* y *Andropogon lateralis* a través del método de jaulas móviles.

Los datos de precipitación, temperatura y radiación global son de la estación meteorológica de la experimental para ese mismo período. Para la calibración se tomó como referencia los datos presentes en la Cuadro 2.3.1.

Cuadro 2.3.1. TB temperatura base (°C); T_{opt} temperatura óptima; Tr temperatura de referencia; α eficiencia de uso de la radiación (gr MS. Mj^{-1}); ν proporción de la eficiencia de crecimiento durante el período vegetativo en relación al reproductivo.

Parámetros	Valor	Rango de valores
Temperatura base (TB)	9	8-15
Temperatura óptima (T_{opt})	30	30-35
Temperatura de referencia	20	
Alfa (α)	0,40	0,50-0,9
Valor ν	0,6	

1.4.3 Calidad de las pasturas

La calidad de las pasturas (Figura 2.3.2.), como alimento para el ganado, está expresada por su capacidad de provocar aumentos de la producción en animales. La calidad está relacionada con la proporción que puede digerir un animal cuando lo consume. La relación entre la cantidad de materia seca que se digiere y la que se consume, se llama materia seca digerible (MSD). Es considerada como medida de calidad del forraje ofrecido. El valor nutritivo de los forrajes se relaciona con el avance del ciclo de crecimiento, es decir, relación de tallo: hoja.

Existen dos condiciones climáticas que atentan contra la calidad de los pastizales. Por un lado, las altas temperaturas y humedad provocan un crecimiento muy rápido y la calidad cae bruscamente. Por otro lado, las heladas afectan el crecimiento de la hoja de las gramíneas y la calidad disminuye considerablemente.

Los parámetros de calidad que requiere el modelo son digestibilidad y energía metabolizable. La digestibilidad del pastizal fue tomada de la bibliografía existente (Mufarrege, 1999; Pizzio, 2010). Sin embargo, la energía metabolizable fue calculada mediante la ecuación 12.

$$\text{EMM cal. kg MS}^{-1} = \text{Dig (\%)} * 3,608 \quad (\text{Ec.12})$$

Donde, EM energía metabolizable; Dig digestibilidad

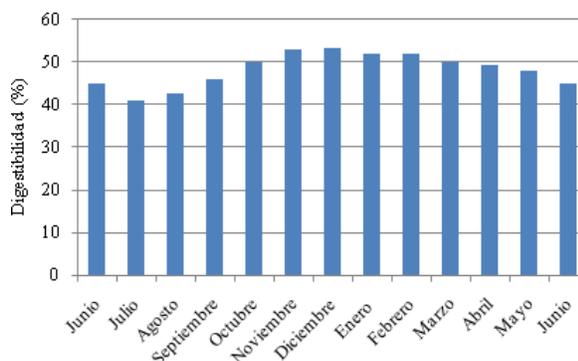


Figura 2.3.2. Representación de la dinámica de la digestibilidad (%) de los pastizales a lo largo del año.

Durante la calibración fue necesario la colaboración de un experto que controle la solidez de las salidas del modelo (Martin *et al.*, 2011). Una vez calibrado el modelo se continuó con su evaluación, utilizando los desvíos estadísticos propuestos por Yang *et al.* (2014).

1.4.4 Resultados y discusión

La producción de forraje ($\text{kg MS. ha}^{-1}.\text{mes}^{-1}$) simulada siguió un patrón cíclico con aumentos desde octubre a abril y disminución de junio a octubre, tal como se da en los datos observados (Figuras 2.3.3.). La producción de forraje promedio de invierno fue de $142 \text{ kg MS. ha}^{-1}$ observada versus $116,4 \text{ kg MS. ha}^{-1}$ simulada. En cambio, la producción promedio durante la primavera fue de $582,3 \text{ kg MS. ha}^{-1}$ y $648,5 \text{ kg MS. ha}^{-1}$, observada y simulada, respectivamente. Asimismo, la producción anual de pasto para ambos, observado y simulado fue, de $5718,5 \text{ kg MS. ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$ y $5486,2 \text{ kg MS. ha}^{-1}.\text{año}^{-1}$. La relación entre valores observados y simulados para producción de forraje ($\text{kg MS. ha}^{-1}.\text{mes}^{-1}$) de la Figura 2.3.4. muestra un buen ajuste, verificado también por los parámetros estadísticos RMSE: $232,5 \text{ kg}$

MS. $\text{ha}^{-1}.\text{m}^{-1}$ y EMA: $173,9 \text{ kg MS. ha}^{-1}.\text{m}^{-1}$. Un valor positivo del ErM: 19,4 determina que existe una ligera sobreestimación de los datos observados. Aun así, el modelo logra captar la variabilidad de las tasas de crecimiento a lo largo del año y entre años con una EFM de 0,85 siendo que un valor superior a 0 determina un buen comportamiento del modelo.

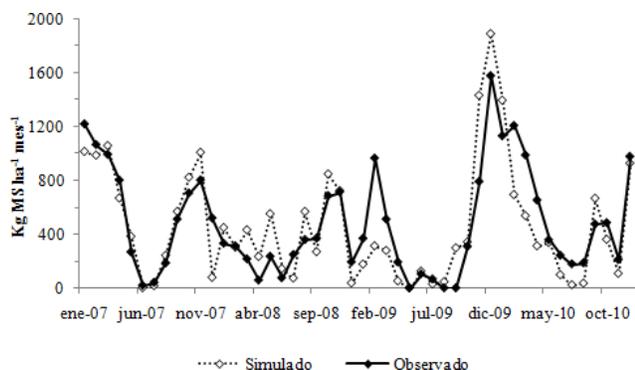


Figura 2.3.3. Producción de pastizal natural ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{mes}^{-1}$) observado y simulado para el período 2007-2010.

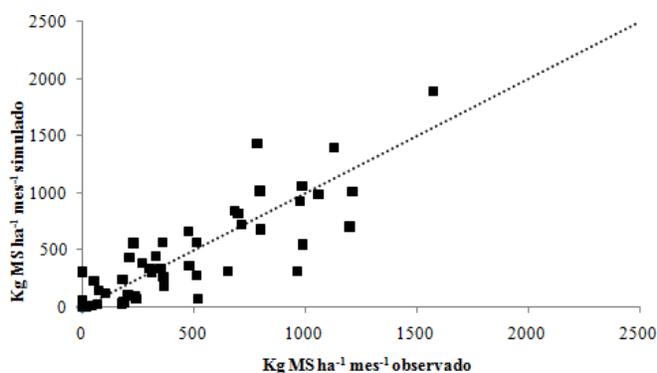


Figura 2.3.4. Producción de forraje ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{mes}^{-1}$) observado y simulado para el período 2007-2010. Línea 1:1.

Un factor crítico del modelo es que sea capaz de captar las variaciones climáticas tal como se observa en la Figura 2.3.5.

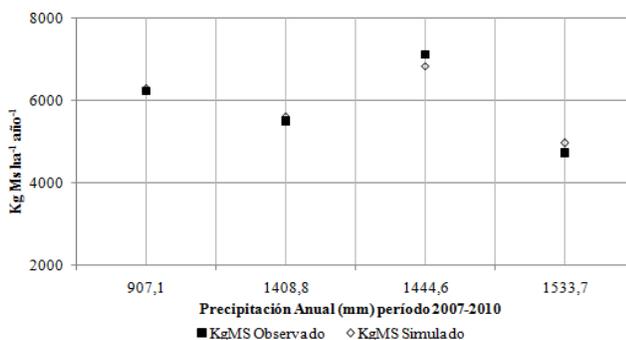


Figura 2.3.5. Relación producción de forraje ($\text{kg MS ha}^{-1} \text{año}^{-1}$) y precipitación anual (mm) para el período 2007- 2010.

Se concluye que el modelo de producción forrajera utilizado es consistente para simular la producción primaria de pastizales del Centro Sur de Corrientes, y permite prever que el mismo será útil para integrar al modelo de sistema de cría.

1.5 Modelo de consumo animal

El consumo de forraje es el factor más determinante de los sistemas de producción (Bailey *et al.*, 1991). La ingesta constituye una parte de los sistemas de pastoreo, influyendo dinámicamente tanto en el animal como en los componentes del pastizal (Hutchings y Gordon, 2001) (Figura 2.4.1.). Noller *et al.*, (1996) han demostrado que el consumo de materia seca produce un mayor impacto en las variaciones de producción animal, esto es, uno de los mayores obstáculos de la investigación en rumiantes: cuantificar y cualificar lo que ingiere los rumiantes en un pastoreo diario.

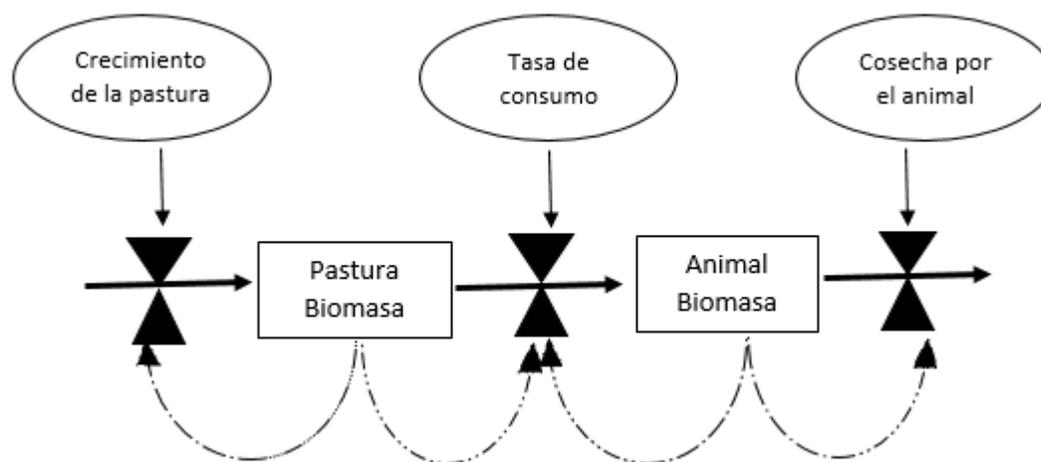


Figura 2.4.1. Representación simplificada de la interacción entre el modelo de consumo y su influencia en la dinámica de los componentes animal y el pastizal. Recuadro simboliza variable de estado; líneas gruesas determinan flujos de información; óvalo representan variables de tasas y líneas discontinuas influencias entre modelos (Adaptado de Feldkamp, 2004).

Existen factores que afectan el comportamiento ingestivo que incluyen la disponibilidad de forraje y la estructura del pasto (Ungar y Noy-Meir, 1988, Galli *et al.*, 1996), palatabilidad del alimento (Weston, 1996), y factores ambientales (NRC, 1987).

La selección de un modelo debe considerar no sólo el nivel de exactitud requerido, sino también las variables de entrada necesarias. El modelo adoptado en esta sección no pretende representar totalmente procesos biológicos y fisiológicos ligados al consumo, sino estimar adecuadamente el consumo de alimentos a partir de algunos atributos de las pasturas y características de los animales.

El modelo adoptado aquí sigue la teoría de la maximización de la ingesta (Sanders y Cartwright, 1979, Mertens, 1987, Poppi *et al.*, 1994). Tanto la ingesta como la digestibilidad de los alimentos de los rumiantes están influenciadas por las características de la alimentación y los animales. La integración de estas características en los modelos matemáticos es fundamental para la evaluación de forraje y la formulación de dietas para los rumiantes (Mertens, 1987). Dicho modelo basado en esta teoría (Pike, 1984; Stephens y Krebs, 1986) ofrece una metodología relativamente simple, un consistente enfoque matemático, una base teórica sólida, suposiciones claras y objetivos definidos para simular la ingesta (Laca y Demment, 1991).

El consumo potencial es estimado como el mínimo de (1) la ingesta restringida por factores metabólicos y (2) el consumo restringido por factores físicos. El estado fisiológico de los animales y las influencias climáticas se considera a través de factores de corrección aplicados a la ingesta potencial. La ingesta real se ve afectada por la ingesta potencial, la disponibilidad de forraje, la temperatura, estado fisiológico. La ecuación 13 muestra el modelo adoptado para estimar la tasa de consumo (IR , [kg de M.S. · día⁻¹]).

$$IR = \min(\{IR_{met}, IR_{físico} \cdot KI_{Gest}\} + KI_{lact}) \cdot KI_{disp} \cdot KI_{temp} \cdot KI_{raza} \quad (\text{Ec.13})$$

Donde IR_{met} e $IR_{físico}$ son las tasas de ingestión limitadas por factores metabólicos y físicos, respectivamente. KI_{Gest} , KI_{Lact} , KI_{disp} , KI_{Temp} y KI_{raza} son factores de corrección para gestación, lactancia, disponibilidad de forraje, temperatura y raza.

1.5.1 Límites metabólicos

Utilizando un concepto similar al de la curva de crecimiento animal potencial (modelo de crecimiento animal), la demanda metabólica de nutrientes sería el potencial para satisfacer a través de la ingesta (Feldkamp, 2004). Así pues, el hambre del animal estaría impulsado por la necesidad de lograr la curva de crecimiento potencial determinada.

La ecuación 14 muestra la tasa de consumo limitada por la demanda metabólica de energía (IR_{met}) ([kg MS · día⁻¹]).

$$IR_{met} = KI_{met} \frac{EBW_{pot}}{0,891} \quad (\text{Ec.14})$$

Donde KI_{met} es 0,064872, y 0,891 transforma el peso vivo vacío en SBW.

1.5.2 Límites físicos

Varios autores Blaxter *et al.*, (1967) y Conrad *et al.*, (1964), señalan el concepto de que la capacidad del tracto gastrointestinal sería el principal responsable del control del consumo en rumiantes. Si bien dichos autores no hicieron referencia específica al rumen como el órgano limitante del consumo, hoy en día se lo reconoce como el compartimento digestivo más importante en la determinación del consumo y digestión de dietas con alto contenido de pared celular.

En forma general, esta teoría establece que el animal puede consumir hasta que el "nivel de llenado del rumen", produce una distensión de las paredes ruminales suficiente para activar

los receptores mecánicos, quienes enviarían información al sistema nervioso central, que una vez procesada, señalaría el cese del consumo (Chilibroste, *et al.*, 1997).

La ecuación 15 muestra la tasa de ingestión limitada por la capacidad física ($IR_{físico}$) ($[kg\ MS.\ día^{-1}]$).

$$IR_{físico} = \frac{KI_{físico} \cdot EBW_{pot} \cdot 0,891}{1 - \frac{MED}{15,096}} \quad (Ec.15)$$

Cuando $KI_{físico}$ es 0,0093, EBW_{pot} es el peso vivo vacío de ese animal a moderado CS; 0,891 transforma el peso vivo vacío en peso vivo reducido, y el MED es la densidad de energía metabolizable de la alimentación $[MJ \cdot kgMS^{-1}]$.

El efecto de la disponibilidad de forraje (KI_{disp}), el efecto de la gestación (KI_{Gest}) y el efecto de la lactancia (KI_{Lact}) siguen el enfoque descripto por Feldkamp (2004).

1.5.3 Evaluación por un experto del modelo adoptado

En el contexto de ausencia de datos experimentales que cuantifiquen el consumo animal en la región de estudio se llevó a cabo un análisis descriptivo de los datos simulados por un experto. Dicho análisis, se realiza cuando no es posible la utilización de test empíricos y se recurre a evaluaciones subjetivas, racionales o personales (Harrison, 1990; Rykiel, 1996; Andrieu *et al.*, 2007; Vayssières *et al.*, 2009). Para lo cual, se utilizó la misma metodología que en el modelo de crecimiento animal. El modelo tiene como unidad elemental al animal individual. Contempla la raza, el tamaño adulto, la edad, el peso vivo inicial y el estado corporal inicial. Determinar el consumo animal requiere conocer la digestibilidad (datos mensuales de bibliografía), y la disponibilidad forrajera (datos medidos durante el ensayo), la temperatura media diaria (datos diarios de la EEA), la raza, el momento de lactancia y gestación. Se implementó en el programa Powersim Studio 9. El conjunto de datos utilizados corresponde a la EEA INTA Mercedes ($29^{\circ} 12' 0'' S$ y $58^{\circ} 5' 00'' O$) y pertenece al período 1981-85. Incluye 24 novillitos entre 8 y 20 meses, Braford, que fueron pesados con frecuencia aproximadamente mensual (entre 9 y 14 veces por año). El recurso forrajero fue un pastizal natural con *Andropogon lateralis* y *Paspalum notatum* como especies dominantes.

1.5.4 Resultados obtenidos

Tal como se observa y según lo descripto en los resultados del modelo de crecimiento animal, el consumo animal sigue el patrón de crecimiento del pasto (Figura 2.4.2.). Los pastizales de la región de estudios poseen bajos niveles de proteína, en consecuencia, influye sobre el valor nutritivo del forraje limitando el consumo y por lo tanto la utilización del pastizal. Es probable que estos animales en condiciones reales hayan sufrido limitaciones en calidad (proteína y fibra) y cantidad del pastizal disponible que restringió su consumo. No obstante, los resultados obtenidos fueron útiles para concluir que el modelo de consumo utilizado es consistente para simular el consumo de un rodeo en pastizales del Centro Sur de Corrientes.

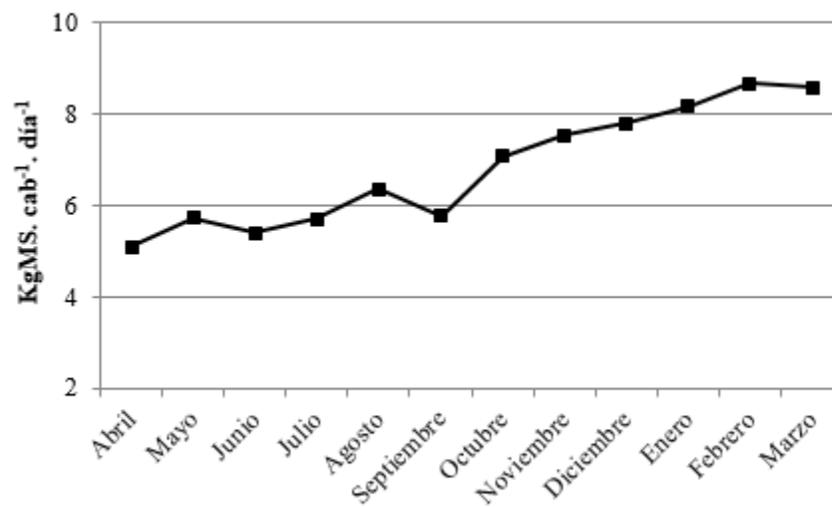


Figura 2.4.2. Consumo promedio (kg MS.cab⁻¹.día⁻¹) simulado de novillos de 8-20 meses de edad (n=24) en un ciclo productivo. Peso vivo promedio inicial 190 kg y peso vivo promedio final 290 kg.

En el caso del rodeo general, vacas adultas y vaquillona los resultados fueron obtenidos en el proceso de elaboración del Capítulo 3, dando por sentado la utilidad del modelo de consumo (Figura 2.4.3.).

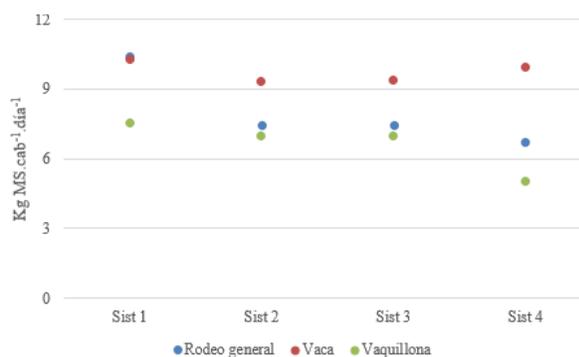


Figura 2.4.3. Consumo promedio de pasto (kg MS.cab⁻¹. día⁻¹) de 60 años de simulación del rodeo general, vacas adultas, y vaquillona de cada sistema.

CAPÍTULO 3. Evaluación de la eficiencia y estabilidad

1.6 Introducción general

Dada la complejidad de los sistemas bovinos de cría, es necesario un abordaje basado en una visión sistémica y un mayor conocimiento del rol que los componentes tienen en la producción agropecuaria. Este tipo de sistema está compuesto por una gran diversidad y cantidad de elementos, tales como, el componente animal, el vegetal, el clima, las características edáficas y las condiciones de mercado. Las relaciones entre los componentes determinan la estructura y por consiguiente el comportamiento de los sistemas (Stermán, 2000). El comportamiento de los sistemas puede ser descrito a través de las propiedades emergentes, como la eficiencia y estabilidad (Viglizzo y Roberto, 1998; Feldkamp, 2004). La ganadería correntina se caracteriza por sistemas de producción extensivos, basados en el aprovechamiento de pasturas naturales de crecimiento primavera - estival, con escasa a nula participación de pasturas cultivadas y de otras fuentes de alimentación complementaria. Bajo estas circunstancias adquiere relevancia el estudio de la incorporación de estrategias de manejo en diferentes sistemas que permita determinar cuál de ellos se comporta mejor evaluado a través de la estabilidad y eficiencia.

El objetivo de este capítulo fue evaluar la eficiencia y estabilidad de sistemas de cría bovina a través de la incorporación de las tecnologías disponibles en la región centro sur de Corrientes. Se contempló las siguientes tecnologías: mejora del campo natural mediante la fertilización fosfórica, suplementación invernal post destete y reducción de la edad del primer servicio. Se utilizó un modelo de simulación de cría bovina con el propósito de evaluar la eficiencia y estabilidad de diferentes sistemas utilizando estrategias de manejo disponible en la región.

1.7 Materiales y métodos

1.7.1 Sitio de estudio

La región de estudio posee un clima subtropical húmedo, sin estación seca. Los veranos son muy cálidos, lo que genera un déficit hídrico estacional (Pizzio, 2001). Las precipitaciones se incrementan de Sur a Norte (1300-1500 mm) igual que las temperaturas, cuya media anual es de 19°C, con un período de probables heladas desde mayo hasta octubre (Arias Usandivaras, 2006). El suelo se caracteriza por una plataforma estructural con afloramientos rocosos del orden de Molisoles. El paisaje es una planicie suave mente ondulada, con praderas de pastos cortos y pajonales con una fuerte dominancia de especies estivales y muy pocas especies invernales (Pizzio, 2001).

Los tipos de pastizales predominantes pueden clasificarse en:

- Pastos en matas dominantes conocidos como “pajonales”, siendo la especie más importante *Andropogon lateralis* (paja colorada), acompañada por especies del género *Paspalum*. Este tipo de pastura está asociada a lugares húmedos y suelos arenosos.
- Pastos cortos asociados a los mejores suelos y condiciones de manejo. La especie dominante es el *Paspalum notatum* (pasto horqueta), acompañado por *Sporobolus indicus* y *Paspalum almun*.

El rodeo se compone de bovinos raza Bradford de producción de cría local. El servicio de la vaca adulta se da en los meses de octubre, noviembre y diciembre con una duración de 90 días, para concentrar la parición en los meses de julio-agosto y septiembre. Durante los meses de febrero-marzo se realiza el tacto para determinar preñez, boqueo para determinar la edad de la vaca, clasificar los animales que sale del sistema (vaca de invernada, terneros y toros) y destete con alrededor de 6 meses de edad. Las vaquillas de reposición son seleccionadas por peso al destete.

Para esta sección se utilizó un conjunto de datos de la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) del Instituto Nacional Tecnología Agropecuaria (INTA), Mercedes Corrientes. La base de datos corresponde a dos períodos de tiempo 1981-1987 y 2006-2016, durante el cual incluye serie climática, características edáficas, peso vivo de los animales, condición corporal, tasa de crecimiento de las pasturas, forraje acumulado por ciclo de crecimiento, calidad de las pasturas, carga animal, manejo de las pasturas, manejo de los animales, insumos utilizados (e.g., suplementos alimenticios) y las principales salidas.

1.7.2 Modelo de simulación y sistemas representados

El sistema está basado en el modelo presentado en el capítulo 2. Una vez que la estructura del modelo queda plasmada en el Powersim studio 9®, se procede a indicar las condiciones iniciales de cada sistema (Figura 3.2.1.).

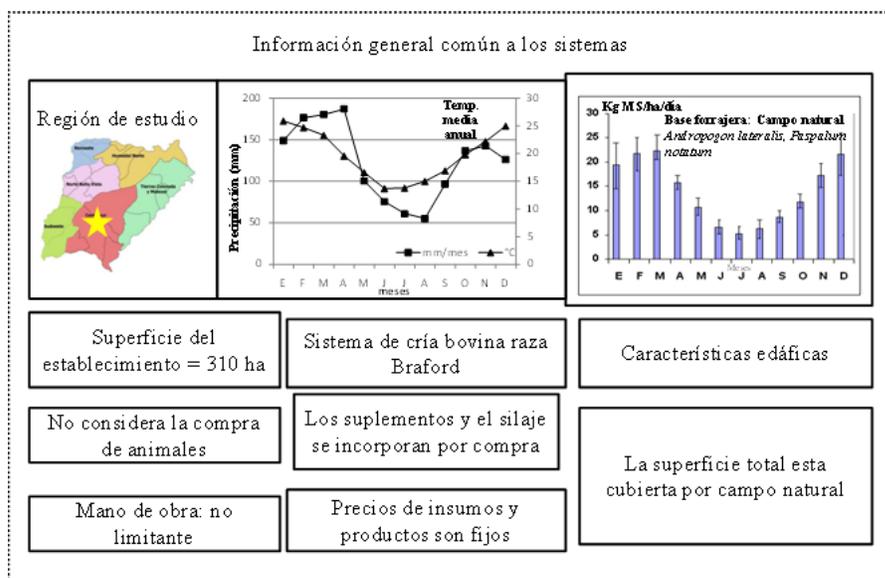


Figura 3.2.1. Características generales y comunes a los sistemas (Adaptado de Nasca, 2016).

El estado inicial de cada sistema se define por los valores iniciales de los atributos de los componentes del sistema (Romera, 2004) y la respuesta dinámica del sistema (Feldkamp, 2004). Antes de una simulación, los valores de los parámetros y los umbrales deben ser fijados, y las reglas de decisión especificadas (Nasca, 2016).

En el presente trabajo se simularon cuatro sistemas diferentes (Cuadro 3.2.1.) con distintos grados de intensificación, desde un sistema con escasa tecnología de procesos a sistemas con mayor incorporación de tecnologías de procesos e insumos.

Cuadro 3.2.1. Características de los sistemas representados en el modelo de simulación de cría bovina.

Técnicas	Sistema 1 (Sist.1)	Sistema 2 (Sist.2)	Sistema 3 (Sist.3)	Sistema 4 (Sist.4)
Carga animal (EV.ha*)	0,7	0,7	1	1
Recurso forrajero	Campo natural (CN)	Campo natural (CN)	Campo natural mejorado (CNM)	Campo natural mejorado (CNM)
Tratamiento de lactancia	Destete convencional	Destete según CC pre servicio	Destete según CC pre servicio	Destete según CC pre servicio
Edad de entore (meses)	26 m	18 m	18 m	15 m
Suplementación ¹ °		Si	Si	Si
invierno post destete				
Utilización de silaje	-----	-----	-----	Vaquillona ad libitum y Vaca según disponibilidad de pasto

*EV ha: equivalente vaca por hectárea.

Estas propuestas presentan un gradiente de intensificación, desde un sistema con escasa tecnología de proceso a sistemas con mayor incorporación de tecnologías de procesos e insumos. La propuesta 1 representa el sistema utilizado en la unidad demostrativa de cría de INTA Mercedes entre 1975 y 1990, y la propuesta 2 representa el manejo vigente en la región de estudio. Sin embargo, las propuestas 3 y 4 no se han evaluado experimentalmente hasta el momento, por lo que su estudio será de gran aporte para planificar futuras experiencias. El fin es determinar cuál de las estrategias tiene mayor impacto sobre la eficiencia y estabilidad.

1.7.3 Propiedades emergentes y salidas

La eficiencia y la estabilidad se evaluaron a través de indicadores productivos, económicos y gases de efecto invernadero (Cuadro 3.2.2). La eficiencia productiva se expresa por animal (i.e., kilos de peso vivo por cabeza) o por hectárea (i.e., kilos de peso vivo vendido por hectárea). Además, la eficiencia es expresada en términos de eficiencia de stock, representa la relación entre producción ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) y carga animal ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$). La eficiencia económica se expresa en términos de margen bruto por hectárea. La estabilidad se expresa como el coeficiente de variación de cada indicador.

Cuadro 3.2.2. Propiedades emergentes con sus correspondientes indicadores productivos, económicos y energéticos.

Propiedades	Indicadores	Unidades
Eficiencia		
Productiva	Peso vivo vacío vendido	$\text{kg PVV}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$
Económica	Margen Bruto	$\text{\$.ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$
Ambiental	Dióxido de carbono equivalente	$\text{CO}_2\text{ eq. ha}^{-1}$
Estabilidad		
Productiva	Desvíos estándar y coeficientes de variación de los indicadores de eficiencia.	
Económica		
Ambiental		

La eficiencia económica fue calculada a partir del margen bruto (pesos) indicador económico que permite comprar actividades o sistemas. Arzeno (1999) propone el margen bruto como el principal indicador económico, considerando que el mismo involucra las relaciones insumo-producto. Los dos componentes básicos son los ingresos (productos generados por el proceso productivo) y los costos (insumos utilizados e.g., productos veterinarios, suplementos, costos laborales, mantenimiento de campo natural y costos operativos y de comercialización). La metodología de cálculo se describe en el Apéndice 2.

Emisión de gases de efecto invernadero

La intensificación de la producción agropecuaria se sustenta en la especialización productiva, en el aumento de la productividad y en una gran utilización de insumos externos, como fertilizantes, agroquímicos o alimentos concentrados (Jacobo *et al.*, 2016). La producción animal es una fuente importante de emisión de gases de efecto invernadero (GEI) en todo el mundo (Gerber *et al.*, 2013).

La Huella del Carbono (HC) es un concepto que nace en Europa y procura calcular el impacto de las prácticas ganaderas en el ambiente, como la nutrición, el estiércol y la cría de animales en la producción de emisión de GEI (Gerber *et al.*, 2013). La HC es un indicador ambiental que pretende cuantificar la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero - expresada en equivalentes de dióxido de carbono- causadas directa o indirectamente por una actividad o las acumuladas durante la vida o etapas de un producto (Sirotiuk, P. y Viglizzo, E., 2013).

Las cadenas alimentarias son responsables, en todo el mundo, de una gran parte de las emisiones totales de GEI (Sonesson *et al.*, 2010). En consecuencia, al aplicar la HC a la producción de alimentos, se consideran todas las emisiones que generan las actividades involucradas en el ciclo de vida del producto (Papendieck, 2010) incluyendo el gasto energético para su producción y transporte.

Existe una relación directa entre las intensidades de emisión de GEI y la eficiencia con que los productores utilizan los recursos naturales. Para los sistemas de producción pecuarios, las emisiones de óxido nitroso (N₂O), metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂), los tres principales GEI emitidos por el sector, son pérdidas de nitrógeno (N), energía y materia orgánica que disminuye la productividad. Esto deriva, en que cada vez más, existe un mayor convencimiento que la eficiencia en el uso de alimentos por unidad de producto (carne leche otra bajo) puede ser mejorado considerablemente mediante la aplicación de normas de manejo (DeRamus *et al.*, 2003). Por lo que, se han identificado tecnologías de procesos e insumos que permiten incrementar la eficiencia de la producción ganadera (Henning *et al.*, 2001). Por ejemplo, se espera que la inclusión de pequeñas cantidades de alimento concentrado en la dieta basada exclusivamente a pasto incremente la productividad animal y disminuya la intensidad de las emisiones de GEI, es decir, CO₂eq por kg de peso producido. A su vez, los forrajes con alto contenido de azúcares (gramíneas con alta concentración de azúcar o forrajes cosechados en las horas de la tarde cuando su concentración de azúcares es mayor) podrían reducir la excreción de nitrógeno urinario, la volatilización del amoníaco y posiblemente las emisiones de N₂O provenientes del estiércol aplicado al suelo. Sin embargo, pocos estudios se han realizado sobre emisiones en relación al manejo y productividad de los sistemas pastoriles (Pavao-Zuckerman *et al.*, 1999 y Nasca, 2007). La metodología de cálculo de cada fracción que conforma el CO₂ equivalente es descrita en el Apéndice 3.

1.7.4 Supuestos y reglas de decisión

Para la comparación de los diferentes sistemas propuestos se establecieron reglas de decisión y supuestos. La superficie utilizada en todos los sistemas fue de 310 hectáreas. La base forrajera en todos los sistemas fue campo natural, Sist 1 y 2, con la diferencia que en los sistemas 3 y 4 se fertilizó el campo natural con fertilizante fosfórico (35 kg de P₂O₅) una vez al año, todos los años en el mes de septiembre.

Se utilizó una carga animal de 0,7 vacas ha⁻¹ para los sistemas 1 y 2, y una carga animal de 1 vacas ha⁻¹ para los sistemas 3 y 4.

Las vaquillonas recibieron servicio entre los 24 a 26 meses en el sistema 1, 18 meses en el sistema 2 y 3 y 15 meses en el sistema 4. El período de servicio fue 90 días entre los meses de octubre, noviembre y diciembre para el servicio de 24 a 26 meses y 15 meses. En cambio, el período de servicio para el entore a los 18 meses fue de 60 días en los meses de febrero y marzo. El destete se realiza en todos los sistemas el 15 de febrero para unificar las salidas, con un promedio de 6 meses de edad. En el caso del Sist 2 y 3 se agrupan los destetes de vacas adultas y los terneros de vaquillas de 18 meses.

Las vacas y vaquillonas se descartaron y vendieron si al momento del tacto se encontraban vacías. Las reglas de decisión no tuvieron en cuenta la compra de animales. Las estrategias de manejo implementadas contemplaron el ajuste de la carga animal y el destete.

La suplementación se utilizó exclusivamente en las vaquillonas de reemplazo en los Sistemas 2, 3 y 4. El nivel de suplementación se reguló para cubrir un consumo diario de 8,3 Mj EM kg MS⁻¹ hasta un máximo de suplemento equivalente al 1% del PVV (base seca) por un período de tiempo comprendido desde junio a septiembre. Además, en el Sist 4, se utilizó el silaje de sorgo de planta entera más la suplementación (maíz- pellet de algodón) al 1% PV. De esta manera, se desea alcanzar los 300 - 320 kg PV en vaquillonas de reposición al inicio de octubre e ingresar a su primer servicio. En el caso de las vacas adultas se suministró silaje cuando la disponibilidad de pasto era inferior a los 800 kg MS.ha⁻¹.

A partir de 18 años de datos climáticos de la estación meteorológica de la EEA INTA Mercedes, se elaboró 5 series artificiales de 80 años generados al azar (Romera, 2004; Woodward *et al.*, 2008). Cada una de las 5 series de 80 años se considera una repetición independiente (Romera *et al.*, 2005; Nasca, 2016). Los valores medios y desvíos estándar para los diferentes indicadores fueron comparados estadísticamente. Para reducir el impacto de los valores iniciales, el modelo se corrió 80 años de los cuales los últimos 60 años fueron analizados.

Las salidas del modelo fueron estadísticamente analizadas con Infostat. El modelo estadístico fue:

$$Y_{ij} = \mu + \tau_i + e_{ij}$$

Donde, Y_{ij} es la ij -ésima observación; μ es la media general; τ_i es el efecto del i -ésimo tratamiento; e_{ij} es el error.

$$i = 1, 2, 3, 4. \quad j = 1, \dots, 5.$$

Se evaluó normalidad y homocedasticidad de los términos del error. Las medias y desvíos fueron comparadas con el test de Tukey, y las diferencias significativas fueron declaradas cuando $P < 0,05$.

1.8 Resultados y discusión

La carga animal en un sistema de cría bovina en pastoreo es una herramienta importante para alcanzar los objetivos productivos y económicos. Es ampliamente aceptado que la carga animal es un componente importante desde el punto de vista de la vegetación, recursos naturales y el retorno económico (Riechers *et al.*, 1989). A continuación, se observa cómo se comportó la carga animal en cada sistema (Figura 3.2.2.).

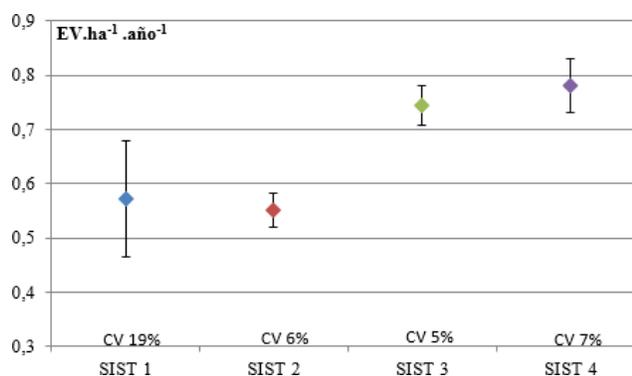


Figura 3.2.2. Carga animal en EV.ha⁻¹.año⁻¹ de los cuatro sistemas. Líneas verticales indican desvío estándar. CV son los coeficientes de variación (%).

La carga animal en EV. ha⁻¹. año⁻¹ del Sist 1 y 2 fue ligeramente inferior a utilizada en los sistemas de cría bovina de la región, siendo que la carga animal para los pastizales del centro sur de Corrientes es de 0,6 EV ha⁻¹ (Benítez *et al.*, 2004). El Sist 1 resultó el más inestable (CV 19%). Esto se debe a que, en años de condiciones climáticas adversas, la preñez del segundo servicio de la vaquillona se vio comprometida con bajos índices de preñez y en consecuencia un incremento de las ventas de vaca vacía. Esta variabilidad determina que se deben realizar ajustes de la carga por lo menos una vez al año que asegure que un EV consuma 1000 kg MS para los 100 días del invierno (Pizzio, 2001).

Los Sist 2, 3 y 4 (CV 6% y CV 5% y CV 7%, respectivamente) mantuvieron una carga estable, siendo el menos variable el Sist 3. Es de destacar que, con la incorporación de la fertilización del campo natural, el Sist 3 tuvo una estabilidad similar al Sist 2, pero a mayor carga. Estos resultados coinciden con lo observado en ensayos de pastoreo tanto con novillos como con vacas de cría en la región, en los cuales se observó que la fertilización fosfórica permitió incrementar la carga de un campo natural en un 30-35% (Benitez *et al.*, 2004; Pizzio *et al.*, 1986; Shaw, 1978).

La carga animal lograda todos los sistemas fue inferior a la carga objetivo.

Resultados productivos

Los sistemas evaluados generaron diferentes resultados en términos de peso vivo vacío vendido. La eficiencia y estabilidad expresada como el valor medio anual del peso vivo vacío vendido y su desvío estándar se observan en la Figura 3.3.3. La productividad por unidad de superficie difiere entre sistemas, y presenta una estrecha relación con la carga animal.

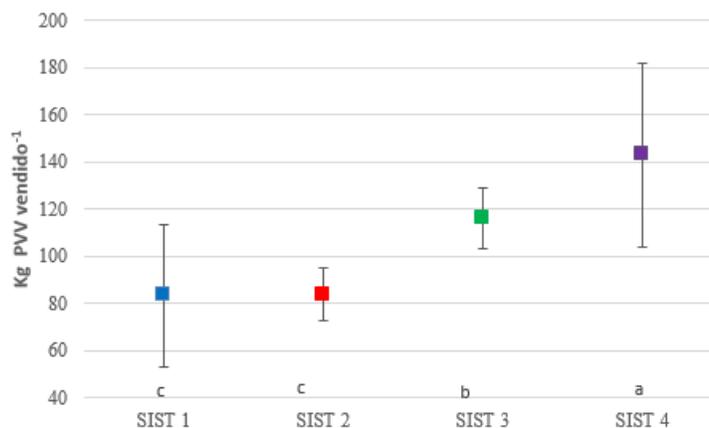


Figura 3.3.3. Valores medios de peso vivo vacío vendido ($n = 5$) ($\text{kg PVV} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) para los diferentes sistemas. Barras indican desvíos estándar. Letras diferentes indican diferencias entre tratamientos con una probabilidad de $P < 0,05$.

La productividad ($\text{kg PVV} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) aumenta a medida que incrementa la carga animal y los recursos alimenticios. En ese sentido, el Sist4 es el que presenta mayor producción por hectárea y mayor eficiencia de stock (0,440 terneros cada 1000 ha y CV 2%). Esto es consecuencia de la mayor cantidad de kilos de peso del ternero destetado por hectárea por año.

Los sistemas 2 y 3 fueron los más estables en términos de producción ($\text{kg PVV} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$ vendido) con un coeficiente de variación de 13 % y 11 % respectivamente. Esta propiedad emergente coincide con los beneficios propuestos para el adelantamiento del servicio a los 18 meses de edad (Sampedro, 2006). Este autor propone que el hecho de que la vaquillona llegue seca al 2° servicio tiene un beneficio sustancial para el sistema. De la misma forma, el manejo de la lactancia según condición corporal en la vaca adulta permite atenuar el efecto climático interanual (Sampedro, 2015). Como puede observarse, el adelantamiento de la edad al primer servicio en el Sist 2 y 3 más el manejo de la lactancia impactan en una mayor eficiencia productiva respecto al Sist 1. A su vez, el impacto en la producción de carne en el Sist 3 fue de un 35% más respecto al Sist 2.

La mayor productividad del Sist 4 estuvo asociada a una menor estabilidad, con un coeficiente de variación del 27%. Cabe destacar, que al anticipar la edad del primer servicio se elimina una categoría improductiva del rodeo e incrementa la proporción de vientres sobre el total del rodeo. En consecuencia, un mayor número de terneros producidos en la misma superficie. Ambos factores (productividad y proporción de animales en producción) determinan un aumento del ingreso económico de la actividad.

El Sist 1 presentó un coeficiente de variación elevado (36%) indicando que no necesariamente un sistema menos intensificado es más estable.

Incrementar la productividad por hectárea ($\text{kg PVV}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{año}^{-1}$) de los sistemas pastoriles en ambientes inestables requerirá entender la variabilidad propia de los índices productivos (Bell *et al.*, 2008). En sistemas pastoriles que dependen de las lluvias como única fuente de humedad, la variabilidad estacional de las precipitaciones incide directamente en la estabilidad de la producción (Cooper *et al.*, 2008; Browne *et al.*, 2013). Además, los tiempos de retraso de los modelos temporales (Sala, 2001; Díaz-Solis *et al.*, 2003; Díaz-Solis *et al.*, 2009) y los factores relacionados con la disponibilidad de agua en el suelo (Bell *et al.*, 2013; Chapman *et al.*, 2013), explicarían esa variabilidad.

El peso medio de los terneros destetados (kg PV ternero destetado) y los días medios de lactancia fueron consistentes con las reglas de decisión utilizadas (Figura 3.3.4.). En los Sist 2 y 3 tanto el peso como los días de lactancia fueron menores debido a la mayor proporción de terneros destetados anticipadamente, producto del servicio a los 18 meses de edad de la vaquillona. No obstante, resultaron los sistemas con mayor estabilidad interanual en cuanto a peso promedio de los terneros con un CV 0,25% y CV 1,5% en los Sist 2 y 3 respectivamente. El Sist 1 y 4 presentaron el mayor peso del ternero, sin embargo, el Sist 1 presentó mayor variabilidad interanual (CV 2%).

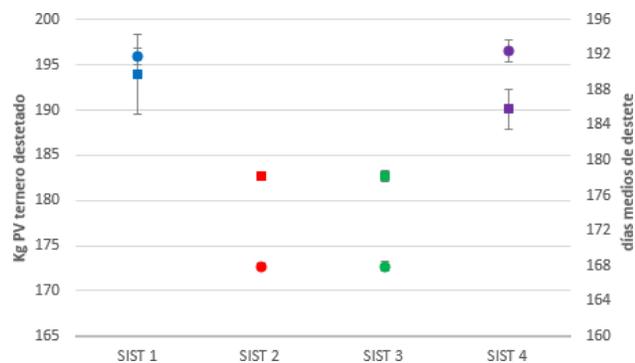


Figura 3.3.4. Peso medio de ternero destetado (kg PV) y días medios de destete para los 4 sistemas. Barras verticales corresponde al desvío estándar. Cuadrados pertenecen a kg de peso vivo del ternero destetado de cada sistema y círculos a los días medios de destete.

En la Figura (3.3.5. A y B) se observan los índices reproductivos de los 4 sistemas. Los sistemas 2 y 3 tuvieron los mejores índices reproductivos en las 3 variables representadas (preñez, parición y destete) en comparación con el Sist 1 y con el Sist 4 (valor p 0,0001), que obtuvo un inferior desempeño. Los Sist 2 y 3 tuvieron baja proporción de cola de parición (10,7%), mientras que el Sist 4 fue quien presentó mayor proporción (15%). Estas ventajas, en los Sist 2 y 3, se relacionan con el uso de un período de primer servicio corto (45 a 60 días) y un destete realizado previo al invierno y varios meses antes del comienzo del segundo servicio. En este sentido, el Sist 4 es el más ajustado ya que el segundo servicio comienza luego de un corto período de recuperación pos parto (aproximadamente de 45 días) y en animales que aún están en desarrollo. Los resultados son coincidentes con lo observado por Flores (2016) siendo necesaria una planificación diferencial en la alimentación para mantener altos índices de preñez en el segundo y tercer servicio, ya que son animales que continúan creciendo además de estar lactando. Dado que el modelo utilizado no simula el efecto de enfermedades, uno de los factores preponderantes en la definición de las pérdidas en sistemas reales, se puede inferir que estas diferencias son debidas a desbalances entre la demanda nutricional de rodeo y la oferta del sistema pastoril en determinados momentos del año.

En este sentido, los Sist 2 y 3 tienen ventajas sobre los Sist 1 y 4 son más susceptibles a cambios bruscos en la alimentación lo que afecta las reservas corporales y producción de leche y por consiguiente las pérdidas de terneros.

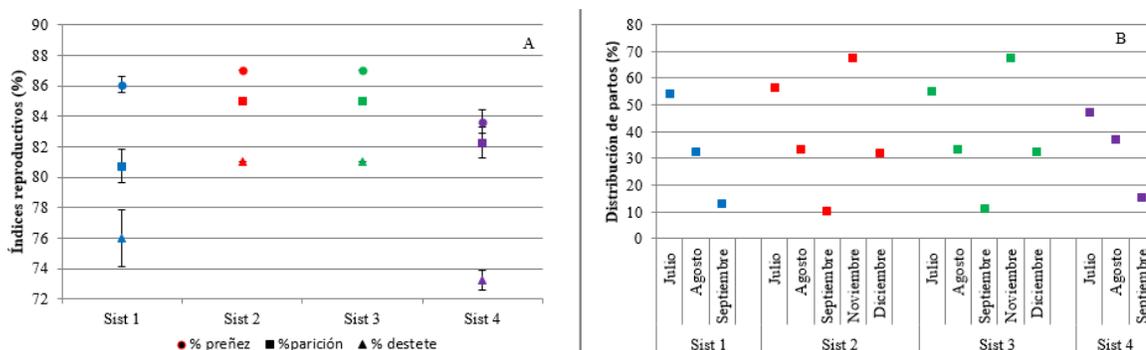


Figura 3.3.5. A) Índices reproductivos y B) Distribución de partos para los cuatro sistemas promedio de 60 años de simulación. Barras indican desvío estándar.

Producción forrajera

La producción de forraje media anual para campo natural alcanzó valores medios similares a los obtenidos en la región. La productividad por unidad de superficie ($\text{kg MS. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) difirió entre los sistemas, la mayor productividad de forraje en campo natural se obtuvo en el

Sist 2 ($5796 \text{ kg MS. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) con un 10% más de productividad en comparación con el Sist 1 ($5275 \text{ kg MS. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$). En cambio, la productividad de forraje en campo natural fertilizado fue mayor en el Sist 3 ($6456 \text{ kg MS. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) con un 5% más de productividad y un CV del 4% respecto al Sist 4 ($6120 \text{ kg MS. ha}^{-1} \cdot \text{año}^{-1}$) con un CV 6% (Figura 3.3.6. A).

Los patrones de producción media mensual de forraje (Figura 3.3.6. B) fueron similares tanto para campo natural (Sist 1 y 2) como para campo natural mejorado (Sist 3 y 4). La tasa de crecimiento media de forraje se logra en primavera con $660 \text{ kg MS. ha}^{-1}$ (mínimo de $470 \text{ kg MS. ha}^{-1}$ hay máximo de $879 \text{ kg MS. ha}^{-1}$) para los Sist 1 y 2 versus $774 \text{ kg MS. ha}^{-1}$ para los Sist 3 y 4 (mínimo de $573 \text{ kg MS. ha}^{-1}$ y máximo de $930 \text{ kg MS. ha}^{-1}$). La tasa de crecimiento media durante el invierno fue de $164 \text{ kg MS. ha}^{-1}$ (mínimo de $43 \text{ kg MS. ha}^{-1}$ y máximo $291 \text{ kg MS. ha}^{-1}$) para el Sist 1 y 2 versus $183 \text{ kg MS. ha}^{-1}$ (mínimo de $50 \text{ kg MS. ha}^{-1}$ y máximo de $367 \text{ kg MS. ha}^{-1}$) para el Sist 3 y 4.

Análogamente, la variabilidad sigue el mismo patrón a través de los diferentes tratamientos. La variabilidad durante la primavera es especialmente importante porque durante esta temporada se determina la tasa de preñez, variable que tiene una gran influencia en los resultados productivos y económicos del sistema de cría.

La producción media de forraje por mes marca un patrón cíclico de lenta disminución de abril a octubre y rápida acumulación de octubre-noviembre con una pequeña caída en diciembre y nuevamente acumulación hasta abril. Para la región, estos resultados son compatibles con los informes sobre el crecimiento de forraje durante un período tiempo (Pizzio *et al.*, 1986).

Es interesante comparar el comportamiento del Sist 2 y 3 (sin y con fertilización respectivamente) como ante la incorporación de la fertilización no sólo se vio beneficiada la producción de forraje sino también pudo mantener la carga animal y lograr mejores índices productivos. Dicha respuesta productiva avalaría la importancia de la aplicación de la fertilización en los campos de cría de la región.

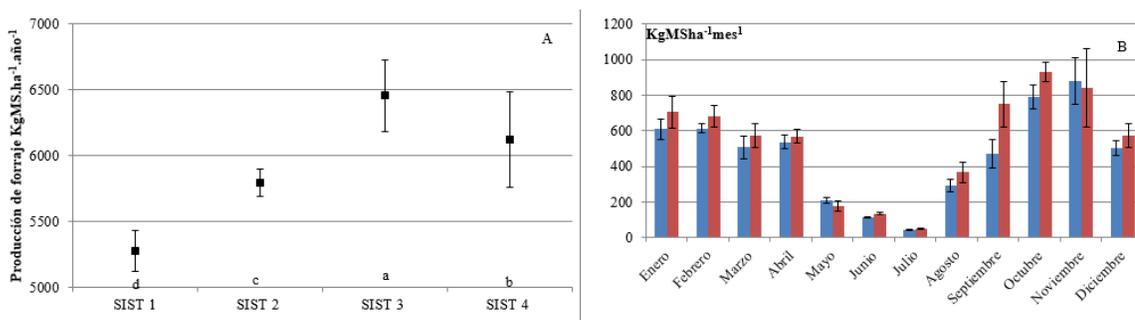


Figura 3.3.6. A) Producción media de forraje anual en kg MS. ha⁻¹.año⁻¹ para los 4 sistemas y B) Producción de forraje de campo natural (barras azules) y campo natural fertilizado (barras rojas). Barras verticales indican el desvío estándar y letras diferentes indican diferencias entre tratamientos con una probabilidad de P <0,05.

Resultados de los Gases de efecto Invernadero

El ganado vacuno es el principal generador de emisiones de gases de efecto invernadero del sector con alrededor de 4,6 Gtn de CO₂eq, que representan el 65% de las emisiones provenientes de las actividades pecuarias (Gerber *et al.*, 2013). En la Figura 3.3.7 se observa las emisiones de dióxido de carbono equivalente por hectárea (CO₂eq. ha⁻¹) para los diferentes sistemas.

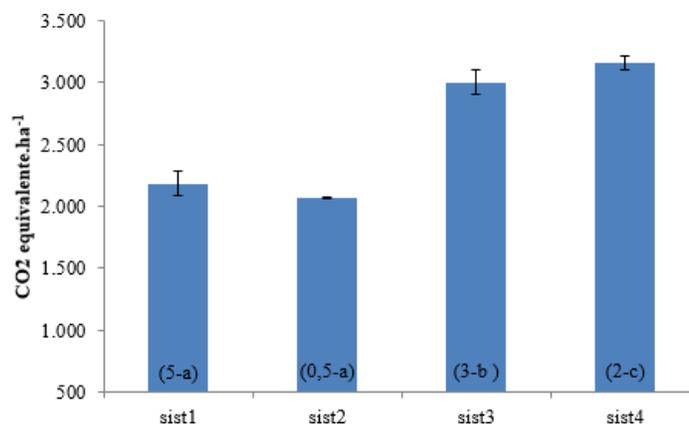


Figura 3.3.7. Dióxido de carbono equivalente por hectárea (CO₂eq. ha⁻¹). Las barras verticales indican el desvío estándar y valores entre paréntesis los coeficientes de variación (%) y letras diferentes indican diferencias entre tratamientos con una probabilidad de P <0,05.

El Sist 4 es el mayor productor de CO₂ eq ha⁻¹ (3161 CO₂ eq ha⁻¹), esto se relaciona con incrementos en la carga animal, la cual está positivamente correlacionado con las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de superficie (Ghahramani y Moore, 2015; Veyseet *et al.*, 2010). El mayor uso de insumos ha permitido aumentar la productividad ganadera. Sin embargo, esto podría aumentar la cantidad de energía fósil requerida para producir una unidad de producto y reducir, en consecuencia, la eficiencia energética (Halberg *et al.*, 2005). En término de eficiencia el Sist 4 produce un 9% menos metano (18,8 kg metano. kg⁻¹ PVV producido) que el Sist 1, es decir, utiliza más eficientemente los recursos naturales. En los sistemas que se aplica fertilización fosfórica, la ingesta total de MS necesaria para proporcionar la misma cantidad de energía digerible es menor, producto de una mejor utilización de los recursos alimenticios.

El Sist 1 con prácticas de manejo básicas produce menor cantidad de CO₂ eq. ha⁻¹ (2182 CO₂eq. ha⁻¹) y niveles de metano mayor (20,5 kg metano. kg⁻¹ PVV producido). Además, resultó ser el más inestable con un CV del 5% y un DE de 99,6 kg CO₂eq. ha⁻¹. En cambio, el Sist 2 produce menos CO₂ eq. ha⁻¹ (2067,9 CO₂eq. ha⁻¹) y 10% más de metano (20,72 kg metano.kg PVV producido) respecto al Sist 4. Asimismo, es el sistema más estable con un CV 0,5% y un DE de 10,1 kg CO₂ eq. ha⁻¹.

Cabe destacar la importancia de identificar métodos efectivos para la mitigación de GEI, que no tengan consecuencias negativas sobre otros sectores, por ejemplo: la biodiversidad o la viabilidad económica de los sistemas de producción (del Prado *et al.*, 2010).Tecnologías como la incorporación de leguminosas, podrían jugar un rol de importancia en la región, permitiendo incrementar la producción de forraje y productividad total (Radrizzani y Nasca, 2014), mejorando el retorno económico y ayudando a disminuir el impacto ambiental (Monjardino *et al.*,2010).

Incrementar la producción por animal (kg PVV) ha sido propuesto como una estrategia para reducir las emisiones de GEI en sistemas agropecuarios, ya que menos animales serían necesarios para producir la misma cantidad de productos (Steinfeld y Wassenaar, 2007). Sin embargo, estos indicadores que reflejan la eficiencia de los sistemas de producción no tienen en cuenta la generación de desechos totales (Nasca, 2016). A su vez, la promoción de sistemas más eficientes, podría llevar a un mayor consumo de energía fósil y de emisión de metano en una escala espacial superior, de manera análoga a lo establecido por la Paradoja de Jevons' (Giampietro, 2004), según la cual, una mayor eficiencia energética lleva a aumento total de la demanda de energía, en lugar de una reducción.

Resultados económicos

La eficiencia del capital invertido expresado en términos de margen bruto varió entre 2000 y 3000 \$. ha⁻¹. año⁻¹ (Figura 3.3.8.). A su vez, los sistemas más estables fueron el 2 y 3 (CV 15% y 14% respectivamente), en coincidencia con la estabilidad productiva indicada previamente. Continúa el Sist 4 con un CV 31% y el Sist 1 es el más inestable con un CV 45%.

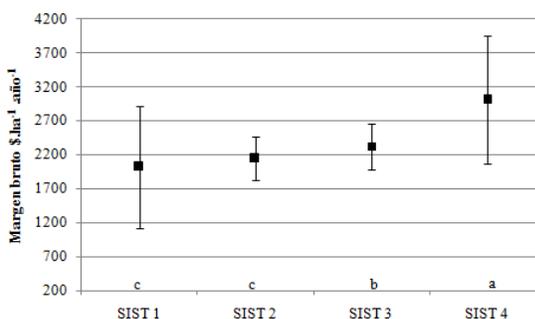


Figura 3.3.8. Margen bruto medio anual (\$. ha⁻¹. año⁻¹). Puntos representan los valores medios (n = 5), y las barras verticales los desvíos estándar. Letras diferentes indican diferencias entre tratamientos con una probabilidad de P < 0,05.

Tradicionalmente, la suplementación es visualizada como un factor que contribuye a la estabilización de los sistemas. Las decisiones de manejo utilizadas en el Sist 2 permitieron estabilizar el sistema y mejorar la ganancia de peso invernala de vaquillas respecto al sistema 1 sobre campo natural. En el Cuadro 3.3.3. se observa cual fue el consumo de cada recurso alimenticio en los diferentes sistemas.

La fluctuación de los precios de los suplementos en muchos casos genera incertidumbre lo que genera que no se utilicen suplementos por encima de ciertos límites (e.g., 1% del PVV) ya que se percibe a esta práctica como riesgosa (Orellana *et al.*, 2009). La percepción del riesgo y la incertidumbre sobre el futuro son los principales factores que limitan la adopción de nuevas tecnologías en los sistemas agropecuarios (Marra *et al.*, 2003).

Cuadro 3.3.3. Utilización de suplemento en los diferentes sistemas (Sist 2, 3 y 4).

	kg cabeza año				
	Vaquilla				Vaca
	Sist 1	Sist 2	Sist 3	Sist 4	
Suplemento	0	53	53	132	-
Silaje	0	0	0	1152	169
Forraje	2755	2559	2555	1821	3620
Total	2755	2612	2608	3105	3789
kg día	7,55	7,16	7,15	8,51	10,38

La frontera de riesgo eficiente muestra las mejores combinaciones factibles de valores esperados de margen bruto y riesgo (medido como la desviación estándar del margen bruto). La frontera de riesgo-eficiencia sigue la regla de eficiencia y de riesgo medio que se basa en que, si el valor medio de la estrategia A es mayor o igual a la media del valor de la estrategia B, y la varianza de A es menor o igual que la varianza de B, con al menos una estricta desigualdad, entonces la estrategia A es preferida a B por todos los tomadores de decisiones (Hardaker *et al.*, 1997, Feldkamp, 2004, Nasca, 2016). La regla asume que cuando dos estrategias tienen el mismo valor, la que obtiene la menor variabilidad es elegida. Cuando dos estrategias tienen la misma variabilidad, la que obtiene el mayor valor medio es la elegida (Feldkamp, 2004). La frontera de riesgo es el conjunto de las mejores combinaciones posibles del margen bruto y el riesgo (desvío estándar) de los sistemas de producción evaluados (Romera *et al.*, 2008). La Figura 3.3.9. muestra que, utilizando el MB como criterio, Sist 2 y 3 son preferidos sobre otras opciones, ya que alcanzan valores medios de MB con similar o menor riesgo respecto a los demás sistemas.

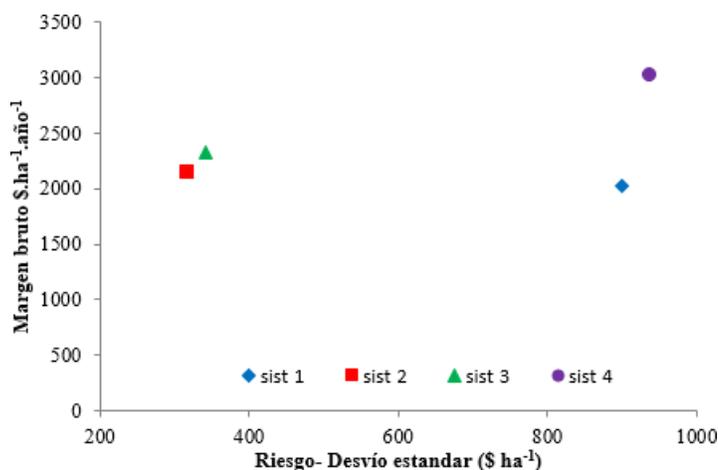


Figura 3.3.9. Frontera de riesgo eficiente para el margen bruto. Los valores fueron calculados a partir de los 60 años de corrida del modelo.

En este trabajo las mayores eficiencias productivas (kg PVV vendido. ha⁻¹. año⁻¹) se corresponden en todos los casos con las mayores eficiencias económicas, medidas a través del MB (\$. ha⁻¹. año⁻¹).

El Sist 1, sin bien presentó un MB similar al Sist 2 y 3 se puede descartar ya que tuvo más riesgo (DE 900 \$ ha⁻¹). En cambio, los Sist 2 y 3 presentan menor riesgo (DE 317 y 343 \$ ha⁻¹ respectivamente) en comparación con el resto de los sistemas. Por último, el Sist 4 presentó un incremento productivo asociado a una alta eficiencia al entorar las hembras a los 15 meses, lo que se tradujo en un retorno económico del 2%. Sin embargo, presenta mayor riesgo (DE 939 \$. ha⁻¹), esto se debe al mayor costo de producción lo que genera mayor incertidumbre de los precios de los insumos. Por lo tanto, optar por el Sist 4 dependerá de la aversión al riesgo que tenga el tomador de decisión.

1.9 Conclusiones

La eficiencia y la estabilidad de los sistemas deben ser discutidas en el contexto específico, lo que requiere de un análisis minucioso del ambiente y los objetivos planteados para cada sistema de producción (Nasca, 2016). Como consecuencia del comportamiento de los indicadores productivos, económicos y GEI el Sist 4 resulta ser la mejor alternativa, a pesar de producir más gases por hectárea y mayor riesgo.

La diferencia en la eficiencia de los sistemas suplementados y no suplementados depende de la carga. Para eficiencias energéticas y productivas, los resultados indican que la ventaja de los sistemas suplementados fue mayor para los sistemas con mayor carga animal (Sist 3 y 4. El uso de recursos alimenticios externos más la fertilización de campo natural, proporcionó al Sist 4 la posibilidad de tomar decisiones ante situaciones límites (e.g. baja disponibilidad de pastizal). Por otra parte, el MB fue menos sensible a los mayores costos debido a la mayor producción de kg PVV vendido y al peso del ternero destetado por año.

Estas ventajas productivas, iniciado con una buena base de forraje dada por la fertilización del campo natural permitirían ir avanzando gradualmente en la incorporación y ajuste de componentes, generando nuevas oportunidades para los sistemas de cría bovina de la región.

Los hallazgos de este trabajo indican que las tecnologías generadas en investigación de los sistemas agropecuarios, pueden generar impactos positivos y negativos sobre el comportamiento de los sistemas de producción. Es decir, no es posible establecer fehacientemente un componente cuya intensidad sea responsable de los resultados que se dan en sistemas complejos. Para lo cual, el enfoque de sistemas juega un rol crucial para determinar el impacto de una tecnología aislada sobre el comportamiento de un sistema de producción.

CAPÍTULO 4. Conclusiones generales

1.10 Introducción general

La hipótesis de este trabajo sostiene que los sistemas de cría bovina del Centro-Sur de la provincia de Corrientes que incorporan al menos una de las estrategias de intervención de manejo, mejoran su eficiencia y estabilidad. Tres técnicas fueron consideradas teniendo en cuenta su importancia en la región: edad de primer servicio, mejora del campo natural con fertilización fosfórica y tratamiento de lactancia.

La evaluación de las estrategias de intervención se da en el marco de las interrelaciones entre los distintos componentes a nivel del sistema de producción. En este sentido se representó un modelo de simulación de producción de cría bovina a partir de cuatro submodelos: crecimiento de forraje, crecimiento animal, consumo de alimento y modelo reproductivo. Estos submodelos, están comandados por un submodelo de manejo que a su vez intercambia información entre ellos.

Para concluir que un sistema manifiesta el mejor comportamiento es necesario que todas sus propiedades emergentes tengan valores moderados a altos (Conway, 1986). Si un sistema de producción presenta valores máximos en todas sus propiedades emergentes, comparadas con otros sistemas, podemos decir que su comportamiento es superior al resto (Feldkamp, 2004).

La naturaleza mecanicista del modelo desarrollado permite dividir un resultado dado en sus componentes, lo que facilita la detección de debilidades y fallas del modelo (Nasca, 2016).

1.11 Comportamiento emergente de los sistemas evaluados

Es importante considerar que los sistemas de producción tienen un propósito, y que la superioridad del comportamiento se define en relación con un objetivo dado del sistema. Esto se debe a que el comportamiento se describe por propiedades, que son conceptos teóricos definidos sin unidades, pero relacionados con indicadores para cuantificar la propiedad (Holling, 1973). Entonces, qué indicador se usa depende del objetivo del sistema (Nasca, 2016). En general, el objetivo de las actividades orientadas al mercado es maximizar los resultados productivos y económicos en el nivel del sistema. Por lo tanto, los indicadores elegidos en este trabajo fueron: kg de peso vivo vacío vendido (kg PVV vendido. ha⁻¹), margen bruto (MB, \$. ha⁻¹) y dióxido de carbono equivalente (CO₂ eq. ha⁻¹).

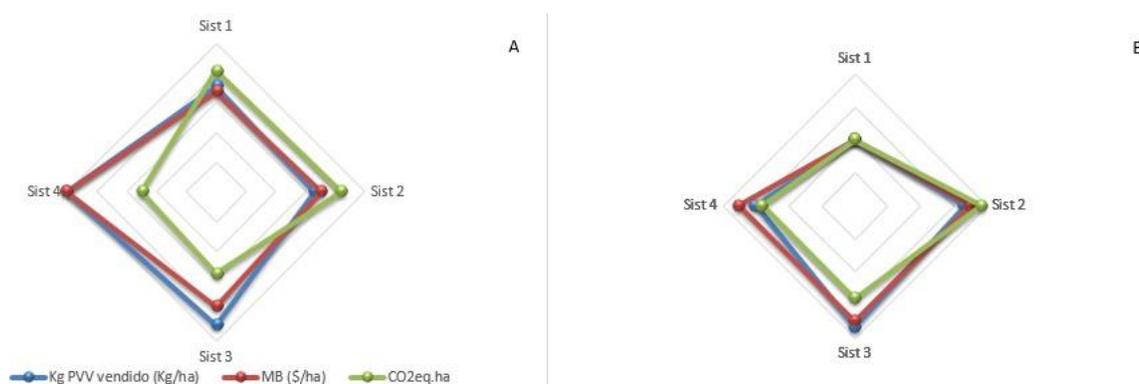


Figura 4.2.1. Comportamiento de los sistemas mediante propiedades como: eficiencia (A) y estabilidad (B), evaluados a través de tres indicadores: kg PVV vendido ($\text{kg PVV} \cdot \text{ha}^{-1}$), Margen Bruto (MB, $\text{\$} \cdot \text{ha}^{-1}$) y Dióxido de carbono equivalente por hectárea ($\text{CO}_2 \text{ eq. ha}^{-1}$) y sus coeficientes de variación en 60 años de simulación.

La Figura 4.2.1. presenta las propiedades, con valores que aumentan desde la parte interna del rombo hacia afuera. En ellas se puede observar el comportamiento de los sistemas mediante la eficiencia y estabilidad a través de valores medios y coeficiente de variación, respectivamente. La figura indica que, dependiendo que es lo que queremos optimizar los resultados son los siguientes:

- Si el objetivo es maximizar el MB, el Sist 3 y 4 son los más eficientes, sin embargo los sistemas más estables son Sist 2 y 3.
- Si se busca optimizar los $\text{kg PVV} \cdot \text{ha}^{-1}$ los Sist 3 y 4 son los más eficientes, pero sólo el Sist 3 es el más estable.
- Por último, si se busca disminuir la liberación de GEI, el Sist 2 sería el más eficiente y más estable.

Como se puede observar no existe un sistema que resulte superior en los tres indicadores en las dos propiedades evaluadas. Los Trade-offs entre las propiedades no permitieron obtener un comportamiento superior en el sistema de producción de cría bovina con las estrategias de intervención evaluadas en este trabajo. Los resultados coinciden con los informados por Viglizzo y Roberto (1998) y Feldkamp (2004).

En consecuencia, los sistemas que incorporen técnicas (edad de entore, suplementación y fertilización) mostraron mejoras en diferentes variables, pero entre los sistemas mejorados evaluados no es posible establecer uno superior.

1.12 Importancia y aspectos a mejorar del modelo de cría bovina desarrollado

El modelo desarrollado en esta tesis cumple con los objetivos planteados, por lo tanto, se puede concluir que esa parte del objetivo está cumplido. Esto no implica que el modelo no pueda ser mejorado, la contribución científica del modelo es independiente de la validación (Caswell, 1988; Rykiel, 1996). El objetivo principal de este modelo no es sólo obtener una salida precisa, sino también ayuda a comprender los procesos involucrados en el funcionamiento del sistema e identificar las necesidades para futuras investigaciones.

Los resultados de esta tesis indican cinco procesos que requieren mayor estudio: 1) Componentes del crecimiento del pastizal y calidad nutricional de la biomasa aérea. 2) Ajustes en el modelo de consumo. 3) Efecto de la presión de pastoreo sobre atributos del submodelo forrajero. 4) modelo reproductivo, edad de entore a los 18 meses. 5) Otras propiedades emergentes como equidad y sustentabilidad.

Con respecto a la calidad del pastizal, en esta tesis se utilizó un enfoque empírico en base a datos de digestibilidad de la materia seca, asignando diferente calidad de forraje para cada mes del año y con un margen de variación debido al efecto de la temperatura ambiente. Si bien este enfoque fue útil para los objetivos de trabajo, sería de utilidad a futuro contar con submodelos de producción primaria más mecanicistas, que contemplen componentes vegetales (tallos y hojas), con valores tanto de energía metabolizable como proteínas. Este punto se relaciona con el submodelo de consumo, el cual está comandado por la biomasa aérea y la calidad forrajera expresada como energía metabolizable. La inclusión del contenido proteico del forraje disponible y de la dieta total como variable de ajuste del consumo, podría mejorar las estimaciones de performance animal sobre pastizales como el utilizado para esta tesis. De esta manera, se podría mejorar la estimación del modelo al valorar la inclusión de tecnologías relacionadas con la suplementación proteica o cambios en el manejo pastoril que promuevan mejor calidad forrajera. Además, el modelo no contempla cambios en el submodelo forrajero derivados de un mal manejo del pastoreo, que conlleven a degradación tal como se registró en ensayos de largo plazo en este tipo de pastizales (Pizzio y col.1986). En estas experiencias se pudo observar que, el pastizal fertilizado lograba una rápida recuperación de las especies frente a condiciones adversas, información que requiere mayor estudio en el modelo de simulación, al igual que la persistencia de especies deseables luego de la fertilización.

El cuarto punto es el modelo reproductivo que requiere mayor estudio. El modelo desarrollado no discrimina los índices reproductivos en primer y segundo servicio. Este aspecto se relaciona con mejorar la programación del servicio a los 18 meses. Dicho proceso no permite observar la ventaja comparativa con respecto al entore de 24-26 meses, dado que no se observa el impacto en la eficiencia reproductiva en el segundo servicio. Las vaquillas que paren su primer ternero en noviembre-diciembre y se destetan en mayo pasan su primer invierno seca para luego ingresar al segundo servicio en primavera resultando en una alta fertilidad. El modo que se plantea el modelo reproductivo requiere un mayor estudio para obtener ese tipo de información. Además, el estudio de las influencias en la probabilidad de preñez en vaquillas y vacas criando el primer ternero mejoraría la capacidad de simulación del modelo.

Por último, el estudio de los sistemas de producción debe abordar aspectos biológicos, económicos y sociales (Barbier, 1989). Aspectos relacionados con la equidad y de otros indicadores de sustentabilidad no han sido abordados en la discusión sobre la intensificación de los sistemas. Por otro lado, la naturaleza económica (e.g. costo de estructura en los diferentes sistemas) y social (calificación de mano de obra) de los sistemas, genera la necesidad de incorporar al modelo reglas de decisión que utilicen un mayor número de criterios económicos (Nasca, 2016). Al utilizar el MB como indicador económico es probable que subestime el beneficio de los sistemas más intensificados cuyo indicador económico más correcto sería el margen neto o incluso rentabilidad.

1.13 Observaciones finales: modelos de simulación en la agenda de investigación

En este trabajo se ha presentado una herramienta de análisis que puede ser de utilidad para comprender mejor el funcionamiento del sector de cría vacuna. Sin embargo, los sistemas no son estructuras fijas, y se van adaptando cuando se modifica el ambiente y el mercado.

El desafío es entonces continuar esta línea de investigación incorporando al modelo nuevos escenarios productivos. Para lo cual, contar con una herramienta que sirva de marco para la discusión, evaluación y análisis de escenarios posibles, es de gran interés para las investigaciones de sistemas productivos de la región.

Bibliografía

- Agnusdei, M.G., 1999. Analyse de la dynamique de la morphogenèse foliaire et de la défoliation de plusieurs espèces de graminées soumises à un pâturage continu dans une communauté végétale de la Pampa Humide (Argentine). PhD Thesis. Institut National Polytechnique de Lorraine, Vandoeuvre-lès-Nancy, France.
- Agricultural and Food Research Council (AFRC), 1994. Necesidades energéticas y proteicas de los rumiantes. Acribia, Zaragoza, España.
- Aguilar González, C. Allende, R. Morales, S., 2007. Gestión de Sistemas Pecuarios. Centro Gráfico Prisma. Pág. 27.
- Andrieu, N., Poix, C., Josien, E., Duru, M., 2007. Simulation of forage management strategies considering farm-level land diversity: Example of dairy farms in the Auvergne. *Computers and Electronics in Agriculture* 55, 36-48.
- Arias Usandivaras, L. M., 2006. Controles climáticos de la productividad primaria de pastizales de la Provincia de Corrientes. Trabajo correspondiente al ciclo de intensificación para acceder al grado de Ingeniero Agrónomo. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires.
- Arzeno, J. L., 1999. Empleo de indicadores de sustentabilidad en sistemas ganaderos. Habilitación de tierras para ganadería. Segunda jornada ganadera del NOA. INTA, Salta, Argentina: 109-125.
- Bailey, D.R.C., Gilbert, R.P., Beauchemin, K.A., Petitclerc, D., 1991. Effects of creep feeding and breed composition on growth of heifer calves and milk production of their dams. *Canadian Journal of Animal Science* 71(3), 621-627.
- Barbier, E. B., 1989. Economics, Natural-Resource Scar city and Development: Conventional and Alternative Views. Earth scan, London.
- Basso, L. y Franco, J., 1999. Producción animal, medio ambiente y sustentabilidad. Editorial Hemisferio Sur S. A. Argentina: 28.
- Beef Improvement Federation (BIF), 1986. Guidelines for uniform beef improvement programs. Beef Improvement Federation, USA.
- Bell, M.M., Lyon, A., Gratton, C., Jackson, R.D., 2008. The productivity of variability: an agroecological hypothesis. *International Journal of Agricultural Sustainability* 6(4), 233-235.
- Bell, M.J., Eckard, R.J., Harrison, M.T., Neal, J.S., Cullen, B.R., 2013. Effect of warming on the productivity of perennial ryegrass and kikuyu pastures in south-eastern Australia. *Crop and Pasture Science*. 64, 61-70.
- Benítez, C., Fernández, J. C., Pizzio, R. Royo Pallares, O. 2004. Mejoramiento y carga animal de un campo natural de la provincia de Corrientes. Serie Técnica N° 33. Publicaciones INTA Mercedes, Corrientes. Pág. 9.

- Bennett, N.D., Croke, B.F.W., Guariso, G., Guillaume, J.H.A., Hamilton, S.H., Jakeman, A.J., Marsili-Libelli, S., Newham, L.T.H., Norton, J.P., Perrin, C., Pierce, S.A., Robson, B., Seppelt, R., Voinov, A.A., Fath, B.D., Andreassian, V., 2013. Characterising performance of environmental models. *Environmental Modelling and Software* 40, 1-20.
- Berra, G. y Taboada, M., 1999. Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero de la República Argentina. Informe Técnico. Secretaria de Desarrollo Sustentable y Político Ambiental. Ministerio de Desarrollo Social y Medio Ambiente. República Argentina: 60- 87.
- Blaxter, K.L., 1967. *The energy metabolism of ruminants*. Revised edition. Hutchinson & Co, London, UK.
- Browne, N., Kingwell, R., Behrendt, R., Eckard, R., 2013. The relative profitability of dairy, sheep, beef and grain farm enterprises in southeast Australia under selected rainfall and price scenarios. *Agricultural Systems*. 117, 35-44.
- Bunge, M., 2004. *Emergencia y convergencia: Novedad cualitativa y unidad del conocimiento*. Editorial GEDISA.
- Bungenstab, D. J., 2005. Environmental impacts of beef production in Central Brazil: The effect of intensification on area appropriation Dr. Verlag. München, 2005. 199 p.
- Cardoso, A. S., Berndt, A., Leytem, A. Alves, B. J. R., de Carvalho, I., de Barros Soares, L. H., Urquiaga, S., Boddey, R.M., 2016. Impact of the intensification of beef production in Brazil on greenhouse gas emissions and land use. *Agricultural Systems* 143:86-96.
- Caswell, H., 1988. Theory and model sin ecology: A different perspective. *Ecol. Modell*: 43, 33-44.
- Censo Nacional Agropecuario, 2002. Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Visita el 8 de julio 2016. Lugar de publicación de https://www.indec.gov.ar/cna_index.asp
- Chapman, D.F., Rawnsley, R.P., Cullen, B.R., Clark, D.A., 2013. Inter-annual variability in pasture herbage accumulation in temperate dairy regions: causes, consequences, and management tools. 22nd International Grassland Congress.
- Chilibroste, P., Tamminga, S., y Boer, H. 1997. Effect of length of grazing session, rumen fill and starvation time before grazing on dry matter intake, ingestive behavior and dry matter rumen pool sizes of grazing lactating dairy cows. *Grass and Forage Science*, 52, 249-257.
- Chiossone, G., 2006. Sistemas de producción ganaderos del Noreste Argentino; Situación actual y propuesta para mejorar su productividad. X Seminario de pastos y forrajes. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, INTA, San Cristóbal, Argentina. 16.

- Conrad, H.R., Pratt, A.D. y Hibbs, J.W., 1964. Regulation of feed intake in dairy cows. I. Change in importance of physical and physiological factors with increasing digestibility. *Journal of Dairy Science* 47: 54-62.
- Conway, G. R., 1985. *Agroecosystem Analysis*. Centre for Environmental Technology and Department of Pure and Applied Biology, Imperial College of Science and Technology, London SW7 2BU, Great Britain. *Agric. Administration* 20, 31-55.
- Conway, G.R., 1986. *Agroecosystems analysis for research and development*. Bangkok. Winrock International. 103p.
- Cooper, P.J.M., Dimes, J., Rao, K.P.C., Shapiro, B., Shiferaw, B., Twomlowc, S.J., Verchot, L.P., Cooper, P., 2008. Coping better with current climatic variability in the rain-fed farming systems of sub-Saharan Africa: An essential first step in adapting to future climate change?. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 126, 24-35.
- Cooper, A.J., 2011. *Evaluation of Udder Conformation, Weight, Body Condition, Reproduction, Disposition, and Calf Growth in Bosindicus – Bostaurus Cows*. PhD Thesis Texas A&M University. 91p.
- Costanza, R., Duplisea, D., Kautsky, U., 1998. Ecological Modelling on modelling ecological and economic systems with STELLA. *Ecological Modelling* 110, 1-4.
- Cros, M-J., Duru, M., Garcia, F., Martin-Clouaire, R., 2003. A biophysical dairy farm model to evaluate rotational grazing management strategies. *Agronomie* 23, 105-122.
- Cruz, P., De quadros, F.L.F., Theau, J.P., Frizzo, A., Jouany, C, Duru, M., Carvalho, P.C.F., 2012. Leaf traits as functional descriptors of the intensity of continuous grazing in native grasslands in the South of Brazil. *Rangel. Ecology Managemt.* 63, 350-358.
- Del Pozo Rodríguez, P.P. 2004. *Bases fisiológicas para el manejo de los pastos tropicales*. Anuario Nuevo, Universidad Agraria de La Habana, Cuba.
- DeRamus, H. A., Clement, T. C., Giampola, D. D., Dickison, P. C., 2003. Methane emissions of cattle on forages: efficiency of grazing management systems. *Journal Envirom Qual.* 32: 269- 277.
- Dent, J. B. Blackie, M. J., 1979. *Systems Simulation in Agriculture*. Applied Science, London.

- Díaz, S., Cabido, M., 2001. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. *Trends Ecol. Evol.* 16, 646–655.
- Díaz-Solís, H., Kothmann, M.M., Hamilton, W.T., Grant, W.E., 2003. A simple ecological sustainability simulator (SESS) for stocking rate management on semi-arid grazinglands. *Agricultural Systems*. 76, 655-680.
- Díaz-Solís, H., Grant, W.E., Kothmann, M.M., Teague, W.R., Díaz-García, J.A., 2009. Adaptive management of stocking rates to reduce effects of drought on cow-calf production systems in semi-arid rangelands. *Agricultural Systems*. 100, 43-50.
- Dos Santos Difante, G. 2003. Importancia da morfogenese no manejo de gramíneas forrageiras. Universidade Federal de Vicosa centro de Ciencia agraria. Departamento Zootecnica. Pág. 25.
- Dos Santos, A.B., Ferreirados Quadros, F.L., Cerato Confortin, A.C., Seibert, L., Ribeiro, B. S., Oliveira Severo, P., Trinidad Casanova, P., Mchacho, K. 2014. Morfogenese de gramíneas nativas do Rio Grande do Sul (Brasil) submetidas a pastoreio rotativo durante primavera e verão. *Ciencia Rural, Santa María, Vol 44 N° 1. Pág. 97-103. ISSN 0103-8478.*
- Eggers, L., Cadenazzi, M. y Boldrini, I. I. 2004. Phyllochron of *Paspalum notatum* Fl. and *Coelorhachis selloana* (Hack.) Camus in natural pasture. *Sci. Agric. (Piracicaba, Braz.)*, v.61, n.4, p.353-357.
- Feldkamp, C.R., 2004. Cow-calf operation in Argentina: a systems approach to intervention assessment. PhD Thesis. Humboldt University, Berlin.
- Flores, A. J. Aguilar, D. E. Hug, M.G y Gómez, M. 2016. Primer servicio de la vaquilla a los 15 meses. *Noticias y comentarios N°533. EEA INTA Mercedes. ISSN N°0327-3059.*
- Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Berntsen, T., Betts, R., Fahey, D.W., Haywood, J., Lean, J., Lowe, D.C., Myhre, G., Nganga, J., Prinn, R., Raga, G., Schulz, M., Van Dorland, R., 2007. Changes in atmospheric constituents and radiative forcing. In: Solomon, S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K.B., Tignor, M., Miller, H.L. (Eds.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Frank, F. C., 2007. Impacto agroecológico del uso de la tierra a diferentes escalas en la región pampeana de Argentina. Tesis de Maestría. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata, Argentina.

- Freer, M., Moore, A. D, Donnelly, J. R., 1997. GRAZPLAN: decision support systems for Australian grazing enterprises –II. The animal biology model for feed intake, production and reproduction and the GrazFeed DSS. *Agricultural Systems* 54: 17-126.
- Galli, J.R. Cangiano, C.A.y Fernández H.H., 1996.Comportamiento ingestivo y consumo de bovinos en pastoreo. *Revista Argentina de Producción Animal* 16:119-142.
- Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Falcucci, A., Tempio, G., 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma. 139 p.
- Gerber, P.J., Henderson, B. y Harinder, P. S., 2013. Mitigación de las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción ganadera. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma. 233p.
- Ghahramani, A., Moore, A.D., 2015. Systemic adaptations to climate change in southern Australian grasslands and livestock: Production, profitability, methane emission and ecosystem function. *Agricultural Systems* 133, 158–166.
- Giampietro, M., 2004. Multi-scale integrated analysis of agroecosystems. CRC Press, Florida.
- Giancola,M.I.,Calvo,S.,Sampedro,D.Marastoni, A. Ponce, V. Di Giano, S. y Storti, M. G. 2013.Causas que afectan la adopción de tecnológica en la ganadería bovina para carne en la prov de Corrientes. Enfoque cualitativo. Estudios socioeconómicos de la adopción de tecnología. N°2. Ediciones del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Pág.61.
- Gonella, C., 2000. Publicación Técnica 32. Área de Investigación, Estación Experimental. Agropecuaria General Villegas, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, República Argentina.
- Halberg, N., Verschuur, G., Goodlass, G.2005. Farm level environmental indicators; are they useful?: an overview of green accounting systems for European farms. *Agriculture, Ecosystems & Environment*105:195-212.
- Hardaker,J.B.,Huirne,R.B.M.,Anderson,J.R.,1998.CopingwithriskinagriCulture.CAB International, Wallingford,UK.
- Harrison, S.R., 1990. Regression of a model on real-system output: an invalid test of model validity, *Agricultural Systems* 34, 183-190.

- Henning, J., Lacefield, G. Rasnake, M., Burris, R., Johns, J., Johnson, K., Turner, L., 2001. Rotational grazing. University of Kentucky College of Agricultural., Lexington.
- Herd, D.B., Sprott, L.R., 1986. Body condition, nutrition and reproduction of beef cows. Texas Agric. Ext. Bull. B-1526.
- Herrero, M., Fawcett, R.H., Silveira, V., Busque, J., Bernue, A., Dent, J.B., 2000. Modelling the growth and utilization of kiku yu grass (*Pennisetum clandestinum*) under grazing. 1. Model definition and parameterization. *Agricultural Systems* 65:73-97.
- Holechek, J.L., Pieper, R.D. y Herbel, C.H. 1998. Range management. Principles and practices. Third Edition. Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, USA.
- Holling, C.S., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics* 4: 1-23.
- Hutchings, N.J. y Gordon, I.J. 2001. A dynamic model of herbivore- plant interactions on grasslands. *Ecological modeling* 136: 209-222.
- IPCC, 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme, Eggleston H.S., Buendia L., Miwa K., Ngara T., and Tanabe K. (eds). Publicado por: IGES, Japón. <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>.
- Jacobo, E., Rodríguez, A., González J. y Golluscio R. 2016. Efectos de la intensificación ganadera sobre la eficiencia en el uso de la energía fósil y la conservación del pastizal en la cuenca baja del río Salado, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Agriscientia*. Vol. 33 (1): 1-14.
- Janoschek, A., 1957. Das reaktion skinetische Grundgesetz und seine Beziehungen zum Wachstums- und Ertragsgesetz. *Statistische Vierteljahresschrift* 10: 25-37.
- Jenkins, T.G. y Ferrell, 1984. A note on the lactation curves of crossbred cows. *Animal Production* 39: 479-482.
- Jones, C.A., 1985. C4 grasses and cereals: growth, development and stress response. First Ed. Wiley & Sons (Ed). New York. US. 417p.
- Kahn, H.E. y Spedding, C.R.W., 1984. A dynamic model for the simulation of cattle herd production systems: Part 2 – An investigation of various factors influencing the voluntary intake of dry matter and the use of the model in their validation. *Agricultural Systems* 13:63-82.
- Kahn, H.E., Lehrer, A.R., 1984. A dynamic model for the simulation of cattle herd production systems: Part3-Reproductive performance of beef cows. *Agricultural Systems* 13:143-59. 17.

- Kropff, M. J., Bouma, J. y Jones, J.W. 2001. Systems approaches for the design of sustainable agro-ecosystems. *Agricultural Systems* 70:369-393.
- Laca, E. A. y Demment, M. W., 1991. Herbivory: the dilemma of foraging in a spatially heterogeneous food environment. In: PALO, R. T.; ROBBINS, C. T. (Ed.). *Plant Defenses Against Mammalian Herbivory*. Boca Raton: CRC Press, p. 29–44.
- Lessa, A.C.R., Madari, B.E., Paredes, D.S., Boddey, R.M., Urquiaga, S., Jantalia, C.P., Alves, B.J.R., 2014. Bovine urine and dung deposited on Brazilian savannah pastures contribute differently to direct and indirect soil nitrous oxide emissions. *Agric. Ecosyst. Environ.* 190, 94–103.
- Lowman, B.G., N.A. Scott y S.M. Somerville. 1976. Condition Scoring beef cattle. The east of Scotland College of Agriculture. Bulletin N° 6.
- Lugo, A.E.Morris,G.L.,1982.Los sistemas ecológicos y la humanidad. Secretaría General de la Organización de los Estados Americanos. Programa regional de desarrollo tecnológico. Serie Biología. Monografía N° 23. Washington D.C: 82p.
- Macarrein O. F. Almirón, L. R. Altamirano, H. H. y Paredes H. G., 2006. La evolución ganadera en la provincia de Corrientes. Comunicaciones científicas y tecnológicas. Departamento de Economía. Facultad de Ciencias Agrarias. Universidad Nacional de Noreste.
- Machado, J.M. Morfogênese de gramíneas nativas sob níveis de adubação nitrogenada. 2010. 77f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Curso de Pós-graduação em Zootecnia, Universidade Federal de Santa Maria, RS.
- Márgenes Agropecuarios, 2017. Cría: Costos y márgenes. Fecha 1 de septiembre de2017. Volumen N° 387. Pág. 79.
- Marra, M., Pannell, D.J., Abadi Ghadim, A., 2003. The economics of risk, uncertainty and learning in the adoption of new agricultural technologies: where are we on the learning curve? *Agricultural Systems* 75,215-234.
- Marten, G.G., 1988. Productivity, stability, sustainability, equitability and autonomy as properties for agroecosystem assessment. *Agricultural Systems* 26, 291-316.

- Martin, G., Martin- Clouaire, R., Rellier J.- P., Duru, M., 2011. A simulation framework for the design of grassland-based beef-cattle farms. *Environmental Modelling and Software* 26, 371-385.
- Mc Call, D. G. and Bishop-Hurley, G. J. 2003. A pasture growth model for use in a whole-farm dairy production model. *Agric. Systems* 76: 1183–1205.
- Mc Cown, R.L., 2001. Learning to bridge the gap between science-based decision support and the practice of farming: evolution in paradigms of model-based research and intervention from design to dialogue. *Australian Journal of Agricultural Research* 52: 549-571.
- Mertens, D.R., 1987. Predicting intake and digestibility using mathematical models of ruminal function. *Journal of Animal Science* 64: 1548-1558.
- Monjardino, M. Revell, D. y Pannell D. J. 2010. The potential contribution of forage shrubs to economic returns and environmental management in Australian dryland agricultural systems. *Agricultural Systems* 103: 187–197
- Mufarrege, D. J., 1999. Los minerales en la alimentación de vacunos para carne en la Argentina. Trabajo de Divulgación Técnica. Estación Experimental Agropecuaria INTA Mercedes, Corrientes Argentina.
- Nabinger, C. y de Faccio Carvalho, P.C., 2009. Ecofisiología de sistemas pastoriles: aplicaciones para su sustentabilidad. *Agrociencia* Vol XIII N°3. Pág.18-27.
- Nasca, J., 2007. Producción sostenible para carne bovina con pasturas tropical es en la Llanura Deprimida Salina de Tucumán. Tesis para optar al grado académico de: Magíster en Ciencias Agrarias. Facultad de agronomía y zootecnia. Universidad Nacional de Tucumán.
- Nasca, J. A., Feldkamp, C. R., Arroquy, J. I. y Colombatto, D., 2015. Efficiency and stability in subtropical beef cattle grazing systems in the northwest of Argentina. *Agricultural Systems* 133: 85–96.
- Nasca, J., 2016. Comportamiento emergente de los sistemas bovinos pastoriles. Tesis presentada para optar al título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires, Área Ciencias Agropecuarias. Pág. 155.
- National Research Council (NRC), 1987. Predicting feed intake of food-producing animals. National Academy Press, Washington, DC, USA.

- National Research Council (NRC), 1996. Nutritional requirements of beef cattle. Update 2000. Seventh Revised Edition. National Academy Press, Washington, USA.
- Noller, C. H., Nascimento Júnior, D., Queiroz, D. S. 1996. Exigências nutricionais de animais em pastejo. In: Simpósio de Manejo de Pastagens, 13, 1996, Piracicaba. Anais... Piracicaba: Fealq, P. 319-352
- Northcutt, S.L., Wilson, D.E., Willham, R.L., 1992. Adjusting weight for body condition score in Angus cows. *Journal of Animal Science* 70, 1342-1345.
- Oltenacu, P.A., Milligan, R.A., Rounsaville, T.R. y Fote, R. H. 1980. Modelling reproduction in a herd of dairy cattle. *Agricultural Systems* 5:193-205.
- Orellana, C., Peña, F., García, A., Perea, J., Martos, J., Domenech, V., Acero, R., 2009. Carcass characteristics, fatty acid composition, and meat quality of Criollo Argentino and Braford steers raised on forage in a semi-tropical region of Argentina. *Meat Science* 81, 57-64.
- Oreskes, N., Shrader-Frechette, K. y Belitz, K., 1994. Verification, Validation, and confirmation of numerical models in the earth sciences. *Science*. 263: 641- 646.
- Owens, F.N., Dubeski, P., Hanson, C.F., 1993. Factors that alter the growth and development of ruminants. *Journal of Animal Science* 71, 3138-3150.
- Papendieck, S. 2010. La Huella de Carbono como Nuevo Estándar Ambiental en el Comercio Internacional de Agroalimentos: Informe Final. ATN/ME-9565-RG BIDFOMIN. 82 pp.
- Passiura, J.B., 1996. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering? *Agronomy Journal* 88: 690-694.
- Pavao- Zuckerman, M. A., Waller, J. C., Ingle, T., Fribourg, H. A., 1999. Methane emissions of beef cattle grazing tall fescue pastures at three levels of endophyte infestation. *J. Environ. Qual.* 28: 1963-1969.
- Pizzio, R., Benítez, C.A., Fernández, J.G. y Rollo Pallarés, O., 1986. Mejoramiento y carga animal en una pradera natural del centro de la provincia de Corrientes. *Rev. Arg. Prod. Anim.* Vol 6: 437-449.
- Pizzio, R., 2001. Día de campo. 10 años de la unidad experimental de cría vacuna. Estación Experimental Agropecuaria Mercedes Corrientes. Publicaciones INTA. Pág. 6.
- Pizzio, R., 2010. Mejora de la eficiencia productiva en ganadería vacuna y ovina. Actividades 2006-2008. Proyecto Regional Ganadero. Centro Regional INTA Corrientes. Pág 14. 18.

- Poppi, D.P., Gill, M. y France, J. 1994. Integration of the ories of intake regulation in growing ruminants. *Journal of theoretical Biology* 167:129-145.
- Pyke, G., 1984. Optimal foraging theory. *Annual Review of Ecological Systems*, Palo Alto, v. 15, p. 532–575.
- Radrizzani, A. y Nasca, J. A. 2014. The effect of *Leucaena leucocephala* on beef production and its toxicity in the Chaco Region of Argentina. *Tropical Grasslands – Forrajes Tropicales*. Volume 2, 127–129
- Rearte, D., 2010. Situación actual y prospectiva de la producción de carne vacuna. Programa Nacional de Carnes. Publicaciones INTA. Pág.25.
- Rierchers, R.K., Conner, J.R. y Heitschmidt, R.K. 1989. Economic consequences of alternative stocking rate adjustment tactics: a simulation approach. *Journal of Range Management* 42: 165-171.
- Rykiel, E.J., 1996. Testing ecological models: The meaning of validation. *Ecol. Modell*: 90, 229–244.
- Romera, A. J., 2004. Simulation of cow-calf systems in the Salado region of Argentina. A PhD Thesis. Massey University, New Zealand. 174p.
- Romera, A.J., Morris, S.T., Hodgson, J., Stirling, W.D., Woodward, S.J.R., 2005. Comparison of haymaking strategies for cow-calf systems in the Salado Region of Argentina using a simulation model. 1. Effect of herbage mass at cutting and cow stocking rate under a rigid system of management. *Grass and Forage Science* 60, 399-408.
- Romera, A.J., Morris, S.T., Hodgson, J., Stirling, W.D., Woodward, S.J.R., 2006. The influence of replacement policies on stability of production in a simulated cow-calf farm system, *New Zealand Journal of Agricultural Research* 49 (1), 35-44.
- Romera, A.J., Burges, J.C., Morris, S.T., Hodgson, J., Woodward, S.J.R., 2008. Modelling spring and autumn calving systems in beef herds of the Salado region of Argentina. *Livestock Science* 115, 62–72.
- Romera, A.J., McCall, D.G., Lee, J.M., Agnusdei, M.G., 2009. Improving the McCall herbage growth model. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 52, 477-494.
- Romero, L. 2010. Pasturas templadas y tropicales. XXI Curso internacional de lechería para profesionales de América Latina. 60 p.
- Royo Pallarés, O. y Mufarrege, D. J., 1969. Respuesta de la pradera natural a la incorporación de nitrógeno, fósforo y potasio. Serie técnica N° 5 INTA Mercedes, Corrientes. 14p.

- Royo Pallarés, O., y Pizzio, R., 1998. Experiencias de fertilización de pasturas naturales en el Centro-Sur de Corrientes. XIV Reunión de grupo técnico regional del cono Sur en mejoramiento y utilización de los recursos forrajeros del área tropical y subtropical: Grupo Campos. Serie técnica N° 94. INIA Tacuarembó. Pág.109-118.
- Rykiel, E.J., 1996. Testing ecological models: the meaning of validation. *Ecological Modelling* 90: 229-244.
- Sampedro, D. 2006. Entore de la vaquilla a los 18 meses de edad. Experiências en la Argentina con el entore a los 18 meses. In: Jornada técnica em sistema de produção de bovinos de corte e cadeia produtiva: Tecnologia, gestão e mercado, 1., Porto Alegre, 2006. Anais... Porto Alegre: UFRGS – DZ – NESPRO.
- Sampedro, D. 2015. Del manejo masivo al manejo individual. *Revista CREA*. Pág. 19.
- Sanders, J. O., 1974. A model of reproductive performance in the bovine female. M. S. Thesis, Texas A&M University, College Station, Texas.
- Sanders, J.O. y Cartwright, T.C. 1979 b. A general cattle production systems model. Part 2- Procedures used for simulating animal performance. *Agricultural Systems* 4: 289-309.
- Shaw, N. H., 1978. Superphosphate and stocking rate effects on a native pasture over sown with *Stylosanthes humilis* in central coastal Queensland. 1 Pasture production. *Journal of Exp Agricultural and Animal*. Vol 8: 800-807.
- Stahringer, R. 2003. La condición corporal en el manejo del rodeo de cría. Conferencia en Congreso Nacional de Cría, 09.03, Santa Fe.
- Sarandón, S. J., 2002. Agroecología: el camino hacia una agricultura sustentable. Ediciones científicas americanas. La Plata, Buenos Aires Argentina. Pág. 119-134.
- SENASA, 2014. Vacunación aftosa. Visita 17 de junio de 2015.
- Sirotiuk, P y Viglizzo E. F., 2013. Estimación de la huella de carbono del proceso de panificación de la cadena agroindustrial del trigo. *RIA*. Vol 39 N° 3. Pág 9.
- Scholefield, D., Lockyer, D.R., Whitehead, D.D., Tyson, K.C., 1991. A model to predict transformations and losses of nitrogen in U K pastures grazed by beef cattle. *Plant Soil* 132, 165–177.
- Smith, G.M. and Harrison, V.L., 1978. The future of livestock systems analysis. *Journal of Animal Science* 46: 807-811.

Software Powersim Studio 9 Professional.

Sonesson, U., Davis, J. y Ziegler, F. 2010. Food Production and Emissions of Greenhouse Gases. An overview of the climate impact of different product groups. SIK-Report N° 802. 25 pp.

Sordi, A., Dieckow, J., Bayer, C., Albuquerque, M.A., Piva, J.T., Zanatta, J.A., Tomazi, M., da Rosa, C.M., de Moraes, A., 2014. Nitrous oxide emission factors for urine and dung patches in a subtropical Brazilian pastureland. *Agric. Ecosyst. Environ.* 190, 94–103.

Sorensen, J.T., 1990. Validation of livestock herd simulation models: a review. *Livestock Production Science* 26: 79-90.

Spedding, CRW. 1988. An introduction to agricultural systems. Second Edition. Elsevier Applied Science, London and New York.

Standing Committee on Agriculture (SCA), 1990. Feeding standards for Australian livestock: Ruminants. CSIRO, Victoria, Australia.

Sterman, J.D., 2000. *System Dynamics: Thinking Systems and Modeling for a Complex World*. Irwin/McGraw-Hill, Boston. 982p.

Steinfeld, H., Wassenaar, T., 2007. The Role of Livestock Production in Carbon and Nitrogen Cycles. *Annual Review of Environment and Resources* 32, 271-294.

Stephens, D. y Krebs, J. R., 1986. *Foraging Theory*. Princeton, Princeton University press, 247 p.

Tainton, N.M., Morris, C.D., Hardy, M.B. 1996. Complexity and stability in grazings systems. Wallingford, CABI, 1996. p. 275–300.

Thornley, J.H.M., France, J., 2007. *Mathematical Models in Agriculture. Quantitative Methods for the plant, animal and ecological sciences*. 2nd Edition, CABI, 887p

Thor, C., Kinkendall, E., 1982. *Energy conservation*. Manhattan, KS: Extension Engineering, Kansas State University.

Ungar, E.D. y Noy-Meir, I. 1988. Herbage intake in relation to availability and sward structure: grazing processes and optimal foraging. *Journal of Applied Ecology* 24: 1045-1062.

Vargas, C.A., Olson, T.A., Chase Jr, C.C., Hammond, A.C., Elzo, M.A., 1999. Influence of Frame Size and Body Condition Score on Performance of Brahman Cattle. *Journal of Animal Science* 77, 3140-3149.

Vayssières, J., Guerrin, F., Paillat, J.M., Lecomte, P., 2009. GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises Part I – Whole-farm dynamic model. *Agricultural Systems* 101, 128-138.

- Veysset, P., Lherm, M., Bebin, D., 2010. Energy consumption, greenhouse gas emissions and economic performance assessments in French Charolais suckler cattle farms: Model-based analysis and forecasts. *Agricultural Systems* 103, 41-50.
- Viglizzo, E. F., 1994. The response of low-input agricultural systems to environmental variability: a theoretical approach. *Agricultural Systems* 44, 1- 17.
- Viglizzo, E.F., Roberto, Z.E., Filippin, M.C., Pordomingo, A.J., 1995. Climate variability and agroecological change in the Central Pampas of Argentina. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 55, 7-16.
- Viglizzo, E. F., Roberto, Z. E., 1998. On trade-off sin low-input agro-ecosystems. *Agricultural Systems* 56 (2), 253-264.
- Viglizzo, E. F., 1999. Sustentabilidad ecológica y económica de la ganadería. *Revista Argentina de Producción Animal* 19: 1-13.
- Wallau, M. 2017. Modeling the dynamics of herbage production and intake in complex grasslands. Ph.D. thesis in Animal Science – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil. 140 p.
- Weston, R.H., 1996. Some aspects of constraint to forage consumption by ruminants. *Australian Journal of Agricultural Research* 47: 175-197.
- Woodward, S.J., Romera, A.J., Beskow, W.B., Lavatt, S.J., 2008. Better simulation modelling to support farming system innovation: Review and synthesis. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 51(3), 235-252.
- Wright, I.A., Russel, J.F., 1984. Partition of fat, body composition and body condition score in mature cows. *Animal Production* 38, 23-32.
- Yang, J.M., Yang, J.Y, Liu, S., Hoogenboom G., 2014. An evaluation of the statistical methods for testing the performance of crop models with observed data. *Agricultural Systems* 127: 81-89.

APÉNDICE 1

Energías de mantenimiento

1. Energía para mantenimiento

Los requisitos de mantenimiento representan más del 40%, 70% y 90% de la ingesta de energía metabolizable de animales de jóvenes de rápido crecimiento, vacas adultas y toros reproductores, respectivamente (NRC, 1996; Feldkamp, 2004). A continuación, se muestra el cálculo necesario para determinar energía de mantenimiento y en el Cuadro A.1.1. los valores de los parámetros.

$$E_{req,MANT} = \frac{0,3222 \cdot PV^{0,75} \cdot k_{CS} \cdot k_{raza} \cdot k_{lact} \cdot k_{sexo} + E_{reqACTIV}}{k_{fe \rightarrow m}}$$

Dónde: $E_{req,MANT}$ (Mj. día⁻¹) es el requerimiento diario de energía metabolizable; k_{CS} , k_{raza} , k_{lact} , k_{sexo} son factores de corrección para la condición corporal, raza, lactancia y sexo. $E_{reqACTIV}$ es la energía requerida para la actividad estipulada en un 30% (Nasca, 2016) y $k_{fe \rightarrow m}$ es la eficiencia de uso del alimento consumido para el mantenimiento.

Cuadro A.1.1. Factores de corrección para requerimientos de mantenimiento (Adaptado de Feldkamp, 2004)

Abreviatura	Valores	Descripción
k_{sexo}	1,00 macho y hembra 1,15 toros	Factor de corrección por sexo
k_{CS}	$0,8 + (CS - 1) \cdot 0,5$	Factor de corrección por condición corporal
k_{raza}	1,00 raza de carne 1,20 raza de leche	Factor de corrección por raza
k_{lact}	1,00 seca 1,12 lactando	Factor de corrección por lactancia

Eficiencia de uso de la energía para mantenimiento

En el modelo propuesto, se calcula la eficiencia del uso de la energía para el mantenimiento a través del enfoque seguido por la NRC (1996). Dando las limitaciones de este enfoque con alimentos de baja calidad, se asigna un valor constante de 0,55 a todos los forrajes. Con una digestibilidad del 55% OM o menos. Este valor sería equivalente al 0,62 propuesto por el SCA (1990).

Energía requerida para gestación

Los requisitos de energía para la gestación se estiman siguiendo el enfoque del NRC (1996). Por lo tanto, la acumulación diaria de energía en los tejidos del útero grávido ($E_{req, PREG}$, (MJ · d⁻¹)) se estima de la siguiente manera:

$$E_{req, PREG} = \frac{PVV_{Bi} \cdot (0,05855 - 0,0000996 \cdot t) \cdot e^{(0,03233 - 0,0000275 \cdot t) \cdot t}}{1000} \cdot 4,184$$

Donde PVV_{Bi} es el peso al nacer y t es el tiempo desde la concepción.

Se asume un valor del 13% para la eficiencia del uso de energía para la gestación (kco) (Feldkamp, 2004).

APÉNDICE 2

Metodología de cálculo del margen bruto

La selección del método de cálculo de costos depende del tipo de decisiones que deben tomarse. El análisis económico en el modelo incluye la determinación de los ingresos y costos. Estos fueron calculados mensualmente y luego sumados para obtener resultados anuales. Las variables ingresos brutos, costos directos (alimentación, sanidad, mano de obra y costo de comercialización), y amortizaciones directas, siguen el enfoque de Nasca (2016).

Se resume en:

- Ingresos brutos: kg vendidos de cada categoría animal por el precio del kg.
- Costo de alimentación: mantenimiento de pastizal y suplementación.
- Costo de sanidad: corresponde a gastos de prevención de salud animal, gastos del profesional y productos como antibióticos y antiparasitarios.
- Costo de mano de obra: honorarios del personal diario.
- Gasto de comercialización: corresponde al 5% del ingreso bruto.

Para las simulaciones se utilizó los precios de los insumos y de la mano de obra de la revista Márgenes Agropecuarios septiembre 2017.

APÉNDICE 3

Gases de efecto invernadero

Las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) se estimaron en dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) utilizando factores de conversión de potencial calentamiento (GWP) de 25 y 298 para CH₄ y N₂O, respectivamente (Forster *et al.*, 2007) y los resultados expresados como CO₂eq por hectárea.

1. Metano

El metano (CH₄) es uno de los componentes más importantes que conforma los Gases de Efecto Invernadero (GEI), pues su poder de calentamiento global es 25 veces superior al CO₂ a expensas de que su concentración es menor (Berra y Taboada, 1999).

Los bovinos producen metano en sus procesos digestivos, principalmente a través de las fermentaciones bacterianas ruminales que provocan la eliminación de dicho gas por eructación. El metano producido a nivel intestinal tiene importancia secundaria (Johnson, 1999). La energía liberada bajo la forma de metano representa del 4% al 10% de la energía bruta ingerida (Basso y Franco, 1999).

La reducción de las emisiones de metano es posible con la aplicación de tecnologías que permitan incrementar la productividad de los sistemas, con beneficios económicos y ambientales. La mejor estrategia de mitigación es probablemente a través de la mejora de la eficiencia de uso de la energía de los alimentos. Los estudios de medición de metano muestran que las pérdidas de dicho gas fluctúan entre 4% -10% de la energía bruta consumida. El Panel Intergubernamental de Cambio Climático -IPCC- (1996), propone la siguiente fórmula la que fue utilizada en este trabajo:

$$\text{Emisión de metano Kg/año} = \frac{\text{EB consumida (Mj/día)} \times \text{TCM} \times 365 \text{ días/año}}{55,65 \text{ Mj /kg de metano}}$$

Dónde: EB: Energía bruta; TCM: Tasa de conversión de metano (energía consumida) que es transformada en metano.

Los rumiantes del trópico y subtropical experimentan fluctuaciones estacionales en la disponibilidad y calidad del forraje ofrecido, lo que repercute en la ganancia de peso y emisión de metano resultante por unidad de producto (Nasca, 2007). En este trabajo, se utilizó la digestibilidad del alimento para calcular la TCM, tal como algunos autores (Van Soest citado por DeRamus, 2003) consideran que la digestibilidad del alimento afecta la emisión de metano.

Las emisiones de metano pueden expresarse de varias maneras, siendo kg CH₄ por hectárea, un índice adecuado que provee información sobre la eficiencia del proceso (Kurihara *et al.*, 1999).

2. Óxido Nitroso

Las emisiones de N₂O son cuantificadas del estiércol y la orina depositados en el pasto, del corral y el N₂O de aplicaciones de fertilizantes al campo natural (Cardoso *et al.*, 2016).

Para la estimación de las emisiones de N₂O de estiércol y orina, primero se tuvo en cuenta, la ingesta total de N y se calculó a partir del contenido de proteína (concentración de 6,25 × N) del forraje/ración y de la ingesta de MS (Cardoso *et al.*, 2016).

Lessa *et al.*, (2014) y Sordi *et al.*, (2014) recomiendan el uso de factores de emisión (FE) separadas para estiércol y orina. Además, Lessa *et al.*, (2014) mostraron que los FE eran mucho más bajos en la estación seca que en la temporada de lluvias. La proporción de N excretada en la orina y en el estiércol se calcularon usando la ecuación de Scholefield *et al.*, (1991):

$$R_{u/f} = [1,2725 * (\% \text{ N en la dieta})] - 1,09$$

Donde $R_{u/f}$ es la relación de N excretada en la orina con respecto a la del estiércol.

La región de estudio no presenta estación seca marcada por lo que se utilizó los EF directos de N_2O en casi todos los meses del año como estación lluviosa. Así los valores adoptados para la orina y el estiércol son de 0,0193 (1,93%) y 0,0014 (0,14%), respectivamente. La estación seca se limitó a los meses de enero y agosto con valores de 0,0001 (0.01%) y cero para la orina y el estiércol, respectivamente.

3. Energía Fósil utilizada

La energía fósil utilizada ($Gj \cdot ha^{-1} \cdot año^{-1}$) se calculó mediante la metodología propuesta por Frank (2007) y Nasca (2016). Para ello se tuvo en cuenta los insumos ingresados al sistema (e.g alimentos) y las actividades agropecuarias realizadas (e.g. labores de mantenimiento del pastizal, agroquímico, transporte) en cada sistema. Se totalizaron, los costos energéticos de las labores realizadas, afectadas por sus respectivas superficies. Se sumaron, además, los correspondientes a las cantidades y superficies en las que se aplicó cada agroquímico (Nasca, 2016). Los granos y subproductos utilizados en la alimentación animal fueron: grano de maíz, harina de soja, balanceado recría (vaquillonas), balanceado invernada y suplemento terneros. Estos fueron ingresados al sistema como insumos.

Los granos y subproductos utilizados en la alimentación animal fueron: grano de maíz y balanceado de recría (vaquillonas). Estos fueron ingresados al sistema como insumos.

Cuadro A.3.1. Características de los insumos agropecuarios utilizados.

Insumos		Energía fósil	Fuente
		Mj/ Kg ⁻¹	
Suplementos	Balanceado recría	11,67	Frank, 2007
	Grano de maíz	16,30	Frank, 2007
	Silaje de sorgo	18,7	Wang <i>et al.</i> , 2010
Combustible	Gas oil	42,7	
	Nafta	42,8	
Otros	Fertilizante fosforado	26,4	
	Herbicidas (general)	254,6	
	Glifosato	452,5	

(Adaptado de Nasca, 2016)

Cuadro A.3.2. Consumo de energía fósil de las actividades realizadas*

Actividades	Energía fósil (Mj.ha ⁻¹)
Aplicación de fertilizante	76
Desmalezado	390
Picado de forraje	1791
Rastra de diente	35
Rastra rotativa	145

*Fuente Frank, 2007 y Nasca, 2016.

La información presentada en los cuadros A.3.1. y A.3.2. fue utilizada para estimar el consumo de energía fósil en el mantenimiento del pastizal, transporte de insumos y animales. Para el transporte de los insumos y animales se consideró el valor de 1,2 kcal.kg⁻¹.km⁻¹ (Thor y Kirkendall, 1982). Para la venta ternero cría, se consideró una distancia de 100km.

El mantenimiento de la pastura involucra el desmalezado de la misma (2 veces por año) y la aplicación de fertilizante fosfórico (35 kg. ha⁻¹ 1 vez por año, todos los años, en el mes de septiembre).

Energía de la producción de los sistemas

La producción de energía, expresada en Gj.ha⁻¹. año⁻¹, se calculó como la suma de los contenidos energéticos de los productos agropecuarios obtenidos en el año de evaluación. El valor energético de la carne adoptado fue de 13,36 Mj.kg⁻¹ (Viglizzo *et al.*, 1995, Nasca, 2016).