



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# Ajuste y ampliación de parámetros de un modelo con dinámica presa-predador para simulación del desempeño animal en sistemas ganaderos sobre campo natural

Ing. Agr. Rodrigo IRIBARNE PIREZ

Magíster en Ciencias Agrarias  
opción Ciencias Animales

Octubre 2022



UNIVERSIDAD  
DE LA REPÚBLICA  
URUGUAY

# Ajuste y ampliación de parámetros de un modelo con dinámica presa-predador para simulación del desempeño animal en sistemas ganaderos sobre campo natural

Ing. Agr. Rodrigo IRIBARNE PIREZ

Magíster en Ciencias Agrarias  
opción Ciencias Animales

Octubre 2022

Tesis aprobada por el tribunal integrado por Dr. Martín Jaurena (Presidente), Dr. Hermes Morales (Vocal) y Dr. Hugo Fort (Vocal), el 25 de octubre de 2022. Autor: Rodrigo Iribarne Pirez. Director PhD. Francisco Dieguez, co-director PhD. Pablo Soca.

## RESUMEN

Con el objetivo de mejorar la capacidad predictiva del modelo de simulación con dinámica presa-predador desarrollado por Dieguez y Fort (2017) en sistemas ganaderos sobre pasturas naturales se ajustaron algunos de los parámetros existentes y se desarrollaron otros en base a información disponible en Uruguay aportada por la investigación nacional. Los parámetros que pasaron de ser constantes a variables fueron la eficiencia de utilización de la energía metabolizable (pasó de 0,25 a variar según la categoría animal), altura de la pastura en la cual los animales cubren sus requerimientos de mantenimiento (de 4,5 cm a variar según la categoría animal) y ganancia diaria media de peso vivo animal (de 0,6 kg/animal/día a variar según la estación del año). Otros parámetros que se modificaron fue la densidad de materia seca (MS) de pastura por centímetro de altura (kgMS/cm altura) que dejó de ser una constante (180 kg MS/cm de altura) a variar en función de la distribución vertical de la pastura, y el consumo de materia seca (kgMS/animal/día) que para la categoría vacas de cría en la estación de verano se corrige por el factor 1,3. Se agregaron al modelo ecuaciones capaces de predecir el porcentaje de preñez de las vacas en función de la condición corporal y técnica de control de amamantamiento, y tasa de sustitución de pastura por suplemento para las categorías de recría cuando se suplementa con concentrados. El modelo desarrollado y el de Dieguez y Fort (2017) presentaron un buen ajuste para la variable altura de la pastura en alta oferta de forraje y pobre en baja oferta de forraje en la categoría vacas de cría. En la categoría de recría ninguno de los modelos fue capaz de predecir con un alto ajuste la altura de la pastura. Para la variable peso vivo en la categoría de vacas de cría ambos modelos presentaron un pobre ajuste, mientras que en la categoría de recría el mismo fue excelente.

Palabras clave: modelos de simulación, dinámica presa-predador, ganadería sobre campo natural.

## SUMMARY

### **Adjustment and extension of a model parameters with prey-predator dynamics for simulation of animal performance in livestock farming systems on native grassland.**

With the aim of improving the predictive ability of the prey-predator simulation model made by Dieguez and Fort (2017) on native grassland livestock farming systems, there were some existing parameters adjusted and new ones developed based on information from national research. The parameters that were changed from being constants to being variable were the metabolizable energy utilization efficiency (from 0.25 to vary according to cattle category), herbage height at which cattle meet their maintenance requirements (from 4.5 cm to vary depending on cattle category), and animal daily weight gain (from 0.6 kg/animal/day to vary according to the season of the year). Other parameters that were modified were pasture dry matter (DM) density per centimeter of height (kgDM/cm), which changed from being a constant (180 kgDM/cm) to vary according to pasture height distribution, and DM intake (kgDM/animal/day), which is corrected by the factor 1.3 when used for breeding cows in summer. Also were included equations to predict cows pregnancy rate depending on body condition score and suckling control technique, and herbage substitution rate when growing cattle categories are supplemented with concentrates. The new model and Dieguez and Fort (2017) model had a good adjustment for the variable pasture height in high herbage allowance, but poor adjustment in low herbage allowance for breeding cows. For the growing cattle categories none of the models were able to predict the herbage height with good adjustment. For live weight variable in breeding cows both models were poorly adjusted, whereas in growing cattle were excellently adjusted.

Keywords: simulation models, prey-predator dynamic, grassland livestock.

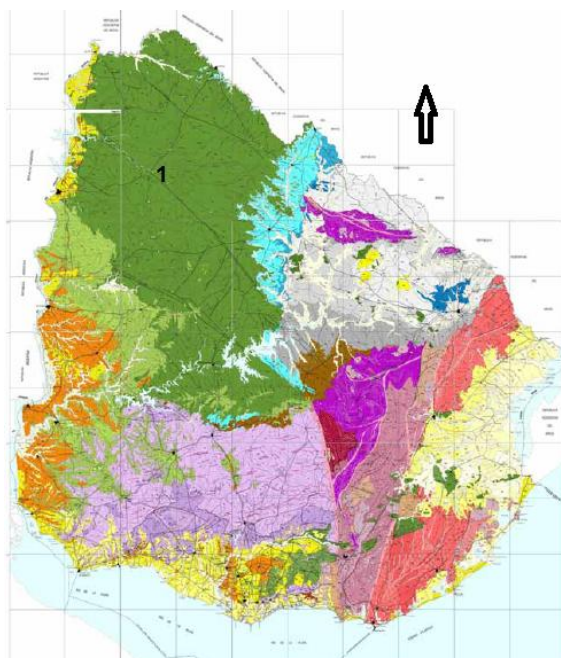
## TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	I
RESUMEN.....	II
SUMMARY.....	III
1. <u>INTRODUCCIÓN</u> .....	1
2. <u>MARCO TEÓRICO</u> .....	3
2.1. FACTORES QUE DETERMINAN EL CONSUMO DE ANIMALES EN PASTOREO.....	5
2.2. SUPLEMENTACIÓN DE VACUNOS EN PASTOREO.....	11
2.3. RELACIONES ENTRE CONDICIÓN CORPORAL DE VACAS DE CRÍA Y DESEMPEÑO REPRODUCTIVO.....	16
2.4. HETEROGENEIDAD VERTICAL DE LAS PASTURAS NATURALES.....	21
3. <u>HIPÓTESIS</u> .....	26
4. <u>OBJETIVO GENERAL</u> .....	26
5. <u>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</u> .....	26
6. <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u> .....	27
6.1. HETEROGENEIDAD VERTICAL DE LA PASTURA.....	30
6.2. CAMBIOS EN EL CONSUMO DE MATERIA SECA DE PASTURA SEGÚN ESTADO FISIOLÓGICO.....	31
6.3. CONDICIÓN CORPORAL DEL GANADO DE CRÍA Y SU DESMPEÑO REPRODUCTIVO.....	32
6.4. TASA DE SUSTITUCIÓN DE PASTURA POR SUPLEMENTO SOBRE CAMPO NATURAL.....	35
6.5. INDICADORES DE DESEMPEÑO DEL MODELO.....	37
6.6. BASE DE DATOS UTILIZADA.....	38
7. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u> .....	38
7.1. EFECTO DE LA HETEROGENEIDAD DE LA PASTURA EN EL MODELO.....	38
7.2. EVEVOLUCIÓN DE LA CONDICIÓN CORPORAL DEL	42

GANADO Y DESEMPEÑO REPRODUCTIVO.....	
7.3. EVOLUCIÓN DE LA ALTURA DE LA PASTURA EN SITUACIONES DE SUPLEMENTACIÓN.....	44
7.4. VALIDACIÓN DEL MODELO.....	45
8. <u>CONCLUSIONES</u> .....	53
9. <u>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</u> .....	55
10. <u>ANEXOS</u> .....	63

## 1. INTRODUCCIÓN

El campo natural es el principal recurso forrajero del Uruguay, ocupando un 64,3 % de la superficie del país (DIEA, 2011). La región de basalto se encuentra presente en parte de los departamentos de Artigas, Salto, Paysandú, Tacuarembó, Rivera y Durazno, abarcando un 25 % del territorio nacional con aproximadamente 4.100.000 ha (Berretta, 1998). Según DIEA (2011), la cuesta basáltica (sumando los departamentos de Artigas, Salto y Paysandú) presenta un 80 % de campo natural, encontrándose allí el 21,8 % de los vacunos y el 43,8 % de los lanares del país, siendo una región agroecológica principalmente criadora. En la figura 1 se presenta la Carta Geológica del Uruguay escala 1:500.000 donde se puede visualizar la región de basalto.



Bossi et al. (1998).

Figura 1. Carta Geológica del Uruguay escala 1:500.000 (n.º 1 indica la región de basalto).



Según Vayssières et al. (2011) y Turner et al. (2013), los sistemas de producción animal basados en la cosecha directa del forraje por parte de los animales se denominan sistemas complejos, los cuales se caracterizan por presentar una respuesta no lineal entre sus componentes y una retroalimentación que está determinada por la relación entre ellos. Un componente externo de estos sistemas que los convierte en aún más impredecibles es la variabilidad climática, principalmente cuando ocurren eventos de déficit hídrico, ya que este ocasiona pérdidas productivas y económicas que, en muchas ocasiones, afectan la sustentabilidad de los sistemas en el tiempo (Bartaburu et al., 2009).

La modelización permite estudiar dicha complejidad, ya que incluye las relaciones entre los componentes involucrados al igual que posibilita incorporar todos los avances que realiza la experimentación tradicional sobre el tema en estudio (Ruiz y Oregui, 2001). En Uruguay se han desarrollado modelos de simulación enfocados en comprender la dinámica de la evolución del desempeño animal en sistemas ganaderos extensivos, como lo son el modelo sequía basalto (Bartaburu, 2011), Modelización de Explotación Ganadera Extensiva (MEGanE) (Dieguez et al., 2012) y Modelo de ganadería sobre pastizales predador presa (PPGL) (Dieguez y Fort, 2017). El objetivo de estos modelos es predecir la evolución estacional del desempeño animal y pastura de forma tal que los productores ganaderos criadores del basalto puedan visualizar la evolución del subsistema planta-animal de forma estacional y, de esta manera, convertirlos en actores menos vulnerables a eventos climáticos adversos. Cada modelo sirvió de insumo para el que se desarrolló posteriormente, de forma tal que el modelo PPGL es una versión mejorada de los anteriores (Dieguez y Fort, 2017).

El presente trabajo busca ajustar algunos parámetros del modelo desarrollado por Dieguez y Fort (2017), además de introducir los componentes de suplementación y preñez, como también revisar tanto en la literatura nacional como internacional algunas simplificaciones o supuestos

que presenta el modelo PPGL de forma tal de encontrar ecuaciones que sean capaces de adaptarse a la dinámica de este, permitiéndole ser más preciso ante mayor variabilidad de situaciones.

En la sección 2 del trabajo se presenta la revisión de literatura realizada, la cual comienza explicando brevemente en qué consisten los modelos y su aplicación en los sistemas ganaderos, para luego profundizar en bibliografía nacional e internacional relacionada con la búsqueda de parámetros a modificar o incluir en el modelo.

## 2. MARCO TEÓRICO

Un modelo es una representación abstracta de la realidad, el cual busca abarcar todas las interacciones y comportamientos posibles del sistema en estudio, pudiendo ser manipulado de forma tal que se parezca más a las situaciones que ocurren en el mundo real (Ruiz y Oregui, 2001). Minsky (1965), menciona que un objeto  $X$  es un modelo del objeto  $Y$  para el observador  $Z$  si y solo si  $Z$  es capaz de responder preguntas de  $Y$  a través de  $X$ . Por otra parte, un sistema es un conjunto de componentes relacionados entre sí, de manera tal que actúan como un todo, en el cual pueden reconocerse componentes e interacciones entre ellos, entradas, salidas y sus límites (Sarandón, 2014). Si se considera a una explotación agropecuaria, y, específicamente, una explotación ganadera, como un sistema de explotación (Ruiz y Oregui, 2001), se puede decir que es un sistema abierto (influenciado por el entorno que lo domina y dirigido por un tomador de decisiones) (Ruiz y Oregui, 2001), dinámico en el tiempo, con un grado variable de componentes (subsistemas), los cuales determinan las entradas, salidas y sus límites. Cuanto mayor sea el número de componentes (subsistemas), mayor será el grado de complejidad del sistema (Ruiz y Oregui, 2001). Todo esto conlleva a que el estudio correcto de una explotación ganadera sea abordado desde un enfoque sistémico, en

donde la explotación es más que la suma de sus componentes (Ruiz y Oregui, 2001), estando fuertemente influenciada por las interacciones entre estos, en la cual el productor pretende lograr un equilibrio entre los componentes de forma tal de lograr la sostenibilidad y persistencia de la explotación en el tiempo (Ruiz y Oregui, 2001). La modelización de los sistemas agropecuarios permite estudiar la complejidad de estos, ya que incluye las relaciones entre los subsistemas involucrados al igual que posibilita incluir todos los avances que realiza la experimentación tradicional sobre el tema en estudio (Ruiz y Oregui, 2001). Los modelos, al ser representaciones de la realidad, son capaces de abarcar todo el entorno de posibilidades, pero en la práctica presentan un enfoque particular, el cual lo da el investigador a la hora de desarrollarlo en busca de plasmar el objetivo propuesto (Ruiz y Oregui, 2001) y, de esa manera, ver si contribuye a la solución de los problemas planteados.

Noy-meir (1975) menciona que los sistemas ganaderos controlados por el hombre pueden ser considerados como casos especiales de sistemas predador-presa (utilizados para explicar la evolución de la dinámica de poblaciones en sistemas naturales), ya que los herbívoros (predador) y plantas (presa) presentan interacciones con características similares a las poblaciones de animales en la naturaleza. En algunas ocasiones, son necesarias modificaciones en las consideraciones de las bases biológicas del sistema predador-presa, pudiendo ser transferible y de gran utilidad para explicar la relación planta-animal. Este autor menciona, además, que comprender de las bases teóricas de la dinámica de poblaciones aplicada a los sistemas ganaderos es de gran utilidad para la solución de los problemas en la gestión de los recursos forrajeros, ya que se puede visualizar la evolución de ambas poblaciones en el tiempo, en el cual la densidad de la presa depende de la densidad del predador, y viceversa, tratando siempre el sistema de encontrar la estabilidad en el tiempo.

El modelo de simulación PPGL desarrollado por Dieguez y Fort (2017) presenta tres variables: altura de la pastura (cm), peso de los animales (kg) y un índice de coeficiente climático. El desempeño animal depende del consumo, el cual, a su vez, depende de la disponibilidad de forraje, siendo esta afectada por la presión de pastoreo y el coeficiente climático. Dentro de las simplificaciones que presenta, se pretende investigar más en la homogeneidad de densidad de la pastura en forma vertical, al igual que todo lo que se relaciona con el consumo animal en pastoreo en diferentes estados fisiológicos. También pretende incorporar al modelo la suplementación energética en condiciones de pastoreo de forma tal de estudiar sus interacciones, al igual que introducir una función que sea capaz de predecir la preñez de las vacas acorde a la evolución de la condición corporal de estas a lo largo del año. Dentro de este marco teórico, se realizará una revisión de los temas que se pretenden ajustar en el modelo.

## 2.1. FACTORES QUE DETERMINAN EL CONSUMO DE LOS ANIMALES EN PASTOREO

El consumo de forraje representa entre el 60 y el 90 % de la variación en el desempeño de los animales en pastoreo (Poppi et al., 1992, Illius y Jessop, 1996, Da Trindade et al., 2016). Es sabido que el consumo de forraje de animales en pastoreo está definido por dos factores: consumo potencial y consumo relativo (CSIRO, 2007, Freer et al., 2010). Freer et al. (2010) mencionan que el consumo potencial está determinado por características intrínsecas del animal, mientras que el relativo está determinado por la cantidad y calidad de la pastura que pastorean.

Por el lado de la demanda animal, se sabe que el consumo potencial está definido por el peso estándar de referencia y el tamaño relativo, viéndose este modificado (incrementado o disminuido) por la salud del animal, el estrés térmico y el estado fisiológico del animal (National Research Council, 1996, CSIRO, 2007, Freer et al., 2010). Con respecto al estrés térmico, Fox

et al. (1988) señalan que si la temperatura permanece por encima de 25 grados centígrados, el consumo se ve reducido, mientras que si esta se encuentra por debajo de 15 grados centígrados, el consumo aumenta 1 % por cada grado centígrado en que se encuentre por debajo. Con respecto a la composición corporal de los animales, Fox et al. (1988) mencionan que el porcentaje de grasa corporal afecta el consumo de forraje en pastoreo por retroalimentación negativa a través de señales endócrinas y metabólicas. Estos encontraron que el consumo disminuye 2,7 % por cada punto porcentual de aumento de grasa corporal (en un rango de 21,3 a 31,5 % de grasa corporal).

En animales gestantes, es sabido que los requerimientos energéticos se ven incrementados, pero no hay evidencia de que se refleje la misma tendencia en el consumo voluntario (Weston, 1982, CSIRO, 2007). Forbes (1970) menciona que la disminución del consumo se observa comúnmente pocos días luego del parto, siendo esta explicada por cambios en el sistema endócrino más que por restricciones físicas. Otros autores (NRC (National Research Council, 1996)) señalan que la preñez afecta principalmente en el último mes de gestación. Ingvarsten et al. (1992) notaron una disminución del consumo de 1,5 % por semana durante las últimas 14 semanas de gestación en vaquillonas con características lecheras. Ese valor es bastante similar al reportado por NRC (1996), en donde el consumo disminuye 2 % por semana durante el último mes de gestación.

En animales en lactación, el consumo se ve incrementado y depende principalmente del tiempo de lactación (Freer et al., 2010). Wood (1969) señala que en ovinos las necesidades de consumo se incrementan hasta el pico de lactación (70 % de aumento), el cual se da alrededor de tres semanas posparto, para luego disminuir de forma gradual hasta los tres meses posparto, en donde el factor de corrección se encuentra muy cercano a 1. Por otra parte, ARC (Agricultural Research Council) (1980) encontraron que el consumo de alimento de animales en lactación puede ser un 30 a 50

% superior que animales en período seco con similar peso vivo y dieta ofrecida. Resultados similares encontró Minson (1990), quien reportó que el consumo de materia seca se incrementa un 30 % durante la lactación.

Por otra parte, los factores que determinan el consumo voluntario de forraje de los animales en pastoreo son complejos y, hasta el momento, no se han podido representar (NRC, 1996), ya que varían ampliamente entre especies e individuos. Entender la forma en que los animales seleccionan la dieta es esencial para llegar a aproximaciones certeras de forma tal de realizar un mejor aprovechamiento de los recursos naturales que se disponen, aspirando a maximizar el desempeño animal en pastoreo. El consumo voluntario en pastoreo está influenciado principalmente por el balance entre apetito y saciedad que presentan los animales (Forbes, 1995). En el corto plazo, el consumo se ve afectado principalmente por la regulación homeostática, condicionado por las características del alimento, mientras que en el largo plazo, el consumo está determinado por los requerimientos nutricionales y reservas corporales (Forbes, 2007). Según Jarrige et al. (1995), los rumiantes en pastoreo distribuyen las sesiones diarias de pastoreo principalmente en dos momentos, en el cual consumen, aproximadamente, entre el 60 y 80 % del total diario, en donde las características de la pastura juegan un rol determinante ya sea por llenado ruminal, cuando el animal consume alimentos fibrosos que presentan baja tasa de pasaje y gran cantidad de material de lenta degradación, o por activación de mecano-receptores de las paredes ruminales, los cuales hacen aumentar los metabolitos en sangre relacionados con la saciedad (Faverdin et al citados por Baumont et al., 2000). Baumont et al. (2000) desarrollaron un modelo conceptual que estudia los factores que determinan la ingestión de forraje de animales en pastoreo explicada por las relaciones entre las características del forraje, los mecanismos de regulación en el corto plazo y el comportamiento animal en pastoreo. Dichos autores concluyeron que la predicción de la dieta que selecciona el animal y los mecanismos de

compensación que realizan son de difícil estimación, y más aún en ambientes complejos donde existe gran variabilidad en el alimento ofrecido.

En pasturas homogéneas, la importancia de la facilidad de cosecha del forraje por parte de los animales es el factor determinante del consumo (determina la tasa de consumo y el tiempo en pastoreo (Allden y Whittaker, 1970). Laca et al. (1993), estudiando el efecto de la altura y densidad aparente de pasturas homogéneas (*Paspalum dilatatum* y *Medicago sativa*) sobre las dimensiones del bocado, concluyeron que la disponibilidad de forraje no puede ser definida como un valor único, sino que es necesario conocer la altura y la densidad de la pastura para poder predecir cómo serán las dimensiones del bocado y, por ende, el comportamiento animal en pastoreo. Estos autores encontraron que la altura de la pastura fue el principal determinante de la profundidad de bocado, mientras que la densidad de la pastura afectó negativamente tanto el área como la profundidad de bocado. El volumen de bocado fue dos o tres veces mayor en pasturas más altas y poco densas que en altas y densas. Una tendencia similar mostró el peso de bocado, siendo más afectado por la altura que por la densidad de la pastura, observándose bocados más pesados en pasturas altas y poco densas que en bajas y densas a una misma masa de forraje por unidad de área.

Por otro lado, en pasturas que presentan heterogeneidad se sabe que el animal presenta diferentes estrategias de consumo que incluyen distintas escalas espacio temporal, como lo son la elección de sitios de pastoreo y parches dentro de sitios de pastoreo. Las características de los parches, como son su abundancia, distribución espacial, facilidad de cosecha y palatabilidad instantánea, son las que determinan su elección por parte de los animales, condicionando así la tasa de consumo y tiempo en pastoreo (Baumont et al., 2000). Parches que presentan mayor disponibilidad de forraje permiten al animal obtener mayor tamaño de bocado y, por ende, mayor tasa instantánea de consumo. El peso de bocado es el principal

determinante de la tasa de consumo (Mezzalira et al., 2014) y está determinado por la facilidad con que el animal pueda cosechar el alimento, por lo que en pasturas vegetativas la altura y densidad de macollos son buenos indicadores del peso de bocado, mientras que en pasturas maduras comienzan a existir restricciones como los tallos y restos secos que dificultan la cosecha y aprovechamiento por parte del animal (Burlison, 1991). La masa de hojas verdes resulta ser un buen indicador del peso de bocado en diferentes estados fenológicos del forraje, aunque no tiene en cuenta todos los factores involucrados en el consumo, ya que presenta dos dimensiones, mientras que el bocado tiene tres dimensiones (Baumont et al., 2000). Cuando los animales son expuestos a pasturas en que su estructura les impide cosechar elevados pesos de bocados, estos reducen el consumo diario, ya que ni la tasa de bocado ni el tiempo en pastoreo son capaces de compensar la reducción en la masa de bocado (Hodgson et al., 1997). La variabilidad vertical y horizontal de la pastura condiciona el comportamiento de los animales en pastoreo (Hodgson et al., 1997, Carrère et al., 2001), ya que, muchas veces, al aumentar esta, es mayor el esfuerzo de los animales en la búsqueda del bocado, pudiendo llegar a reducir la tasa de consumo. De igual manera el animal presenta mayor oportunidad de seleccionar una dieta de mejor valor nutritivo y, de esta forma, compensar el incremento de costo energético de búsqueda (Hodgson et al., 1997).

Mezzalira et al. (2014) intentaron estimar el consumo voluntario de vaquillonas en pastoreo a través del comportamiento ingestivo, con la hipótesis de que al aumentar la altura de la pastura, incrementa el peso de bocado y por ende la tasa de consumo (ya que el peso de bocado es el principal determinante del consumo en el corto plazo). Sin embargo, no pudieron encontrar una relación directa, lo que evidencia que el consumo animal no solo depende de la cantidad de forraje ofrecido, sino que, además, está determinado por un sinnúmero de factores inherentes del animal que determinan la elección de los sitios de pastoreo y parches dentro de estos.



Estos autores encontraron que al aumentar la altura de la pastura de *Cynodon*, aumenta el peso de bocado hasta 30 cm, mientras que los animales que pastoreaban alturas superiores a estas presentaron menor peso de bocado. Comportamiento similar presentaron los animales que pastoreaban *Avena strigosa*, con la diferencia que la altura que redujo el peso de bocado fue mayor (40 cm). La explicación que encontraron es que cuando la altura de la pastura superaba los 30 y 40 cm para *Cynodon* y *Avena strigosa*, respectivamente, el área de bocado del animal se reducía, lo que disminuía el peso de bocado de forma significativa.

Da Trindade et al. (2016) encontraron que el consumo de forraje de vaquillonas en pasturas naturales tendía a aumentar con la oferta de forraje, pero con gran variabilidad de estructura de la pastura, ya que se encontraron animales que consumían 1,8 % del peso vivo con disponibilidades de forraje entre 400 y 2000 kgMS/ha y 4 y 10 cm de altura aproximadamente, animales que consumían 2,6 % del peso vivo con disponibilidades entre 600 y 2800 kgMS/ha y 5 y 17 cm de altura, y animales que consumían más del 3 % del peso vivo en ambientes que presentaban entre 1500 y 3000 kgMS/ha y 10 y 13 cm de altura. A su vez, encontraron que los mecanismos de compensación no siempre ocurrieron como se esperó, ya que, muchas veces, al aumentar la oferta de forraje, el consumo de alimento se incrementa, pero también en varias ocasiones se elevó el tiempo en pastoreo en busca de una mejor calidad de dieta, modificando así los requerimientos energéticos en deterioro de un mejor desempeño animal, por lo que no fue raro encontrarse con altas ofertas de forraje y productividades secundarias por debajo de lo esperado.

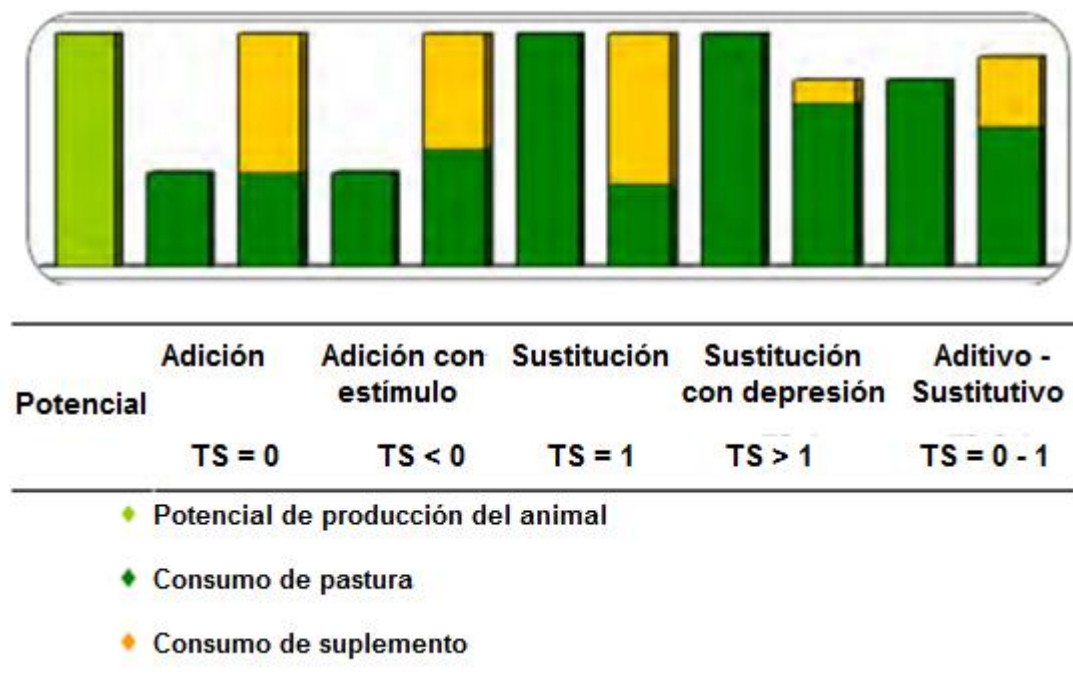
Holling (1959), estudiando el comportamiento de las poblaciones, modeló el consumo animal denso-dependiente, en el cual el consumo depende de la densidad de la pastura hasta un nivel en que este no responde más al aumento de la pastura, llegando al punto de saturación determinado por las características del propio animal. De Boer (2021) también menciona que una

forma de describir las relaciones predador-presa donde a bajos niveles de densidad de la presa, baja la tasa de consumo del predador, sería mediante una función de respuesta sigmoide saturada ( $f(R) = (R-k)/(h+R-k)$ ), donde  $R$  es la pastura y  $k$  es la densidad de la pastura a partir de la cual comienza a existir consumo por parte del predador (herbívoro). Este tipo de funciones dinámicas (ya que incluyen a la variación del tiempo) tienden hacia condiciones de equilibrio natural, ya que la densidad de la presa (pastura) condiciona la densidad del predador (animal) y este aumenta hasta cierto punto en el cual la presa se vuelve escasa, determinando una disminución de la densidad de predadores por falta de alimentos (Holling, 1959, Pastor, 2008).

## 2.2. SUPLEMENTACIÓN DE VACUNOS EN PASTOREO

En condiciones de pastoreo existen diferentes relaciones entre la pastura y el suplemento que afectan al consumo de alimento total diario de los animales (Lange, 1980). El suministro de suplemento puede afectar al consumo de pastura ya sea aumentándolo (adición con estímulo) o disminuyéndolo (sustitución con depresión). Existen grados intermedios en los cuales la ingesta de suplemento aumenta el consumo total de materia seca diaria sin modificar el de la pastura (adición). Otras veces en donde el consumo de pastura se reduce al suplementar sin aumentar la ingesta de alimento total (sustitución) o casos en donde el consumo de pastura se ve reducido, pero no el total de alimento aumenta (adición-sustitución) (Lange, 1980). A lo que se debería aspirar en condiciones de pastoreo es a que ocurran efectos de sustitución (cuando se quiere diferir forraje o aumentar la carga) o adición (cuando la pastura limita al consumo de materia seca total), ocurriendo generalmente situaciones de adición-sustitución (Claramunt y Rodríguez, 2015). En todos los casos, la respuesta de la suplementación va a depender de las características de las pasturas (estructura, altura y valor nutritivo, entre otras) y del suplemento (cantidad, calidad, frecuencia de

alimentación) (Mieres, 1997). En la figura 2 se representan las diferentes asociaciones entre pastura y suplemento cuando coexisten en los sistemas ganaderos.



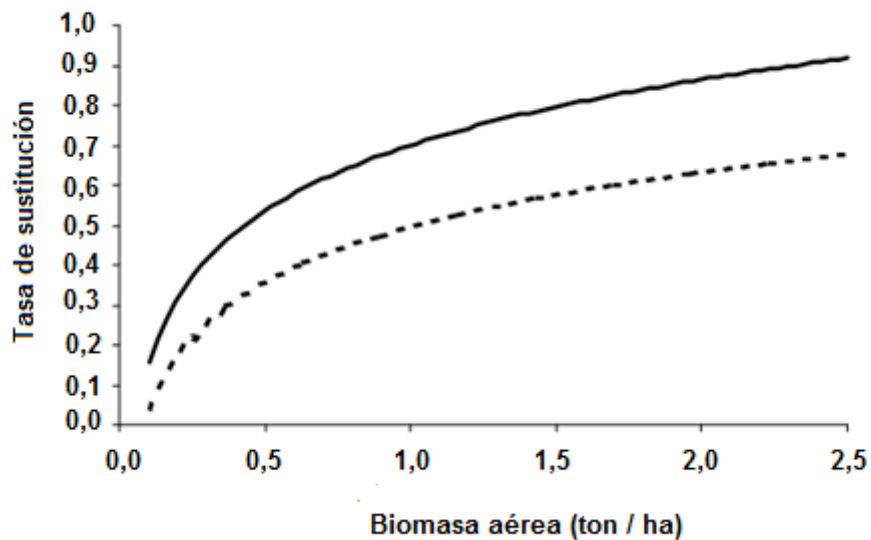
Adaptado de Claramunt y Rodriguez (2015)

Figura 2. Relación entre pastura y suplemento sobre el consumo de materia seca total (pastura + suplemento). TS: Tasa de sustitución

La suplementación es una técnica muy utilizada en sistemas pastoriles extensivos del Uruguay, aplicándose principalmente para aumentar la ganancia de peso vivo de los animales o para mejorar la utilización de la pastura disponible (Claramunt y Rodriguez, 2015). Estos autores realizaron una exhaustiva revisión sobre trabajos nacionales que utilizaron suplementación sobre campo natural como base forrajera. De un total de 13 experimentos que evaluaron la suplementación en animales de recría, 10 presentaron como base forrajera campo natural diferido con una moderada a alta disponibilidad (1000 a 4500 kgMS/ha, respectivamente) con baja

proporción de forraje verde y bajo valor nutritivo. En la mayoría de estos experimentos, se encontró una respuesta de adición con estímulo. Los niveles de suplementación fueron amplios, variando entre 0,15 hasta 2 % del peso vivo, aunque, en la mayoría de los trabajos, la suplementación fue a razón del 1 % del peso vivo. Con los datos surgidos de los experimentos, Claramunt y Rodríguez (2015) estimaron la tasa de sustitución con base en las ecuaciones desarrolladas por NRC (1996) y encontraron situaciones en donde la respuesta esperable era la adición, que resultó ser de sustitución con depresión, explicada, posiblemente, por el rápido aporte de carbohidratos que brinda el suplemento. Esto afectaría la tasa de pasaje a nivel ruminal, sumado a una posible reducción del costo de cosecha en situaciones en donde la masa de forraje era baja o a bajos niveles de proteína cruda que presentó el forraje, lo que provocaría una reducción del consumo de este en presencia de otro alimento de mejor valor nutritivo.

Freer et al. (2010) mencionan que cuando el suplemento es ofrecido a animales en pastoreo, normalmente causa una depresión en el consumo de materia seca de la pastura que conlleva un efecto de sustitución. En situaciones en donde el objetivo de la suplementación es corregir una deficiencia de proteína de la pastura, el consumo de suplemento provoca un aumento en el consumo de materia seca de la pastura, y la tasa de sustitución posiblemente sea negativa, lo que ocasiona un efecto de adición (Freer et al., 2010). En la figura 3 se presentan resultados de predicción de las ecuaciones desarrolladas por Freer et al. (2010) para ovinos suplementados sobre pasturas con diferente digestibilidad. Cabe aclarar que, para el desarrollo de ecuaciones de predicción del consumo de materia seca en pastoreo, estos autores asumen que el animal primero consume todo el suplemento y luego la pastura ante iguales valores de digestibilidad.



Adaptado de Freer et al. (2010)

Figura 3. Tasa de sustitución estimada en ovinos suplementados a razón de 200 gramos por día con una ración de 80 % de digestibilidad sobre una pastura de 70 % de digestibilidad (línea sólida) o 50 % de digestibilidad (línea punteada).

Como se observa en la figura 3, cuanto mayor es la digestibilidad y disponibilidad de la pastura, mayor es la tasa de sustitución de pastura por suplemento. Resultados similares encontraron AFS (1994), los que se presentan en el cuadro 1.

Cuadro 1. Tasa de sustitución de pastura por suplemento según disponibilidad y digestibilidad de pastura.

Suplemento	Dig	Digestibilidad de pastura	Disponibilidad de pastura (ton/ha)		
			< 1	1	> 1,5
Granos	0,8	0,7	0,6	0,8	1
		0,5	0,3	0,4	0,5
Voluminosos	0,6	0,7	0,2	0,4	0,5

Adaptado AFS (1994)

Por otro lado, Claramunt y Rodriguez (2015) reportaron experimentos donde al suplementar vacas de cría en invierno a razón de 0,15 a 0,9 % del peso vivo, aumentó la condición corporal (CC) de las vacas cuando esta fue inferior a 4, sin encontrar respuesta cuando la CC de las vacas era de 4,5 o superior. En muchas ocasiones, la suplementación de las vacas de cría se realiza en torno al parto y/o entore cuando el objetivo de esta es mejorar el balance energético de las vacas, de forma tal de aumentar la probabilidad de preñez y que esta sea, a su vez, de mayor calidad (más temprana). En este sentido, Quintans (2014) resume una serie de trabajos de suplementación en los que encontró una tendencia de aumento del porcentaje de preñez y reducción del intervalo parto-concepción en vacas multíparas, siendo escaso el efecto en vacas primíparas. Soca et al. (2012) realizaron un experimento con suplementación de corta duración (*flushing*) a vacas primíparas con 2 kg/animal/día de afrechillo de arroz durante 20 días luego de 61 días de paridas. Estos autores encontraron que la suplementación aumentó la probabilidad preñez temprana de las vacas, no así la total, siendo esta respuesta muy afectada por la CC al parto. Concluyen, además, que la técnica de suplementación sumada al destete temporario son herramientas de bajo costo y alto impacto para aumentar la preñez en vacas con CC sub óptima (CC < 4).

### 2.3. RELACIÓN ENTRE CONDICIÓN CORPORAL DE VACAS DE CRÍA Y DESEMPEÑO REPRODUCTIVO

La condición corporal es un valor que indica indirectamente el porcentaje de reservas corporales que presenta un animal (Herd y Sprott, 1986). Estos autores encontraron que la condición corporal (CC) al parto (escala 1 a 9, siendo 1 extremadamente delgada y 9, extremadamente gorda) es un excelente indicador del desempeño de la vaca de cría en la próxima estación reproductiva. Los autores vieron que vacas que presentaban al parto 5 o más puntos de CC eran capaces de destetar un ternero por año, mientras que en vacas que presentaban 4 o menos, el intervalo interpartos sobrepasaba el año de duración. A un total de 1000 vacas de cría se le evaluó la CC durante la primera etapa de la estación de cría y se llegó a la conclusión de que 5 puntos de CC era el límite crítico para no afectar el desempeño reproductivo, en donde vacas que tenían 4 o menos puntos de CC presentaron una preñez de 58 % a los 150 días, mientras que las vacas que tenían 5 y 6 o mayor CC presentaron una preñez de 85 y 95 %, respectivamente (Herd y Sprott, 1986). En concordancia con estos autores, Orcasberro (1991) y Scaglia (1997) agregan, además, de que la CC (escala 1 al 8, Méndez et al., 1988) al parto está asociada con el intervalo parto-primer celo, desempeño en la lactación y salud y vigor del ternero, mientras que la CC al entore está asociada con el desempeño reproductivo en términos de número de servicios por concepción, intervalo interpartos y porcentaje de vacas vacías. Orcasberro (1991) señala que vacas multíparas que llegan al parto con una CC de 4 tienen altas probabilidades de quedar preñadas en el período de servicio, siendo la duración del anestro posparto de 35 a 50 días (según sea el plano alimenticio en el posparto). Este autor indica que existe una relación lineal entre CC al parto y porcentaje de preñez hasta 4 puntos de CC, dependiendo, a su vez, del comportamiento que presentaron las vacas luego del parto (83, 77, 56 y 29 % de preñez para vacas que llegaron al parto con 4,5, 4, 3,5 y 3 puntos de CC,

respectivamente, y perdieron peso en el período parto-fin de entore, mientras que en las vacas que ganaron peso en ese período, la preñez fue de 83, 84, 69 y 56 %, respectivamente). Las vacas primíparas presentan anestros posparto más prolongados, siendo, además, más susceptibles a períodos de subnutrición que las vacas multíparas (Orcasberro, 1991). Para esta categoría animal se encontró que una CC al parto inferior a 4,5 puntos determinaba que el anestro posparto se extendiera mucho y la preñez se viera muy afectada (71, 49 y 46 % de preñez cuando la CC al parto fue de 4,5, 4 y 3, respectivamente).

En los cuadros 2 y 3 se presenta un resumen de información internacional y nacional, respectivamente.



Cuadro 2. Resumen de información internacional que relaciona a la condición corporal (CC) con la respuesta reproductiva en la siguiente estación de cría.

Autor	Año	Escala CC	Período	Categoría	CC	N.º vacas	% vacas en celo 80 DPP	% preñez
Whitman	1975	1 al 9	CC al parto	Vacas multíparas	≤3	272	62	
					4 al 6	364	88	
					≥7	50	98	
Herd y Sprott	1987	1 al 9	CC al parto	Vacas multíparas	≤4	78		69
					5	10		80
					≥6	0		0
					≤4	25		24
					5	139		60
					≥6	23		87
					≤4	32		12
					5	60		50
					≥6	32		90
					≤4	168		70
					5	274		90
≥6	197		92					
CC al entore	Vacas multíparas	≤4	122		58			
		5	300		85			
		≥6	619		95			

Cuadro 3. Resumen de información nacional que relaciona a la condición corporal (CC) con la respuesta reproductiva en la siguiente estación de cría.

Autor	Año	Escala CC	Período	Categoría	CC	N.º vacas	% Preñez	
Desempeño de los rodeos de cría en pastoreo	1986-1990	1 al 8	Parto-entore	Vacas multíparas (pierden CC)	3		29	
					3,5		56	
					4		77	
					4,5		83	
				Vacas multíparas (ganan CC)	3	20	56	
					3,5	87	69	
					4	135	84	
					4,5	181		
				CC inicio entore	Palo a Pique)	6	21	98
						2	18	11
			3			326	32	
			4			478	70	
			5			202	94	
			6			23	96	
			CC al parto	Primera cría	3		40	
					3,5		45	
					4		50	
					4,5		65	
			CC al parto	1ra cría (pierden estado entre parto-fin de entore)	5		80	
					3	16	46	
4	25	49						
CC inicio entore	Vacas multíparas	4,5	22	71				
		3,5		49,1				
		3,5-4		74,1				
		4-4,5		76,6				
				4,5-5		81,5		
				5		95,2		

En los sistemas ganaderos criadores, la tasa de destete es la principal variable que afecta los ingresos económicos de estos (Soca et al., 2012). Short et al. (1990) señalan que uno de los principales factores que afectan directamente la eficiencia reproductiva es el largo del anestro posparto. Acortando dicho período se incrementan de forma notable la probabilidad de preñez del rodeo de cría (Hess et al., 2005). Las técnicas de control de amamantamiento, ya sea temporal o definitivo, ayudan a disminuir el largo del anestro posparto de las vacas de cría y, por ende, mejoran el desempeño reproductivo en la siguiente estación de cría (Orcasberro, 1991).

El destete temporario (DT) con aplicación de tablilla nasal durante 11-14 días en terneros que tengan más de 60 días de edad (Quintans, 2007) ha demostrado ser una tecnología de alto impacto en términos reproductivos en vacas que presentan una CC cercana a 3,5 puntos, teniendo menor impacto en vacas con CC menor a 3,5 y primíparas. Erosa et al. (1992) encontraron una muy buena respuesta a esta tecnología en vacas que presentaron CC al parto mayor a 4 (100 % vs. 80 % de preñez con y sin DT, respectivamente), mientras que en vacas que presentaron CC al parto menor a 3,5, la respuesta fue nula (54 % vs. 48 % de preñez con y sin DT, respectivamente). Quintans et al. (2006) encontraron que la mayor respuesta al DT se observó en vacas que estaban en anestro superficial, independientemente de la CC que presentaban. Las vacas que estaban en anestro superficial y se les aplicó DT presentaron una preñez de 70 %, mientras que las que estaban en anestro superficial y no se les aplicó esta tecnología presentaron una preñez de 30 %.

Por otra parte, el destete precoz (DP) es una técnica que presenta muy buenos resultados reproductivos en vacas flacas (menor a 3,5 puntos de CC) o vacas primíparas (Simeone y Beretta, 2002). Estos autores realizaron una exhaustiva revisión sobre trabajos nacionales y regionales que estudiaron esta tecnología y los resultados son consistentes: observaron que la aplicación del DP logra un aumento de 54 puntos porcentuales en la preñez de vacas

primíparas y 59 puntos porcentuales en vacas flacas (menor a 3 puntos de CC), siendo frecuente lograr 85-90 % de preñez al final del entore (Simeone y Beretta, 2002).

#### 2.4. HETEROGENEIDAD VERTICAL DE LAS PASTURAS NATURALES

Según García (1995), cuando se habla de estructura o distribución vertical del tapiz vegetal, se hace referencia a la forma en que se distribuye el forraje desde el nivel del suelo hasta el estrato superior del dosel (en cuanto a densidad, composición botánica y tisular, entre otros). Este autor menciona que el manejo y utilización de pasturas hace referencia, en la mayoría de las situaciones, a la disponibilidad (kgMS/ha) y producción de esta (kgMS/ha/año). Una misma masa de forraje se puede obtener de diferentes maneras, ya sea con la combinación de pasturas bajas y densas o altas y poco densas (García, 1995). Son varios los aspectos por los que es importante conocer la estructura de la pastura, pero, cuando se habla de animales en pastoreo, el factor más importante es conocer cómo la estructura de la pastura afecta al consumo voluntario de los animales. Poppi et al. (1987) y Hodgson (1990) señalan que los atributos de la pastura que afectan el consumo animal en pastoreo se pueden agrupar en «nutricionales» y «no nutricionales». Los primeros cobran relevancia cuando el consumo de materia seca (CMS) es elevado, y comienzan a ser importantes factores relacionados con la calidad y metabolibilidad del alimento, mientras que cuando el CMS se ve restringido por las características del forraje que se les ofrece a los animales, son los factores no nutricionales los que determinan el CMS y comportamiento de los animales en pastoreo (Poppi et al., 1987, Hodgson, 1990).

García (1995) estudió la estructura de diferentes mezclas forrajeras sembradas, de diferentes edades, en tres diferentes estratos (0-5 cm, 5-10 cm y > 10 cm). En cada estrato se realizaron determinaciones de disponibilidad de materia seca (ton/ha), porcentaje de materia seca (% MS),

digestibilidad de la materia orgánica del forraje (% DMO) y densidad de materia seca por centímetro de altura expresada por hectárea (kgMS/cm/ha). Como primer resultado, se encontró una marcada diferencia en la estructura según la edad de la pastura, a pesar de presentar la misma distribución vertical. En los primeros 5 cm de altura, independientemente de la edad de la pastura, es donde se encontraron la mayor densidad y % MS y menor % DMO de la pastura. El 56, 20 y 24 % de la disponibilidad de forraje (tonMS/ha) correspondió al primer, segundo y tercer estrato, respectivamente, para las pasturas de 1-2 años de edad, mientras que el 67, 18 y 15 %, respectivamente, para pasturas de 3-4 años de edad. En el cuadro 4 se presenta la información resumida de la proporción de los parámetros estudiados en los diferentes estratos de la pastura.

Cuadro 4. Densidad (kgMS/cm de altura), % de materia seca, digestibilidad de la materia orgánica (%DMO) y rendimiento (ton/ha) según edad y estrato vertical de pasturas sembradas.

Edad pastura	Altura (cm)	Densidad (kgMS/cm)	% MS	% DMO	ton/ha
1-2 años	> 10	92 (71-112)	21 (18-27)	80 (78-82)	1,02
	5-10	172 (145-200)	21 (18-23)	77 (73-81)	0,86
	0-5	477 (433-567)	28 (25-33)	54 (57-75)	2,38
3-4 años	> 10	104 (74-140)	26 (25-28)	75 (74-78)	0,94
	5-10	224 (146-332)	25 (23-31)	74 (69-77)	1,12
	0-5	843 (490-991)	39 (34-43)	58 (51-65)	4,22

Valores entre paréntesis indican el rango

Adaptado de García (1995).

Hodgson (1990) representó la distribución vertical de la pastura expresada a través de la densidad de tejidos (foliar y radicular) por centímetro de altura. Demostró que la mayor densidad de tejido foliar (5-10 mg MS/cm<sup>3</sup>) se encuentra en alturas por debajo de 3 cm, mientras que en estratos superiores a 5 cm, de altura la densidad baja considerablemente (< 5 mg MS/cm<sup>3</sup>). Resultados similares encontró para el tejido radicular, con la diferencia de que la estratificación de la densidad es más notable aún: halló valores entre 15 y 30 mg MS/cm<sup>3</sup> en alturas por debajo de 5 cm, mientras que en profundidades radiculares mayores a 5 cm, la densidad fue menor a 3 mg MS/cm<sup>3</sup>.

De Barbieri et al. (2000) evaluaron el efecto de la carga y de la suplementación sobre la producción y calidad de carne de corderos pesados pastoreando *Avena byzantina* en la región este del Uruguay. Parte del trabajo fue evaluar cómo afectan estas variables de manejo a la estructura de la pastura. Independientemente del efecto de las variables de manejo del trabajo, el porcentaje de % MS de la pastura fue mayor en el estrato inferior

(40-53 % de MS en el estrato de 0-10 cm), decreciendo a medida que las determinaciones se hacían en los estratos superiores de la pastura (0-9 % MS para el estrato mayor a 30 cm de altura).

Cangiano (1999) estudió la variación vertical de la densidad de MS (kgMS/cm) de diferentes especies forrajeras templadas y sus mezclas. Encontró que, sin importar la especie forrajera sembrada, en el estrato inferior (0-2 cm) es donde presenta mayor densidad (kgMS/cm de altura), decreciendo a medida que pasa a los estratos superiores del tapiz vegetal. En el cuadro 5 se presenta la densidad para las diferentes mezclas forrajeras estudiadas.

Cuadro 5. Densidad (kgMS/cm de altura) según estrato vertical de diferentes especies forrajeras sembradas.

Estrato	Base		Pasto mezcla de				Trigo	Sorgo	Avena	Achicoria
	Alfalfa	alfalfa	Festuca	ovillo	gramíneas					
> 15	48	59	25	20	24	34	30	40	26	
10 - 15	66	75	103	50	120	75	61	115	85	
5 - 10	28	59	203	64	126	87	86	165	88	
2 - 5	19	42	150	47	122	55	130	177	88	
0 - 2	26	50	226	71	168	80	130	155		

Adaptado de Cangiano (1999).

Saldanha (comunicación personal, julio de 2013) estudió la distribución vertical de una pastura natural de zona baja de basalto haciendo énfasis en la densidad (kgMS/cm de altura) y observó que el 51,7 % de la MS se encontró por debajo de los 2,5 cm de altura, decreciendo de forma considerable a medida que se acercaba a alturas cercanas al ápice de las hojas. La densidad observada fue de 800 kgMS/cm de altura para el rango de 0-1 cm de altura, 744 kgMS/cm para el rango entre 1-2,5 cm de altura, 297 kgMS/cm para el rango entre 2,5 y 5 cm, y 89, 62 y 52,7 kgMS/cm para los rangos de 5-7,5, 7,5-20 y > 20 cm de altura, respectivamente.

Gratarolla et al. (1993) estudiaron la distribución vertical de la densidad de MS en diferentes momentos del año en una pastura natural de Cretácico. Ellos encontraron que, independientemente del período de medición, la mayor densidad de la MS se encontraba en los primeros 2,5 cm de altura, disminuyendo hacia alturas mayores. En el cuadro 6 se presenta un resumen de la distribución vertical de la densidad de la MS (kgMS/cm).

Cuadro 6. Densidad (kgMS/cm de altura) según diferentes estratos de medición de una pastura natural sobre suelos de cretácico.

	Estratos de medición (cm)			
	2,5	5	7,5	10
04/04/1991	333	200	100	83
20/05/1991	200	367	117	83
26/07/1991	383	150	50	42
10/09/1991	300	167	50	42
20/11/1991	167	200	50	42

Adaptado de Gratarolla et al. (1993)

A partir de la información recabada en la presente sección, en el presente trabajo se pretende modificar algunas constantes que presenta el modelo PPGL desarrollado por Dieguez y Fort (2017) de manera tal que sea capaz de predecir con mayor exactitud la evolución de peso de las diferentes categorías de animales y la altura de la pastura. La elección de las variables a modificar se definió por la sensibilidad del modelo a la misma realizada en un estudio previo del funcionamiento del modelo.



### 3. HIPÓTESIS

Los cambios en los parámetros en el modelo PPGL permiten mejorar la capacidad predictiva del modelo.

### 4. OBJETIVO GENERAL

Contribuir en la mejora de la predicción del desempeño animal de un modelo de simulación con dinámica presa-predador.

### 5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Incorporar al modelo una función que sea capaz de describir la densidad de la pastura en relación a la altura de la pastura (kgMS/cm altura).
- Incorporar cambios en el CMS según estado fisiológico de las vacas de cría.
- Incorporar al modelo una función de respuesta de preñez de las vacas en relación a la condición corporal al parto.
- Incorporar al modelo las asociaciones que existen entre el consumo de forraje y suplemento.
- Validar las modificaciones incorporadas al modelo usando la información de experimentos en los cuales se monitorearon la altura de la pastura y el peso de las distintas categorías animales.

## 6. MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolla sobre un modelo con dinámica predador-presa elaborado por Dieguez y Fort (2017). Este busca representar los procesos físico-biológicos (relación pasto-animal) de una explotación ganadera extensiva a cielo abierto, con lógica de dinámica de poblaciones. Tanto la pastura (presa) como el animal (predador) son representados mediante funciones logísticas, en las cuales el crecimiento de la pastura depende del consumo animal, y viceversa. Y ambas poblaciones en ausencia (de predador) o abundancia (de presa) de la otra población se saturan en un determinado punto. Las ecuaciones utilizadas para modelar el comportamiento de las poblaciones son las siguientes:

$$dx/dt = rx\{1-x/K(t)\} - c(y) * (x^2/(H^2 + x^2)) * y^{3/4} S,$$

$$dy/dt = \beta * [c(y)(x^2/(H^2 + x^2)) - Im] * y^{3/4}, \text{ donde}$$

$x$  es la altura de la pastura en cm,

$t$  es el tiempo en días,

$r$  es la tasa de crecimiento de la pastura en días,

$K$  es la capacidad de carga del sistema (máxima y mínima, en cm),

$c$  es el consumo máximo de pastura en cm/kg PV metabólico/día,

$H$  es  $c/2$ , o sea, la máxima tasa de consumo en cm,

$y$  es el peso vivo del animal en kg,

$S$  representa la tasa de carga,

$\beta$  es la eficiencia de conversión del forraje en Kg PV metabólico/cm,

$Im$  es el forraje requerido para cubrir los requerimientos de mantenimiento del animal en cm/Kg PV metabólico/día.

El primer término de la ecuación representa el crecimiento logístico de la pastura, mientras que el segundo representa el consumo animal multiplicado por el peso metabólico por hectárea. El modelo presenta una corrección por coeficiente climático, el cual afecta directamente al factor  $K$ , por lo que en años con abundancia relativa de forraje, la capacidad de carga es mayor, mientras que en años con deficiencias de forraje, la capacidad de carga es menor.

En la segunda ecuación se presenta la ganancia media diaria de los animales, en la cual al consumo diario de los animales se le resta el consumo para cubrir los requerimientos de mantenimiento, lo que resultaría en el consumo neto. Al multiplicar este último por la eficiencia de conversión se obtendría la ganancia media diaria de los animales, que luego es expresada en peso vivo metabólico.

Como los modelos de simulación pretenden representar una realidad específica, un objetivo específico, presentan supuestos de forma tal acotar la realidad a representar y ser más precisos y consistentes con el objetivo de este. Los supuestos del modelo PPGL (Dieguez y Fort, 2017) son:

- El alcance del modelo es un potrero, una categoría animal y una estación, considerando las decisiones de manejo estacional (entore y destete, entre otras).
- La pastura es representada como una especie dominante determinada por sus coeficientes  $r$  y  $K$ , por lo que no se tiene en cuenta la heterogeneidad de especies.
- La altura de la pastura es representada como el promedio de altura disponible, sin tener en cuenta la densidad de la pastura ni la distribución de las alturas.
- El valor nutricional de la pastura es fijado independientemente de la altura.

— Se asumió una dependencia lineal entre ganancia de peso animal y la tasa de consumo de pastura.

Algunas de las constantes del modelo desarrollado por Dieguez y Fort (2017) que se convirtieron en variables según categoría animal o estación del año son la eficiencia de utilización de la energía metabolizable para ganancia de peso (Kg), la altura de pastura para mantenimiento de peso vivo según categoría animal y la ganancia de peso máxima según estación del año sobre campo natural.

En relación con la eficiencia de utilización de la energía metabolizable para ganancia de peso, el modelo pasó de ser una constante (0,25) a variar según la categoría animal: la categoría de terneros/as presentó una eficiencia de 0,35, las vaquillonas de 1-2 años, 0,30, las vaquillonas preñadas, un valor de 0,28, mientras que las vacas de cría la eficiencia fue de 0,25 (Mieres, 2004). Se asume que las categorías jóvenes tienen una mayor capacidad de seleccionar una dieta de mayor digestibilidad que vacas de cría (Montossi, 2000). Por otro lado, la constante altura de mantenimiento de peso vivo sobre campo natural pasó de 4,5 cm a variar según la categoría animal: la categoría de terneros/as presentó un valor de 3 cm y las vaquillonas de 1 a 2 años, 3,5 cm, mientras que las vaquillonas preñadas y las vacas de cría mantuvieron el valor de 4,5 cm. Estos valores surgieron de la observación de los datos de comportamiento ingestivo publicados por Gibb (2006), los cuales indican que para que una vaca consuma 7,9 kg de materia seca (consumo de mantenimiento de una unidad ganadera (Berreta et al., 1998)) se debería contar con una pastura que presente una altura promedio de 4,5 a 5 cm. Finalmente, la constante ganancia diaria máxima de peso vivo pasó de 0,6 kg/animal/día a variar según la estación del año: las estaciones de otoño, invierno, primavera y verano presentaron una ganancia diaria de 0,45, 0,2, 0,8 y 0,5 kg/animal/día, respectivamente.

Otros parámetros que dejaron de ser constantes en el modelo fueron la densidad de materia seca por centímetro de altura (kgMS/cm) y el consumo de MS (kgMS/animal/día) según estado fisiológico de las vacas. A su vez, se agregaron al modelo funciones de respuesta que relacionen el desempeño reproductivo de vacas de cría según su condición corporal y las relaciones que existen entre el consumo de suplemento y pastura en las categorías de recría. A continuación, se desarrolla la forma en que se obtuvieron las funciones de respuesta a incluir en el modelo.

### 6.1. HETEROGENEIDAD VERTICAL DE LA PASTURA

En el modelo desarrollado por Dieguez y Fort (2017), la densidad de la pastura expresada en kgMS/cm de altura es constante, siendo esta influyente en los parámetros capacidad máxima de consumo (coeficiente C) y eficiencia de conversión de la pastura (coeficiente beta). En el presente trabajo, se tiene como uno de los objetivos estudiar la heterogeneidad vertical de la pastura y ver cómo esta modifica el comportamiento del modelo, ya que se sabe que afecta el consumo de materia seca de forraje de animales en pastoreo (Mezzalira et al., 2014).

La base de datos que se utilizó fue la de Saldanha (comunicación personal, julio de 2013), ya que fue desarrollada sobre suelos de basalto y a la fecha fue la única información disponible con que se contaba. En la figura 4 se presenta la variación de la densidad de la pastura (kgMS/cm) en función de la altura de la pastura para suelos de basalto.

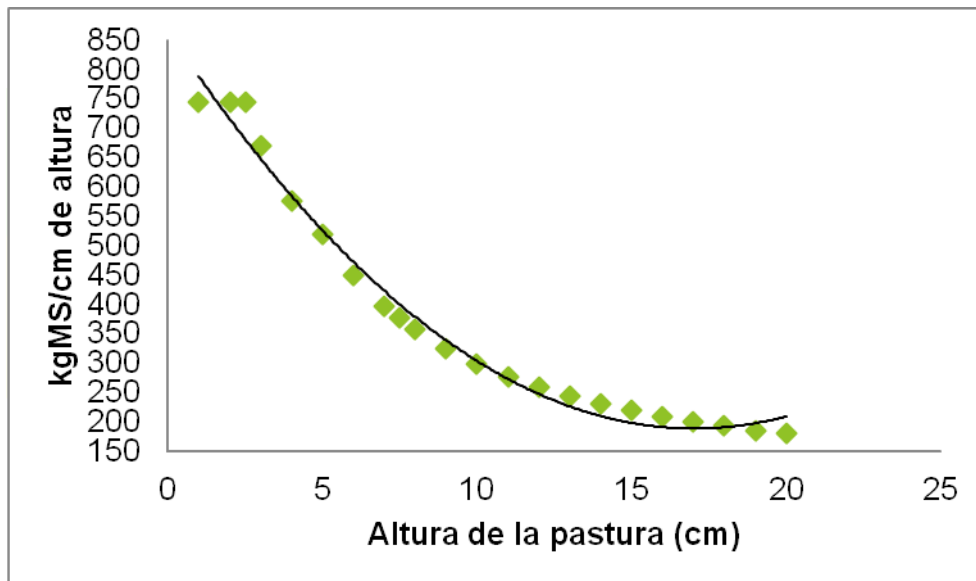


Figura 4. Variación de la densidad de la pastura (kgMS/cm) en función de la altura de la pastura.

La distribución que presentó mejor ajuste ( $R^2 = 0,98$ ) se correspondió a un modelo polinómico, siendo la ecuación de regresión la siguiente:

$$y = 2,3347x^2 - 79,495x + 865,5 \quad (1)$$

siendo,

$y$  = variable aleatoria dependiente (kgMS/cm de altura)

$x$  = variable aleatoria independiente (altura de la pastura)

En la figura 4 se puede observar que, a medida que aumenta la altura de la pastura, disminuye la densidad de esta por cm de altura.

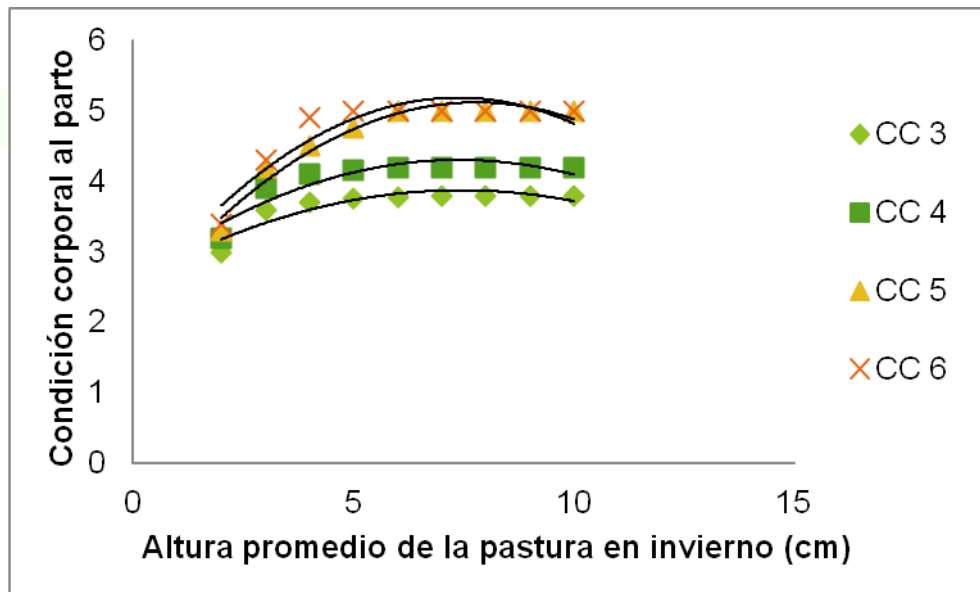
## 6.2. CAMBIOS EN EL CONSUMO DE MATERIA SECA DE PASTURA SEGÚN ESTADO FISIOLÓGICO

Como se mencionó en el ítem 2.2, el consumo se ve afectado en forma directa por la heterogeneidad vertical de la pastura, siendo este, a su vez, denso-dependiente (condicionado por la altura de la pastura) (Hodgson et

al., 1997). Otro factor que afecta el consumo de forraje en pastoreo (CFP) es el estado fisiológico de las vacas de cría. Luego de una exhausta revisión bibliográfica, en el modelo desarrollado en el presente trabajo se aplica un factor de corrección del coeficiente C por 1,3 (aumento de un 30 %) en verano debido al aumento del consumo a causa de la lactación Minson (1990).

### 6.3. CONDICIÓN CORPORAL DEL GANADO DE CRÍA Y DESEMPEÑO REPRODUCTIVO

Otro de los objetivos de este trabajo es encontrar una función de respuesta que involucre la condición corporal (CC) de las vacas de cría con el desempeño reproductivo en la próxima estación de cría. En Uruguay, existe abundante información con resultados consistentes (desempeño de los rodeos de cría en Uruguay entre los años 1986 y 1990, Orcasberro et al., 1991) y se sabe que la CC al parto es un factor determinante para predecir el desempeño reproductivo de las vacas en la siguiente estación de cría (Orcasberro et al., 1991). En el presente trabajo se obtuvieron, con base en la información de Orcasberro et al. (1991), quienes estudiaron la CC al parto de vacas en función de la CC al inicio del invierno ante diferentes alturas de pasto promedio del invierno, ecuaciones de predicción de la CC al parto. En la figura 5 se presenta la CC al parto en función de la altura promedio de la pastura en invierno y de la CC al inicio del invierno.



Adaptado de Orcasberro (1991)

Figura 5. Condición corporal al parto en función de la condición corporal de las vacas al inicio del invierno y la altura promedio de la pastura en invierno.

Para todas las situaciones de CC al inicio del invierno se ajustó un modelo polinómico de segundo grado resultando en las siguientes ecuaciones:

$$\text{CC 3: } y = -0,0234x^2 + 0,3487x + 2,5771 \quad (2)$$

$$\text{CC 4: } y = -0,0308x^2 + 0,4553x + 2,6207 \quad (3)$$

$$\text{CC 5: } y = -0,0486x^2 + 0,7579x + 2,1669 \quad (4)$$

$$\text{CC 6: } y = -0,0529x^2 + 0,7801x + 2,311 \quad (5)$$

donde, para cada CC al inicio del invierno,

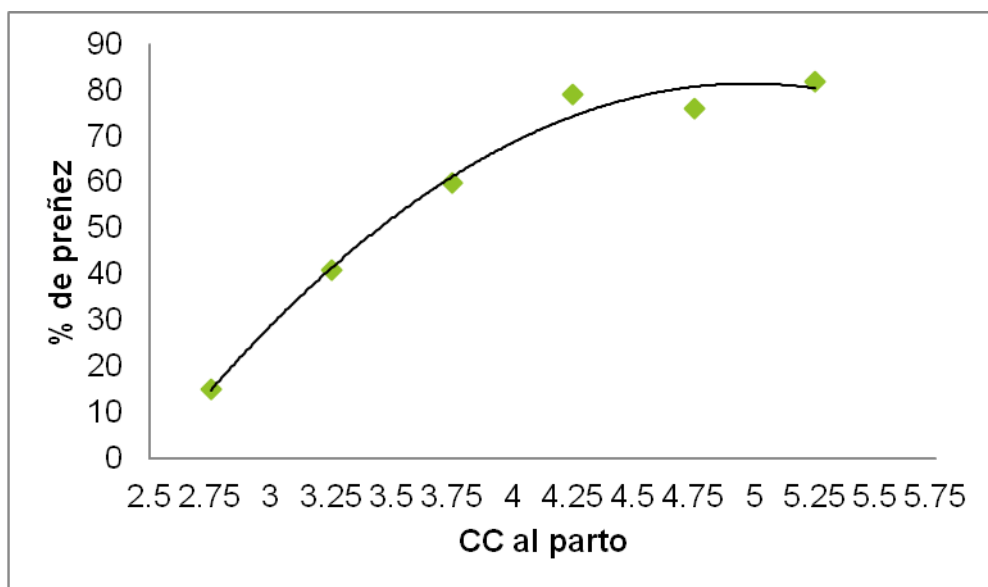
$y$  = variable aleatoria dependiente (CC al parto)

$x$  = variable aleatoria independiente (altura promedio de la pastura en invierno)



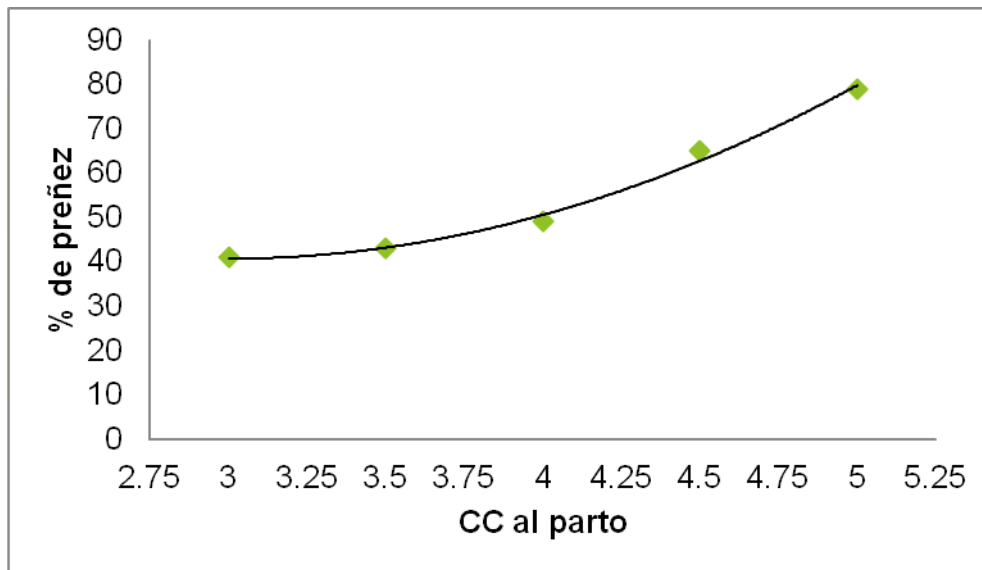
Estas ecuaciones de regresión responden dentro de los rangos de CC de las vacas al inicio del invierno entre 3-6 puntos y 2-10 cm de altura promedio de la pastura en invierno.

En las figuras 5 y 6 se presentan las relaciones existentes entre la CC de las vacas multíparas y primíparas (respectivamente) al parto y el desempeño reproductivo de las vacas en la siguiente estación de cría (Orcasberro et al., 1991).



Adaptado de Orcasberro (1991)

Figura 6. Desempeño reproductivo de vacas multíparas en función de la CC de las vacas al parto.



Adaptado de Orcasberro (1991)

Figura 7. Desempeño reproductivo de vacas primíparas en función de la CC de las vacas al parto.

En ambas situaciones se ajustó un modelo polinómico de segundo grado con un ajuste de 0,99, siendo las ecuaciones de regresión las siguientes:

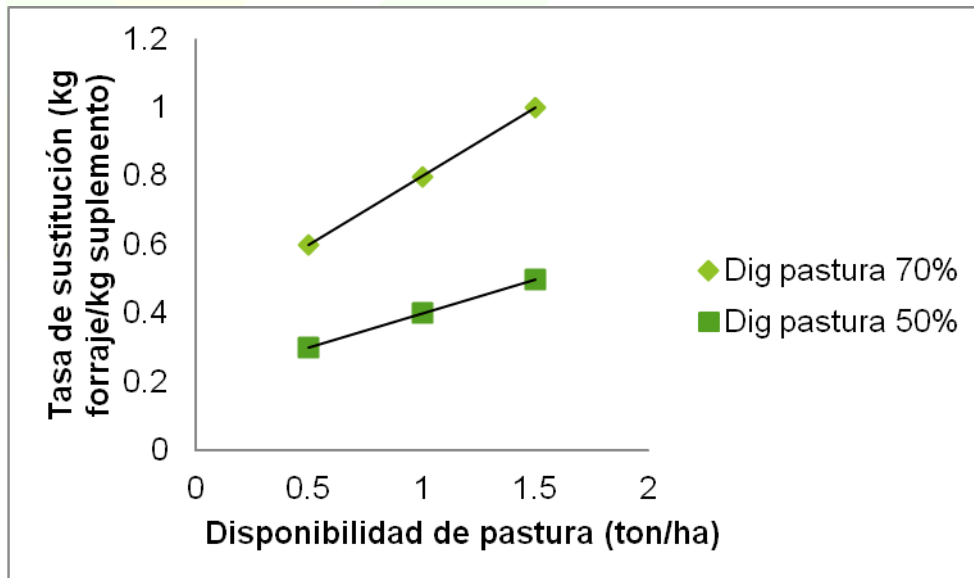
$$\text{Vacas múltiparas: } y = -13,429x^2 + 133,66x - 251,15 \quad (6)$$

$$\text{Vacas primíparas: } y = 9,7143x^2 - 58,114x + 127,57 \quad (7)$$

#### 6.4. TASA DE SUSTITUCIÓN DE PASTURA POR SUPLEMENTO SOBRE CAMPO NATURAL

Para incluir la relación que existe entre el consumo de suplemento y pastura cuando coexisten en los sistemas ganaderos, se utilizó la función de respuesta resultante de los datos aportados por AFS (1994) presentados en el cuadro 1. En la figura 8 se muestra la tasa de sustitución resultante de la combinación de diferentes disponibilidades y digestibilidades de la pastura. El supuesto que asume esta relación es que el animal consume el

suplemento (80 % de digestibilidad) antes que la pastura de igual o inferior digestibilidad.



Adaptado de AFS (1994)

Figura 8. Tasa de sustitución en función de la disponibilidad de la pastura para dos digestibilidades de pastura.

Las ecuaciones de regresión resultantes de dicha relación son las siguientes:

$$\text{Dig. pastura 70 \%} = 0,4x + 0,4 \quad (8)$$

$$\text{Dig. pastura 50 \%} = 0,2x + 0,2 \quad (9)$$

Para ambas digestibilidades, la tasa de sustitución de pastura por suplemento aumenta a medida que aumenta la disponibilidad de forraje. También se observa una mayor tasa de sustitución en pasturas de mayor digestibilidad ante variadas disponibilidades de forraje.

## 6.5. INDICADORES DEL DESEMPEÑO DEL MODELO

Para evaluar la bondad de ajuste del modelo a datos observados de altura de la pastura (cm) y peso de los animales (kg), se probaron indicadores como error del sesgo medio (*mean bias error*, MBE), error del sesgo absoluto relativo (*relative absolute bias error*, MBE %), raíz del error cuadrado medio (*root mean square error*, RMSE), raíz del error cuadrado medio relativo (*relative root mean square error*, RRMSE %), error cuadrático medio normalizado (*normalized root mean square error*, NRMSE), coeficiente de determinación de Pearson ( $R^2$ ), coeficiente de eficiencia modificado (E1) y el índice de acuerdo modificado (d1).

$$MBE = 1/n \sum_{i=1}^n Y_{obs} - Y_{est}$$

$$MBE\% = 1/n \sum_{i=1}^n ((|Y_{obs} - Y_{est}|) / Y_{obs}) * 100$$

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n [Y_{obs} - Y_{est}]^2}$$

$$RRMSE \% = (RMSE / media_{obs}) * 100$$

$$NRMSE (\%) = (RMSE / delta_{obs}) * 100$$

$$E1 = 1 - ((\sum_{i=1}^n [Y_{obs} - Y_{est}]) / ((\sum_{i=1}^n [Y_{obs} - Y_{est\ prom}])))$$

$$d1 = ((\sum_{i=1}^n [Y_{obs} - Y_{est}]) / ((\sum_{i=1}^n ([Y_{est} - Y_{est\ prom}] + ([Y_{est} + Y_{est\ prom}])))$$

Los indicadores que se utilizaron para ver el ajuste del modelo fueron *NRMSE%*, *E1* y *d1*. Qi et al. (2017) mencionan que cuando el indicador *NRMSE%* es  $\leq 10\%$ ,  $10\% < NRMSE\% \leq 20\%$ ,  $20\% < NRMSE\% \leq 30\%$  y  $NRMSE\% > 30\%$ , el desempeño del modelo es excelente, muy bueno, bueno o pobre, respectivamente. Por otro lado, el indicador *E1* descrito por Legates y McCabe (1999) puede tomar valores de menos infinito a 1, presentando el modelo mejor ajuste cuanto más cercano a 1 sea el indicador. Finalmente, el indicador *d1* toma valores más acotados que *E1*

(entre 0 y 1), presentando el modelo mejor ajuste cuando los valores se encuentran cercano a 1 (Legates y McCabe, 1999).

## 6.6. BASE DE DATOS UTILIZADA

Para estudiar el ajuste del modelo en la categoría vacas de cría, se utilizó la base de datos de Do Carmo et al. (sin publicar). Esta presenta, para una serie de años (2018-2019) y dos ofertas de forraje contrastantes, la altura de la pastura y el peso de los animales de forma mensual, para un campo natural de la región este del país. Por otro lado, para la categoría de recría se utilizó la base de datos de Rodriguez et al. (sin publicar), en donde se cuenta con información (2018-2021) de peso vivo y altura de la pastura de forma mensual para un campo natural de la zona de basalto. La descripción de las bases de datos se presentan en el anexo 2.

## 7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se presentan los principales resultados obtenidos en el estudio de los parámetros que se pretende modificar del modelo en estudio, como lo son la heterogeneidad vertical de la pastura, la evolución de la condición corporal de las vacas de cría y su desempeño reproductivo y la relación existente entre consumo de suplemento y pastura cuando estas coexisten en los sistemas ganaderos. Finalmente, se realizó la validación del modelo modificado con una base de datos para la categoría de recría y otra base de datos para la categoría de vacas de cría.

### 7.1. EFECTO DE LA HETEROGENEIDAD DE LA PASTURA EN EL MODELO

En el modelo desarrollado por Dieguez y Fort (2017), la densidad de materia seca de pastura (kgMS) por cm de altura es una constante. En el presente trabajo se planteó como un objetivo que dicho parámetro variara en función

de la altura de la pastura (García, 1995). En la sección 6.1.2 se pueden visualizar los valores de densidad de la pastura (kgMS) por centímetro según la altura de esta.

En el modelo desarrollado, el parámetro densidad de pastura (kgMS/cm) condiciona el valor que toman los parámetros coeficiente C y beta. En la figura 8 se presenta la variación del coeficiente C en función de la densidad de la pastura para dos alturas de pasto inicial (5 y 10 cm) para cada estación del año, mientras que en la figura 9 se presenta dicha relación de forma estacional para cada altura de pasto inicial.

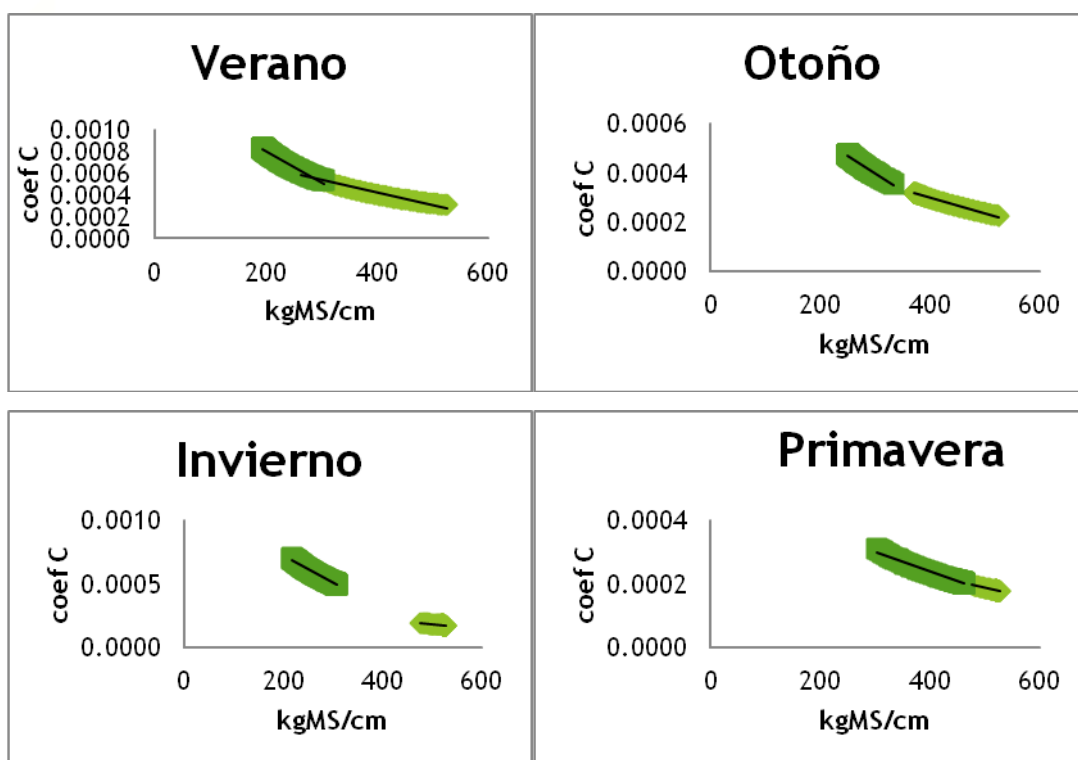


Figura 8. Coeficiente C en función de la densidad de la pastura (kgMS/cm) para dos alturas de pasto inicial (5 cm línea verde claro, 10 cm línea verde oscuro) para cada estación del año (simulaciones obtenidas en base a la salida del modelo).

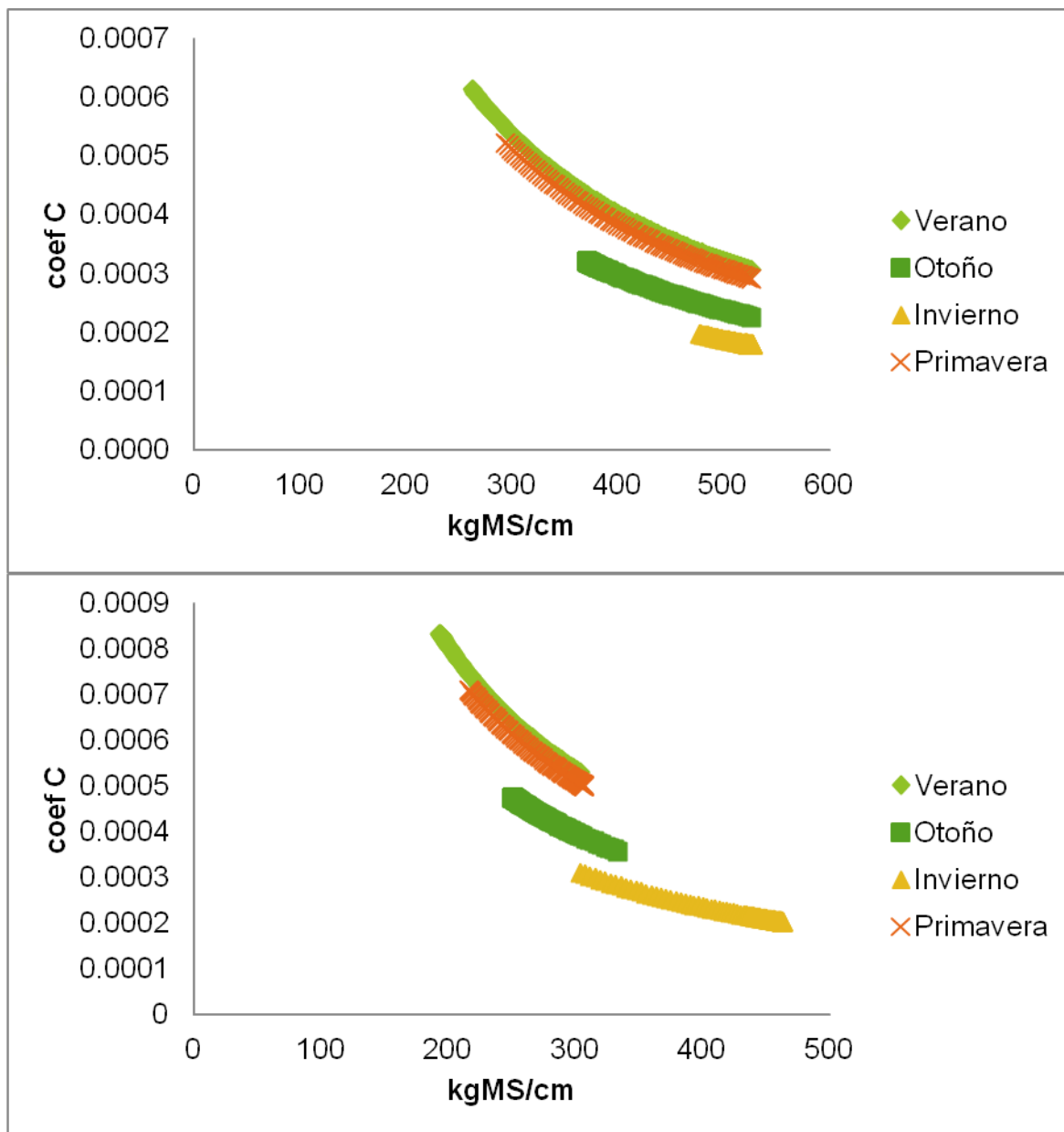


Figura 9. Coeficiente C en función de la densidad de la pastura (kgMS/cm) de forma estacional según altura inicial de la pastura (5 cm, superior y 10 cm, inferior) (simulaciones obtenidas en base a la salida del modelo).

Como se puede observar en las figuras 8 y 9, el coeficiente C disminuye al aumentar la densidad de la pastura, explicado principalmente por la disminución de la altura de la pastura. Estos resultados concuerdan con Mezzalira et al. (2014), quienes reportaron que al aumentar la altura de la

pastura, aumenta el peso de bocado. Los valores más altos de coeficiente C se encuentran en la estación de verano, ya que las simulaciones fueron realizadas para la categoría vacas de cría, quienes, en dicha estación, se encuentran en su período de lactación, cuando los requerimientos de consumo aumentan un 30 %. En las cuatro estaciones del año, el coeficiente C demostró ser más sensible cuando la altura inicial de la pastura fue 10 cm, ya que, al presentar desde el inicio una mayor altura de pasto, la densidad de la pastura fue menor y menos variable por centímetro de altura. Estos resultados son coherentes con lo que sucede en la realidad, ya que a mayores alturas de pasto, el animal presenta mayor oportunidad de cosechar pesos de bocados más altos, lo que resulta en un mayor consumo animal (Mezzalira et al., 2014). Cuando se analiza la variación del coeficiente C de forma estacional para una altura determinada, se puede visualizar que, para ambas alturas de pasto inicial, en verano y primavera es cuando el coeficiente C es mayor, lo que resulta en un mayor consumo. Esto es explicado porque es en primavera y verano cuando los animales presentan mayores ganancias de peso vivo, lo cual se encuentra en el numerador de la ecuación para el cálculo de coeficiente C. De todas maneras, es de esperar que, en estas estaciones, la pastura presente mayor tasa de crecimiento y, por ende, mayor capacidad de consumo y ganancia media diaria de los animales.

Otro parámetro en que la densidad de la pastura está involucrada de forma directa es en el beta. Al ser el parámetro beta de un producto de factores (en el que participa la densidad de la pastura), la relación es lineal con la densidad de la pastura. Esto resulta en que a mayores densidades (que se corresponden a menores alturas de forraje), el parámetro beta es mayor. Esta relación presenta cierta coherencia con la realidad, ya que es de esperar que a menores alturas de forraje exista mayor proporción de hojas verdes fotosintéticamente activas y los bocados que cosechen los animales



presenten alta digestibilidad, lo que resulta en una mejor eficiencia de conversión del alimento en kg de PV animal.

## 7.2. EVOLUCIÓN DE LA CONDICIÓN CORPORAL DEL GANADO Y DESEMPEÑO REPRODUCTIVO

Para estudiar el comportamiento del modelo relacionado al desempeño reproductivo, se realizaron simulaciones con tres alturas de pasto a inicio de invierno (2, 4 y 6 cm), tres condiciones corporales (3, 4 y 5) y dos cargas (0,5 y 1 cab/ha) para vacas multíparas y primíparas. En las figuras 10 y 11 se presentan para 0,5 cab/ha los resultados de preñez en función de la condición corporal para tres alturas de pasto a inicio de invierno para vacas multíparas y primíparas, respectivamente.

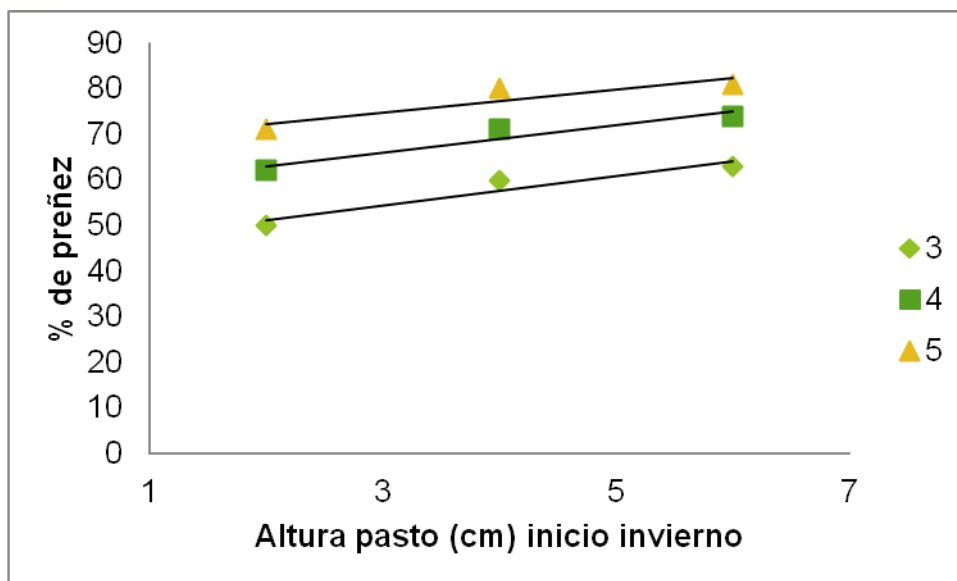


Figura 10. Preñez de vacas multíparas en función de la altura de la pastura a inicio del invierno para tres condiciones corporales al inicio de invierno (3, 4 y 5) y 0,5 cab/ha (simulaciones obtenidas en base a la salida del modelo).

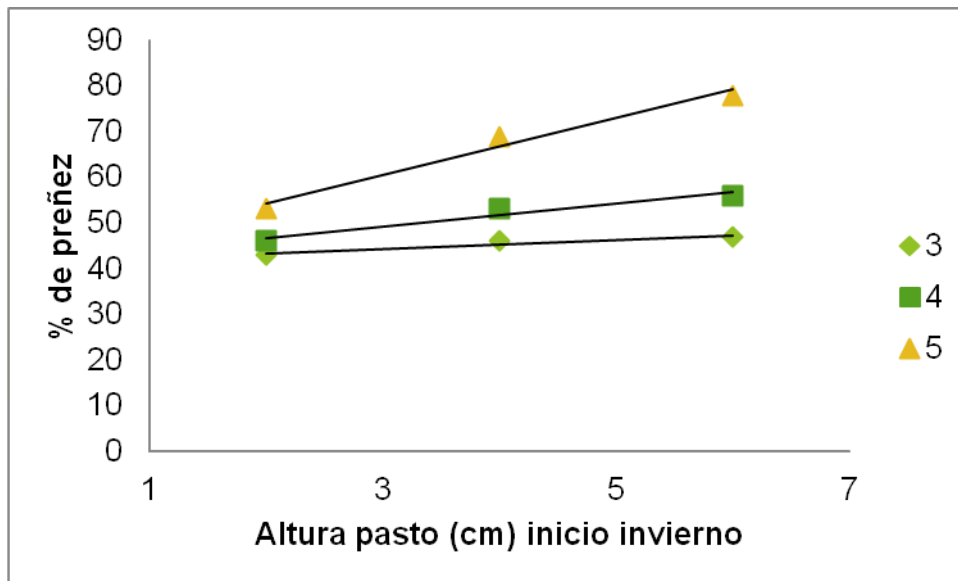


Figura 11. Preñez de vacas primíparas en función de la altura de la pastura a inicio del invierno para tres condiciones corporales al inicio de invierno (3, 4 y 5) y 0,5 cab/ha.

Para ambas categorías se observa que a mayor condición corporal y altura de pasto a inicio del invierno, mayor es el porcentaje de preñez en la siguiente estación de cría. Sin embargo, en vacas primíparas, el incremento de preñez al aumentar la altura de pasto es de mayor magnitud cuando la condición corporal a inicio del invierno es de 5. Además, cuando la condición corporal al inicio del invierno es menor a 5 puntos, el resultado de preñez es poco sensible a la altura de la pastura a inicio del invierno. Estos resultados son coherentes, ya que esta categoría requiere mayor condición corporal al parto (y, por ende, a inicio del invierno) para presentar buen desempeño reproductivo en la siguiente estación de cría debido a que las vacas, además de estar lactando, aún continúan incrementando su tamaño corporal, por lo que la energía disponible para destinar al reinicio de la actividad sexual (luego del parto) es menor (Short et al., 1990).

### 7.3. EVOLUCIÓN DE LA ALTURA DE LA PASTURA EN SITUACIONES DE SUPLEMENTACIÓN

Se realizaron simulaciones del modelo en tres niveles de suplementación (0, 0,5 y 1 % del PV) y tres alturas de forraje (2, 6 y 10 cm) a inicio de la estación de invierno en la categoría de terneros/as de 180 kg a una carga de un animal por hectárea. En el cuadro 7 se presenta el comportamiento de la altura de la pastura promedio de la estación de invierno con diferentes niveles de suplementación.

Cuadro 7. Altura de la pastura promedio (cm) de la estación de invierno con tres niveles de suplementación (0, 0,5 y 1 % del PV) y tres alturas iniciales (2, 6 y 10 cm) pastoreada con terneros/as (simulaciones obtenidas en base a la salida del modelo).

Nivel de suplementación (% PV)	0			0,5			1		
Altura pastura inicio (cm)	2	6	10	2	6	10	2	6	10
Altura promedio estación (cm)	3,2	5,9	7,3	3,2	5,9	7,3	3,2	5,9	7,3

Como se puede observar en el cuadro 7, el modelo no es capaz de mostrar diferencias en altura de la pastura promedio de la estación ante diferentes niveles de suplementación y altura de la pastura al inicio de la estación de invierno. Estos resultados no concuerdan con los presentados por Claramunt y Rodríguez Palma (2015), que mencionan diferentes respuestas en el consumo de pastura ante diferentes ofertas de forraje y suplemento.

## 7.4. VALIDACIÓN DEL MODELO

Como ya se mencionó en el ítem 6.5, las bases de datos utilizadas para validar el modelo fueron las de Do Carmo et al. y Rodriguez et al. para vacas de cría y recria, respectivamente.

Las bases de datos utilizadas para validar el modelo no fueron elaboradas con este objetivo, por lo que presentan algunas limitantes para lograrlo. Sin embargo, fueron utilizadas porque fue la información nacional que se logró obtener con las variables y calidad de datos necesarias (altura de la pastura y peso vivo de los animales registrados, como mínimo, una vez por estación del año, en campo natural).

Para validar el modelo en la categoría vacas de cría, se utilizó la base de datos generada por Do Carmo et al. (sin publicar). Esta presenta para dos ofertas de forraje (alta y baja), la altura de la pastura y el peso de los animales de forma mensual. En las figuras 12 y 13 se presentan gráficamente, para ambas ofertas de forraje, el ajuste de las salidas del modelo a los datos observados para la altura y peso, respectivamente.

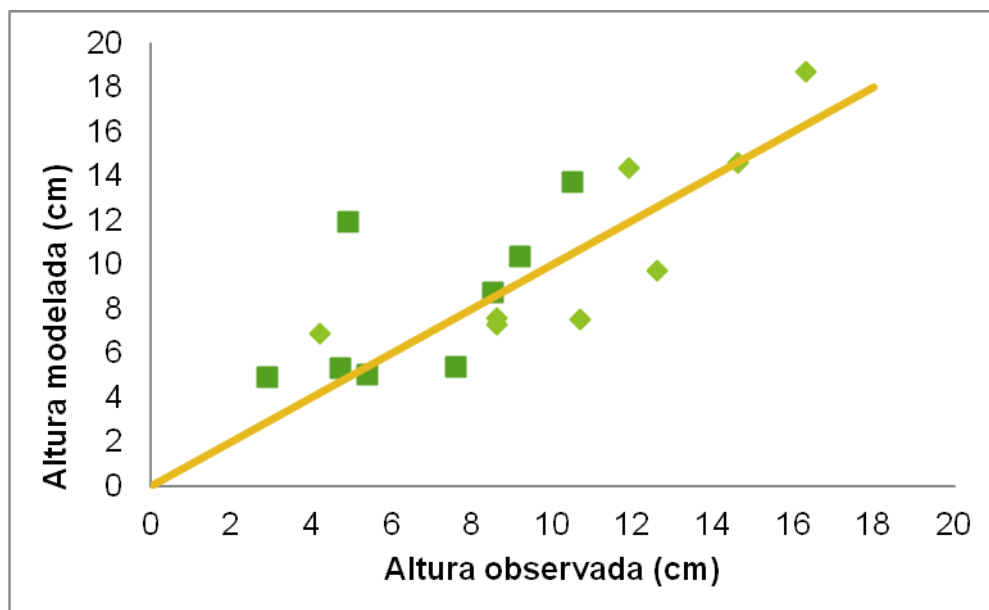


Figura 12. Ajuste del modelo para la característica altura a los datos observados (cuadrados: baja oferta de forraje; rombos: alta oferta de forraje; línea verde: igualdad)

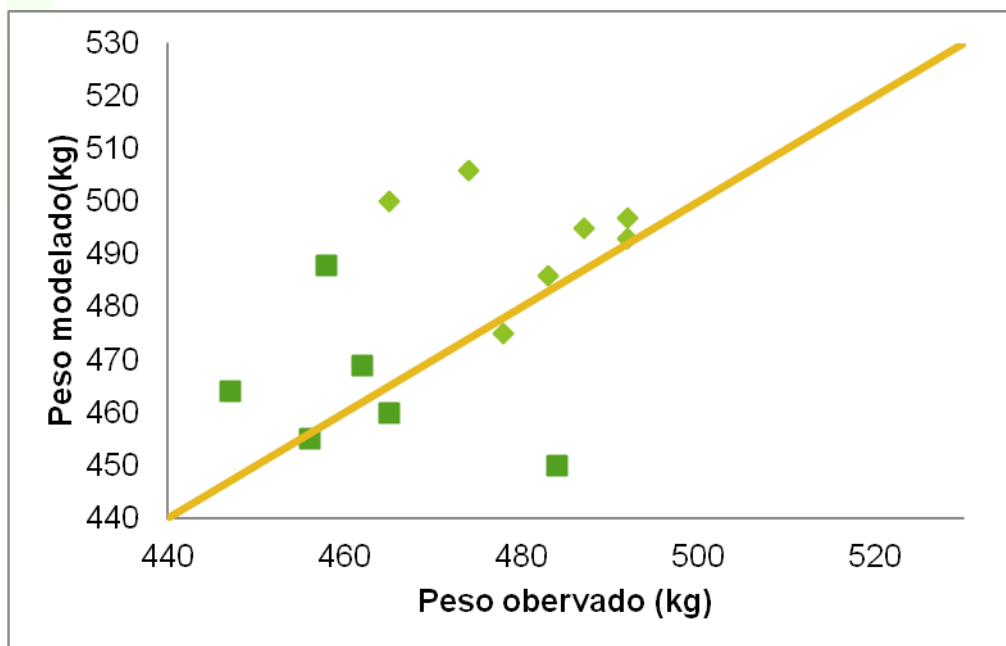


Figura 13. Ajuste del modelo para la característica peso a los datos observados (cuadrados: baja oferta de forraje; rombos: alta oferta de forraje; línea verde: igualdad)

En el cuadro 8 se presentan los indicadores de bondad de ajuste que se utilizaron para validar el modelo.

Cuadro 8. Indicadores de bondad de ajuste del modelo utilizados en vacas de cría.

	Altura		Peso	
	Alta	Baja	Alta	Baja
<b><i>NRMSE %</i></b>	18,50	39,07	44,01	40,91
<b><i>E1</i></b>	0,32	0,05	-0,16	-0,57
<b><i>d1</i></b>	0,52	0,46	0,46	0,08

Como se observan en las figuras 12 y 13 y en el cuadro 8, el modelo presentó un ajuste pobre para la característica peso vivo de las vacas de cría para ninguna oferta de forraje. Los coeficientes *NRMSE* %, *E1* y *d1* presentan valores de 44,01, -0,16 y 0,46 para alta oferta de forraje, respectivamente, mientras que para baja oferta de forraje presentan valores de 40,91, -0,57 y 0,08, respectivamente. Una posible causa del nulo ajuste que presenta el modelo para esta característica es que predecir la evolución del peso vivo de vacas de cría no es sencillo para un modelo de extensión (requieren pocos datos de entrada del modelo), ya que esta categoría presenta cambios bruscos en el peso vivo debido a su estado fisiológico (gestación y parto), los cuales no son contemplados en el modelo.

Por otro lado, para la característica altura de la pastura, el modelo presenta un mejor ajuste para alta oferta de forraje, siendo el *NRMSE* % de 18,5 %, lo que determina un muy buen ajuste, mientras que los indicadores *E1* y *d1* indican un ajuste medio. En baja oferta de forraje, el modelo sobreestima la altura del forraje, siendo el *NRMSE* %, *E1* y *d1* de 39,07 %, 0,05 y 0,46, respectivamente, indicando estos un pobre ajuste del modelo

Para validar el modelo en la categoría recria, se utilizó la base de datos generada por Rodriguez et al. Se cuenta con información de tres años de evaluación y las variables de interés registradas fueron altura de la pastura y peso vivo de los animales, tomada mensualmente.

En las figuras 14 a 19 se presenta el ajuste de los datos simulados en relación con los observados para altura de la pastura y peso vivo de los animales para los tres últimos años, respectivamente.

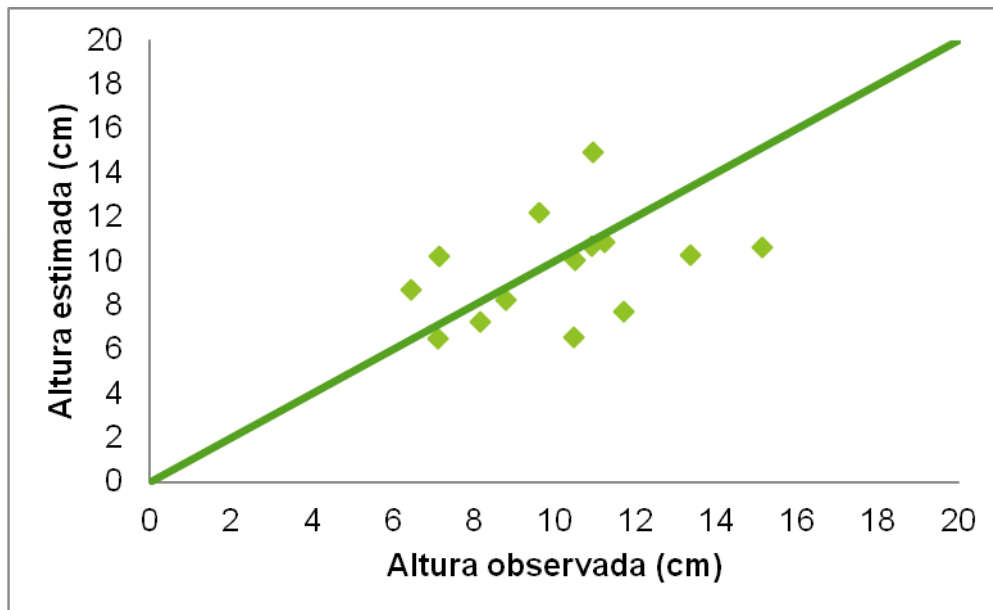


Figura 14. Ajuste del modelo a los datos observados de altura de la pastura para el año 2018/19.

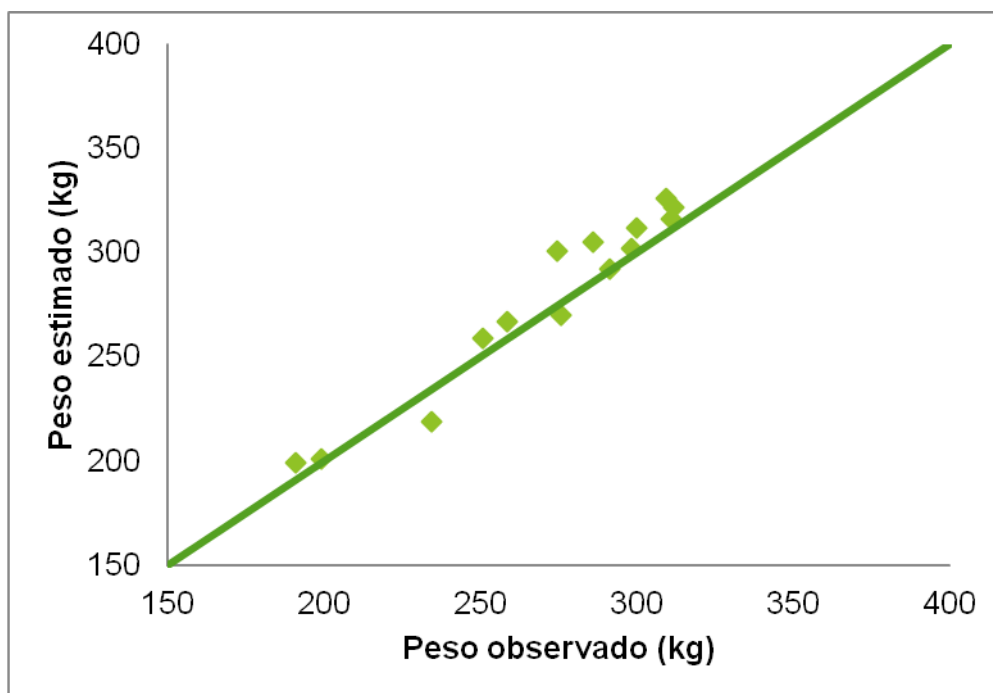


Figura 15. Ajuste del modelo a los datos observados de peso vivo de los animales para el año 2018/19.

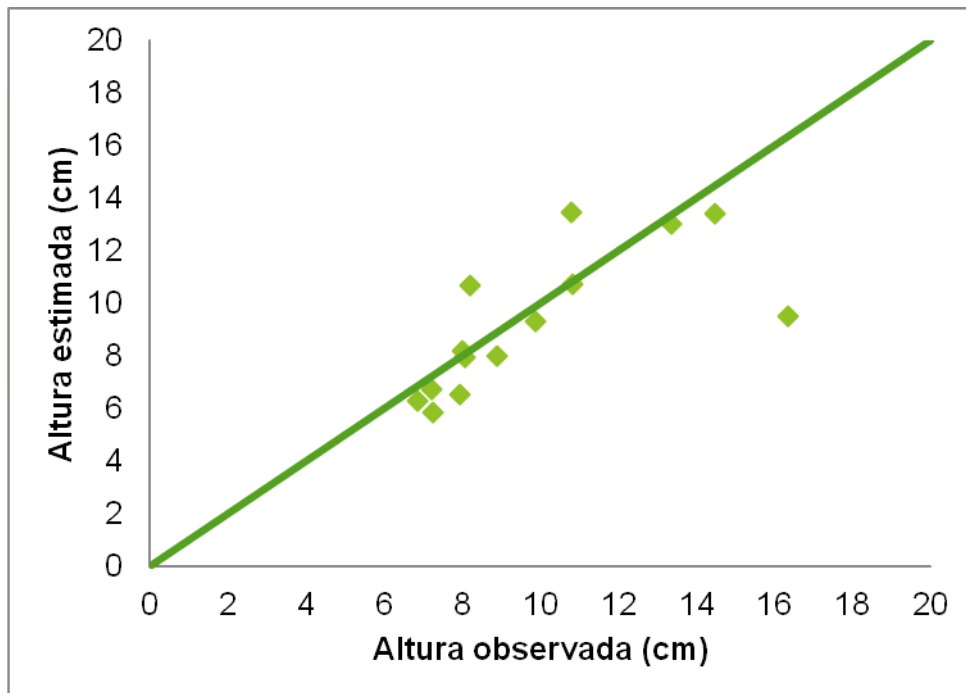


Figura 16. Ajuste del modelo a los datos observados de altura de la pastura para el año 2019/20.

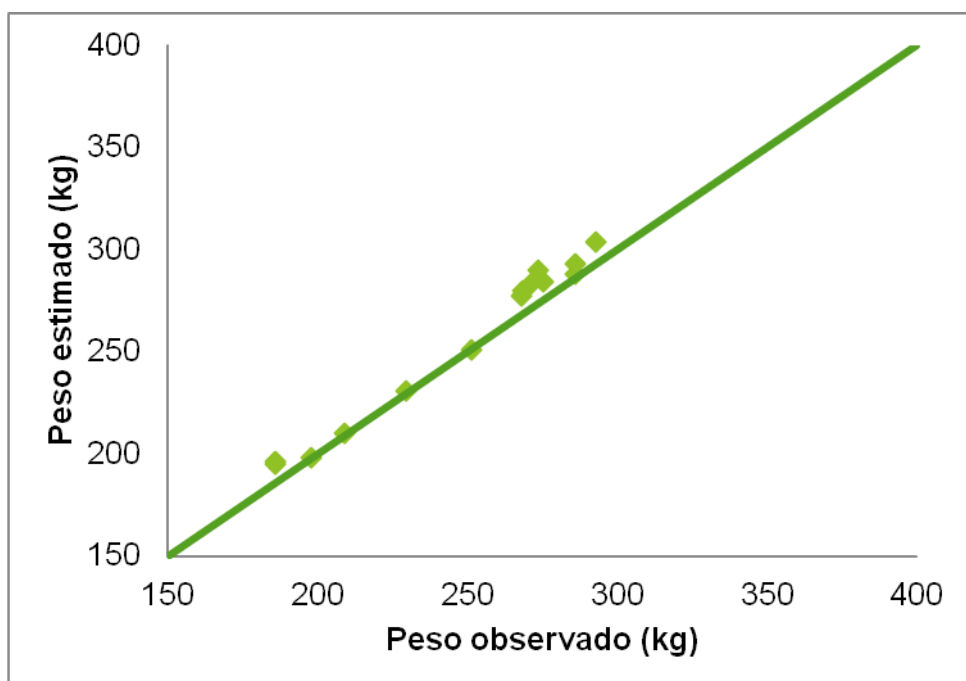


Figura 17. Ajuste del modelo a los datos observados de peso vivo de los animales para el año 2019/20.



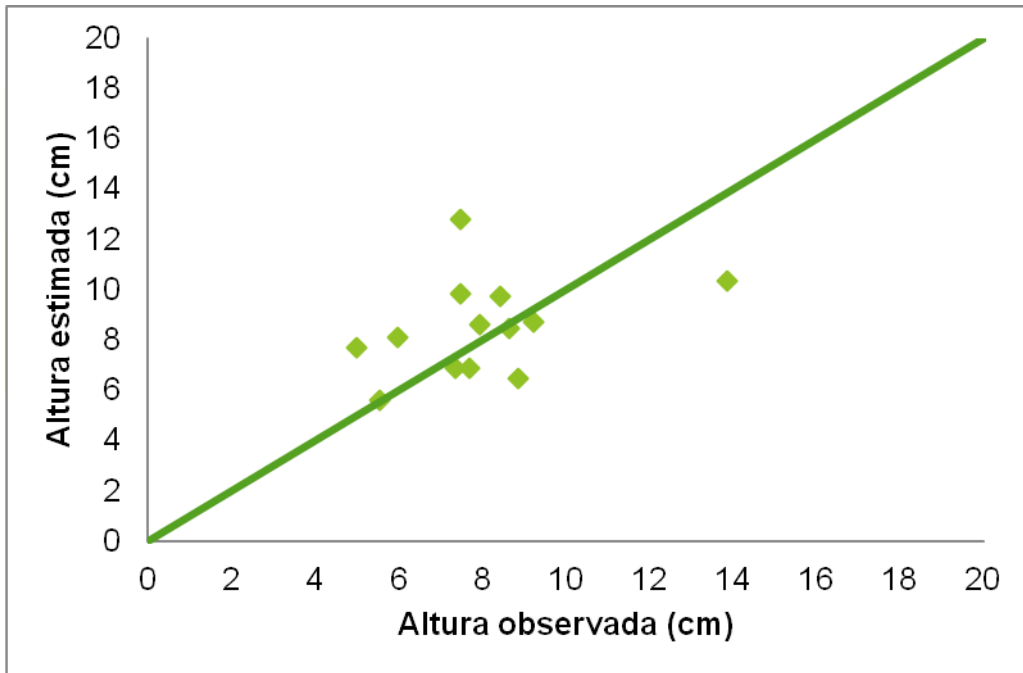


Figura 18. Ajuste del modelo a los datos observados de altura de la pastura para el año 2020/21.

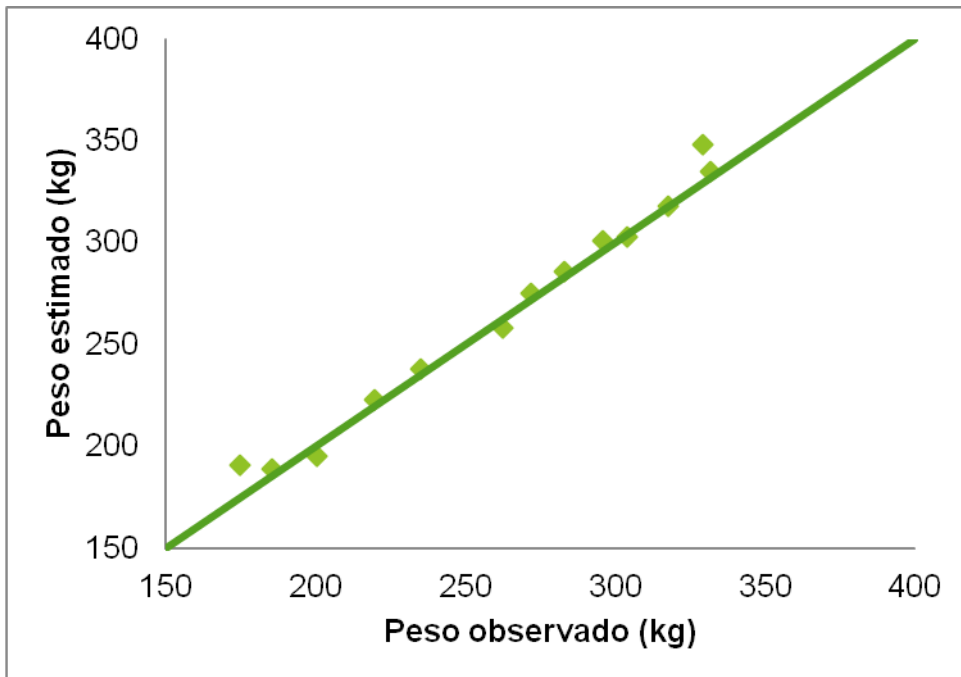


Figura 19. Ajuste del modelo a los datos observados de peso vivo de los animales para el año 2020/21.

En el cuadro 9 se presentan los indicadores de bondad de ajuste que se utilizaron para validar el modelo.

Cuadro 9. Indicadores de bondad de ajuste del modelo utilizados en recría.

	Altura			Peso		
	2018/19	2019/20	2020/21	2018/19	2019/20	2020/21
<b><i>NRMSE %</i></b>	30,87	23,00	25,59	10,19	8,15	4,88
<b><i>E1</i></b>	-0,15	0,42	-0,21	0,68	0,79	0,88
<b><i>d1</i></b>	0,05	0,42	0,85	0,79	0,80	0,85

Como se puede observar en las figuras 14 a 19 y el cuadro 9, el peso vivo de la recría presentó un excelente ajuste a los datos observados con un *NRMSE %* de 10,19, 8,15 y 4,88 para primer, segundo y tercer período, respectivamente, mientras que los estimadores *E1* y *d1* fueron 0,68, 0,79 y 0,88 y 0,79, 0,80 y 0,85 para primer, segundo y tercer ciclo, respectivamente. Por otro lado, para la variable altura de la pastura, el ajuste del modelo fue pobre a bueno, con un *NRMSE %* de 30,87, 23 y 25,59 para el primer, segundo y tercer año, respectivamente, presentando los estimadores *E1* y *d1* similar tendencia (excepto *d1* en el último período).

Para determinar si las modificaciones que se realizaron en este trabajo al modelo original de PPGL (Dieguez y Fort, 2017) cumplieron el objetivo de lograr un modelo que se ajuste mejor a la realidad de los sistemas ganaderos en basalto, se realizaron simulaciones del modelo PPGL con la base de datos utilizada para validar el modelo desarrollado en el presente trabajo. En los cuadros 10 y 11 se presentan los indicadores de ajuste del modelo PPGL a los datos observados por Do Carmo et al. (sin publicar) y Rodriguez et al.(sin publicar), respectivamente.

Cuadro 10. Indicadores de bondad de ajuste del modelo utilizados en vacas de cría para el modelo PPGL

	Altura		Peso	
	Alta	Baja	Alta	Baja
<b><i>NRMSE %</i></b>	20,09	38,56	54,01	44,30
<b><i>E1</i></b>	0,24	0,07	-0,72	-0,83
<b><i>d1</i></b>	0,49	0,46	0,37	0,00

Cuadro 11. Indicadores de bondad de ajuste del modelo utilizados en recría para el modelo PPGL.

	Altura			Peso		
	2018/19	2019/20	2020/21	2018/19	2019/20	2020/21
<b><i>NRMSE %</i></b>	33,20	28,19	30,01	8,38	7,94	5,51
<b><i>E1</i></b>	-0,25	0,13	-0,42	0,76	0,79	0,85
<b><i>d1</i></b>	-0,10	0,30	0,08	0,79	0,80	0,85

Al comparar los indicadores de ajuste de ambos modelos con los datos observados en la categoría vacas de cría, se puede apreciar que el modelo desarrollado mejora el ajuste para la variable peso vivo en alta oferta de forraje a pesar de que el ajuste sigue siendo pobre. En la categoría de recría, el modelo desarrollado presenta un mejor ajuste para la variable altura de la pastura, cambiando de criterio de *NRMSE %* de pobre a bueno en el tercer año. Para la variable peso vivo en recría, las modificaciones de este modelo no mejoran el ajuste con respecto al modelo original.

## 8. CONCLUSIONES

Se generó un nuevo modelo que pretende mejorar y levantar algunas limitantes que presenta el modelo desarrollado por Dieguez y Fort (2017). Se modificó el parámetro densidad de la pastura (kgMS/cm). Esta modificación trajo consigo modificaciones en otros parámetros, como lo son el coeficiente C y beta, que pasaron de ser constantes a variables en función de la densidad de la pastura. Además, el coeficiente C para la categoría vacas de cría aumenta un 30 % en la estación de verano debido al aumento en los requerimientos energéticos de dicha categoría como consecuencia del estado fisiológico en que se encuentran (lactación).

Para validar el modelo, se utilizaron datos aportados por la investigación nacional tanto para vacas de cría y categorías de recria, para ver el ajuste que presentaba dicho modelo a los datos observados.

Para la variable altura, en la categoría vacas de cría, el modelo desarrollado resultó un muy buen ajuste ( $10 \leq NRMSE \% \leq 20$ ) en alta oferta de forraje y un ajuste pobre ( $NRMSE \% \geq 30$ ) en baja oferta de forraje. Resultados similares de ajuste mostró el modelo PPGL para ambas ofertas de forraje. En las categorías de recria, ambos modelos lograron un ajuste bueno a pobre, dependiendo del año de evaluación, a pesar de tener un mejor ajuste el modelo desarrollado en el presente trabajo.

Para la variable peso vivo, la categoría de vacas de cría resultó un pobre ajuste en ambos modelos, explicado en parte por los cambios abruptos de peso vivo que presentan las vacas al momento del parto y lactación, los cuales no son contemplados en el modelo. En cambio, para las categorías de recria, ambos modelos lograron un excelente ajuste a los datos observados para los tres años de evaluación.

Es importante aclarar que las bases de datos utilizadas para validar el modelo no fueron desarrolladas para tal fin, siendo otros los objetivos de los

experimentos. Esto significa que no hay que afirmar que el modelo no es un buen predictor de la altura de la pastura, ya que, para ello, este debe ser evaluado con una base de datos desarrollada para tal fin.

Finalmente, y no menos importante, se agregó al modelo una función que sea capaz de predecir, para la categoría de vacas de cría, el resultado de preñez esperable en la próxima estación de cría según la altura de la pastura y la condición corporal de las vacas a inicio del invierno, tomando como referencia gran parte de la información desarrollada por la investigación nacional.

Para culminar, el modelo actual debería ser probado con bases de datos de pasturas y producción animal más amplias, así como también ajustar el parámetro densidad de la pastura con bases de datos de diferentes comunidades de campo natural y evaluar su desempeño.

## 9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allden WG, Whittaker IA. 1970. The Determinants of Herbage Intake by Grazing Sheep: The Interrelationship of Factors Influencing Herbage Intake and Availability. *Australian Journal of Agricultural Research*, 21 (5): 755–766. <https://doi.org/10.1071/AR9700755>.
- AFS (Australian Feeding Standard). 1994. Prediction of feed intake. 209-225
- ARC (Agricultural Research Council). 1980. The Nutrient Requirements of Ruminant Livestock. Farnham Royal, UK. 351p.
- Bartaburu D. 2011. Evaluación de una metodología de modelación y simulación participativa para contribuir a la comprensión y comunicación del fenómeno de la sequía y mejorar la capacidad de adaptación de productores ganaderos del Basalto. *FPTA (Fondo de Promoción de Tecnologías Agropecuarias)*, 286: 1-46.
- Bartaburu D, Duarte E, Montes E, Morales H, Pereira M. 2009. Las sequías : un evento que afecta la trayectoria de las empresas y su gente. En: Morales H, Dieguez F. (Eds.). *Familias y campo: Rescatando estrategias de adaptación*. Montevideo. Instituto Plan Agropecuario. 155–168.
- Baumont R, Prache S, Meuret M, Morand-Fehr P. 2000. How forage characteristics influence behaviour and intake in small ruminants: A review. *Livestock Production Science*, 64(1): 15–28. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(00\)00172-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(00)00172-X)
- Berretta EJ. 1998. Principales características climáticas y edáficas de la región de basalto en Uruguay. Seminario de actualización en tecnologías para basalto. Serie técnica 102. 8-15p.

- Burlison AJ, Hodgson J, Illius AW. 1991. Sward canopy structure and the bite dimensions and bite weight of grazing sheep. *Grass and Forage Science*, 46 (1), 29–38. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1991.tb02205.x>
- Cangiano CA. 1999. Evaluación de la pastura. En: Cangiano CA, Fernández HH, Galli JR (Eds.). *ConPast 3.0, Programa de computación para la estimación del consumo de bovinos en pastoreo*. Buenos Aires. 137-165.
- Carrère P, Flouault F, De Faccio Carvalho PC, Lafarge M, Soussana JF. 2001. How does the vertical and horizontal structure of a perennial ryegrass and white clover sward influence grazing?. *Grass and Forage Science*, 56 (2): 118–130. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2494.2001.00257.x>
- Claramunt M, Rodriguez R. 2015. Consultoría sobre actualización y mejora del Programa “Modelización de una Explotación Ganadera Extensiva (MEGanE).” Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca - Instituto Plan Agropecuario, 1: 96.
- CSIRO (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation). 2007. *Nutrient Requirements of Domesticated Ruminants*. Collingwood, Australia. 296p
- Da Trindade JK, Neves FP, Pinto CE, Bremm C, Mezzalira JC, Nadin LB, De Faccio Carvalho PC. 2016. Daily Forage Intake by Cattle on Natural Grassland: Response to Forage Allowance and Sward Structure. *Rangeland Ecology and Management*, 69 (1): 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2015.10.002>.
- De Barbieri LI, Rado FJ, Xalambri LE. 2000. Efecto de la carga y de la suplementación sobre la producción y calidad de carne de corderos

- pesados pastoreando avena byzantina en la región Este. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 153 p.
- De Boer RJ. 2021. Sigmoid functional response. En: De Boer RJ (Ed.) Biological Modeling of Populations. Utrecht: Utrecht University. 59-74.
- Dieguez F, Bommel P, Corral J, Bartaburu D, Pereira M., Montes E, Morales H. 2012. Modelización de una explotación ganadera extensiva criadora en basalto. *Agrociencia Uruguay*, 16 (2): 120–130.
- Dieguez F, Fort H. 2017. Towards scientifically based management of extensive livestock farming in terms of ecological predator-prey modeling. *Agricultural Systems*, 153: 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.021>.
- Erosa R, Mujica S, Simeone A. 1992. Efecto del manejo de la alimentación durante la gestación avanzada y del destete temporario al inicio del entore sobre la performance de vacas Hereford en campo natural. Tesis de Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 74 p.
- Fox DG, Sniffen CJ, Connor JD. 1988. Adjusting Nutrient Requirements of Beef Cattle for Animal and Environmental Variations. *Journal of Animal Science*, 66 (6): 1475–1495. <https://doi.org/10.2527/jas1988.6661475x>.
- Forbes JM. 1970. The voluntary food intake of pregnant and lactating ruminants: A review. *The British Veterinary Journal*, 126 (1): 1-11.
- Forbes, J.M., 1995. En: *Voluntary Food Intake and Diet Selection in Farm Animals*, CAB International, Wallingford, UK, p. 532.
- Forbes, J.M., 2007. Part II Mechanisms. En: Forbes, J.M. (Ed), *Voluntary Food Intake and Diet Selection in Farm Animals*, Second Edition CAB International, Wallingford, UK, p.41-187.
- Freer M, Moore A, Donnelly JR. 2010. The GRAZPLAN animal biology model for sheep and cattle and the GrazFeed decision support tool. , 1–47. 20



de Septiembre de 2022

<https://www.apsim.info/wpcontent/uploads/2019/09/TechPaperJan10.pdf>

García JA. 1995. Estructura del tapiz de praderas. Estructura del tapiz de praderas. Serie Técnica (66): 1-14.

Gibb M. 2006. Grassland Management With Emphasis on Grazing Behaviour. Fresh Herbage for Dairy Cattle, 18: 141–157. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5452-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5452-5_8)

Grattarola JLF, Hitateguy T, Mussio PA. 1993. Evaluación de un sistema de pastoreo sobre pasturas de cretácico. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Facultad de Agronomía. 204p.

Herd DB, Sprott LR. 1986. Body Condition, Nutrition and Reproduction of Beef Cows. Texas Agricultural Experimental Station, 1–12. 20 de Septiembre de 2022. <https://hdl.handle.net/1969.1/129135>.

Hodgson J. 1990. Grazing management: science into practice. Harlow, UK. 203 p.

Hodgson J, Cosgrove GP, Woodward SJR .1997. Research on foraging behavior: progress and priorities. En: Buchanan-Smith JC, Bails L, McCaughev P (Eds.). Proceedings of the 18th international grassland congress, Calagary, Canada. 109–118.

Holling CS. 1959. The Components of Predation as Revealed by a Study of Small Mammal Predation of the European Pine Sawfly. The Canadian Entomologist, 91(5): 293–320.

Illius AW, Jessop NS. 1996. Metabolic Constraints on Voluntary Intake in Ruminants. Journal of Animal Science, 74 (12): 3052–3062. [10.2527/1996.74123052x](https://doi.org/10.2527/1996.74123052x).

- Ingvartsen KL , Refsgaard H, Foldager J. 1992. Effect of Sex and Pregnancy on Feed Intake Capacity of Growing Cattle, *Acta Agriculturae Scandinavica, Section A — Animal Science*, 42 (1): 40-46. 10.1080/09064709209410107
- Jarrige R, Dulphy JP, Faverdin P, Baumont R, Demarquilly C. 1995. Activites d'ingestion et de rumination. En: Jarrige R, Ruckebusch Y, Demarquilly C, Farce MH, Journet M. (Eds.), *Nutrition des Ruminants Domestiques*, Paris, 123–181.
- Laca EA, Ungart ED, Seligman N, Demment M. 1993. Effects of sward height and bulk density on bite dimensions of cattle grazing homogeneous sward. *Grass and Forage Science*, 47: 91–102.
- Lange A. 1980. Suplementación de pasturas para la producción de carnes. Colección Investigación aplicada. 2ª Edición AACREA. Buenos Aires, Argentina. 74 p.
- Legates DR, McCabe GJ. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, 35(1): 233–241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>.
- Mezzalana JC, De Faccio Carvalho PC, Fonseca L, Bremm C, Cangiano C, Gonda HL, Laca EA. 2014. Behavioural mechanisms of intake rate by heifers grazing swards of contrasting structures. *Applied Animal Behaviour Science*, 153: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2013.12.014>.
- Mendez J, Vizcarra J, Orcasberro R. 1988. Condición por apreciación visual en vacas Hereford. *Revista Plan Agropecuario*. 44: 33-34.
- MGAP-DIEA (Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca - Dirección de Estadísticas Agropecuarias). 2011. Censo General Agropecuario, Resultados definitivos. Montevideo, Uruguay. 146p

- Mieres JM. 1997. Tipo de suplemento y su efecto sobre el forraje. Suplementación estratégica para el ganado de carne. Serie Técnica (83): 11-16.
- Mieres JM. 2004. Guía para la alimentación de rumiantes. Serie Técnica (142): 1-92.
- Minson D. 1990. Measurement of voluntary intake. En: Minson D (Ed.). Forage in Ruminant Nutrition. Queensland. 9-59.
- Minsky M. 1968. Matter, Mind, and Models. En: Minsky M (Ed.). Semantic Information Processing, MIT Press. Cambridge. 425-432.
- Montossi F. 2000. Selectividad animal y valor nutritivo de la dieta de ovinos y vacunos en sistemas ganaderos: teoría y práctica. Serie Técnica (113): 1-91.
- NRC (National Research Council). 2000. Nutrient Requirements of Beef Cattle: Seventh Revised Edition: Update 2000. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9791>.
- Noy-meir I. 1975. Stability of Grazing Systems: An Application of Predator-Prey Graphs. The Journal of Ecology, 63(2): 459-481. <http://links.jstor.org/sici?sici=00220477%28197507%2963%3A2%3C459%3ASOGSAA%3E2.0.CO%3B2-Y>.
- Orcasberro R. 1991. Estado corporal, control del amamantamiento y performance reproductiva de rodeos de cría. Pasturas y producción animal en áreas de ganadería extensiva. Serie Técnica (13): 158-169.
- Pastor J. 2008. Part 2: Populations. En: Pastor J (Ed.). Mathematical Ecology of Populations and Ecosystems. Nueva York. Wiley-Blackwell. 51-176.
- Poppi PJ, Hugues TP, L'huillier PJ. 1987. Intake of pasture by grazing ruminants. En: Nicol AM (Ed.) Livestock feeding on pasture. NZ Society of Animal Production, Occasional Publication, (10): 55-63.

- Qi A, Murray PJ, Richter GM. 2017. Modelling productivity and resource use efficiency for grassland ecosystems in the UK. *European Journal of Agronomy*, 89: 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.05.002>
- Quintans G, Jiménez de Aréchaga C. 2006. Efecto del manejo nutricional y del amamantamiento en vacas de primera cría sobre la performance productiva y reproductiva. En: Día de campo “Manejo de la cría vacuna en suelos arenosos”. Serie de Actividades de Difusión (445). 14-16
- Quintans, G. (2007). Efecto de distintas técnicas de control del amamantamiento sobre parámetros reproductivos y productivos. XXXV Jornadas Uruguayas de Buiatría. Paysandú, Uruguay. Centro Médico Veterinario. 158-166.
- Ruiz R, Oregui L. 2001. El enfoque sistémico en el análisis de la producción animal: revisión bibliográfica (revisión). *Investigación Agraria. Producción y Sanidad Animales*, 16 (1): 30–61.
- Sarandón S. 2014. El Agroecosistema: un ecosistema modificado. En: Sarandón S, Flores CC (Eds.). *Agroecología: bases teóricas para el diseño y manejo de Agroecosistemas sustentables*. Buenos Aires: Editorial de la Universidad de la Plata. (47; nro 380). 100–130.
- Scaglia G. 1997. Nutrición y reproducción de la vaca de cría: Uso de la condición corporal. *Serie Técnica* (91): 1–20.
- Short R, Bellows R, Staigmiller R, Bernardinelli J, Custer E. 1990. Physiological mechanisms controlling anestrus and infertility in postpartum beef cattle. *Journal of Animal Science*, 68: 799–816. [10.2527/1990.683799x](https://doi.org/10.2527/1990.683799x).
- Simeone A, Beretta V. 2002. Destete precoz en ganado de carne. Simeone A, Beretta V. (Eds.). *Destete precoz en ganado de carne*. Montevideo: Editorial Hemisferio Sur. 118 p.

- Soca P, Carriquiry M, Keisler DH, Claramunt M, Do Carmo M, Olivera-Muzante J, Rodríguez M, Meikle A. 2013. Reproductive and productive response to suckling restriction and dietary flushing in primiparous grazing beef cows. *Animal Production Science*, 53 (4): 283-291. <http://dx.doi.org/10.1071/AN12168>
- Tarifa EE. 1988. *Teoría de Modelos y Simulación. Introducción a la Simulación*, 1–17 [Datos sin publicar].
- Turner BL, Rhoades RD, Tedeschi LO, Hanagriff RD, McCuistion KC, Dunn BH. 2013. Analyzing ranch profitability from varying cow sales and heifer replacement rates for beef cow-calf production using system dynamics. *Agricultural Systems*, 114: 6–14. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2012.07.009>.
- Vayssières J, Vigne M, Alary V, Lecomte P. 2011. Integrated participatory modelling of actual farms to support policy making on sustainable intensification. *Agricultural Systems*, 104(2): 146–161. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2010.05.008>.
- Weston RH. 1982. Animal factors affecting feed intake. En: Hacker JB. (Ed.), *Nutritional limits to Animal Production from Pastures*, Commonwealth Agricultural Bureaux. 183-198.
- Wood PDP. 1969. Factors affecting the shape of the lactation curve in cattle. *Animal Production*, 11(3): 307-316. doi:10.1017/S0003356100026945.

## 10. ANEXOS

### Anexo 1: Descripción de las bases de datos utilizadas

#### Base de datos de Do Carmo

El experimento fue ejecutado en la Estación Experimental Bernardo Rosengurt de la Facultad de Agronomía de la UdelaR, en la localidad de Bañado de Medina, departamento de Cerro Largo, durante los meses de abril del año 2018 y enero del año 2019. Se utilizó un total de 395 vacas preñadas (a parir en primavera), las cuales fueron asignadas a tratamientos de alta (8%) y baja (4%) oferta de forraje. El tratamiento de alta oferta de forraje presentó un total de 110 vacas con un peso promedio de  $477,8 \pm 60,1$  kg para la primera repetición y 101 vacas con  $487,6 \pm 55,6$  kg en la segunda repetición. El tratamiento de baja oferta de forraje presentó un total de 87 vacas con un peso promedio de  $455,5 \pm 44,6$  kg para la repetición 1 y 97 vacas con un peso promedio de  $449,7 \pm 47,0$  kg para la repetición 2. La base forrajera fue campo natural. El tratamiento alta oferta de forraje presentó una biomasa aérea de 5679 kgMS/ha y 12,3 cm de altura promedio para la repetición 1, mientras que la repetición 2 presentó 5290 kgMS/ha y 9,6 cm de altura promedio. El tratamiento de baja oferta de forraje presentó 3555,1 y 3027,0 kgMS/ha y 7,4 y 6,4 cm promedio para la repetición 1 y 2 respectivamente.

#### Base de datos Rodriguez Palma

Es un experimento de largo plazo, ubicado en la Estación Experimental Facultad de Agronomía de Salto (UdelaR), departamento de Salto. El mismo presenta como uno de sus objetivos evaluar el efecto de la fertilización nitrógeno fosfatada en cantidad y calidad de forraje de campo natural. El método de pastoreo es continuo con carga variable ("*put and take*") con el objetivo de mantener la altura de la pastura en un rango de 6 a 13 cm de altura a lo largo del año. Los animales que se utilizan para pastorear son terneras de destete (6 meses aproximadamente) hasta vaquillonas de 1 a 2 años de edad de la raza Hereford. Para la validación del modelo se utilizaron 3 ciclos: Junio 2018 - Abril 2019, Mayo 2019 – Abril 2020 y Mayo 2020 – Abril 2021 del tratamiento control únicamente. En el año 2018-2019 el tratamiento control presentó una altura promedio de pastura de  $8,3 \pm 2,1$  cm y un peso promedio a inicio del experimento de 188,3 kg PV. En el año 2019-2020 presentó una altura  $8,8 \pm 2,2$  cm y un peso promedio a inicio del

experimento de 183 kg PV. Finalmente en el año 2020-2021 el tratamiento control presentó una altura de forraje promedio de  $8,0\pm 1,7$  cm y un peso promedio a inicio del experimento de 184,1 kg de PV.

Anexo 2: Borrador de artículo científico según pautas de AUPA.

**Título:** Ajuste y ampliación de parámetros de un modelo para simulación del desempeño animal en sistemas ganaderos sobre campo natural

**Título corto:** Ajuste de un modelo de simulación ganadero extensivo

### **Abstract**

With the aim of improving the predictive ability of the pray-predator simulation model made by Dieguez and Fort (2017) on native grassland livestock farming systems, there were some existing parameters adjusted and new ones developed based on information from national research. The parameters that were changed from being constants to being variable were the metabolizable energy utilization efficiency (from 0.25 to vary according to cattle category), herbage height at which cattle meet their maintenance requirements (from 4.5 cm to vary depending on cattle category), and animal daily weight gain (from 0.6 kg/animal/day to vary according to the season of the year). Other parameters that were modified were pasture dry matter (DM) density per centimeter of height (kgDM/cm), which changed from being a constant (180 kgDM/cm) to vary according to pasture height distribution, and DM intake (kgDM/animal/day), which is corrected by the factor 1.3 when used for breeding cows in summer. Also were included equations to predict cows pregnancy rate depending on body condition score and suckling control technique, and herbage substitution rate when growing cattle categories are supplemented with concentrates. The new model and Dieguez and Fort (2017) model had a good adjustment for the variable pasture height in high herbage allowance, but poor adjustment in low herbage allowance for breeding cows. For the growing cattle categories none of the models were able to predict the herbage height with good adjustment. For live weight

variable in breeding cows both models were poorly adjusted, whereas in growing cattle were excellently adjusted.

Keywords: simulation models, pray-predator dynamic, grassland livestock.

## **Introducción**

Según Vayssières et al. (2011) y Turner et al. (2013), los sistemas de producción animal basados en la cosecha directa del forraje por parte de los animales se denominan sistemas complejos, los cuales se caracterizan por presentar una respuesta no lineal entre sus componentes y una retroalimentación que está determinada por la relación entre ellos. Un componente externo de estos sistemas que los convierte en aún más impredecibles es la variabilidad climática, principalmente cuando ocurren eventos de déficit hídrico, ya que este ocasiona pérdidas productivas y económicas que, en muchas ocasiones, afectan la sustentabilidad de los sistemas en el tiempo (Bartaburu et al., 2009). La modelización permite estudiar dicha complejidad, ya que incluye las relaciones entre los componentes involucrados al igual que posibilita incorporar todos los avances que realiza la experimentación tradicional sobre el tema en estudio (Ruiz y Oregui, 2001). En Uruguay se han desarrollado modelos de simulación enfocados en comprender la dinámica de la evolución del desempeño animal en sistemas ganaderos extensivos, como lo son el modelo sequía basalto (Bartaburu, 2011), MEGanE (Dieguez et al., 2012) y PPGL (Dieguez y Fort, 2017). El objetivo de estos modelos es predecir la evolución estacional del desempeño animal y pastura de forma tal que los productores ganaderos criadores del basalto puedan visualizar la evolución del subsistema planta-animal de forma estacional y, de esta manera, convertirlos en actores menos vulnerables a eventos climáticos adversos. Cada modelo sirvió de insumo para el que se desarrolló posteriormente, de forma tal que el modelo PPGL es una versión mejorada de los anteriores (Dieguez y Fort, 2017). El modelo de simulación PPGL (por sus siglas en inglés, que significa modelo de ganadería sobre pastizales con dinámica predador-presa) desarrollado por Dieguez y Fort (2017) presenta tres variables: altura de la pastura (cm), peso de los



animales (kg) y un índice de coeficiente climático, en donde el desempeño animal depende del consumo, el cual, a su vez, depende de la disponibilidad de forraje, siendo esta afectada por la presión de pastoreo y el coeficiente climático. Dentro de las simplificaciones que presenta, se pretende investigar más en la homogeneidad de densidad de la pastura en forma vertical, al igual que todo lo que se relaciona con el consumo animal en pastoreo en diferentes estados fisiológicos. También pretende incorporar al modelo la suplementación energética en condiciones de pastoreo de forma tal de estudiar sus interacciones, al igual que introducir una función que sea capaz de predecir la preñez de las vacas acorde a la evolución de la condición corporal de estas a lo largo del año y contrastar los resultados con datos experimentales.

#### Factores que determinan el consumo de animales en pastoreo

El consumo representa entre el 60 y el 90 % de la variación en el desempeño de los animales (Poppi et al., 1992, Illius y Jessop, 1996, Da Trindade et al., 2016). En animales en pastoreo el mismo está influenciado principalmente por el balance entre apetito y saciedad que presentan los animales (Forbes, 1995). En el corto plazo, se ve afectado principalmente por la regulación homeostática, condicionado por las características del alimento, mientras que en el largo plazo, el consumo está determinado por los requerimientos nutricionales y reservas corporales (Forbes, 2007). En pasturas homogéneas, la importancia de la facilidad de cosecha del forraje por parte de los animales es el factor determinante del consumo (determina la tasa de consumo y el tiempo en pastoreo (Aldden y Whittaker, 1970)). Laca et al. (1993) concluyeron que la disponibilidad de forraje no puede ser definida como un valor único, sino que es necesario conocer la altura y la densidad de la pastura para poder predecir cómo serán las dimensiones del bocado y, por ende, el comportamiento animal en pastoreo. Estos autores encontraron que la altura de la pastura fue el principal determinante de la profundidad de bocado, mientras que la densidad de la pastura afectó negativamente tanto el área como la profundidad de bocado. Por otro lado, en pasturas que presentan heterogeneidad se sabe que el animal presenta diferentes estrategias de consumo que incluyen distintas escalas espacio temporal,

como lo son la elección de sitios de pastoreo y parches dentro de sitios de pastoreo. Las características de los parches, como son su abundancia, distribución espacial, facilidad de cosecha y palatabilidad instantánea, son las que determinan su elección por parte de los animales, condicionando así la tasa de consumo y tiempo en pastoreo (Baumont et al., 2000). Parches que presentan mayor disponibilidad de forraje permiten al animal obtener mayor tamaño de bocado y, por ende, mayor tasa instantánea de consumo. La variabilidad vertical y horizontal de la pastura condiciona el comportamiento de los animales en pastoreo (Hodgson et al., 1997, Carrère et al., 2001), ya que, muchas veces, al aumentar esta, es mayor el esfuerzo de los animales en la búsqueda del bocado, pudiendo llegar a reducir la tasa de consumo. De igual manera el animal presenta mayor oportunidad de seleccionar una dieta de mejor valor nutritivo y, de esta forma, compensar el incremento de costo energético de búsqueda (Hodgson et al., 1997).

#### Suplementación de vacunos en pastoreo

En condiciones de pastoreo existen diferentes relaciones entre la pastura y el suplemento que afectan al consumo de materia seca total diario de los animales (Lange, 1980). El suministro de suplemento puede afectar al consumo de pastura ya sea aumentándolo (adición con estímulo) o disminuyéndolo (sustitución con depresión), existiendo además, grados intermedios en los cuales la ingesta de suplemento aumenta el consumo total de materia seca diaria sin modificar el de la pastura (adición), otras veces en donde el consumo de pastura se reduce al suplementar sin aumentar la ingesta de materia seca total (sustitución) o casos en donde el consumo de pastura se ve reducido, pero no el total de materia seca aumenta (adición-sustitución) (Lange, 1980). Freer et al. (2010) mencionan que cuando el suplemento es ofrecido a animales en pastoreo, normalmente causa una depresión en el consumo de materia seca de la pastura que conlleva un efecto de sustitución. En situaciones en donde el objetivo de la suplementación es corregir una deficiencia de proteína de la pastura, el consumo de suplemento provoca un aumento en el consumo de materia seca de la pastura, y la tasa de sustitución posiblemente sea negativa, lo que ocasiona un efecto de adición (Freer et al., 2010). La suplementación es una

técnica muy utilizada en sistemas pastoriles extensivos del Uruguay, aplicándose principalmente para aumentar la ganancia de peso vivo de los animales o para mejorar la utilización de la pastura disponible (Claramunt y Rodriguez, 2015). Estos autores realizaron una exhaustiva revisión sobre trabajos nacionales que utilizaron suplementación sobre campo natural como base forrajera. En la mayoría de estos experimentos, se encontró una respuesta de adición con estímulo. Los niveles de suplementación fueron amplios, variando entre 0,15 hasta 2 % del peso vivo, aunque, en la mayoría de los trabajos, la suplementación fue a razón del 1 % del peso vivo.

#### Relación entre condición corporal de vacas de cría y desempeño reproductivo

La condición corporal es un valor que indica indirectamente el porcentaje de reservas corporales que presenta un animal (Herd y Sprott, 1986). Estos autores vieron que vacas que presentaban al parto 5 o más puntos de CC (escala de 1 a 9) eran capaces de destetar un ternero por año, mientras que en vacas que presentaban 4 o menos, el intervalo interpartos sobrepasaba el año de duración. En concordancia con estos autores, Orcasberro (1991) y Scaglia (1997) agregan, además, de que la CC (escala 1 al 8, Méndez et al., 1988) al parto está asociada con el intervalo parto-primer celo, desempeño en la lactación y salud y vigor del ternero, mientras que la CC al entore está asociada con el desempeño reproductivo en términos de número de servicios por concepción, intervalo interpartos y porcentaje de vacas vacías. Orcasberro (1991) señala que vacas multíparas que llegan al parto con una CC de 4 tienen altas probabilidades de quedar preñadas en el período de servicio, siendo la duración del anestro posparto de 35 a 50 días (según sea el plano alimenticio en el posparto). Este autor indica que existe una relación lineal entre CC al parto y porcentaje de preñez hasta 4 puntos de CC, dependiendo, a su vez, del comportamiento que presentaron las vacas luego del parto. Las vacas primíparas presentan anestros posparto más prolongados, siendo, además, más susceptibles a períodos de subnutrición que las vacas multíparas (Orcasberro, 1991). Para esta categoría animal se encontró que una CC al parto inferior a 4,5 puntos determinaba que el anestro posparto se extendiera mucho y la preñez se viera muy afectada.

## Heterogeneidad vertical de las pasturas naturales

Según García (1995), cuando se habla de estructura o distribución vertical del tapiz vegetal se hace referencia a la forma en que se distribuye el forraje desde el nivel del suelo hasta el estrato superior del dosel (en cuanto a densidad, composición botánica y tisular, entre otros). El mismo estudió la estructura de diferentes mezclas forrajeras sembradas de diferentes edades, en tres diferentes estratos (0-5 cm, 5-10 cm y > 10 cm) y encontró una marcada diferencia en la estructura según la edad de la pastura a pesar de presentar la misma distribución vertical. En los primeros 5 cm de altura, independientemente de la edad de la pastura, es donde se encontraron la mayor densidad y % MS y menor % DMO de la pastura. El 56, 20 y 24 % de la disponibilidad de forraje (tonMS/ha) correspondió al primer, segundo y tercer estrato, respectivamente, para las pasturas de 1-2 años de edad, mientras que el 67, 18 y 15 %, respectivamente, para pasturas de 3-4 años de edad. En el cuadro 4 se presenta la información resumida de la proporción de los parámetros estudiados en los diferentes estratos de la pastura. Por otra parte, Saldanha (comunicación personal, julio de 2013) estudió la distribución vertical de una pastura natural de zona baja de basalto haciendo énfasis en la densidad (kgMS/cm de altura) y observó que el 51,7 % de la MS se encontró por debajo de los 2,5 cm de altura, decreciendo de forma considerable a medida que se acercaba a alturas cercanas al ápice de las hojas. La densidad observada fue de 800 kgMS/cm de altura para el rango de 0-1 cm de altura, 744 kgMS/cm para el rango entre 1-2,5 cm de altura, 297 kgMS/cm para el rango entre 2,5 y 5 cm, y 89, 62 y 52,7 kgMS/cm para los rangos de 5-7,5, 7,5-20 y > 20 cm de altura, respectivamente.

El objetivo de este trabajo es contribuir en la mejora de la predicción del desempeño animal de un modelo de simulación con dinámica presa-predador de manera tal que sea capaz de representar con mayor exactitud la evolución de peso de las diferentes categorías de animales y la altura de la pastura.

## **Materiales y métodos**

El trabajo se desarrolla sobre un modelo con dinámica predador-presa desarrollado por Dieguez y Fort (2017). Este busca representar los procesos físico-biológicos (relación pasto-animal) de una explotación ganadera extensiva a cielo abierto, con lógica de dinámica de poblaciones. Tanto la pastura (presa) como el animal (predador) son representados mediante funciones logísticas, en las cuales el crecimiento de la pastura depende del consumo animal, y viceversa. Y ambas poblaciones en ausencia (de predador) o abundancia (de presa) de la otra población se saturan en un determinado punto. Las ecuaciones utilizadas para modelar el comportamiento de las poblaciones son las siguientes:

$$dx/dt = rx\{1-x/K(t)\} - c(y) * (x^2/(H^2 + x^2)) * y^{3/4} S,$$

$$dy/dt = \beta * [c(y)(x^2/(H^2 + x^2)) - Im] * y^{3/4}, \text{ donde}$$

$x$  es la altura de la pastura en cm,

$t$  es el tiempo en días,

$r$  es la tasa de crecimiento de la pastura en días,

$K$  es la capacidad de carga del sistema (máxima y mínima, en cm),

$c$  es el consumo máximo de pastura en cm/kg PV metabólico/día,

$H$  es  $c/2$ , o sea, la máxima tasa de consumo en cm,

$y$  es el peso vivo del animal en kg,

$S$  representa la tasa de carga,

$\beta$  es la eficiencia de conversión del forraje en Kg PV metabólico/cm,

$Im$  es el forraje requerido para cubrir los requerimientos de mantenimiento del animal en cm/Kg PV metabólico/día.

El primer término de la ecuación representa el crecimiento logístico de la pastura, mientras que el segundo representa el consumo animal multiplicado por el peso metabólico por hectárea. En la segunda ecuación se presenta la ganancia media diaria

de los animales, en la cual al consumo diario de los animales se le resta el consumo para cubrir los requerimientos de mantenimiento, lo que resultaría en el consumo neto. Al multiplicar este último por la eficiencia de conversión se obtendría la ganancia media diaria de los animales, que luego es expresada en peso vivo metabólico.

Algunas de las constantes del modelo desarrollado por Dieguez y Fort (2017) que se convirtieron en variables según categoría animal o estación del año son la eficiencia de utilización de la energía metabolizable para ganancia de peso (Kg), la altura de pastura para mantenimiento de peso vivo según categoría animal y la ganancia de peso máxima según estación del año sobre campo natural. En relación con la eficiencia de utilización de la energía metabolizable para ganancia de peso, el modelo pasó de ser una constante (0,25) a variar según la categoría animal: la categoría de terneros/as presentó una eficiencia de 0,35, las vaquillonas de 1-2 años, 0,30, las vaquillonas preñadas, un valor de 0,28, mientras que las vacas de cría la eficiencia fue de 0,25 (Mieres, 2004). Se asume que las categorías jóvenes tienen una mayor capacidad de seleccionar una dieta de mayor digestibilidad que vacas de cría (Montossi, 2000). Por otro lado, la constante altura de mantenimiento de peso vivo sobre campo natural pasó de 4,5 cm a variar según la categoría animal: la categoría de terneros/as presentó un valor de 3 cm y las vaquillonas de 1 a 2 años, 3,5 cm, mientras que las vaquillonas preñadas y las vacas de cría mantuvieron el valor de 4,5 cm. Estos valores surgieron de la observación de los datos de comportamiento ingestivo publicados por Gibb (2006), los cuales indican que para que una vaca consuma 7,9 kg de materia seca (consumo de mantenimiento de una unidad ganadera (Berreta et al., 1998)) se debería contar con una pastura que presente una altura promedio de 4,5 a 5 cm. Finalmente, la constante ganancia diaria máxima de peso vivo pasó de 0,6 kg/animal/día a variar según la estación del año: las estaciones de otoño, invierno, primavera y verano presentaron una ganancia diaria de 0,45, 0,2, 0,8 y 0,5 kg/animal/día, respectivamente. Otros parámetros que dejaron de ser constantes en el modelo fueron la densidad de materia seca por centímetro de altura (kgMS/cm) y el consumo de MS (kgMS/animal/día) según estado fisiológico de las vacas. A su

vez, se agregaron al modelo funciones de respuesta que relacionen el desempeño reproductivo de vacas de cría según su condición corporal y las relaciones que existen entre el consumo de suplemento y pastura en las categorías de recría.

Para convertir de constante a variable la distribución vertical de la pastura, se utilizó la base de datos de Saldanha (comunicación personal, julio de 2013) donde la función de respuesta que ajustó mejor ( $R^2=0,98$ ) fue  $y = 2,3347x^2 - 79,495x + 865,5$  siendo,  $y$  = variable aleatoria dependiente (kgMS/cm de altura) y  $x$  = variable aleatoria independiente (altura de la pastura). Este coeficiente afecta el coeficiente C y Beta del sistema de ecuaciones. El coeficiente C se ve afectado también para la categoría de vacas de cría en la estación de verano por un factor de 1,3, ya que los requerimientos de consumo se ven incrementados por estar las vacas en lactación (Minson, 1990).

Para determinar el desempeño reproductivo de las vacas de cría se la relacionó con la condición corporal (CC) al parto, ya que existe información reportada de que la misma es un buen indicador para predecir el porcentaje de preñez de vacas en la siguiente estación de cría (Orcasberro et al., 1991). Para obtener el valor de CC al parto se utilizó información nacional (Orcasberro et al., 1991) en donde se estudió la CC al parto de vacas en función de la CC al inicio del invierno ante diferentes alturas de pasto promedio del invierno. Los modelos que ajustaron mejor fueron los siguientes:

$$CC\ 3: y = -0,0234x^2 + 0,3487x + 2,5771$$

$$CC\ 4: y = -0,0308x^2 + 0,4553x + 2,6207$$

$$CC\ 5: y = -0,0486x^2 + 0,7579x + 2,1669$$

$$CC\ 6: y = -0,0529x^2 + 0,7801x + 2,311$$

donde, para cada CC al inicio del invierno,

$y$  = variable aleatoria dependiente (CC al parto)

$x$  = variable aleatoria independiente (altura promedio de la pastura en invierno).

Luego de obtener el valor de CC al parto, se ajustaron ecuaciones de regresión del desempeño reproductivo tanto para vacas multíparas como primíparas, siendo las mismas:

$$\text{Vacas multíparas: } y = -13,429x^2 + 133,66x - 251,15$$

$$\text{Vacas primíparas: } y = 9,7143x^2 - 58,114x + 127,57$$

Para incluir la relación que existe entre el consumo de materia seca de suplemento y pastura cuando coexisten en los sistemas ganaderos, se utilizó la función de respuesta resultante de los datos aportados por Simeone y Beretta (comunicación personal, agosto de 2014). El supuesto que asume esta relación es que el animal consume el suplemento (80 % de digestibilidad) antes que la pastura de igual o inferior digestibilidad. Las ecuaciones de regresión resultantes de dicha relación son las siguientes:

$$\text{Dig. pastura 70 \%} = 0,4x + 0,4$$

$$\text{Dig. pastura 50 \%} = 0,2x + 0,2$$

Para ambas digestibilidades, la tasa de sustitución de pastura por suplemento aumenta a medida que aumenta la disponibilidad de forraje. También se observa una mayor tasa de sustitución en pasturas de mayor digestibilidad ante variadas disponibilidades de forraje.

Finalmente, para evaluar la bondad de ajuste del modelo a datos observados de altura de la pastura (cm) y peso de los animales (kg), se probaron indicadores como error del sesgo medio (*mean bias error*, MBE), error del sesgo absoluto relativo (*relative absolute bias error*, MBE %), raíz del error cuadrado medio (*root mean square error*, RMSE), raíz del error cuadrado medio relativo (*relative root mean square error*, RRMSE %), error cuadrático medio normalizado (*normalized root mean square error*, NRMSE), coeficiente de determinación de Pearson ( $R^2$ ), coeficiente de eficiencia modificado (E1) y el índice de acuerdo modificado (d1).



$$MBE = 1/n \sum_{i=1}^n Y_{obs} - Y_{est}$$

$$MBE\% = 1/n \sum_{i=1}^n ((Y_{obs} - Y_{est}) / Y_{obs}) * 100$$

$$RMSE = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n [Y_{obs} - Y_{est}]^2}$$

$$RRMSE \% = (RMSE / media_{obs}) * 100$$

$$NRMSE (\%) = (RMSE / delta_{obs}) * 100$$

$$EI = 1 - ((\sum_{i=1}^n [Y_{obs} - Y_{est}]) / ((\sum_{i=1}^n [Y_{obs} - Y_{est prom}])))$$

$$dI = ((\sum_{i=1}^n [Y_{obs} - Y_{est}]) / ((\sum_{i=1}^n ([Y_{est} - Y_{est prom}] + ([Y_{est} + Y_{est prom}])))$$

Los indicadores que se utilizaron para ver el ajuste del modelo fueron *NRMSE%*, *EI* y *dI*. Qi et al. (2017) mencionan que cuando el indicador *NRMSE%* es  $\leq 10\%$ ,  $10\% < NRMSE\% \leq 20\%$ ,  $20\% < NRMSE\% \leq 30\%$  y  $NRMSE\% > 30\%$ , el desempeño del modelo es excelente, muy bueno, bueno o pobre, respectivamente. Por otro lado, el indicador *EI* descrito por Legates y McCabe (1999) puede tomar valores de menos infinito a 1, presentando el modelo mejor ajuste cuanto más cercano a 1 sea el indicador. Finalmente, el indicador *dI* toma valores más acotados que *EI* (entre 0 y 1), presentando el modelo mejor ajuste cuando los valores se encuentran cercano a 1 (Legates y McCabe, 1999).

Para estudiar el ajuste del modelo en la categoría vacas de cría, se utilizó la base de datos de Do Carmo et al. (sin publicar). Esta presenta, para una serie de años (2018-2019) y dos ofertas de forraje contrastantes, la altura de la pastura y el peso de los animales de forma mensual, para un campo natural de la región este del país. Por otro lado, para la categoría de recria se utilizó la base de datos de Rodriguez et al. (sin publicar), en donde se cuenta con información (2018-2021) de peso vivo y altura de la pastura de forma mensual para un campo natural de la zona de basalto.

## Resultados y discusión

Para estudiar la coherencia del modelo desarrollado en el presente trabajo se realizaron simulaciones con diferentes datos de entrada.

## Efecto de la heterogeneidad de la pastura en el modelo

Como se mencionó anteriormente el parámetro densidad de pastura (kgMS/cm) condiciona el valor que toman los parámetros coeficiente C y beta. Se realizaron simulaciones para la categoría vacas de cría con diferentes alturas de pasto iniciales resultando en que el coeficiente C disminuye al aumentar la densidad de la pastura, explicado principalmente por la disminución de la altura de la pastura. Estos resultados concuerdan con Mezzalira et al. (2014), quienes reportaron que al aumentar la altura de la pastura, aumenta el peso de bocado. Los valores más altos de coeficiente C se encuentran en la estación de verano, ya que las simulaciones fueron realizadas para la categoría vacas de cría, quienes, en dicha estación, se encuentran en su período de lactación, cuando los requerimientos de consumo aumentan un 30 %. En las cuatro estaciones del año, el coeficiente C demostró ser más sensible cuando la altura inicial de la pastura fue 10 cm, ya que, al presentar desde el inicio una mayor altura de pasto, la densidad de la pastura fue menor y menos variable por centímetro de altura. Estos resultados son coherentes con lo que sucede en la realidad, ya que a mayores alturas de forraje, el animal presenta mayor oportunidad de cosechar pesos de bocados más altos, lo que resulta en un mayor consumo animal (Mezzalira et al., 2014). Cuando se analiza la variación del coeficiente C de forma estacional para una altura determinada, se puede visualizar que, para ambas alturas de pasto inicial, en verano y primavera es cuando el coeficiente C es mayor, lo que resulta en un mayor consumo. Esto es explicado porque es en primavera y verano cuando los animales presentan mayores ganancias de peso vivo, lo cual se encuentra en el numerador de la ecuación para el cálculo de coeficiente C. De todas maneras, es de esperar que, en estas estaciones, la pastura presente mayor tasa de crecimiento y, por ende, mayor capacidad de consumo y ganancia media diaria de los animales.

Otro parámetro en que la densidad de la pastura está involucrada de forma directa es en el coeficiente beta. Al ser este parámetro un producto de factores (en el que participa la densidad de la pastura), la relación es lineal con la densidad de la pastura. Esto resulta en que a mayores densidades (que se corresponden a menores alturas de forraje), el parámetro beta es mayor. Esta relación presenta cierta coherencia con la

realidad, ya que es de esperar que a menores alturas de forraje exista mayor proporción de hojas verdes fotosintéticamente activas y los bocados que cosechen los animales presenten alta digestibilidad, lo que resulta en una mejor eficiencia de conversión del alimento en kg de PV animal.

#### Evolución de la condición corporal del ganado de cría y desempeño reproductivo

Para estudiar el comportamiento del modelo relacionado al desempeño reproductivo, se realizaron simulaciones con tres alturas de pasto a inicio de invierno (2, 4 y 6 cm), tres condiciones corporales (3, 4 y 5) y dos cargas (0,5 y 1 cab/ha) para vacas multíparas y primíparas. Para ambas categorías se observa que a mayor condición corporal y altura de pasto a inicio del invierno, mayor es el porcentaje de preñez en la siguiente estación de cría. Sin embargo, en vacas primíparas, el incremento de preñez al aumentar la altura de pasto es de mayor magnitud cuando la condición corporal a inicio del invierno es de 5. Además, cuando la condición corporal al inicio del invierno es menor a 5 puntos, el resultado de preñez es poco sensible a la altura de la pastura a inicio del invierno. Estos resultados son coherentes, ya que esta categoría requiere mayor condición corporal al parto (y, por ende, a inicio del invierno) para presentar buen desempeño reproductivo en la siguiente estación de cría debido a que las vacas, además de estar lactando, aún continúan incrementando su tamaño corporal, por lo que la energía disponible para destinar al reinicio de la actividad sexual (luego del parto) es menor (Short et al., 1990).

#### Evolución de la altura de la pastura en situaciones de suplementación

Se realizaron simulaciones del modelo en tres niveles de suplementación (0, 0,5 y 1 % del PV) y tres alturas de forraje (2, 6 y 10 cm) a inicio de la estación de invierno en la categoría de terneros/as de 180 kg a una carga de un animal por hectárea. En el cuadro 1 se presenta el comportamiento de la altura de la pastura promedio de la estación de invierno con diferentes niveles de suplementación.

Cuadro 1. Altura de la pastura promedio (cm) de la estación de invierno con tres niveles de suplementación (0, 0,5 y 1 % del PV) y tres alturas iniciales (2, 6 y 10 cm) pastoreada con terneros/as.

Nivel de suplementación (% PV)	0			0,5			1		
	2	6	10	2	6	10	2	6	10
Altura pastura inicio (cm)									
Altura promedio estación (cm)	3,17	5,85	7,3	3,19	5,86	7,3	3,2	5,87	7,33

Como se puede observar en el cuadro 1, el modelo no es capaz de mostrar diferencias en altura de la pastura promedio de la estación ante diferentes niveles de suplementación y altura de la pastura al inicio de la estación de invierno. Estos resultados no concuerdan con los presentados por Claramunt y Rodriguez Palma (2015), que mencionan diferentes respuestas en el consumo de pastura ante diferentes ofertas de forraje y suplemento.

#### Validación del modelo

Para validar el modelo en la categoría vacas de cría, se utilizó la base de datos generada por Do Carmo et al. (sin publicar). Esta presenta para dos ofertas de forraje (alta y baja), la altura de la pastura y el peso de los animales de forma mensual. En el cuadro 2 se presentan los indicadores de bondad de ajuste que se utilizaron para validar el modelo.

Cuadro 2. Indicadores de bondad de ajuste del modelo utilizados en vacas de cría.

	Altura		Peso	
	Alta	Baja	Alta	Baja
<i>NRMSE</i> %	18,50	39,07	44,01	40,91
<i>EI</i>	0,32	0,05	-0,16	-0,57
<i>dI</i>	0,52	0,46	0,46	0,08

Como se observa en el cuadro 2, el modelo no presenta un ajuste pobre para la característica peso vivo de las vacas de cría para ninguna oferta de forraje. Una posible causa del nulo ajuste que presenta el modelo para esta característica es que predecir la evolución del peso vivo de vacas de cría no es sencillo para un modelo de extensión (requieren pocos datos de entrada del modelo), ya que esta categoría presenta cambios bruscos en el peso vivo debido a su estado fisiológico (gestación y parto), los cuales no son contemplados en el modelo.

Por otro lado, para la característica altura de la pastura, el modelo presenta un mejor ajuste para alta oferta de forraje, siendo el *NRMSE* % de 18,5 %, lo que determina un muy buen ajuste, mientras que los indicadores *EI* y *dI* indican un ajuste medio. En baja oferta de forraje, el modelo sobreestima la altura del forraje, siendo el *NRMSE* %, *EI* y *dI* de 39,07 %, 0,05 y 0,46, respectivamente, indicando estos un pobre ajuste del modelo

Para validar el modelo en la categoría recría, se utilizó la base de datos generada por Rodriguez et al. (sin publicar). Se cuenta con información de tres años de evaluación y las variables de interés registradas fueron altura de la pastura y peso vivo de los animales, tomada mensualmente. En el cuadro 3 se presentan los indicadores de bondad de ajuste que se utilizaron para validar el modelo.

Cuadro 3. Indicadores de bondad de ajuste del modelo utilizados en recría.

	Altura			Peso		
	2018/19	2019/20	2020/21	2018/19	2019/20	2020/21
<b><i>NRMSE</i></b>						
<b>%</b>	30,87	23,00	25,59	10,19	8,15	4,88
<b><i>EI</i></b>	-0,15	0,42	-0,21	0,68	0,79	0,88
<b><i>dI</i></b>	0,05	0,42	0,85	0,79	0,80	0,85

Como se puede observar en el cuadro 3, el peso vivo de la recría presentó un excelente ajuste a los datos observados con un *NRMSE* % de 10,19, 8,15 y 4,88 para

primer, segundo y tercer período, respectivamente, mientras que los estimadores *EI* y *dI* fueron 0,68, 0,79 y 0,88 y 0,79, 0,80 y 0,85 para primer, segundo y tercer ciclo, respectivamente. Por otro lado, para la variable altura de la pastura, el ajuste del modelo fue pobre a bueno, con un *NRMSE* % de 30,87, 23 y 25,59 para el primer, segundo y tercer año, respectivamente, presentando los estimadores *EI* y *dI* similar tendencia (excepto *dI* en el último período).

Para determinar si las modificaciones que se realizaron en este trabajo al modelo original de PPGL (Dieguez y Fort, 2017) cumplieron el objetivo de lograr un modelo que se ajuste mejor a la realidad de los sistemas ganaderos en basalto, se realizaron simulaciones del modelo PPGL con la base de datos utilizada para validar el modelo desarrollado en el presente trabajo. En los cuadros 4 y 5 se presentan los indicadores de ajuste del modelo PPGL a los datos observados por Do Carmo et al. (sin publicar) y Rodriguez et al.(sin publicar), respectivamente.

Cuadro 4. Indicadores de bondad de ajuste del modelo utilizados en vacas de cría para el modelo PPGL

	Altura		Peso	
	Alta	Baja	Alta	Baja
<i>NRMSE</i> %	20,09	38,56	54,01	44,30
<i>EI</i>	0,24	0,07	-0,72	-0,83
<i>dI</i>	0,49	0,46	0,37	0,00

Cuadro 5. Indicadores de bondad de ajuste del modelo utilizados en recria para el modelo PPGL.

	Altura			Peso		
	2018/19	2019/20	2020/21	2018/19	2019/20	2020/21
<i>NRMSE</i> %	33,20	28,19	30,01	8,38	7,94	5,51
<i>EI</i>	-0,25	0,13	-0,42	0,76	0,79	0,85
<i>dI</i>	-0,10	0,30	0,08	0,79	0,80	0,85

Al comparar los indicadores de ajuste de ambos modelos con los datos observados en la categoría vacas de cría, se puede apreciar que el modelo desarrollado mejora el ajuste para la variable peso vivo en alta oferta de forraje a pesar de que el ajuste sigue siendo pobre. En la categoría de recria, el modelo desarrollado presenta un mejor ajuste para la variable altura de las pasturas, cambiando de criterio de *NRMSE* % de pobre a bueno en el tercer año. Para la variable peso vivo en recria, las modificaciones de este modelo no mejoran el ajuste con respecto al modelo original.

### **Conclusiones**

El modelo desarrollado en este trabajo pretende mejorar y levantar algunas limitantes que presenta el modelo desarrollado por Dieguez y Fort (2017). Se modificó el parámetro densidad de la pastura (kgMS/cm), el cual pasó de ser una constante a un valor que varía en función de la altura de la pastura de campo natural, tomando como referencia datos aportados por la investigación nacional. Esta modificación trajo consigo modificaciones en otros parámetros, como lo son el coeficiente C y beta, que pasaron de ser constantes a variables en función de la densidad de la pastura. Además, el coeficiente C para la categoría vacas de cría aumenta un 30 % en la estación de verano debido al aumento en los requerimientos energéticos de dicha categoría como consecuencia del estado fisiológico en que se encuentran (lactación).

Para la variable altura, en la categoría vacas de cría, el modelo desarrollado resultó un muy buen ajuste en alta oferta de forraje y un ajuste pobre en baja oferta de forraje. Resultados similares de ajuste mostró el modelo PPGL para ambas ofertas de forraje. En las categorías de recria, ambos modelos lograron un ajuste bueno a pobre, dependiendo del año de evaluación, a pesar de tener un mejor ajuste el modelo desarrollado en el presente trabajo.

Para la variable peso vivo, la categoría de vacas de cría resultó un pobre ajuste en ambos modelos, explicado en parte por los cambios abruptos de peso vivo que presentan las vacas al momento del parto y lactación, los cuales no son contemplados en el modelo. En cambio, para las categorías de recria, ambos modelos lograron un excelente ajuste a los datos observados para los tres años de evaluación. Es

importante aclarar que las bases de datos utilizadas para validar el modelo no fueron desarrolladas para tal fin, siendo otros los objetivos de los experimentos. Esto significa que no hay que afirmar que el modelo no es un buen predictor de la altura de la pastura, ya que, para ello, este debe ser evaluado con una base de datos desarrollada para tal fin.

Finalmente, y no menos importante, se agregó al modelo una función que sea capaz de predecir, para la categoría de vacas de cría, el resultado de preñez esperable en la próxima estación de cría según la altura de la pastura y la condición corporal de las vacas a inicio del invierno, tomando como referencia gran parte de la información desarrollada por la investigación nacional.

### **Literatura citada**

Allden WG, Whittaker IA. 1970. The Determinants of Herbage Intake by Grazing Sheep: The Interrelationship of Factors Influencing Herbage Intake and Availability. *Australian Journal of Agricultural Research*, 21 (5): 755–766. <https://doi.org/10.1071/AR9700755>.

Bartaburu D, Duarte E, Montes E, Morales H, Pereira M. 2009. Las sequías : un evento que afecta la trayectoria de las empresas y su gente. En: Morales H, Dieguez F. (Eds.). *Familias y campo: Rescatando estrategias de adaptación*. Montevideo. Instituto Plan Agropecuario. 155–168.

Bartaburu D. 2011. Evaluación de una metodología de modelación y simulación participativa para contribuir a la comprensión y comunicación del fenómeno de la sequía y mejorar la capacidad de adaptación de productores ganaderos del Basalto. *FPTA (Fondo de Promoción de Tecnologías Agropecuarias)*, 286: 1-46.

Baumont R, Prache S, Meuret M, Morand-Fehr P. 2000. How forage characteristics influence behaviour and intake in small ruminants: A review. *Livestock Production Science*, 64(1): 15–28. [https://doi.org/10.1016/S0301-6226\(00\)00172-X](https://doi.org/10.1016/S0301-6226(00)00172-X).



- Berretta EJ. 1998. Principales características climáticas y edáficas de la región de basalto en Uruguay. Seminario de actualización en tecnologías para basalto. Serie técnica 102. 8-15p.
- Carrère P, Flouault F, De Faccio Carvalho PC, Lafarge M, Soussana JF. 2001. How does the vertical and horizontal structure of a perennial ryegrass and white clover sward influence grazing?. *Grass and Forage Science*, 56 (2): 118–130. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2494.2001.00257.x>
- Claramunt M, Rodriguez R. 2015. Consultoría sobre actualización y mejora del Programa “Modelización de una Explotación Ganadera Extensiva (MEGanE).” Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca - Instituto Plan Agropecuario, 1: 96.
- Da Trindade JK, Neves FP, Pinto CE, Bremm C, Mezzalira JC, Nadin LB, De Faccio Carvalho PC. 2016. Daily Forage Intake by Cattle on Natural Grassland: Response to Forage Allowance and Sward Structure. *Rangeland Ecology and Management*, 69 (1): 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2015.10.002>.
- Dieguez F, Bommel P, Corral J, Bartaburu D, Pereira M., Montes E, Morales H. 2012. Modelización de una explotación ganadera extensiva criadora en basalto. *Agrociencia Uruguay*, 16 (2): 120–130.
- Dieguez F, Fort H. 2017. Towards scientifically based management of extensive livestock farming in terms of ecological predator-prey modeling. *Agricultural Systems*, 153: 127–137. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.01.021>.
- Forbes, J.M., 1995. En: *Voluntary Food Intake and Diet Selection in Farm Animals*, CAB International, Wallingford, UK, p. 532.
- Forbes, J.M., 2007. Part II Mechanisms. En: Forbes, J.M. (Ed), *Voluntary Food Intake and Diet Selection in Farm Animals*, Second Edition CAB International, Wallingford, UK, p.41-187.

- Freer M, Moore A, Donnelly JR. 2010. The GRAZPLAN animal biology model for sheep and cattle and the GrazFeed decision support tool. , 1–47. 20 de Septiembre de 2022 <https://www.apsim.info/wpcontent/uploads/2019/09/TechPaperJan10.pdf>
- García JA. 1995. Estructura del tapiz de praderas. Estructura del tapiz de praderas. Serie Técnica (66): 1-14.
- Gibb M. 2006. Grassland Management With Emphasis on Grazing Behaviour. Fresh Herbage for Dairy Cattle, 18: 141–157. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5452-5\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5452-5_8)
- Herd DB, Sprott LR. 1986. Body Condition, Nutrition and Reproduction of Beef Cows. Texas Agricultural Experimental Station, 1–12. 20 de Septiembre de 2022. <https://hdl.handle.net/1969.1/129135>.
- Hodgson J, Cosgrove GP, Woodward SJR .1997. Research on foraging behavior: progress and priorities. En: Buchanan-Smith JC, Bails L, McCaughev P (Eds.). Proceedings of the 18th international grassland congress, Calagary, Canada. 109–118.
- Illius AW, Jessop NS. 1996. Metabolic Constraints on Voluntary Intake in Ruminants. Journal of Animal Science, 74 (12): 3052–3062. [10.2527/1996.74123052x](https://doi.org/10.2527/1996.74123052x).
- Laca EA, Ungart ED, Seligman N, Demment M. 1993. Effects of sward height and bulk density on bite dimensions of cattle grazing homogeneous sward. Grass and Forage Science, 47: 91–102.
- Lange A. 1980. Suplementación de pasturas para la producción de carnes. Colección Investigación aplicada. 2ª Edición AACREA. Buenos Aires, Argentina. 74 p.
- Legates DR, McCabe GJ. 1999. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. Water Resources Research, 35(1): 233–241. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>.

- Mendez J, Vizcarra J, Orcasberro R. 1988. Condición por apreciación visual en vacas Hereford. *Revista Plan Agropecuario*. 44: 33-34.
- Mezzalira JC, De Faccio Carvalho PC, Fonseca L, Bremm C, Cangiano C, Gonda HL, Laca EA. 2014. Behavioural mechanisms of intake rate by heifers grazing swards of contrasting structures. *Applied Animal Behaviour Science*, 153: 1–9. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2013.12.014>.
- Mieres JM. 2004. Guía para la alimentación de rumiantes. *Serie Técnica* (142): 1-92.
- Minson D. 1990. Measurement of voluntary intake. En: Minson D (Ed.). *Forage in Ruminant Nutrition*. Queensland. 9-59.
- Montossi F. 2000. Selectividad animal y valor nutritivo de la dieta de ovinos y vacunos en sistemas ganaderos: teoría y práctica. *Serie Técnica* (113): 1-91.
- Orcasberro R. 1991. Estado corporal, control del amamantamiento y performance reproductiva de rodeos de cría. *Pasturas y producción animal en áreas de ganadería extensiva*. *Serie Técnica* (13): 158-169.
- Poppi PJ, Hugues TP, L'huillier PJ. 1987. Intake of pasture by grazing ruminants. En: Nicol AM (Ed.) *Livestock feeding on pasture*. NZ Society of Animal Production, Occasional Publication, (10): 55-63.
- Qi A, Murray PJ, Richter GM. 2017. Modelling productivity and resource use efficiency for grassland ecosystems in the UK. *European Journal of Agronomy*, 89: 148–158. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2017.05.002>
- Ruiz R, Oregui L. 2001. El enfoque sistémico en el análisis de la producción animal: revisión bibliográfica (revisión). *Investigación Agraria. Producción y Sanidad Animales*, 16 (1): 30–61.
- Scaglia G. 1997. Nutrición y reproducción de la vaca de cría: Uso de la condición corporal. *Serie Técnica* (91): 1–20.

- Short R, Bellows R, Staigmiller R, Bernardinelli J, Custer E. 1990. Physiological mechanisms controlling anestrus and infertility in postpartum beef cattle. *Journal of Animal Science*, 68: 799–816. [10.2527/1990.683799x](https://doi.org/10.2527/1990.683799x).
- Turner BL, Rhoades RD, Tedeschi LO, Hanagriff RD, McCuistion KC, Dunn BH. 2013. Analyzing ranch profitability from varying cow sales and heifer replacement rates for beef cow-calf production using system dynamics. *Agricultural Systems*, 114: 6–14. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2012.07.009>.
- Vayssières J, Vigne M, Alary V, Lecomte P. 2011. Integrated participatory modelling of actual farms to support policy making on sustainable intensification. *Agricultural Systems*, 104(2): 146–161. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2010.05.008>.