

Doctorado en Ciencia Animal

Tesis

Estudio de modelación de manejos alternativos en sistemas de
cría vacuna de la Depresión de Laprida

Por: Horacio Berger

Facultad de Ciencias Veterinarias

UNCPBA



2018

Doctorado en Ciencia Animal
Tesis

Estudio de modelación de manejos alternativos en sistemas de
cría vacuna de la Depresión de Laprida

Por: Horacio Berger

Facultad de Ciencias Veterinarias
UNCPBA

Directores:

Dr. Claudio F. Machado

Dra. Mónica Agnusdei

Miembros del Jurado:

Dr. Sergio (Yani) Garcia

Dr. Walter Ayala

Dedicatoria

A Mercedes, María Eugenia e Ignacio

Agradecimientos

Todo el desarrollo y la culminación de las distintas actividades realizadas en el marco del doctorado que se resumen en el presente trabajo de tesis, fue posible gracias al desempeño, ayuda y colaboración de muchas personas entre las que quiero destacar:

En primer lugar a mis directores de tesis, Mónica Agnusdei y Claudio Machado por su guía constante y consejos en cada paso del camino. Lamentablemente Mónica falleció el año pasado, pero sus comentarios personales, críticas y contribuciones están muy presentes en este trabajo.

A INTA que a través del programa de posgrado posibilitó la realización del doctorado y la pasantía en centros de referencia de Australia (CSIRO, Universidad de Melbourne, Tasmanian Institute of Agriculture, Universidad de Queensland).

Tuve la fortuna de trabajar con Lindsay Bell investigador de CSIRO – Australia y Brendan Cullen investigador de la Universidad de Melbourne – Australia. Muchas gracias por sus valiosos aportes en la elaboración de los papers originados en los trabajos de tesis y por haberme recibido en sus grupos de investigación en el marco de una pasantía de estudio, posibilitando incorporar experiencias y conocimientos de gran valor en mi formación profesional.

También a Paulo Recavarren y Kevin Leaden de las agencias de extensión INTA de Olavarría y Laprida por su participación en las discusiones y comentarios, además de facilitar el relevamiento de datos meteorológicos locales.

Por sus aportes, a Pedro Errecart, Alejandra, Marino y Fernando Lattanzi quienes proporcionaron los datos correspondientes a los ensayos de pasturas utilizados en la calibración del modelo de simulación DairyMod.

No quiero dejar de mencionar a Franco Bilotto, del equipo de modelación de la Fac. de Ciencias Veterinarias de Tandil, por sus invaluable aportes a los trabajos de simulación y de discusión llevados adelante en la elaboración de uno de los papers que forma parte de los trabajos vinculados a la presente tesis.

Tampoco quiero dejar de mencionar a Mauricio Arroqui y Pablo Mangudo, responsables del desarrollo y soporte del modelo de simulación SIMUGAN, por su asesoramiento y trabajo en el modelo facilitando la realización de las simulaciones.

Y por último, y en especial a Mercedes, mi compañera de vida, por su incondicional apoyo y acompañamiento a lo largo del doctorado y también a mis hijos, Ignacio y María Eugenia, por la

paciencia y comprensión en los momentos en que les robé tiempo para dedicarlo a la elaboración de esta tesis.

A todos ellos vaya mi reconocimiento y agradecimiento por contribuir cada uno desde diferentes lugares y en distintas etapas a mi crecimiento y formación profesional.

Resumen

El objetivo del presente trabajo fue explorar alternativas específicas de intensificación (aumento de la carga animal y fertilización nitrogenada de pasturas) de sistemas de cría de la zona de la Depresión de Laprida, Buenos Aires, procurando mejoras tanto cuantitativas como de estabilidad de la producción y performance económica en condiciones de variabilidad interanual. La tesis comprende a) la evaluación y calibración del modelo biofísico de pasturas DairyMod para la simulación de pasturas de festuca (*Festuca arundinacea Schreb*) bajo las condiciones de producción, manejo y variabilidad climática locales. b) Evaluación del impacto sobre el sistema de producción de distintas estrategias de fertilización nitrogenada de pasturas implementadas realizando el manejo de las pasturas basado en conceptos de ecofisiología de pasturas (buenas prácticas de manejo, BPM). Las simulaciones incluyeron diferentes cargas animales (0,9, 1,1 y 1,3 cab/ha). c) Exploración de alternativas de análisis que posibiliten la identificación y cuantificación de oportunidades de mejora en la mejora de la oferta forrajera aplicando la metodología del cálculo del valor marginal del alimento extra (VMA), en sistemas de cría vacuna incluyendo el impacto de la variabilidad climática sobre la producción forrajera. Los resultados de la calibración del modelo de pasturas DairyMod mostraron que las acumulaciones de masa forrajera (AMF), observadas y simulados fueron coincidentes, siendo el rango para el desvío medio entre -136 y 288 kg MS/ha, y el error medio de predicción entre 25 y 32%, encontrándose las mayores diferencias en los tratamientos con riego. La eficiencia del modelo fluctuó entre 0,50 en otoño y valores mayores a 0,75 en el resto de los datos. La razón de varianza (0,87) y factor de corrección de desvíos (1,09) indican que la varianza de las AMF simuladas fue cercana a las medidas en los ensayos. Concomitantemente a la calibración se exploraron alternativas de mejora, simulándose un ensayo en función de la curva de referencia de N crítico, donde la AMF simulada tuvo una concordancia mayor con la registrada a campo en comparación a las simulaciones manteniendo el parámetro N_{opt} constante. El modelo logró representar adecuadamente las pasturas de festuca bajo condiciones edafoclimáticas y de manejo bien caracterizadas, posibilitando el uso del modelo para el análisis de distintos manejos de pasturas. La evaluación de las estrategias de fertilización nitrogenada resultó que la EUN de primavera fue de 20,1 kg MS/kg N posibilitando un rebrote temprano aún en años secos. La EUN de otoño fue 8,3 en los 90 días posteriores a la fertilización, aunque hubo también respuesta en el crecimiento de la siguiente primavera, resultando una EUN final de 20,8 kg MS/kg N. La producción de terneros y el MB se incrementó linealmente con la carga animal en los años “normales”. Ante condiciones de sequía, la fertilización en otoño o primavera en el 20%

de la superficie incrementó la producción de terneros hasta el escenario de 1.1 cab/ha, y en el caso de fertilizar 40% de la superficie no se encontraron mejoras adicionales. El impacto negativo de las sequías en el planteo de 1.3 cab/ha no pudo ser compensado por ninguna de las opciones de fertilización. El MB fue afectado por las sequías, aunque en la alternativa de 1.1 cab/ha, las pérdidas se redujeron casi totalmente con la fertilización del 20% de la superficie en otoño o en primavera indistintamente. La modelación del valor marginal del alimento mostró un impacto positivo a partir de 1.1 cab/ha (por debajo este fue generalmente negativo), incrementándose junto con la carga animal. A 1,1 y 1,2 cab/ha tuvo mayor impacto la asignación de alimento adicional en otoño (VMA fluctuó entre 0,003 - 0,083 U\$\$/kg MS y entre 0,011 – 0,174 U\$\$/kg MS respectivamente), y a 1,3 cab/ha la provisión de alimento extra en invierno fue la condición dominante (VMA estuvo entre 0,017 y 0,194 U\$\$/kg MS). Las variables biofísicas fueron la fuente principal de variabilidad, mientras que los costos y precios de venta tuvieron un impacto mínimo. La tesis en su conjunto expone la importancia de integrar/escalar cuantitativamente a nivel de los sistemas de producción y también en términos económicos a los resultados de la investigación disciplinaria a escala de parcela, incorporando los efectos de la variabilidad climática, de modo de facilitar la reducción de la brecha entre la producción científica y la adopción en los emprendimientos comerciales.

Palabras claves: Cría vacuna, festuca, Nitrógeno, riesgo climático, carga animal, alimento extra, modelación

Abstract

The objective of this work was to explore specific alternatives (increasing stocking rate and N application to pastures) to intensify cow-calf systems from the Laprida Depression, Buenos Aires, by attempting to improve system productive and economic performance meanwhile decreasing their variability, all under interannual climatic effects. The present thesis includes a) To test the ability and flexibility of the biophysical pasture model DairyMod to represent herbage mass accumulation of tall fescue pastures (*Festuca arundinacea Schreb*) from Argentina under several environmental conditions that included different seasons, nitrogen levels and irrigation. b) To model the whole-farm responses from nitrogen pasture fertilization applied to tall fescue pastures with different strategies (season of application and % of the farm area fertilized) within a good practice pasture management. Virtual experimentation included different stocking rates (0.9, 1.1 and 1.3 head/ha) under interannual climatic variability. c) To estimate the combined marginal value of feed (the possible gross economic benefit of additional feed on offer during an annual cycle, MVF), with risk assessment under the expected variability of climate and input and output prices to define better management strategies to overcome feed gaps in livestock systems. DairyMod calibration showed that herbage mass accumulation of tall fescue pastures under a wide range of climatic and management conditions was simulated with reasonable accuracy. Across all datasets mean bias ranged from -136 and 288 kg DM ha⁻¹ and with mean predicted error between 25 and 32%, irrigated data presented the highest deviation. Modelling Efficiency ranged from 0.5 in Autumn with values higher than 0.75 in the rest of the data. Prediction accuracy was also indicated by bias correction factor (1.09) and the variance ratio (0.87). Additionally, the model assumption that optimum N concentration stays constant through herbage mass accumulation was substituted with the application of a reference critical N dilution curve observed for temperate forage grasses, and both options were simulated. Modelled N concentration using a reference critical N dilution curve matched better field results. Nitrogen fertilization (100 kg/ha) applied in either autumn or spring yielded a nitrogen use efficiency (NUE) of 20.1 and 8.3 kg pasture DM/kg N applied, respectively. Autumn dressing also had within a carry-over for extra pasture growth in the following spring yielded an average final NUE of 20.8 DM/kg N applied. In Average years, weaner calf LW production and gross margin increased linearly as function of SR. Autumn and spring N fertilization to the 20% of the farm area in dry autumn and dry spring years, increased weaner calf LW production up to 1.1 SR, with no additional benefits when the 40% of the farm was fertilized. On 1.3 SR, with dry autumn and dry spring conditions decreased weaners production which was not mitigated by any of the

N applications. Dry seasons reduced gross margin, which was compensated at SR 1.1 when nitrogen was applied to 20% of the farm both in autumn or spring. At SR 1.3, dry seasons reduced gross margins, and none of the N strategies were able to recover the conditions to those in Average years. The assessments of the marginal value of feed showed a positive impact of additional forage only above 1.1 head /ha and increased with SR, whereas at the low SR it was mostly negative. At 1.1 and 1.2 head/ha, allocating additional feed in autumn produced the highest return (0.04 and 0.08US\$/kg DM) than feed provided at other times of the year (averaging 0.02 and 0.05 US\$/kg DM). Otherwise, at SR 1.3 extra feed on winter was the dominant condition (MVF was within 0.017 and 0.194 US\$/kgDM). Bio-physical variables of livestock demand and seasonality of pasture growth were the main drivers of the marginal value of feed variability. This thesis help to highlight the importance of scaling and integrating disciplinary research outputs to the whole system level modelling the key biophysical and economic system variables while the effects of climatic variability is also considered. Therefore it may contribute to fill the gap between research products and technological innovation by beef cattle producers.

Keywords: Cow-calf systems, fescue, Nitrogen, climatic risk, stocking rate, extra feed, modelling.

Abreviaturas:

°Cd: Grados día (acumulación térmica)

20%-Ot: Tratamiento con fertilización de 100 kgN/ha aplicados a el 20 de la sup. del campo

20%-Pri: Tratamiento con fertilización de 100 kgN/ha aplicados a el 20 de la sup. del campo

40%-Ot: Tratamiento con fertilización de 100 kgN/ha aplicados a el 20 de la sup. del campo

40%-Pri: Tratamiento con fertilización de 100 kgN/ha aplicados a el 40 de la sup. del campo

AMF: Acumulación de masa forrajera

Cb: Factor de corrección del desvío

CC: Condición corporal (escala 1-9)

CCC: Coeficiente del factor de concordancia

Control 0%: Tratamiento sin fertilización

EUN: Eficiencia de uso del nitrógeno

Inv-Seco: Años con invierno seco

MB: Margen bruto

MEF: Eficiencia del modelo

MFP: Masa forrajera promedio (disponibilidad de pastura del establecimiento)

MPE: Mean Prediction Error

Nopt: Concentración óptima de N para el crecimiento de las plantas (parámetro)

Ot-Se: Años con otoño seco

PET: Evapotranspiración potencial

Pri-Se: Años con primavera seca

PVD: Peso vivo de los terneros al destete

r²: Coeficiente de determinación

Rent: Rentabilidad productiva, expresada como el retorno obtenido del capital invertido en hacienda y equipamientos

RFA: Radiación fotosintéticamente activa

TD: Tasa destete

TP: Tasa preñez de vacas y vaquillonas

V: Relación de varianza

Ver-Seco: Años con verano seco

VMA: Valor marginal del alimento (US\$/kgMS)

Índice

ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVIII
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN.....	1
BIBLIOGRAFÍA	7
CAPÍTULO 2: SIMULACIÓN DE PASTURAS DE FESTUCA CON UN MODELO BIOFÍSICO /CLIMA DEPENDIENTE	13
INTRODUCCIÓN	13
MATERIALES Y MÉTODOS	14
<i>Datos de campo.....</i>	<i>14</i>
<i>Modelo de simulación de pasturas.....</i>	<i>18</i>
<i>Parametrización del modelo de simulación.....</i>	<i>18</i>
<i>Análisis de las simulaciones.....</i>	<i>22</i>
RESULTADOS	23
<i>Evaluación del modelo.....</i>	<i>32</i>
DISCUSIÓN.....	34
CONCLUSIONES.....	36
BIBLIOGRAFÍA	37
CAPÍTULO 3: EVALUACIÓN MEDIANTE MODELACIÓN DE DIFERENTES ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN UN SISTEMA DE CRÍA VACUNA.....	42
INTRODUCCIÓN	42
MATERIALES Y MÉTODOS	43
<i>Características del sistema de producción y del clima de la zona.....</i>	<i>43</i>
<i>Simulación de las respuestas a la fertilización y la variación intra e inter anual de la producción de las pasturas.....</i>	<i>44</i>
<i>Simulación y evaluación del impacto de la intensificación a nivel del establecimiento ganadero.....</i>	<i>45</i>
RESULTADOS	50

<i>Simulación de la dinámica del crecimiento de las pasturas y las respuestas a la fertilización nitrogenada.</i>	50
<i>Incorporación del efecto en el sistema de cría vacuna de la variabilidad climática interanual.</i>	53
DISCUSIÓN.....	59
<i>Implicancias de la intensificación en el sistema de producción ganadero.</i>	60
CONCLUSIONES.....	63
BIBLIOGRAFÍA	64
CAPÍTULO 4: ESTIMACIÓN DEL VALOR ECONÓMICO DEL ALIMENTO ADICIONAL EN SISTEMAS DE CRÍA EN CONDICIONES DE VARIABILIDAD INTERANUAL.	71
INTRODUCCIÓN	71
MATERIALES Y MÉTODOS	72
<i>Datos de crecimiento de las pasturas y acumulación de masa forrajera.</i>	73
<i>Simulación del sistema ganadero.</i>	74
<i>Estimación del valor marginal del alimento.</i>	78
RESULTADOS	81
<i>Impacto de la adición de alimento extra sobre la producción y variabilidad de los sistemas de cría vacuna.</i>	81
<i>Estimación del valor marginal del alimento extra.</i>	85
DISCUSIÓN.....	88
CONCLUSIONES.....	92
BIBLIOGRAFÍA	94
CAPÍTULO 5: DISCUSIÓN GENERAL	99
<i>Modelación biofísica del crecimiento de pastura de festuca.</i>	102
<i>Impactos a nivel de sistema de producción de la intensificación de carga animal, fertilización N y de provisión de alimento extra en un contexto de variabilidad climática</i>	105
<i>Oportunidades y desafíos para el uso de modelos de simulación para colaborar con la identificación de oportunidades de innovación de estos sistemas.</i>	111
CONCLUSIONES.....	113
BIBLIOGRAFÍA	115

Índice de figuras

Capítulo 2

- Figura 1: Duración de los experimentos seleccionados de crecimiento estacional de las pasturas de festuca..... 15
- Figura 2: Precipitaciones promedio, evapotranspiración potencial y temperatura media diaria del aire en la Estación Experimental INTA Balcarce (2000–2010). Las líneas verticales muestran los desvíos estándar de cada variable. 17
- Figura 3: Acumulación de masa forrajera AMF (kg MS ha^{-1}) registrada a campo ($\text{---}\circ\text{---}$), y en las simulaciones ($\text{---}\bullet\text{---}$) de los experimentos de Invierno/Primavera 1996: (a) 0, (b) 50, (c) 100, (d) 150 and (e) 200 kg N ha^{-1} 24
- Figura 4: Acumulación de masa forrajera, AMF (kg MS ha^{-1}) para el experimento de Primavera 2006 ($\text{---}\circ\text{---}$) y los resultados simulados ($\text{---}\bullet\text{---}$), con (a) 0 N fertilización, (b) fertilizado con 75, (c) 150, (d) y 225 kg N ha^{-1} 25
- Figura 5: Acumulación de masa forrajera (AMF, kg MS ha^{-1}) medida en los ensayos de campo ($\text{---}\circ\text{---}$) y simuladas ($\text{---}\bullet\text{---}$) para los experimentos de Primavera 2009 con dosis de fertilización nitrogenada de 0 (a, b), 75 (c, d), 150 (e, f), 350 (g, h) y 500 kg N ha^{-1} (i, j) para pasturas en seco (lado izquierdo) o con riego (lado derecho)..... 26
- Figura 6: Acumulación de masa forrajera (AMF, kg MS ha^{-1}) de los ensayos de campo ($\text{---}\circ\text{---}$) y simulados ($\text{---}\bullet\text{---}$), para los tratamiento de Verano 2009 donde se utilizaron dos dosis de fertilización, 40 (a, b) y 200 kg N ha^{-1} (c, d) en seco (lado izquierdo) y con riego (lado derecho)..... 28
- Figura 7: Acumulación de masa forrajera (AMF, kg MS ha^{-1}), en los ensayos de campo ($\text{---}\circ\text{---}$) y simulados ($\text{---}\bullet\text{---}$), de los experimentos de Otoño 2009 en pasturas de festuca con dosis de fertilizante nitrogenado de 0 (a, b); 75 (c, d); 150 (e, f); y 225 kg N ha^{-1} (g, h) en seco (lado izquierdo) o con riego (lado derecho)..... 30
- Figura 8: Contenido de nitrógeno de la planta (a) y acumulación de masa forrajera (b) en los ensayos de campo (\blacktriangledown), simulación A donde la concentración de N óptima para el crecimiento de las plantas se mantiene constante independientemente de la acumulación de masa forrajera

(●), y simulación B donde la concentración óptima de N sigue la función alométrica de forma $N\% = 4.8 * \text{masa de hojas}^{-0.32}$ (○). Curva crítica de referencia de dilución del N (—).31

Figura 9: Gráfico Bland-Altman de acumulación de masa forrajera (AMF), para Primavera 2006 (●), Primavera 2009 con riego (○), Primavera 2009 en seco (▼), Verano 2009 con riego (Δ), Verano 2009 en seco (■), Invierno 1996 (□), Otoño 2009 con riego (◆) y Otoño 2009 en seco (◇). La línea sólida indica la diferencia media entre las AMF observadas y simuladas, mientras que las líneas punteadas muestran la media ± dos desvíos estándar.33

Capítulo 3

Figura 1: Precipitaciones mensuales promedio (barras blancas), y evapotranspiración potencial (ET0, barras rayadas), en Laprida (1993 - 2013). Las líneas verticales muestran el desvío estándar.....44

Figura 2: Resultados de tasas de acumulación neta de forraje mensuales (kg MS/ha/día), de simulaciones de largo plazo (1993-2013) para la región de Laprida. Los escenarios simulados fueron tratamientos sin fertilizar, fertilización otoñal o fertilización en primavera con 100kgN/ha (líneas sólida, punteada y discontinua respectivamente).47

Figura 3: Acumulación forrajera (AMF) de largo plazo (1993-2013), correspondiente a pasturas de festuca de la región de Laprida, Argentina. Box plots muestran los percentiles 10, 25, 75 y 90°. Las líneas punteadas indican la media y los puntos son los percentiles 5 y 95°.51

Figura 4: Acumulación de masa forrajera adicional (sobre el tratamiento control= 0 kgN/ha) en respuesta a la fertilización (100kg/ha) de otoño (a) o de primavera (b) en distintos tipos de año (barras negras, gris claro, y gris oscuros son años promedio, con otoño seco o con primavera seca respectivamente).52

Figura 5: Acumulación de masa forrajero promedio mensual (kgMS/ha.día) para pasturas de festuca afectadas por distintos tipo de año (promedio, otoño seco o primavera seca) en el escenario base con 0N (barras negras) y fertilizadas con N (100kgN/ha) en otoño (barras gris oscuro) o la misma dosis de N en primavera (barras grises claras) en la región de Laprida, Argentina.53

Figura 6: Heno cosechado (ton. heno/ha/año), y suministrados en el siguiente invierno, en cargas de 0,9; 1,1 y 1,3 cab/ha bajo diferentes tipos de año (Años Promedio, izquierda; años con otoño

seco, centro; o años con primavera seca, derecha) en planteos fertilizados con 100kgN/ha en otoño (Ot.) o primavera (Prim.) en 20 o 40% de la superficie del campo.57

Figura 7: Margen bruto (U\$S/ha) para los sistemas de cría vacuna modelados con cargas de 0,9; 1,1 y 1,3 cab/ha de la región de Laprida, Argentina. Los grupos de 5 barras representan los tratamientos de fertilización nitrogenada siendo control (0kg N), 100 kgN/ha en el 20% de la superficie del campo aplicados en otoño o primavera, y 100kgN/ha aplicados al 40% de la superficie del establecimiento en otoño o primavera, bajo diferentes tipos de año: Año promedio (Prom.), o años con otoño seco o primavera seca (Ot-Se o Pri-Se, respectivamente).....58

Figura 8: Rentabilidad productiva (expresada como el % de retorno al capital invertido en el rodeo de cría y maquinarias/equipamiento) para los sistemas de cría simulados de la región de Laprida con cargas animales de 0,9; 1,1 y 1,3 cab/ha. Los grupos de cinco barras representan el tratamiento control (0kg N), 100kgN/ha aplicado en el 20% del establecimiento en otoño o primavera, y 100kgN/ha aplicado al 40% de la superficie del campo en otoño o primavera ante diferentes tipos de año: Promedio (Prom.) o años con otoño o primavera secos (Ot-Se ó Pri-Se respectivamente).58

Capítulo 4

Figura 1: Resultados de largo plazo (1993-2013), de acumulación de masa forrajera (AMF), estacional de pasturas de festuca de la región de Laprida, Argentina. Las cajas muestran los percentiles 10°, 25°, 75° y 90°. Las líneas punteadas indican la media y los puntos son los 5° y 95° percentiles. Los primeros cuartiles (parte de debajo de las cajas) corresponden a las estaciones secas denominadas Ot-Se, Inv-Se, Pri-Se y Ver-Se para Otoño, Invierno, Primavera y Verano respectivamente.74

Figura 2: Diagrama de procesos que describe las interacciones de la acumulación de masa forrajera (AMF), el alimento adicional extra (ADE), la performance animal (cambio de peso vivo, condición corporal, y performance reproductiva expresada como tasa de preñez). Las flechas grises solidas indican las interacciones entre las variables de la pastura y las de los animales (A), las líneas solidas negras, las interacciones entre la oferta y la demanda de alimento (B), las líneas punteadas negras la cantidad de alimento extra agregado, las líneas punteadas grises muestran los datos de entrada y las flechas negras huecas los resultados productivos y económicos (C).77

Figura 3: Frecuencia de déficits estacionales de alimento (% de meses en los que el promedio de la masa forrajera de pastura del establecimiento fuese < 1800 kg MS/ha en invierno/inicio primavera y verano o <2000 kg MS/ha en otoño y primavera tardía) en escenarios de sistemas de cría vacuna simulados a cargas animales crecientes (0,9 a 1,3 cab/ha) y la adición de alimento extra. El alimento extra se agregó incrementando 10% la AMF para cada mes del año (anual, círculo llenos), o agregando la totalidad del alimento extra en una de las estaciones del año por vez (círculos abiertos, triángulos llenos, triángulos huecos y cuadrados rellenos corresponden a verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente). Los escenarios base (sin alimento extra), están representados por las líneas sólidas con diamantes huecos. La regla de destete precoz se activo en los escenarios base (sin adición de alimento extra), a cargas de 1,2 y 1,3 cab/ha.82

Figura 4: Indicadores productivos de sistemas productivos ganaderos de la región de Laprida simulados en el período 1993 a 2013 a las cargas animales de 0,9; 1,0; 1,1; 1,2 y 1,3 cab/ha, donde se agregó o no alimento extra anualmente, en verano, otoño, invierno o primavera: (A) Condición corporal (CC) de las vacas al inicio del servicio; (B) tasa de preñez (vacas preñadas/vacas en servicio); (C) Terneros de destete vendidos (kg PV/ha/año); (D) Heno confeccionado (rollos heno/ha/año). Los box plots muestran la mediana y los percentiles 10, 25, 75 y 90°. Los escenarios con carga animal 1,3 cab/ha sin y con adición de alimento en verano y otoño no tuvieron heno cosechado.....84

Figura 5: Valor marginal del alimento adicionado a sistemas de cría de la Depresión de Laprida en años promedio y años con la presentación de verano, otoño, invierno o primavera secos con carga animal creciente de 0,9 (barras negras), 1,0 (barras gris claro con líneas cruzadas), 1,1 (barras grises cuadrículadas), 1,2 (barras blancas con líneas cruzadas) y 1,3 cab/ha (barras gris oscuro con líneas horizontales). El alimento fue agregado incrementando el 10% de la AMF de cada mes a lo largo del año (Anual), o agregando la cantidad total en una de las estaciones del año por vez (Verano, Otoño, Invierno o Verano, respectivamente).86

Figura 6: Probabilidad acumulada del valor marginal del alimento adicionado a sistemas de cría con carga animal creciente (0,9 a 1,3 cab/año) de la Depresión de Laprida asociados a variabilidad en la producción de forraje y variabilidad económica (dada por la variabilidad de precios de los insumos y de las ventas de la producción). El alimento fue agregado incrementando el 10% de la AMF de cada mes a lo largo del año (Anual, línea sólida), o agregando la cantidad total en una de las estaciones del año por vez (líneas punteadas, líneas

discontinuas cortas, líneas discontinuas y puntos, o líneas discontinuas largas corresponden a Verano, Otoño, Invierno o Verano, respectivamente).87

Figura 7: Valor marginal del alimento adicionado durante otoño en escenarios con carga animal creciente (0,9 a 1,3 cab/ha), estimado en escenarios con precios fijos (barras negras) e incluyendo la variabilidad de precios (barras grises).88

Capítulo 5

Figura 1: Representación esquemática de la estrategia de modelación utilizada para evaluar el impacto de la fertilización nitrogenada en sistemas de cría vacuna de la Depresión de Laprida. El alcance/rol de cada modelo de simulación está indicado por las líneas punteadas y las flechas en la base indican la correspondencia con los objetivos de la tesis. La transferencia de información entre los modelos está indicada por flechas. 106

Figura 2: Comparación de distintas fuentes de alimento en relación al valor marginal del alimento extra (VMA) adicionado en otoño a planteos de cría vacuna de la Depresión de Laprida. 110

Figura 3: Evaluación de alternativas tecnológicas en el marco de un proceso participativo (adaptado de Martin et al., 2011). 112

Índice de tablas

Capítulo 2

Tabla 1: Pautas de manejo y condiciones climáticas para cada uno de los experimentos de pasturas de festuca.	16
Tabla 2: Ajuste de parámetros utilizados en las simulaciones de las pasturas de festuca.	20
Tabla 3: Condiciones climáticas y masa inicial de hojas para los experimentos de Primavera 2006 e Invierno/Primavera 1996 desde el 14 de Agosto al 15 de Octubre, lapso que se corresponde con el periodo experimental del experimento de Primavera 2009.	27
Tabla 4: Resumen de estadísticos indicando el desempeño del modelo para la estimación de la acumulación de masa forrajera (AMF, expresada en kg MS ha ⁻¹). Se presenta el análisis de todos los datos en conjunto, los tratamientos con riego, en seco y por estación.	32

Capítulo 3

Tabla 1: Tasas de preñez base (%) obtenidas a las cargas de 0,9; 1,1 y 1,3 cab/ha de los escenarios sin fertilizar y las diferencias en relación a los escenarios fertilizados con 100kgN/ha en otoño o primavera (aplicados a 20 o 40% de la superficie del campo), en diferentes tipo de año (en función de los establecimientos fertilizados con 100 kgN/ha en años Promedio o años con otoño o primaveras secos). Los asteriscos indican aquellos escenarios donde se activó la regla de destete precoz.	55
Tabla 2: Producción de PV de terneros de destete a las cargas de 0,9; 1,1 y 1,3 cab/ha en los escenarios sin fertilizar (Base) y el PV adicional producido (kg PV/ha) con 100kgN/ha en Otoño o Primavera (aplicados a 20 o 40% de la superficie del establecimiento), bajo diferentes tipos de año (Promedio, otoño seco o primavera seca, respectivamente). Los asteriscos indican aquellos planteos donde se activó la regla de destete precoz de los terneros.	56

Capítulo 4

Tabla 1: Parámetros y distribuciones utilizados en el modelo de riesgo.	80
--	----

Capítulo 1: Introducción

En Argentina, el área denominada “pampa inundable” es reconocida como la principal área de cría vacuna, donde se produce el 45% de los terneros de Argentina (MINAGRI, 2015). Esta área comprende una superficie de 9 millones de hectáreas situadas en el centro oeste de la región de la Pampa Húmeda e incluye las cuencas del Río Salado y la Depresión de Laprida (Soriano, 1992). Esta última, que comprende los partidos de Olavarría, Benito Juárez, Laprida y General La Madrid, posee una superficie aproximada de 2 millones de hectáreas, donde la ganadería vacuna ocupa el 75% de la superficie del territorio representando su stock ganadero el 3,6% del total de la provincia de Buenos Aires (Recavarren, 2016).

Los sistemas ganaderos modales de esta región cuentan con una superficie aproximada de 500 has donde las actividades productivas están orientadas en función de la aptitud productiva del suelo, predominando la producción ganadera (Mosciaro et al., 2012). Las pasturas de agropiro y festuca son ampliamente utilizadas en esta zona (Cid et al., 2008). La producción promedio para la cría vacuna es de 80 kg carne/ha.año, hay explotaciones con 125 kg/ha.año y el potencial productivo es de 180-200 kg/ha.año y los factores que explican esta diferencia son la baja tasa de destete debido a problemas nutricionales y reproductivos (INTA, 2013). Esta condición se la menciona habitualmente como “brecha tecnológica” que expresa la diferencia entre la situación promedio actual y el potencial lográble aplicando dichas tecnologías (Rearte y Pordomingo, 2014). Para el caso particular de la Cuenca del Salado las vinculadas al manejo sanitario y nutricional del rodeo, como la planificación forrajera, la fertilización, y el control de malezas (aumento y mejora de la oferta forrajera) constituyen tecnologías críticas (aquellas que producen un alto impacto en la productividad y/o calidad), las cuales tendrían que ser las primeras en considerarse en los procesos de adopción (Andreu et al., 2014). Los planteos productivos que logran una mayor productividad en la zona de la Depresión de Laprida producen más forraje por unidad de superficie y de manera más estable, los recursos forrajeros son manejados de modo de efficientizar el uso de los recursos (radiación solar y agua) y son mejor utilizados logrando una conversión a carne más eficiente (Pacín y Oosterheld, 2015). Sin embargo, hay distintas limitantes para la adopción de tecnologías que se observan en el sector agropecuario, siendo entre las de mayor importancia, la percepción del grado de complejidad de la nueva tecnología y las dificultades para comprenderla, que tan fácilmente observables son los impactos de su incorporación, su costo económico-financiero, la opinión personal hacia la tecnología en cuestión, la relevancia percibida y la actitud frente al riesgo (Guerin y Guerin, 1994). *En la*

región, el INTA, Universidades y grupos CREA son importantes difusores tecnológicos, sin embargo hay evidentemente un problema de adopción. Entre las posibles causas del retraso en la incorporación de nuevas tecnologías puede mencionarse la dificultad en cuantificar su impacto en el sistema de producción, tanto a nivel productivo como económico. El autor de esta tesis ha tenido esta zona como trabajo institucional de INTA que le ha permitido entender parcialmente la situación, por la importancia productiva de la misma, se suma la oportunidad de efectuar un aporte científico a la situación a través de este trabajo.

El desarrollo de prácticas de manejo y tecnologías que contribuyan a reducir la frecuencia y/o intensidad de presentación de déficits en la oferta forrajera (períodos durante los cuales la provisión de forraje es insuficiente para cubrir la demanda animal ya sea de cantidad y/o calidad de alimento), pueden incrementar en gran medida la rentabilidad de los sistemas ganaderos, a través de la reducción de la cantidad de alimento suplementado y/o por cargas más altas que puedan ser sostenidas por el sistema de manera segura/estable (Moore et al., 2009). Las pasturas perennes tienen gran potencial para mejorar la productividad y la adaptación de los sistemas a la variabilidad climática, habilitar áreas improductivas, además de aportar potenciales servicios ambientales (Lemaire *et al.*, 2011). La alta capacidad de producción de la festuca (*Festuca arundinacea Schreb*) bajo condiciones críticas en verano debido a su eficiente sistema radicular (Raeside et al., 2012), resulta clave para el incremento de la productividad de la base forrajera con una mejor distribución estacional (Nie et al., 2004). Localmente, las pasturas de festuca han sido asociadas a los efectos tóxicos de ergocalcoides (pérdidas reproductivas, reducción en la ganancia de peso, estrés térmico, el síndrome distérmico) en pasturas con festucosis tóxica, contaminadas con hongos endófitos de la especie *Epichloë coenophiala* (ex *Acremonium coenophialum*), (Armendano et al., 2015; Campero, 1996). Sin embargo, actualmente se encuentran disponibles comercialmente semillas libres de estos hongos, asegurando la implantación de pasturas que permiten un pastoreo seguro, pudiendo expresarse las virtudes de la festuca. Estas características sustentan el interés creciente para su utilización regional (Insúa et al., 2016; Lattanzi et al., 2007; Martinefsky et al., 2010; Scheneiter y Améndola, 2012; Scheneiter y Fontana, 2002), en países europeos (Durand y Ghesquiere, 2002; Durand et al., 2002) y en Australia (Nie et al., 2008; Tharmaraj et al., 2008), entre otros lugares. *Por lo mencionado previamente, se observa la importancia de la mejora de la oferta forrajera en planteos de cría de la Depresión de Laprida en base a esta especie forrajera por las condiciones de crecimiento de la zona y sus características productivas.*

Actualmente se cuenta con pautas y recomendaciones técnicas para el manejo de las pasturas basado en conceptos de ecofisiología de pasturas (buenas prácticas de manejo, BPM, Agnusdei et al. (2010b); Agnusdei y Di Marco (2015), respaldados en sólidos antecedentes de investigación (Agnusdei et al., 2007; Agnusdei et al., 2010a; Chapman et al., 2012; Lemaire et al., 2009). Sin embargo, estas BPM se encuentran centradas en el manejo del lote apuntando a la productividad y eficiencia de uso de las pasturas de cada potrero, con lo cual surge la necesidad de escalar y evaluar el impacto a nivel del sistema de producción. La utilización de la fertilización N como herramienta para adelantar el crecimiento de las pasturas al inicio de la primavera y/o aumentar la producción, así como incrementar la productividad otoñal con el propósito de lograr una mayor disponibilidad de forraje al inicio del invierno surgen como estrategias de manejo relevantes para su evaluación, contándose a tal fin con importante información a nivel de parcelas (e.g. Lattanzi, 1998; Marino y Agnusdei, 2007 y Mazzanti y Arosteguy, 1985). A esto se suma información incipiente de un módulo demostrativo-experimental de pasturas de festuca integrado a un campo comercial de la zona de Laprida, Provincia de Buenos Aires, llevado adelante por INTA en el marco de un proyecto de extensión y transferencia (INTA, 2013), que permitió monitorear y evaluar las implicancias del manejo de estas pasturas aplicando BPM (Bilotto, 2014). *La información generada a nivel de ensayos de parcela ha generado un cumulo importante de información valiosa que respalda a nivel local conceptos de base ecofisiológica sobre el crecimiento y manejo de las pasturas, lo que ha permitido su aplicación en módulos experimentales. Sin embargo, es menester integrar y escalar a nivel del sistema de producción estas prácticas de manejo de modo de cuantificar su impacto y ajustar su aplicación a las particularidades de cada planteo ganadero.*

Los modelos matemáticos constituyen una herramienta clave para complementar la investigación de campo, ayudando a predecir y comprender los efectos de las variaciones climáticas y del manejo sobre los sistemas biofísicos, como también para el logro de progresos significativos en la generación y adopción de tecnologías de alto impacto productivo (McCown, 2002; Moore et al., 1997). Existen distintos antecedentes en el desarrollo de modelos de crecimiento de pasturas (Johnson et al., 2003; Moir et al., 2000; Moore et al., 1997; Pan et al., 2000; Thornley, 2001), mayormente orientados a pasturas dominadas por raigrás perenne. En lo que respecta a la Argentina sólo se ha calibrado un modelo de simulación de ecosistemas con resolución espacial para ambientes semiáridos de la estepa magallánica (Peri y Cibils, 2006), no existiendo aún desarrollos disponibles para el caso de zonas templadas. En las simulaciones de sistemas ganaderos de estas zonas se ha utilizado un modelo calibrado para las condiciones de Nueva

Zelanda (McCall et al., 2003) pero que respondió aceptablemente para agropiro (Romera, 2004) y también se han utilizado ecuaciones logísticas (Dieguez Camerón y Fort, 2017; Feldkamp, 2004; Machado, 2004). Para la integración y cuantificación del conocimiento a nivel del sistema de producción agroganadero (“whole-farm”) se cuenta localmente con un modelo biofísico de sistemas de producción agropecuarios desarrollado para las características y condiciones de los planteos productivos locales, particularmente de la región Pampeana (SIMUGAN, Machado et al., 2010). *En resumen, los modelos de simulación constituyen herramientas para la integración y cuantificación del conocimiento posibilitando integrar información disciplinaria de modo de indagar en las consecuencias a nivel de los sistemas de producción, fortaleciendo la investigación y la generación de tecnologías relevantes para los planteos productivos comerciales. Un aspecto crucial en la modelación de sistemas pastoriles, es disponer de una buena capacidad predictiva del crecimiento forrajero (Woodward y Rollo, 2002), sobre todo ante la variabilidad climática interanual, lo que constituye el punto de partida de esta tesis, incluyendo la respuesta a la aplicación estratégica de nitrógeno.*

El desarrollo de prácticas de manejo y tecnologías que contribuyan a reducir la frecuencia y/o intensidad de presentación de déficits en la oferta forrajera (períodos durante los cuales la provisión de forraje es insuficiente para cubrir la demanda animal ya sea de cantidad y/o calidad de alimento), resultan claves ya que pueden incrementar en gran medida la rentabilidad de los sistemas ganaderos y hacerlos más estables (Moore et al., 2009). *Para este fin, se requiere identificar los períodos del ciclo productivo donde es más relevante contar con más alimento. Un enfoque posible es la estimación del beneficio económico que se puede lograr agregando alimento adicional a través del cálculo del valor marginal del alimento (VMA) que indica el impacto del agregado de un kg de materia seca de alimento ó de energía metabolizable extra (Megajoule) en la rentabilidad de un sistema de producción particular (Bell et al., 2008).*

La investigación de tecnologías innovadoras y prácticas de manejo para incrementar la productividad de los sistemas agroganaderos requerirá la identificación y exploración de nuevas intervenciones tecnológicas en los sistemas productivos que contribuyan a mejorar la eficiencia de uso de recursos y aquellas que permitan lograr saltos productivos, analizando la relación entre los retornos que puedan proveer en relación al riesgo implícito en su implementación, en particular aquellos vinculados a la variabilidad climática (Carberry et al., 2010). *La presentación de déficits en la oferta forrajera, tanto en función de la distribución de la producción forrajera estacional como en su variación interanual, hace oportuna la disponibilidad de cuantificaciones*

del impacto productivo y económico de la incorporación de alimento extra en los sistemas ganaderos en distintos momentos del ciclo productivo, para proveer información a la toma de decisiones.

Hipótesis

Por lo expuesto precedentemente, el presente trabajo planteó la siguiente hipótesis:

- El incremento de la productividad de las pasturas mediante N en momentos claves del ciclo productivo en los sistemas de cría vacuna de la Depresión de Laprida con carga animal crecientes por encima de lo utilizado en el sistema modal, mejorará tanto la respuesta y la estabilidad de las respuestas productiva y económica de estos sistemas aun ante la variabilidad interanual histórica.

Objetivo general

El objetivo principal de la tesis es:

- Evaluar y calibrar con investigación de campo un modelo de simulación biofísico y clima-dependiente del crecimiento de pasturas templadas y realizar a través de su integración a un simulador integral de empresas agropecuarias (“whole farm”), evaluaciones de alternativas de intensificación de sistemas de cría de la zona de la Depresión de Laprida en términos de mejoras en los niveles y en la estabilidad de la producción y performance económica.

Objetivos específicos

Los objetivos específicos de la tesis son:

- Evaluar y calibrar un modelo biofísico y clima-dependiente de pasturas a partir de los modelos disponibles, para simular el crecimiento de pasturas de festuca bajo condiciones

locales y estimar el impacto de distintas estrategias de manejo forrajero sobre su productividad (Capítulo 2).

- Evaluar mediante simulación el impacto de la intensificación de sistemas de cría de la Depresión de Laprida, Buenos Aires en base a fertilización nitrogenada de pasturas de festuca y aumento de la carga animal sobre las respuestas productiva y económica bajo condiciones de variabilidad climática interanual (Capítulo 3).
- Cuantificar mediante simulación la capacidad de respuesta de sistemas de cría vacuna de la Depresión de Laprida, Buenos Aires ante el agregado de alimento extra (valor marginal del alimento) ante condiciones de variabilidad climática y de precios (Capítulo 4).

Bibliografía

- Agnusdei, M., Assuero, S.G., Fernández Grecco, R.C., Cordero, J.J., Burghi, V.H., 2007. Influence of sward condition on leaf tissue turnover in tall fescue and tall wheatgrass swards under continuous grazing. *Grass and Forage Science* 62, 55-65. 10.1111/j.1365-2494.2007.00561.x
- Agnusdei, M., Assuero, S.G., Lattanzi, F.A., Marino, A., 2010a. Critical N concentration can vary with growth conditions in forage grasses: implications for plant N status assessment and N deficiency diagnosis. *Nutr Cycl Agroecosyst* 88, 215-230. 10.1007/s10705-010-9348-6
- Agnusdei, M., Di Marco, O.N., Marino, A., Errecart, P., Insúa, J., 2010b. Festuca alta: Una mirada ecofisiológica para entender y manejar la producción, calidad y eficiencia de utilización del forraje., XXII Reunión Anual de Forrajeras. INTA Pergamino, Argentina, p. 16.
- Agnusdei, M.G., Di Marco, O., 2015. Más producción de carne, menos riesgo y más flexibilidad con pasturas perennes en suelos bajos., En: Premio 75° Aniversario Colombo y Magliano.
- Andreu, M., Giancola, S.I., Carranza, A., Roberi, A., Serena, J., Carranza, F., Nemoz, J.P., Meyer Paz, R., 2014. Resultados físicos y económicos de la implementación de tecnologías críticas en sistemas ganaderos bovinos de ciclo completo en Cuenca del Salado, provincia de Buenos Aires, in: Agraria, A.A.d.E. (Ed.), IV Congreso Regional de Economía Agraria; XLV Reunión Anual de la Asociación Argentina de Economía Agraria; XIX Congreso de Economistas Agrarios de Chile., Buenos Aires, Argentina, pp. 1-11.
- Armendano, J., Odeón, A.C., Callejas, S., Echarte, L., Odriozola, E., 2015. Estrés térmico y síndrome distérmico en bovinos para carne de la provincia de Buenos Aires., 9nas Jornadas Internacionales de Veterinaria Práctica, Mar del Plata - Argentina, pp. 1-14.
- Bell, L.W., Robertson, M.J., Revell, D.K., Lilley, J.M., Moore, A.D., 2008. Approaches for assessing some attributes of feed-base systems in mixed farming enterprises. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 789-798. <http://dx.doi.org/10.1071/EA07421>
- Bilotto, F., 2014. Manejo ecofisiológico de pasturas de festuca para una ganadería de alto rendimiento, Fac. Cs. Vet. UNICEN, p. 68.
- Campero, C.M., 1996. Efectos de la festuca toxica sobre el desempeño reproductivo y produccion en bovinos; una revisión. *Therios* 132 1-16.

Carberry, P.S., Bruce, S.E., Walcott, J.J., Keating, B.A., 2010. Innovation and productivity in dryland agriculture: a return-risk analysis for Australia. *The Journal of Agricultural Science* 149, 77-89. doi:10.1017/S0021859610000973

Chapman, D.F., Tharmaraj, J., Agnusdei, M., Hill, J., 2012. Regrowth dynamics and grazing decision rules: further analysis for dairy production systems based on perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) pastures. *Grass and Forage Science* 67, 77-95. 10.1111/j.1365-2494.2011.00824.x

Cid, M.S., Ferri, C.M., Brizuela, M.A., Sala, O., 2008. Structural heterogeneity and productivity of a tall fescue pasture grazed rotationally by cattle at four stocking densities. *Grassland Science* 54, 9-16. 10.1111/j.1744-697X.2008.00099.x

Dieguez Camerón, F., Fort, H., 2017. Towards scientifically based management of extensive livestock farming in terms of ecological predator-prey modeling. *Agr. Syst.* 153, 127-137. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agry.2017.01.021>

Durand, J.L., Ghesquiere, M., 2002. Root biomass changes in tall fescue and italian ryegrass swards under two irrigation regimes. *Grassland Science in Europe* 7, 292-293.

Durand, J.L., Ghesquiere, M., Bariac, T., Fugè, M., 2002. Breeding for deeper rooting grasses with the help of 18O natural abundance in soils., in: Villalobos, F. (Ed.), *Proceedings VII Congress of the European Society of Agronomy*, pp. 81-82.

Feldkamp, C.R., 2004. Cow-calf operation in Argentina: a systems approach to intervention assessment, *Livestock Ecology*. Humboldt University, Berlin, Germany, p. 205.

Guerin, L., Guerin, T., 1994. Constraints to the adoption of innovations in agricultural research and environmental management: a review. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 34, 549-571. <http://dx.doi.org/10.1071/EA9940549>

Insúa, J.R., Agnusdei, M.G., Machado, C.F., Berger, H., 2016. Modelación de la calidad nutritiva de pasturas defoliadas. *Rev Investigación Agropecuaria (RIA)* 42, 317-323.

INTA, 2013. BASUR 1272101 Proyecto regional con enfoque territorial centro oeste. (INTA: Olavarría, Lamadrid, Laprida, Benito Juárez). .

Johnson, I.R., Lodge, G.M., White, R.E., 2003. The sustainable grazing Systems Pasture Model: description, philosophy and application to the SGS National Experiment. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 43, 711-728.

Lattanzi, F.A., 1998. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el crecimiento de festucas de tipo templado y mediterráneo, Programa de Posgrado en Ciencias Agrarias - Curso de Posgrado en Producción Animal. Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Balcarce, p. 161.

Lattanzi, F.A., Mazzanti, A., Wade, M.H., 2007. Seasonal animal production of temperate and Mediterranean tall fescue cultivars under continuous variable stocking with close control of sward state. *Australian Journal of Agricultural Research* 58, 203-213.

<http://dx.doi.org/10.1071/AR06164>

Lemaire, G., Da Silva, S.C., Agnusdei, M., Wade, M., Hodgson, J., 2009. Interactions between leaf lifespan and defoliation frequency in temperate and tropical pastures: a review. *Grass and Forage Science* 64, 341-353. 10.1111/j.1365-2494.2009.00707.x

Lemaire, G., Hodgson, J., Chabbi, A., 2011. Grassland productivity and ecosystem services. CABI. 10.1079/9781845938093.0000

Machado, C.F., 2004. Field and modelling studies of the effect of herbage allowance and maize grain feeding on animal performance in beef cattle finishing system. Massey University, New Zealand, p. 271.

Machado, C.F., Morris, S.T., Hodgson, J., Arroqui, M.A., Mangudo, P.A., 2010. A web-based model for simulating whole-farm beef cattle systems. *Computer and Electronics in Agriculture* 74, 129-136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2010.07.007>

Marino, A., Agnusdei, M., 2007. Manejo estacional del suministro de nitrógeno en pasturas de *Festuca arundinacea* Scrieb (sudeste bonaerense, Argentina): Crecimiento y eficiencia en el uso de recursos [Seasonal management of N provision to tall fescue pastures (south-east of the Buenos Aires Province, Argentina): Pasture growth and seasonal resource use efficiencies.], APPA - ALPA, Cusco, Perú, pp. 1-6.

Martinefsky, M.J., Assuero, S.G., Mollier, A., Pellerin, S., 2010. Analysis of the response of two tall fescue cultivars of different origin to P deficiency. *Environmental and Experimental Botany* 69, 250-258. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envexpbot.2010.04.009>

Mazzanti, A., Arosteguy, J.C., 1985. Comparación del rendimiento estacional de forraje de cultivares de *Festuca arundinacea Schreb.* (Comparison of the forage seasonal yield of cultivars of *Festuca arundinacea Schreb.*). *Revista Argentina de Producción Animal* 5, 157-165.

McCall, D.G, Bishop-Hurley, G.J., 2003. A pasture growth model for use in a wholefarm dairy production model. *Agricultural Systems* 76, 1183–1205.

McCown, R.L., 2002. Changing systems for supporting farmers` decisions: problems, paradigms, and prospects. *Agr. Syst.* 74, 179-220.

MINAGRI, 2015. Dirección De Análisis Económico Pecuario Dirección Nacional De Estudios y Análisis Económico Del Sector Pecuario - Existencias bovinas SENASA.

Moir, J.L., Scotter, D.R., Hedley, M.J., Mackay, A. D., 2000. A climate-driven, soil fertility dependent, pasture production model. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 43, 491-500.

Moore, A.D., Donnelly, J.R., Freer, M., 1997. GRAZPLAN: Decision support systems for australian grazing enterprises. III. Pasture growth and soil moisture submodels, and the GrassGro DSS. *Agr. Syst.* 55, 535-582.

Moore, A.D., Bell, L.W., Revell, D.K., 2009. Feed gaps in mixed-farming systems: insights from the Grain & Graze program. *Animal Production Science* 49, 736-748.

<http://dx.doi.org/10.1071/AN09010>

Mosciaro, M.A., Natinzon, P.C., Tosi, J.C., 2012. Análisis de la situación actual y de la sustentabilidad económica de sistemas característicos de los territorios de Cerbas. Informe de avance conjunto del Proyecto Sistemas de Información Productiva, Socioeconómica y de Fortalecimiento de la Capacidad de Gestión Local de Los Territorios del CERBAS (BASUR 720071) y del Proyecto Competitividad y Sustentabilidad de los Sistemas de Producción. .

Nie, Z.N., Chapman, D.F., Tharmaraj, J., Clements, R., 2004. Effects of pasture species mixture, management, and environment on the productivity and persistence of dairy pastures in south-west Victoria. 1. Herbage accumulation and seasonal growth pattern. *Australian Journal of Agricultural Research* 55, 625-636.

Nie, Z.N., Miller, S., Moore, G.A., Hackney, B.F., Boschma, S.P., Reed, K.F.M., Mitchell, M., Albertsen, T.O., Clark, S., Craig, A.D., Kearney, G., Li, G.D., Dear, B.S., 2008. Field evaluation of perennial grasses and herbs in southern Australia. 2. Persistence, root characteristics and summer activity. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 424-435.

<https://doi.org/10.1071/EA07136>

Pacín, F., Oesterheld, M., 2015. Closing the technological gap of animal and crop production through technical assistance. *Agr. Syst.* 137, 101-107.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2015.04.007>

Pan, X., Hesketh, J., D., , Huck, M., G., 2000. OWSimu: an object-oriented and Web-based simulator for plant growth. *Agr. Syst.* 63, 33-47.

Peri, P.L., Cibils, A.F., 2006. Desarrollo de un Sistema de Soporte de Decisiones para mejorar porcentajes de señalada de modo ecológicamente sustentable en establecimientos de la Estepa Magallánica (Patagonia). INTA EEA Santa Cruz, Río Gallegos, Santa Cruz, Argentina.

Raeside, M.C., Friend, M.A., Behrendt, R., Lawson, A.R., Clark, S.G., 2012. A review of summer-active tall fescue use and management in Australia's high-rainfall zone. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 55, 393-411. 10.1080/00288233.2012.708663

Rearte, D.H., Pordomingo, A.J., 2014. The relevance of methane emissions from beef production and the challenges of the Argentinean beef production platform. *Meat Science* 98, 355-360.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.021>

Recavarren, P., 2016. La producción agropecuaria en Olavarría, Benito Juárez, Laprida y Gral. La Madrid: evolución y desafíos a futuro, in: INTA, E. (Ed.), p. 143.

Romera, A.J., 2004. Simulation of cow-calf systems in the Salado region of Argentina. Massey University, Palmerston North, New Zealand.

Scheneiter, O., Améndola, C., 2012. Tiller demography in tall fescue (*Festuca arundinacea*) swards as influenced by nitrogen fertilization, sowing method and grazing management. *Grass and Forage Science* 67, 426-436. 10.1111/j.1365-2494.2012.00861.x

Scheneiter, O., Fontana, S., 2002. Producción y calidad de forraje de pasturas puras y en mezcla de festuca alta [*Festuca Arundinacea Schreb*] y trébol blanco [*Trifolium repens L.*] *Revista de*

tecnología agropecuaria. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro Regional Buenos Aires Norte. Estación Experimental Agropecuaria Pergamino. INTA. EEA Pergamino 7, 42-46.

Soriano, A., 1992. Río de la Plata Grasslands., in: Coupland, R.T. (Ed.), *Ecosystems of the World*, pp. 367-407.

Tharmaraj, J., Chapman, D.F., Nie, Z.N., Lane, A.P., 2008. Herbage accumulation, botanical composition, and nutritive value of five pasture types for dairy production in southern Australia. *Australian Journal of Agricultural Research* 59, 127-138.

Thornley, J.H.M., 2001. Modelling grassland ecosystems., XIX International Grassland Congress, Brazil, p. 1029-1035.

Woodward, S., J., R., Rollo, M.D., 2002. Why pasture growth prediction is difficult. *Agronomy* 32, 17-26.

Capítulo 2: Simulación de pasturas de festuca con un modelo biofísico /clima dependiente¹

Introducción

Los sistemas de alimentación ganaderos que incrementan la cantidad y calidad del alimento de producción propia y que reducen la estacionalidad de la producción de forraje tienen la posibilidad de incrementar significativamente la estabilidad de los establecimientos ganaderos. El desafío de mejorar la utilización del forraje de producción propia es compartido por los sistemas de producción de base pastoral de muchas partes del mundo (Chapman et al., 2008a). Otro factor común de gran relevancia es que las proyecciones de cambio climático prevén condiciones más cálidas y posiblemente más secas, las cuales tendrán consecuencias en la productividad de los sistemas ganaderos pastoriles (Cullen et al., 2009). En ambientes más calurosos y secos, las plantas con raíces profundas y más tolerantes al calor podrían utilizarse para mejorar la producción de pasturas en secano. La incorporación de estas características en distintas forrajeras utilizadas comúnmente en pasturas se puede lograr a través de la selección y desarrollo de nuevos cultivares o utilizando especies que ya tienen estas características, tales como la festuca (*Festuca arundinacea* Schreb). En este sentido, las pasturas de festuca cuentan con la capacidad de mantener producciones razonables bajo condiciones climáticas limitantes, especialmente en veranos secos, mejorando la distribución de la acumulación de forraje y la producción anual (Nie et al., 2004; Tharmaraj et al., 2008). Por lo tanto, bajo condiciones extremas cada vez frecuentes por el cambio climático, las pasturas de festuca tienen un gran potencial de expansión a nivel mundial (Durand y Ghesquiere, 2002; Durand et al., 2002; Nie et al., 2008). Sin embargo estas pasturas no están ampliamente difundidas en el sector ganadero a nivel global, posiblemente en parte debido a que no se conoce bien su posible impacto económico en los sistemas ganaderos, así como los riesgos que conllevaría su uso (Chapman et al., 2008a).

Los modelos de simulación constituyen herramientas claves para complementar los estudios de campo ayudando a prever y comprender las consecuencias de las variaciones climáticas y las estrategias de manejo sobre los sistemas biofísicos y además generar y facilitar la adopción de

¹ Berger, H., Machado, C. F., Agnusdei, M., & Cullen, B. R. (2014). Use of a biophysical simulation model (DairyMod) to represent tall fescue pasture growth in Argentina. *Grass and Forage Science*, 69 (3), 441-453.

nuevas tecnologías (McCown, 2002; Moore et al., 1997). DairyMod, EcoMod y SGS Pasture Model son modelos biofísicos de simulación de pasturas destinados a sistemas de base pastoril de Australia y Nueva Zelanda, contando como base con la misma estructura biofísica de simulación (Johnson et al., 2008). Estos modelos han sido extensamente evaluados para pasturas base raigrás en un gran rango de ambientes y sistemas de manejo de pasturas en Australia y Nueva Zelanda (Cullen et al., 2008; White et al., 2008). También hay ejemplos de simulación de pasturas de festuca con DairyMod (Chapman et al., 2008a; Chapman et al., 2008b), aunque no se ha evaluado formalmente su capacidad predictiva para representar este tipo de pasturas.

El objetivo de este capítulo fue evaluar la capacidad y flexibilidad de DairyMod para representar la acumulación forrajera de pasturas de festuca de Argentina ante distintas condiciones ambientales que incluyen estaciones del año, niveles de nitrógeno e irrigación.

Materiales y métodos

Datos de campo

Se seleccionaron 5 ensayos estacionales de evaluación de crecimiento de pasturas establecidas de festucas templadas (*L. arundinaceum*) cv. El Palenque MAG INTA, llevados a cabo en la Estación Experimental INTA Balcarce (Longitud: 58° 18' 12.5" O Latitud: 37° 45' 57.7" S 125 msnm), para representar el crecimiento de estas en diferentes épocas del año (Figura 1).

El conjunto de datos seleccionados pertenecientes a 5 ensayos de campo, representan un amplio rango de condiciones de crecimiento, considerando temperatura diaria, radiación solar, precipitaciones, balance de agua, así como fertilización nitrogenada y tratamientos bajo riego y seco. Los datos fueron utilizados para evaluar la performance del modelo en diferentes estaciones bajo situaciones con y sin limitaciones de agua y nitrógeno.

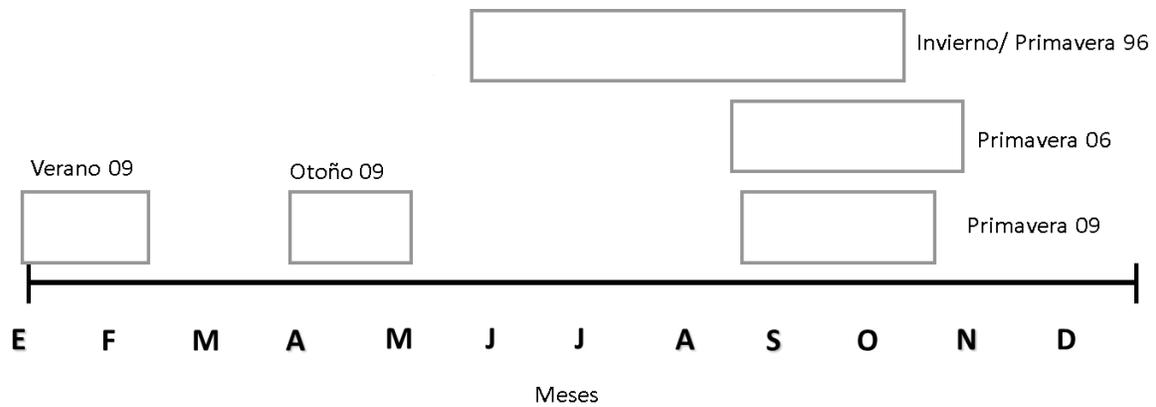


Figura 1: Duración de los experimentos seleccionados de crecimiento estacional de las pasturas de festuca.

La fertilización nitrogenada (N) y el riego en distintas estaciones del año fueron los efectos principales que se estudiaron en estos 5 experimentos (Tabla 1). Para evitar la posibilidad de deficiencias de fósforo se aplicó 20 kg ha^{-1} de superfosfato triple al inicio de todos los ensayos. Otros minerales tales como K (Moscatelli et al., 2001), y S (Angón et al., 2015), usualmente no son limitantes en el tipo de suelos en que se llevaron a cabo los experimentos.

Tabla 1: Pautas de manejo y condiciones climáticas para cada uno de los experimentos de pasturas de festuca.

Experimento	Primavera 2006	Primavera 2009	Verano 2009	Otoño 2009	Invierno/ Primavera 1996
Período experimental	15 Ago – 31 Oct	19 Ago – 14 Oct	30 Dic -19 Feb	19 Mar- 7 May	20 May – 15 Oct
Año implantación	1999	1999	1999	1999	1982
Precipitaciones (mm)	145.5	76.7	90.9	48.1	305.5
Temperatura media (°C)	12.5	11.0	22.3	17.3	9.7
Balance hídrico (lluvia - ETP; mm)	-75.3	-53.6	-187.4	-85.3	89.1
Radiación solar incidente acumulada (MJ m ²)	737	748	924	583	1396
Radiación solar incidente media (MJ m ² day ⁻¹)	12.1	13.1	23.4	12.2	9.7
Tiempo termal acumulado, (°Cd) ⁻¹	736	374	927	638	774
Duración del ensayo (días)	77	56	51	49	148
Fecha fertilización N	15 Ago	19 Ago	30 Dic	19 Mar	20 May
N aplicado (kg ha ⁻¹)	0, 75, 150, 225	0, 75, 150, 350, 500	40, 200	0, 75, 150, 225	0, 50, 100,150, 200
Riego	Secano	Secano e irrigado	Secano e irrigado	Secano e irrigado	Secano
Riego total (mm)	--	48	135, 145	53	--

¹ Temperatura media diaria acumulada (sobre 5 C°) durante el período experimental desde el corte inicial hasta la última cosecha (Temp. base = 5 C°)

En la Figura 2 se presentan los datos históricos de temperatura media mensual y precipitaciones (promedio y desvío para el período 2000-2010) correspondientes al sitio experimental. Las lluvias durante los ensayos fueron menores a las medias históricas, determinando balances hídricos negativos (lluvia - PET Penman), excepto para **Invierno/Primavera 1996** donde las condiciones climáticas fueron más favorables. Los experimentos de **Verano 2009** e **Invierno/Primavera 1996** tuvieron los menores y mayores balances hídricos respectivamente. Los rebrotes de primavera

tuvieron temperaturas medias que oscilaron en el rango $\sim 10 - 13^{\circ}\text{C}$, los cuales son adecuados para promover un crecimiento temprano al final del invierno e inicio de la primavera cuando la disponibilidad de agua y nutrientes no son limitantes. Las temperaturas durante otoño y verano promediaron 17 y 22°C , respectivamente. En ausencia de otras restricciones, estas condiciones térmicas pueden sostener crecimientos prácticamente óptimos en pasturas que se encuentran en estado vegetativo.

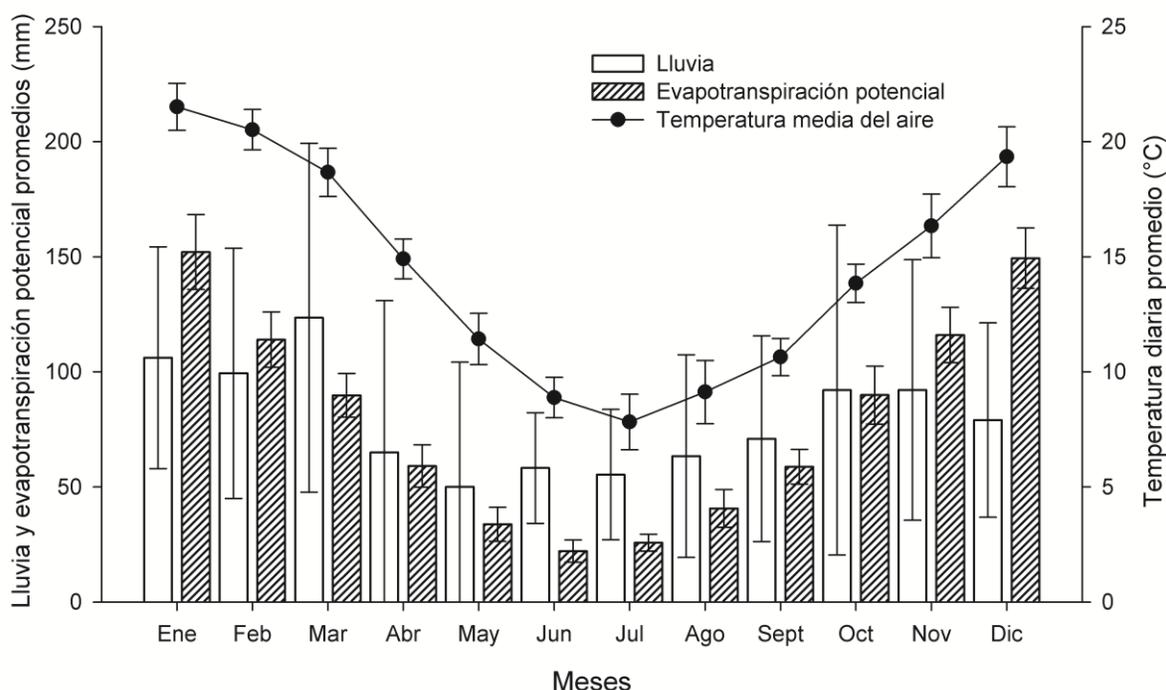


Figura 2: Precipitaciones promedio, evapotranspiración potencial y temperatura media diaria del aire en la Estación Experimental INTA Balcarce (2000–2010). Las líneas verticales muestran los desvíos estándar de cada variable.

Al inicio de cada experimento, como un procedimiento general, se llevó a cabo un corte de limpieza en cada una de las parcelas, dejando un remanente de una altura de 50 mm. Luego de 30-35 días de rebrote se realizaron 4–6 cortes consecutivos (dependiendo del experimento) cada 7 -10 días hasta 50 mm de altura con una moto-guadaña en parcelas independientes de $5,5 \text{ m}^2$. El material cosechado en cada parcela se pesaba (peso fresco) y una sub-muestra (300-500 g peso húmedo) se secó en horno a 60°C por 48 hs. para determinar el contenido de materia seca. El material remanente se

cosechó con tijeras, secados en horno a 60°C por 48hs determinándose el contenido de materia seca y su peso (promedio de 600 kg MS ha⁻¹). Para calcular la masa total de forraje de cada parcela se sumó al material cosechado con la moto-guadaña el peso del material remanente. Las parcelas bajo riego recibían agua diariamente (en caso de requerirse) de modo de compensar la diferencia entre la evapotranspiración potencial (PET) y la lluvia registrada en cada día. Las variables climáticas fueron registradas en una estación meteorológica cercana. El manejo de los ensayos y las condiciones climáticas durante los mismos se resumen en la Tabla 1.

Modelo de simulación de pasturas.

DairyMod (Johnson et al., 2008) es un modelo de simulación que ha sido utilizado exitosamente para representar pasturas templadas y subtropicales en un amplio rango de condiciones climáticas en Australia y Nueva Zelanda (Cullen, *et al.*, 2008, Cullen, *et al.*, 2009). Dairy Mod es un modelo clima dependiente y comprende un conjunto de sub-modelos (o módulos), para el crecimiento de pasturas y su utilización por rumiantes tales como ovejas, vacunos de carne, vacas lecheras y ciervos. También incluye sub-modelos para representar la dinámica del agua y los nutrientes en el suelo, abordando la dinámica de los componentes orgánicos e inorgánicos. Este modelo fue seleccionado dada su flexibilidad para hacer frente a una amplia variedad de situaciones de manejo de riego y fertilización así como el pastoreo en un solo cuadro o múltiples potreros implementados a través de una interfase amigable e intuitiva (Johnson, *et al.*, 2008). Este ha sido desarrollado como una herramienta de investigación incluyendo de tal modo una serie de parámetros que pueden ser modificados para ajustar el crecimiento del forraje a una gran variedad de condiciones y especies forrajeras. Ejemplos de su aplicación son los trabajos de White et al. (2008) con la simulación de raigras perenne, trébol blanco y trébol subterráneo, Chapman et al. (2008a) con festuca, raigras anual y perenne y también Cullen et al. (2008) con pasturas base raigras.

Parametrización del modelo de simulación.

A partir de distintas interfaces del modelo DairyMod se accede a los parámetros para la simulación de las pasturas. Los parámetros correspondientes al suelo se ajustaron para representar un suelo Natraucol (Buol et al., 1989), con un perfil limo-arcilloso-arenoso (3.8% de contenido de materia orgánica, pH 9.1, conductividad eléctrica 1.03 dS m⁻¹, 6.4 mg kg⁻¹ de contenido de fósforo, y 19% de sodio intercambiable).

Las simulaciones de cada uno de los tratamientos descriptos previamente (Tabla 1), se realizaron utilizando datos climáticos correspondientes a los rangos de fechas de cada experimento (Figura 2). Los datos de precipitaciones (mm), radiación solar ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{d}$) y temperatura ($^{\circ}\text{C}$), se utilizaron como parámetros diarios. El modelo se organizó para simular la dinámica de N de las plantas a fin de analizar los efectos de los tratamientos con fertilización nitrogenada. Para las simulaciones representadas se asumió que no había déficit de fósforo, potasio y azufre debido a la disponibilidad natural de P, K y S en estos tipos de suelos.

De acuerdo con White et al. (2008), la mayoría de los parámetros fueron mantenidos con sus valores establecidos “por defecto”, dado que estos están basados en datos robustos obtenidos de experimentos conducidos a nivel de los mecanismos biológicos (Thornley y Johnson, 1990), y dicha información en la práctica raramente se encuentran disponibles. Sin embargo, distintas especies de plantas poseen condiciones específicas de crecimiento, respuestas al agua disponible y requerimientos de nutrientes, por lo que se ajustaron parámetros específicos dentro de rangos legítimos/aceptables para obtener un comportamiento apropiado del modelo (Tabla 2).

Tabla 2: Parámetros para pasturas de festuca utilizados previamente (*) y los ajustes para las simulaciones.

Factor	Parámetro	Valores utilizados previamente	Valores en simulaciones
Crecimiento	Intervalo de aparición de hojas 20°C (días)	10	13.3
	Masa foliar (kg MS ha ⁻¹)	2000	600
	Proporción inicial material vivo (% MS)	50	100
	Masa inicial raíces (kg MS ha ⁻¹)	1000	1000
	N optimo en hojas (%MS)	3.5	3.5
	Composición nutricional en relación a los nutrientes presentes en hojas (% , proporción concentración de cada nutriente en láminas y raíces)	50 (lámina), 50 (raíces)	50 (lámina), 50 (raíces)
Temperatura	Efecto de altas temperaturas	Activado Inicio, (°C) 28 Total, (°C) 35 T-suma crítica 50	Inactivado
	Efecto de bajas temperaturas	Inicio, (°C) 2 Total, (°C) 0 T-suma crítica 20	Inicio, (°C) 5 Total, (°C) 3 T-suma crítica 3
Fotosíntesis	Temp. Min. (°C)	2	5
	Temp. Opt. (°C)	20	20
	Curvatura (q)	1.5	0.5
Raíces	Máxima profundidad de raíces (cm)	120	120
	Profundidad a la que se encuentra el 50% de la masa radicular (cm)	50	50
	Factor escalar empírico	3	3

* Parámetros para festuca utilizados por Chapman et al. (2008a)

Los parámetros que describen la respuesta de la fotosíntesis bruta a la temperatura (el coeficiente de curvatura q y la temperatura mínima para la fotosíntesis), se modificaron para representar respuestas de la especie (Tabla 2). La temperatura y el patrón de acumulación térmica definen los límites para el crecimiento de las pasturas, especialmente durante el período comprendido entre otoño tardío y primavera donde las tasas de crecimiento dependen fuertemente del ecotipo o lugar de origen de la pastura. Las plantas de origen continental crecen muy lentamente o directamente no crecen a 5°C o

menos (Hutchinson et al., 2000). En este sentido, en una evaluación local de cultivares de festucas templadas, Lattanzi (1998) estimó una temperatura base de 4.5°C. Para la mayoría de las gramíneas templadas la temperatura óptima para el crecimiento se encuentra entre 20 y 25°C. Aún con abundante disponibilidad de agua, el crecimiento se verá reducido a temperaturas por encima de 25°C y puede cesar arriba de los 30-35°C. En gramíneas templadas la fotosíntesis neta en cada hoja muestra una respuesta a la temperatura en forma de curva aplanada, alcanzando valores óptimos alrededor de los 20°C, aunque los ecotipos locales varían ligeramente en su valor óptimo (Cooper y Tainton, 1968). El crecimiento de primavera temprana (**Invierno 1996** y **Primavera 2009**) se logró representar adecuadamente modificando el parámetro q de su valor original de 1.5 a 0.5, manteniendo el valor de referencia de máxima fotosíntesis bruta (P_{mx}) para plantas C3 (1 mg CO₂ (m² hoja) s⁻¹ a 20°C), que está en concordancia con datos publicados (Gastal y Bélanger, 1993; Wilhelm y Nelson, 1978; Wong et al., 1983). Estos cambios permitieron lograr una curva de respuesta de temperatura con un pico más aplanado, extendiendo el rango de temperatura para la fotosíntesis activa en comparación con los valores de los parámetros por defecto.

El intervalo de aparición de hojas de festuca a 20°C fue establecido en 13.3 días, estimado a partir de una temperatura base para el crecimiento de la pastura de 5°C, la vida media de las hojas desde la emergencia al inicio de la senescencia, se estableció en 600°Cd (grados día), y un máximo de tres hojas vivas (Lattanzi, 1998), dando como resultado un intervalo de aparición de hojas de 200°Cd (Intervalo de aparición de hojas a 20°C = 200°Cd / (20°C - 5°C) = 13.3).

Las respuestas de las pasturas a fertilizaciones de 150 kgN ha⁻¹ o superiores se simularon a través del incremento del número de hojas vivas por macollo de 3 a 4, y N% óptimo en las láminas de 3.5 a 4.5% siguiendo el criterio aplicado por Chapman et al. (2008a), para representar los efectos de un mejor manejo de la fertilidad del suelo. En un ensayo local de festuca (Lattanzi, 1998), se halló que niveles de fertilización nitrogenada mayores que 100 kg N ha⁻¹ incrementaron el número de hojas vivas por macollo en un 25%, manteniéndose la vida foliar invariable. Las pasturas de los tratamientos con dosis de fertilizante hasta 150 kg N ha⁻¹ fueron simuladas con 3 hojas vivas por macollo y cuando se aplicaron mayores dosis de fertilizante estas se aumentaron a 4.

El manejo del riego seleccionado en el modelo para los experimentos **Primavera 2009**, **Verano 2009** y **Otoño 2009** fue “regar en respuesta al déficit de lluvias”, aplicándose el riego sobre la

canopia, con un mínimo de 1 día entre aplicaciones y fijándose en 5 mm como el valor mínimo “Diferencia crítica acumulada PET – lluvia” para iniciar el riego.

Adicionalmente, se simuló un experimento con el tratamiento **Primavera 2009** 500N con riego para verificar la asunción implícita en los cálculos del modelo de que la concentración óptima de N para el crecimiento de las plantas (*N_{opt}*) permanece constante independientemente de la acumulación de masa forrajera (AMF), y la aplicación de la curva de referencia de la dilución crítica de N donde la concentración sigue una función matemática $N\% = 4.8 \text{ AMF}^{-0.32}$ (Lemaire y Salette, 1984). Esto último fue modelado por etapas, en simulaciones sucesivas para cada una de las fechas de corte, dado que no fue posible hacerlo en una sola simulación (ajuste de *N_{opt}*). En cada una de estas fechas, los datos de AMF y peso de raíces del paso previo simulado se utilizaron para inicializar la simulación (para el primer paso el modelo se inicializó utilizando los parámetros presentados en la Tabla 2. Los valores estimados de N% fueron 4.80, 4.33, 3.77, 3.54, 3.30 y 3.09 para 19/08, 10/09, 17/09, 23/09, 29/09 y 6/10, respectivamente. El parámetro “composición de nutrientes como porcentaje del contenido de nutrientes de las hojas” fue 90 y 20% para tallo y raíces respectivamente.

Análisis de las simulaciones.

La comparación entre los datos de AMF medidos a campo y los simulados, además de la inspección visual, fue llevada a cabo a través de dos métodos cuantitativos. Primero, se utilizaron distintos estimadores estadísticos para calcular la aptitud de los modelos matemáticos, tal como fuera realizado en evaluaciones previas (Cullen, et al., 2008). Los cálculos se basaron en los lineamientos fijados por Tedeschi (2006). Estos estadísticos fueron calculados para todo el conjunto de datos y también se analizó de manera individual el efecto del secano/riego y la estación del año. Los estadísticos utilizados fueron: Desvío medio, la diferencia entre la media simulada y la medida en los ensayos, r^2 , coeficiente de determinación; cuadrado medio del error (CME), una medida de la eficiencia general del modelo expresada como % de la media (Bibby y Toutenburg, 1977); Eficiencia del Modelo (EM), la proporción de la variación explicada por los valores modelados con un valor de 1 indicando un ajuste perfecto, porcentaje de variación (v), que es la magnitud de la variancia de los datos medidos y simulados, con un valor de 1 indicando que ambos tienen la misma cuantía de variación; factor de corrección del desvío (Cb), el cual indica el desvío de la línea $y=x$ con un valor de 1 indicando que no hay desvío; y el coeficiente del factor de concordancia (CCC)

que es la medición simultánea de la precisión y exactitud con un ajuste ideal indicado por un valor de 1. En segunda instancia, se confeccionó un gráfico Bland-Altman comparando los datos simulados y medidos (Bland y Altman, 1986).

Resultados

En términos generales, los tratamientos con fertilizaciones nitrogenadas de 150 o 225 kg N ha⁻¹ prácticamente duplicaron el total de masa forrajera al final de cada período experimental, en comparación con el tratamiento testigo (0 kg N ha⁻¹). Una excepción fue el tratamiento en secano de **Verano 2009** donde la producción de forraje se incrementó solamente un 43%. La acumulación total de forraje simulada resultó muy similar a los registrados en los ensayos de campo.

En las simulaciones de los ensayos **Invierno/Primavera 1996** y **Primavera 2009** no se alcanzaron las producciones potenciales durante el período experimental. También, en el experimento de **Primavera 2006** se observó una reducción en la AMF en el último corte. Los rebrotes de **Invierno/Primavera 1996** mostraron un pico primaveral (que se corresponde con la diferenciación de estado vegetativo a reproductivo) al final del período del rebrote (500 to 600°Cd), en que se observó un incremento en la AMF. Los resultados de las simulaciones mostraron una buena coincidencia con los resultados de campo en la observación visual, reflejando adecuadamente las tendencias mencionadas, observándose el mejor ajuste en el ensayo **Invierno/Primavera 1996** (Figura 3). En el caso de **Primavera 2006** y **2009**, la AMF simulada y la registrada en los ensayos tuvo una tendencia similar en los tratamientos hasta 150 y 350 kg N ha⁻¹, respectivamente (Figura 4 y Figura 5). En ambos casos las estimaciones del modelo divergieron de los valores observados de AMF en los tratamientos con las mayores dosis de fertilizante, siendo mayores las diferencias en el segundo experimento.

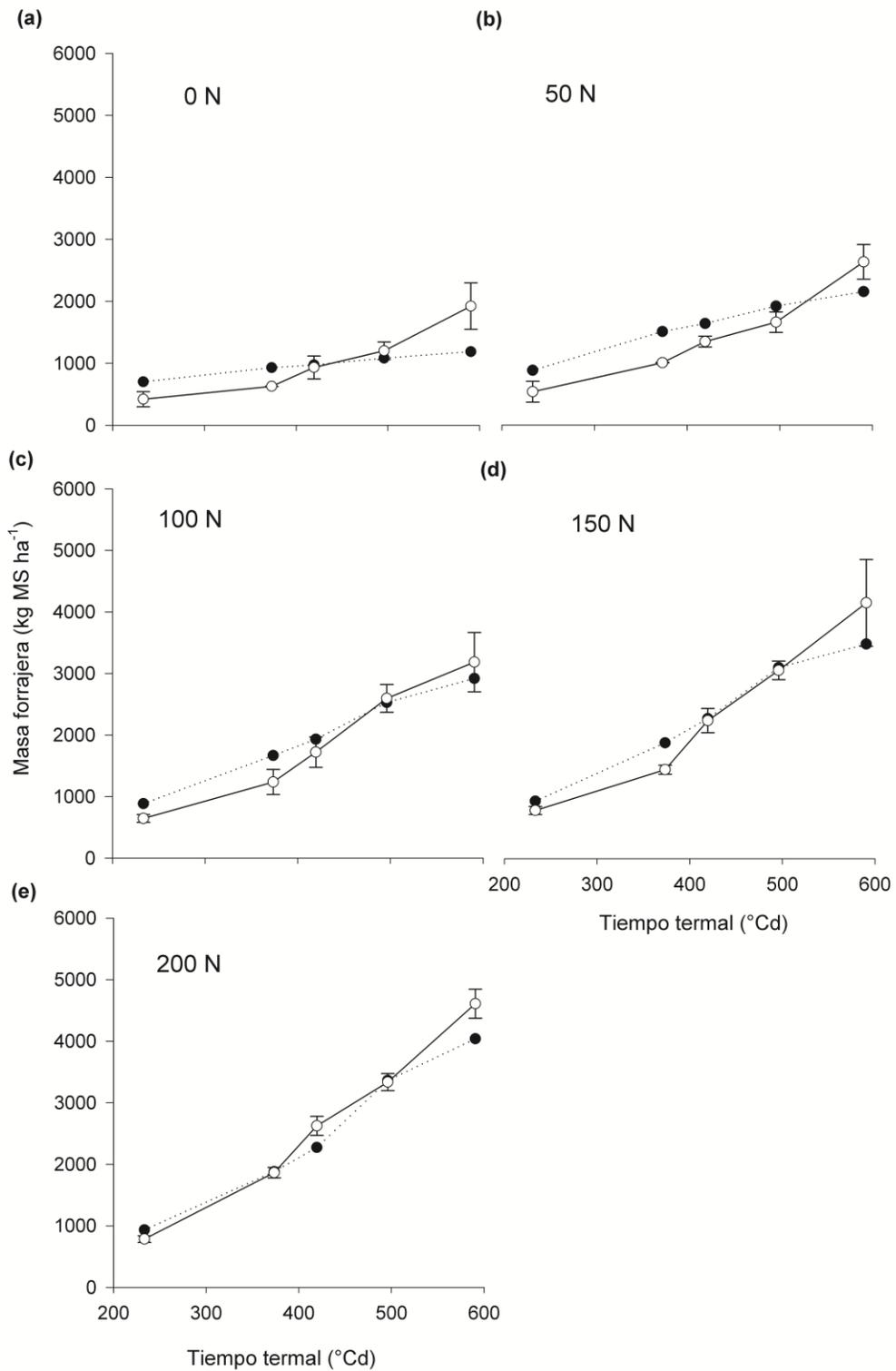


Figura 3: Acumulación de masa forrajera MFA (kg MS ha⁻¹) registrada a campo (○), y en las simulaciones (●) de los experimentos de Invierno/Primavera 1996: (a) 0, (b) 50, (c) 100, (d) 150 and (e) 200 kg N ha⁻¹.

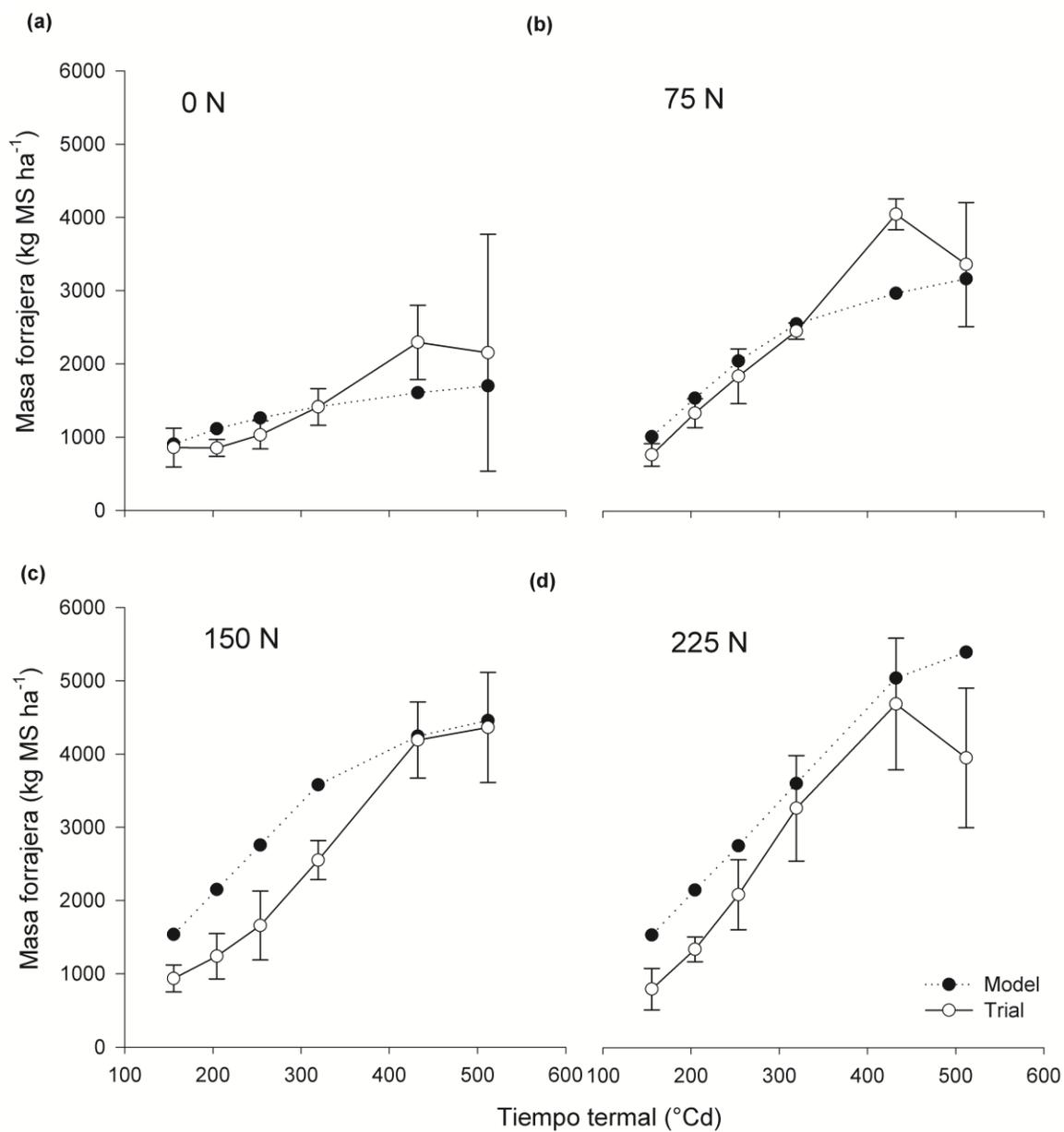


Figura 4: Acumulación de masa forrajera, AMF (kg MS ha⁻¹) para el experimento de Primavera 2006 (○) y los resultados simulados (●), con (a) 0 N fertilización, (b) fertilizado con 75, (c) 150, (d) y 225 kg N ha⁻¹.

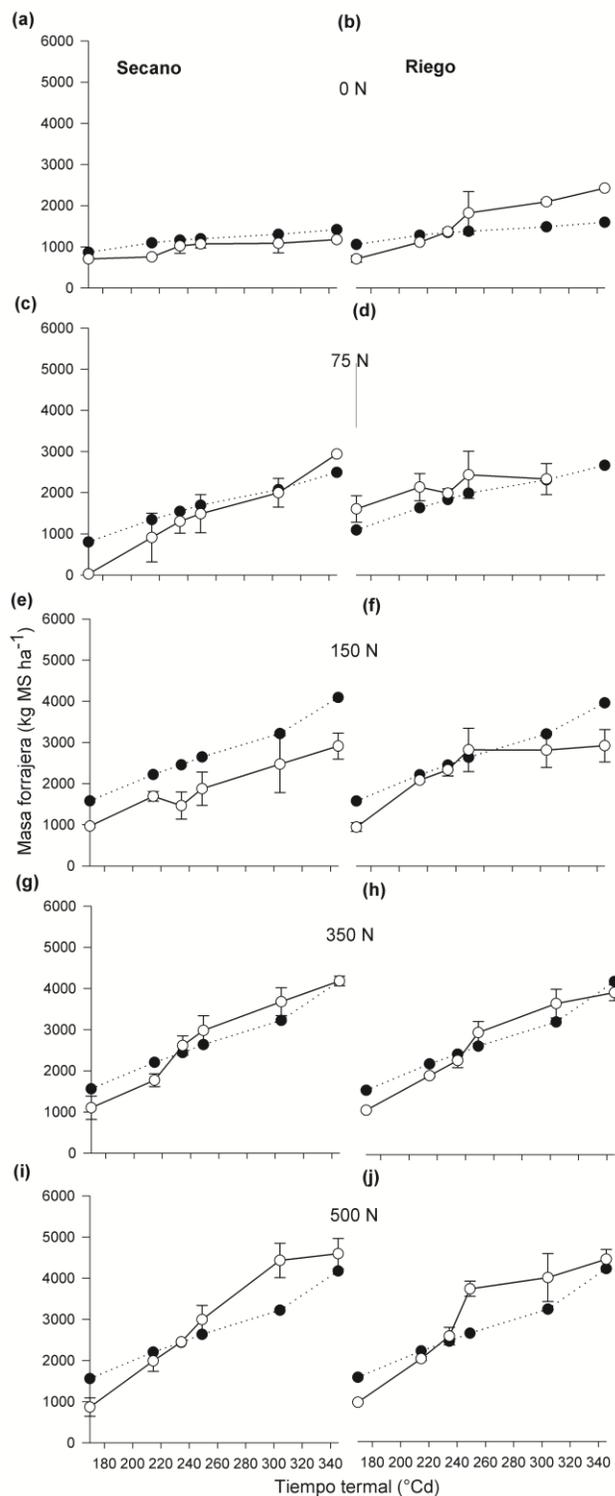


Figura 5: Acumulación de masa forrajera (AMF, kg MS ha⁻¹) medida en los ensayos de campo (○) y simuladas (●) para los experimentos de Primavera 2009 con dosis de fertilización nitrogenada de 0 (a, b), 75 (c, d), 150 (e, f), 350 (g, h) y 500 kg N ha⁻¹ (i, j) para pasturas en seco (lado izquierdo) o con riego (lado derecho).

Cuando se comparan los resultados tomando como referencia el tiempo térmico acumulado (Tabla 3), los experimentos de **Primavera 2006** y **Primavera 2009** produjeron 1412 ± 250 , 2457 ± 112 and 2552 ± 265 o 1174 ± 021 , 2938 , y 2913 ± 314 kg MS ha⁻¹ con 0, 75 o 150 kg N ha⁻¹ (Figura 4 a, b y c; y Figura 5 a, c y e respectivamente). En el caso del experimento de **Invierno/Primavera 1996** donde la fertilización se anticipó 3 meses en relación a los ensayos de primavera, se alcanzaron mayores niveles de AMF: 3007 ± 492 and 5298 ± 624 kg MS ha⁻¹ para 0 y 150 kg N ha⁻¹, respectivamente (Figura 3 a y d).

El experimento de **Verano 2009** exhibió un incremento de AMF entre la primera y segunda fecha de corte (desde 250 a 400°Cd de tiempo térmico acumulado, entre el 13 al 21 de enero). Posteriormente, la AMF se reinició y continuo incrementándose en un lapso de tiempo mayor al de la vida foliar de la festuca. El modelo representó aceptablemente la tendencia general hallada en los resultados de campo, aunque sin detectar el retraso en el crecimiento de aproximadamente 400 °Cd observado en todos los tratamientos y la alta AMF del tratamiento 200 N con riego (Figura 6).

Tabla 3: Condiciones climáticas y masa inicial de hojas para los experimentos de Primavera 2006 e Invierno/Primavera 1996 desde el 14 de Agosto al 15 de Octubre, lapso que se corresponde con el periodo experimental del experimento de Primavera 2009.

Experimento	Primavera temprana 2006	Invierno/Primavera 1996
Biomasa de láminas al 14 de agosto (kg MS ha ⁻¹)	600	0N=421±121 (campo), 1061 (simulado) 150N=784±65 (campo), 847 (simulado)
Temperatura media (°C)	11,2	12,5
Balance de agua (Lluvia-ETP, mm)	-46,6	-7,5
RFA acumulado (MJ m ² day ⁻¹)	737	821
RFA promedio (MJ m ² day ⁻¹)	12,09	13,7
Tiempo termal acumulado (°Cd)	380	471

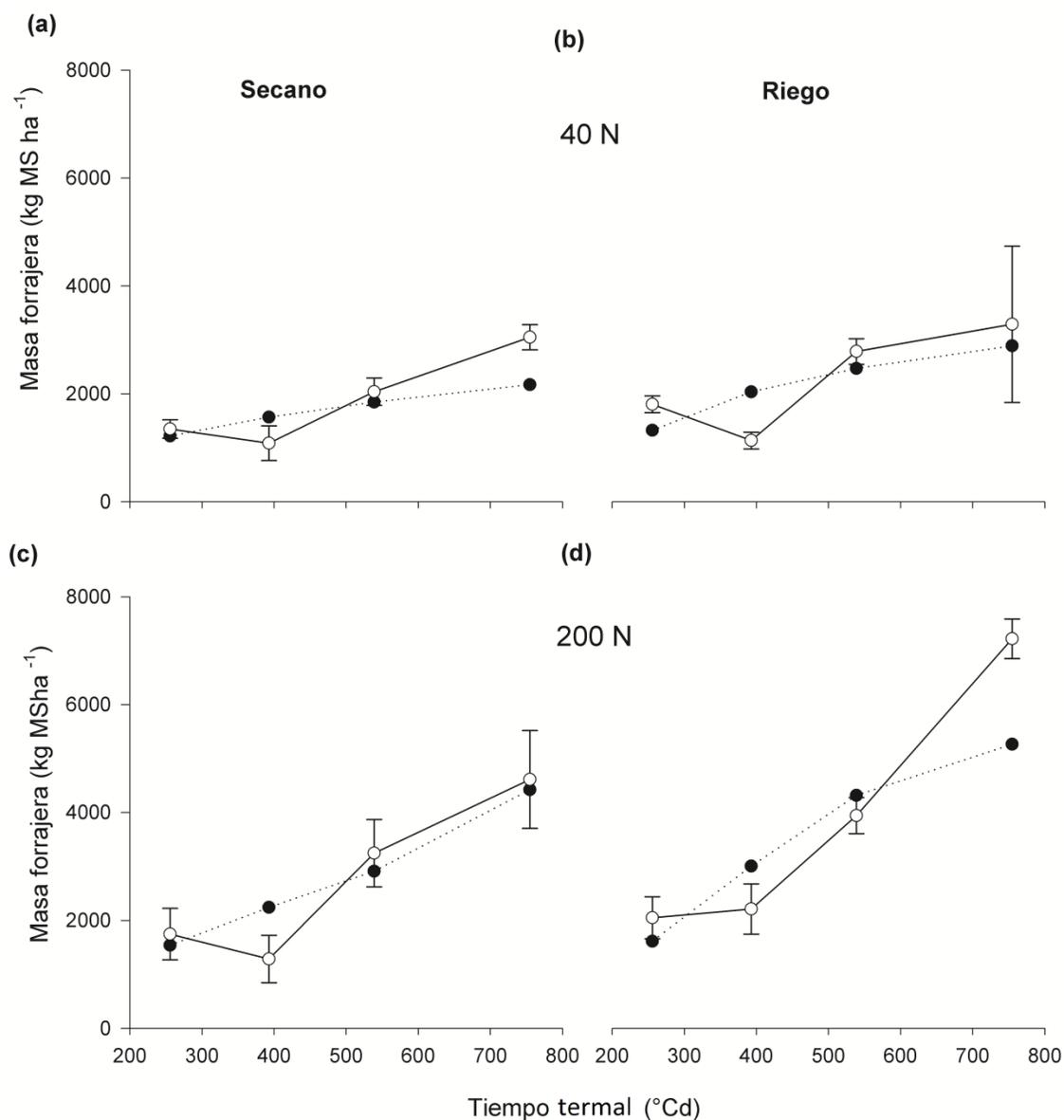


Figura 6: Acumulación de masa forrajera (AMF, kg MS ha⁻¹) de los ensayos de campo (—○—) y simulados (···●···), para los tratamiento de Verano 2009 donde se utilizaron dos dosis de fertilización, 40 (a, b) y 200 kgN ha⁻¹ (c, d) en secano (lado izquierdo) y con riego (lado derecho).

Los resultados de **Otoño 2009** mostraron que AMF tendió a incrementarse con la aplicación de N a dosis de hasta 150 kg N ha⁻¹ tanto en los tratamientos en secano como los irrigados, la AMF prácticamente duplicó a la de los tratamientos control en las dos dosis más altas. El modelo logró

una buena estimación de los resultados de campo en los tratamientos hasta 75 kg N ha^{-1} pero subestimó la AMF de manera consistente cuando se aplicaron dosis de 150 and 225 kg N ha^{-1} . El riego incremento estas diferencias (Figura 7), el modelo estimo AMF para el tratamiento 225 N con riego con un retraso de 100°Cd (8 días) respecto a los datos de campo.

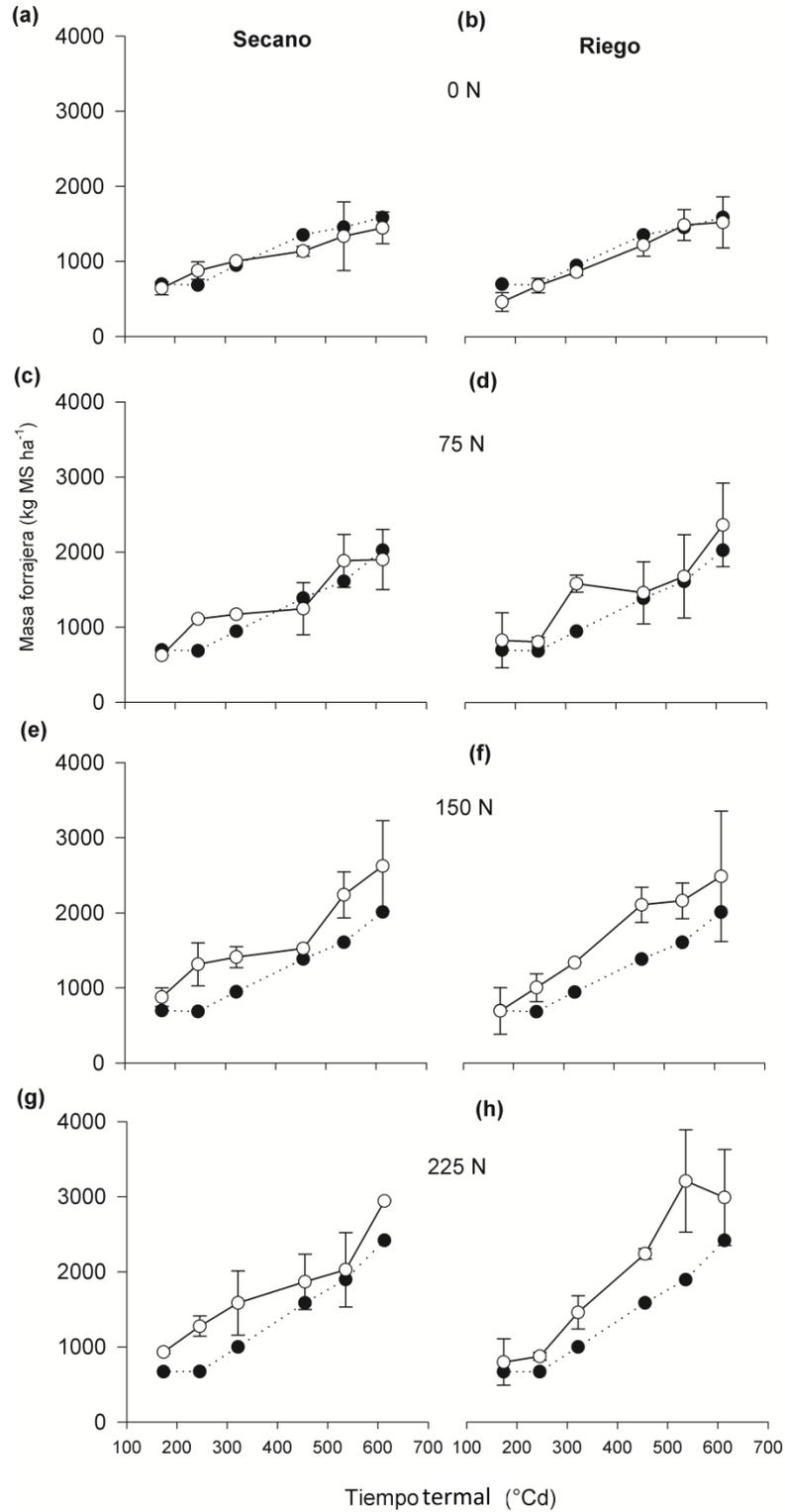


Figura 7: Acumulación de masa forrajera (AMF, kg MS ha⁻¹), en los ensayos de campo (○) y simulados (●), de los experimentos de Otoño 2009 en pasturas de festuca con dosis de fertilizante nitrogenado de 0 (a, b); 75 (c, d); 150 (e, f); y 225 kg N ha⁻¹ (g, h) en secano (lado izquierdo) o con riego (lado derecho).

En el caso de **Primavera 2009** y **Otoño 2009** se observaron AMF similares en los tratamientos en seco y con riego. El modelo estimó aceptablemente la respuesta al riego, donde la irrigación en verano determinó un incremento en AMF en comparación con el tratamiento en seco, principalmente en el tratamiento con la mayor dosis de fertilizante nitrogenado. Sin embargo, hubo diferencias entre las AMF medidas y simuladas para el tratamiento de 200 kg N con riego cuando el tiempo térmico acumulado superó los 500 °Cd (Figura 5), en este caso la AMF estival alcanzó solo el 73 % de los valores medidos en el experimento.

Cuando *Nopt* del tratamiento **Primavera 2009** fue modelado de acuerdo a la curva crítica de N de referencia de Lemaire y Salette (1984), el contenido de N en el forraje simulado fue cercano al registrado en terreno (Figura 8a). Adicionalmente, estas simulaciones concordaron mejor con la dinámica de AMF de los resultados de campo de los experimentos que cuando se utilizó *Nopt* con un valor constante (Figura 8b).

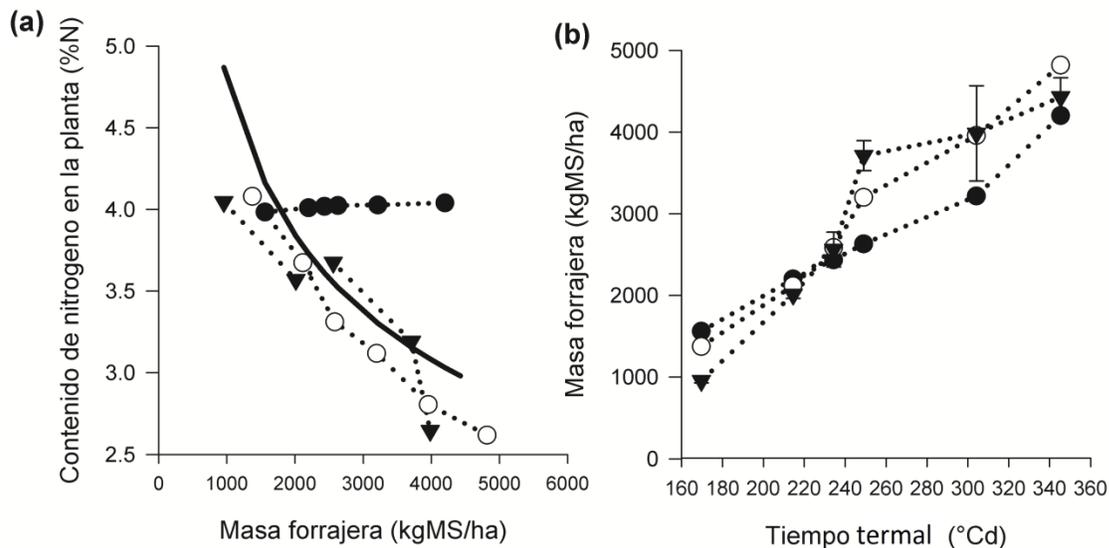


Figura 8: Contenido de nitrógeno de la planta (a) y acumulación de masa forrajera (b) en los ensayos de campo (▼), simulación A donde la concentración de N óptima para el crecimiento de las plantas se mantiene constante independientemente de la acumulación de masa forrajera (•), y simulación B donde la concentración óptima de N sigue la función alométrica de forma $N\% = 4.8 * \text{masa de hojas}^{-0.32}$ (○). Curva crítica de referencia de dilución del N (—).

Evaluación del modelo

En la Tabla 4 se resumen los estadísticos calculados para todo el conjunto de datos, para los tratamientos en seco o con riego y para cada estación. Considerando todo el conjunto de datos, el rango del desvío medio fue de -136 a 288 kg MS ha⁻¹ de AMF y con un CME entre 25 y 32%, hallándose el mayor desvío en los tratamientos con riego. EM tuvo un valor de 0.5 en Otoño, y más de 0.75 en el resto de los datos (Tabla 4). La varianza en los datos simulados fue similar a la de los datos medidos, tal como lo indica v y C_b (cerca a la línea 1:1). Estos indicadores concuerdan con lo reflejado en el gráfico Bland-Altman (Figura 8), que además muestra una dispersión ligeramente mayor a medida que AMF se incrementa. La media y el desvío standard de las diferencias fue -66.9 y 600, respectivamente.

Tabla 4: Resumen de estadísticos indicando el desempeño del modelo para la estimación de la acumulación de masa forrajera (AMF, expresada en kg MS ha⁻¹). Se presenta el análisis de todos los datos en conjunto, los tratamientos con riego, en seco y por estación.

	Todos los datos	Riego	Secano	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
Media observada	1984	2249	1975	2174	2678	1486	1865
Media simulada	1960	1996	2012	2310	2552	1198	1885
Desvío medio	24	253	-37	-136	126	288	-20
r^2	0,79	0,80	0,80	0,78	0,81	0,71	0,93
Error de predicción promedio (MPE)	26	32	27	25	27	32	19
Eficiencia del modelo (MEF)	0,79	0,75	0,80	0,77	0,78	0,50	0,91
Relación de varianza	1,09	1,31	1,10	1,10	1,33	1,44	1,23
Factor de corrección del desvío (C_b)	0,87	0,97	0,90	1,00	0,86	0,94	0,75
Coficiente del factor de concordancia (CCC)	0,77	0,86	0,81	0,88	0,77	0,79	0,73
N (número datos)	172	63	113	83	16	48	25

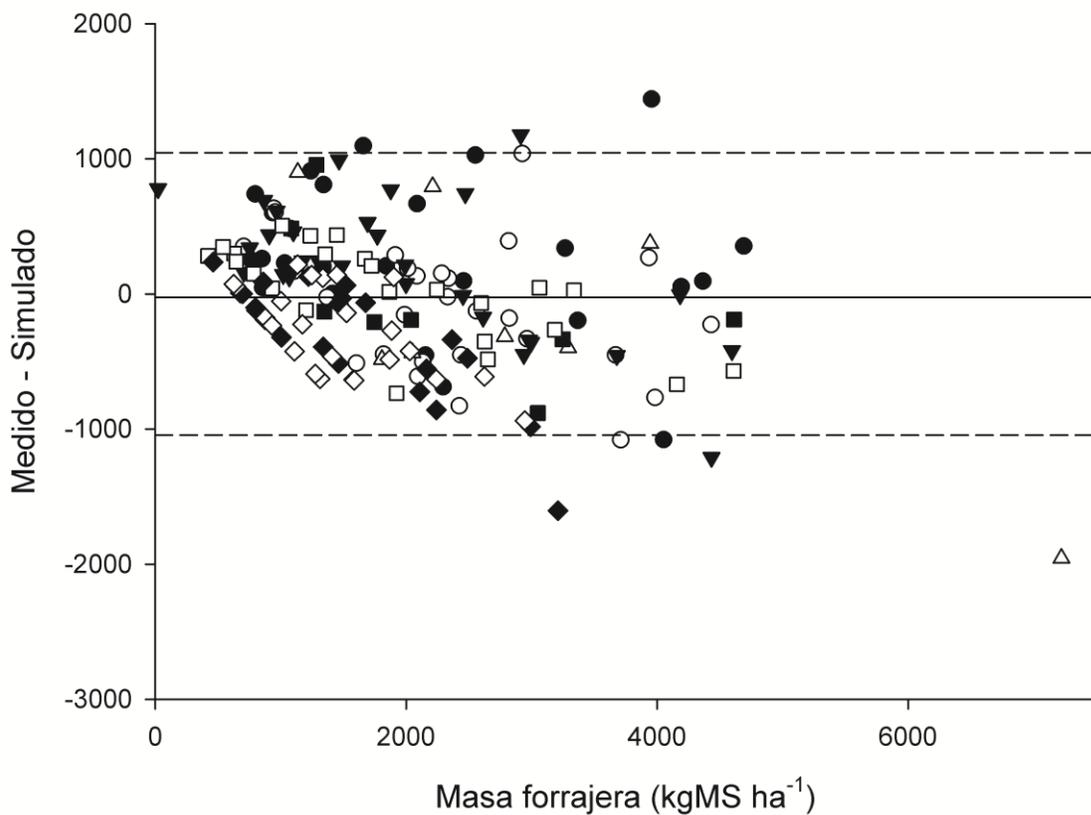


Figura 9: Gráfico Bland-Altman de acumulación de masa forrajera (AMF), para Primavera 2006 (●), Primavera 2009 con riego (○), Primavera 2009 en seco (▼), Verano 2009 con riego (△), Verano 2009 en seco (■), Invierno 1996 (□), Otoño 2009 con riego (◆) y Otoño 2009 en seco (◇). La línea sólida indica la diferencia media entre las AMF observadas y simuladas, mientras que las líneas punteadas muestran la media \pm dos desvíos estándar.

Discusión

La evaluación efectiva de los modelos de simulación requiere de la disponibilidad de un conjunto de datos apropiados contra los cuales poder evaluar el modelo, los cuales tienen que haber sido medidos a la escala apropiada y cubrir un rango suficientemente amplio de situaciones en las que va a ser utilizado el modelo como estaciones del año, regiones, tipo de pasturas y tratamientos de fertilización (Romera et al., 2009; Woodward y Rollo, 2002). En este caso, se seleccionaron 5 experimentos para representar la variación estacional de las pasturas de festuca a lo largo del año (Tabla 1). Dado que el rebrote de primavera es un período importante en el manejo de las pasturas (Agnusdei et al., 2010b; Hernández Garay et al., 1997), 3 de los experimentos seleccionados corresponden a esta época, donde se evaluaron niveles de fertilización nitrogenada similares (0 and 150 kg N ha⁻¹ para **Invierno /Primavera 1996** y 0, 75 y 150 kg N ha⁻¹, para **Primavera 2006** y **Primavera 2009**).

Los datos de AMF simulados y medidos tuvieron en general buena concordancia, tanto de forma visual (Figuras 3 to 7) como estadística (

Tabla), aunque sí se observaron algunos desvíos en el patrón de AMF estimados en todas las estaciones, excepto en **Invierno/Primavera 1996**, particularmente en las mayores dosis de fertilización con N. Si se hace foco en los experimentos en secano, es interesante mencionar que el experimento **Invierno/Primavera 1996** fue el único con balance positivo de agua en el suelo (Tabla 1). Los balances de agua negativos estimados para el resto de las estaciones sugieren que al menos algunos períodos de déficit hídrico pueden haber ocurrido durante el período de rebrote. En este sentido, es ampliamente conocido que la captura de N (Gonzalez-Dugo et al., 2005) y su eficiencia de uso por parte de las plantas (Magne et al., 2010) son afectados negativamente cuando la disponibilidad de agua en el suelo se encuentra restringida.

En los tratamientos con riego, las discrepancias en las estimaciones de AMF a dosis relativamente altas de fertilización nitrogenada, generalmente estuvieron dadas por una tendencia a subestimar las observaciones de campo (Figuras 5, 6 y 7). Esto sugiere que el contenido de N *per se*, como resultado de la lógica de funcionamiento del modelo es un firme candidato a explicar parcialmente estas inconsistencias. En concordancia con la discusión previa, se encontró una representación aceptable de las respuestas de las plantas a la fertilización nitrogenada a través del ajuste dos de los

parámetros claves del modelo que están asociados al estado de nutrición nitrogenada de las plantas [número de hojas vivas por macollo (Lattanzi, 1998) y concentración óptima de N en las plantas en función de los niveles de aplicación de N (Chapman et al., 2008a)], sin embargo son necesarios más estudios para profundizar sobre la cuestión del N, dado las diferencias en el cálculo de AMF.

Dentro de los supuestos para la simulación de la nutrición nitrogenada en el modelo, el contenido de N en las hojas determinan el potencial de fotosíntesis y por otro lado, la concentración óptima de N (N_{opt}), cuando la disponibilidad de N en el suelo no es limitante, permanece constante independientemente de la AMF (Simulación A en la Figura 8). Adicionalmente, el modelo utiliza un factor limitante del crecimiento definido como el cociente entre la captación de N actual (calculada) y la correspondiente a la demanda de la pastura para alcanzar un crecimiento óptimo (Johnson, 2012). Sin embargo, la concentración de N en las plantas en canopias densas invariablemente decrece con el aumento de AMF siguiendo la relación alométrica de forma $N\% = 4.8 AMF^{-0.32}$ (Greenwood et al., 1990; Lemaire y Salette, 1984), que indica el porcentaje de N crítico o mínimo requerido por las pasturas para alcanzar tasas de crecimiento máximas. Esta curva crítica de N ha sido propuesta dado que se mantiene apreciablemente estable ante variaciones en los factores ambientales más importantes (Gastal y Lemaire, 2002) tal como ha sido verificado ante distintas situaciones edafoclimáticas cuando otros factores distintos a la disponibilidad de N no fueron limitantes (Justes, et al., 1994; Belanger, et al., 1994; Colnenne, et al., 1998; Herrmann y Taube, 2004; Ziadi, et al., 2008; Agnusdei, et al., 2010a). La concentración de N modelada utilizando la mencionada curva crítica de N de referencia (Simulación B en la Figura 8) logró un mejor ajuste con los resultados de campo de %N (Figura 8A) y la dinámica de AMF (Figura 8b). Tal como fue evidenciado por esta prueba, este enfoque muy probablemente mejoraría la concordancia entre los datos simulados y medidos de AMF presentados previamente (Figuras 3 a 7).

El modelo estimó de forma precisa a la respuesta al riego. El riego estival incrementó la AMF en comparación con los tratamientos en secano, principalmente en aquellos lotes con mayores dosis de fertilización nitrogenada. Si bien se observaron diferencias entre las AMF simuladas y medidas cuando se aplicó riego, estas ocurrieron con dosis de 200 kg N cuando el tiempo térmico acumulado fue mayor que 500 °Cd (Figura 5), donde la AMF estival simulada alcanzó solo al 73% de la medida a campo. Cullen et al. (2008) asumieron en sus simulaciones de raigrás anual y perenne que el riego reduce el estrés térmico de las plantas, e incorporaron este efecto activando/desactivando el factor de

estrés por alta temperatura en situaciones de secano y riego respectivamente. En las simulaciones realizadas con festuca en este trabajo este factor estuvo desactivado en todas las circunstancias de modo de representar su capacidad para continuar creciendo bajo las condiciones estivales.

Conclusiones

El modelo de simulación DairyMod simuló con una precisión razonable la AMF de pasturas de festuca en ambientes templados de Argentina en un amplio rango de condiciones climáticas y de manejo, incluyendo estaciones del año, con 0N y con dosis moderadas de fertilizante nitrogenado y riego. Sin embargo, el modelo tuvo ciertas dificultades en representar la dinámica de AMF en algunas situaciones donde las pasturas crecían con una alta disponibilidad de N. El uso de la curva crítica de N de referencia mejoró sustancialmente estos desvíos, indicando la necesidad de profundizar el análisis de la representación de la dinámica del N en este modelo.

La representación aceptable de DairyMod de las pasturas de festuca ante condiciones edafo-climáticas y condiciones de manejo definidas en forma detallada tal como fue mostrado en este estudio, promueve y respalda la continuación de evaluaciones adicionales de este modelo en distintos escenarios y condiciones, tales como distintas alternativas de manejo del pastoreo, estrategias de fertilización nitrogenada y evaluación del riesgo en función de la variabilidad climática. Por otra parte, cualquier actualización del modelo para mejorar la simulación de la nutrición nitrogenada podría mejorar su utilidad para evaluar la efectividad de distintas prácticas de manejo de la fertilización con N teniendo en cuenta de manera integrada factores productivos, económicos y ambientales en diferentes escenarios y condiciones de los sistemas pastoriles.

Bibliografía

- Agnusdei, M., Assuero S.G., Lattanzi, F.A., Marino, A. (2010a) Critical N concentration can vary with growth conditions in forage grasses: implications for plant N status assessment and N deficiency diagnosis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 88, 215–230.
- Agnusdei, M., Di Marco, O.N., Marino, A., Errecart, P., Insúa, J., 2010b. *Festuca alta: Una mirada ecofisiológica para entender y manejar la producción, calidad y eficiencia de utilización del forraje.*, XXII Reunión Anual de Forrajeras. INTA Pergamino, Argentina, p. 16.
- Angón, E., Perea, J., Toro-Mújica, P., Rivas, J., de-Pablos, C., García, A., 2015. Pathways Towards to Improve the Feasibility of Dairy Pastoral System in La Pampa (Argentine). *Italian Journal of Animal Science* 14, 3624. 10.4081/ijas.2015.3624
- Belanger, G., Gastal, F., Warembourg, F.R. (1994) Carbon balance of tall fescue (*Festuca arundinacea Schreb.*): effects of nitrogen fertilization and the growing season. *Annals of Botany*, 74, 653–659.
- Bibby, J., Toutenburg, H., 1977. Prediction and improved estimation in linear models. Berlin.
- Bland, J.M., Altman, D.G., 1986. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurements. *The Lancet* 327, 307-310.
- Buol, S.W., Hole, F.D., McCracken, R.J., 1989. Soil genesis and classification, 3rd edn. Iowa University Press, Ames.
- Chapman, D.F., Kenny, S.N., Beca, D., Johnson, I.R., 2008a. Pasture and forage crop systems for non-irrigated dairy farms in southern Australia. 1. Physical production and economic performance. *Agr. Syst.* 97, 108-125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2008.02.001>
- Chapman, D.F., Kenny, S.N., Beca, D., Johnson, I.R., 2008b. Pasture and forage crop systems for non-irrigated dairy farms in southern Australia. 2. Inter-annual variation in forage supply, and business risk. *Agr. Syst.* 97, 126-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2008.02.002>

Colnenne, C., Meynard, J.M., Reaur, R., Justes, E., Merrien, A. (1998) Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. *Annals of Botany*, 81, 311–317.

Cooper, J.P., Tainton, N.M., 1968. Light and temperature requirements for the growth of tropical and temperate grasses. *Herbage abstracts* 38, 167-177.

Cullen, B.R., Eckard, R.J., Callow, M.N., Johnson, I.R., Chapman, D.F., Rawnsley, R.P., Garcia, S.C., White, T., Snow, V.O., 2008. Simulating pasture growth rates in Australian and New Zealand grazing systems. *Australian Journal of Agricultural Research* 59, 761-768.

<http://dx.doi.org/10.1071/AR07371>

Cullen, B.R., Johnson, I.R., Eckard, R.J., Lodge, G.M., Walker, R.G., Rawnsley, R.P., McCaskill, M.R., 2009. Climate change effects on pasture systems in south-eastern Australia. *Crop & Pasture Science* 60, 933-942.

Durand, J.L., Ghesquiere, M., 2002. Root biomass changes in tall fescue and italian ryegrass swards under two irrigation regimes. *Grassland Science in Europe* 7, 292-293.

Durand, J.L., Ghesquiere, M., Bariac, T., Fugi, M., 2002. Breeding for deeper rooting grasses with the help of 18O natural abundance in soils., in: Villalobos, F. (Ed.), *Proceedings VII Congress of the European Society of Agronomy*, pp. 81-82.

Gastal, F., Bélanger, G., 1993. The Effects of Nitrogen Fertilization and the Growing Season on Photosynthesis of Field-grown Tall Fescue (*Festuca arundinacea* Schreb.) Canopies. *Annals of botany* 72, 401-408. 10.1006/anbo.1993.1125

Gastal, F., Lemaire, G., 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany* 53, 789-799.

10.1093/jexbot/53.370.789

Gonzalez-Dugo, V., Durand, J., Gastal, F., Picon-Cochard, C., 2005. Short-term response of the nitrogen nutrition status of tall fescue and Italian ryegrass swards under water deficit. *Australian Journal of Agricultural Research* 56, 1269-1276. <http://dx.doi.org/10.1071/AR05064>

Greenwood, D.J., Lemaire, G., Gosse, G., Cruz, P., Draycott, A., Neeteson, J.J., 1990. Decline in percentage N of C3 and C4 crops with increasing plant mass. *Annals of botany* 66, 425-436.

Hernández Garay, A., Hodgson, J., Matthews, K., B., 1997. Effect of spring grazing management on perennial ryegrass and ryegrass-white clover pastures 1. Tissue turnover and herbage accumulation. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 40, 25-35.

Herrmann, A., Taube, F. (2004) The range of the critical nitrogen dilution curve for maize (*Zea mays L.*) can be extended until silage maturity. *Agronomy Journal*, 96, 1131–1138.

Hutchinson, G.K., Richards, K., Risk, W.H., 2000. Aspects of accumulated heat patterns (growing degree-days) and pasture growth in Southland., *Proceedings of the New Zealand Grassland Association Invercargill, New Zealand*, , pp. 81-85.

Johnson, I.R., 2012. DairyMod documentation. 4. Pasture growth.

Johnson, I.R., Chapman, D.F., Snow, V.O., Eckard, R.J., Parsons, A.J., Lambert, M.G., Cullen, B.R., 2008. DairyMod and EcoMod: biophysical pasture-simulation models for Australia and New Zealand. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 621-631.
<http://dx.doi.org/10.1071/EA07133>

Justes, E., Meynard, J.M., Machet, J.M., Thelier-Huche, L. (1994) Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany*, 74, 397–407.

Lattanzi, F.A., 1998. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el crecimiento de festucas de tipo templado y mediterráneo, Programa de Posgrado en Ciencias Agrarias - Curso de Posgrado en Producción Animal. Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Balcarce, p. 161.

Lemaire, G., Salette, J., 1984. Relation entre dynamique de Coissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminières fourragères. I. Etude de l'effet du milieu. *Agronomie* 4, 423-430.

Magne, M.A., Cerf, M., Ingrand, S., 2010. A conceptual model of farmers' informational activity: a tool for improved support of livestock farming management. *Animal* 4, 842-852.

McCown, R.L., 2002. Changing systems for supporting farmers' decisions: problems, paradigms, and prospects. *Agr. Syst.* 74, 179-220.

Moore, A., D., , Donnelly, J., R., , Freer, M., 1997. GRAZPLAN: Decision support systems for Australian grazing enterprises. III. Pasture growth and soil moisture submodels, and the GrassGro DSS. *Agr. Syst.* 55, 535-582.

Moscatelli, G., Lutens, L.A., Gómez, L.A., 2001. Niveles de disponibilidad y reservas de potasio en Argentina. En: Melgar, R.J., Magen, H., Lavado, R.S. (Eds.), *El potasio en Sistemas agrícolas argentinos*. 1° Simposio FAUBA-INTA Fertilizar INTA Pergamino, Buenos Aires., pp. 13-59.

Nie, Z.N., Chapman, D.F., Tharmaraj, J., Clements, R., 2004. Effects of pasture species mixture, management, and environment on the productivity and persistence of dairy pastures in south-west Victoria. 1. Herbage accumulation and seasonal growth pattern. *Australian Journal of Agricultural Research* 55, 625-636.

Nie, Z.N., Miller, D., Moore, A.D., Hackney, B.F., Boschma, S.P., Reed, K.F.M., Mitchell, M., Albertsen, T.O., Clark, S., Craig, A.D., 2008. Field evaluation of perennial grasses and herbs in southern Australia. 2. Persistence, root characteristics and summer activity. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 424-435.

Romera, A.J., McCall, D.G., Lee, J.M., Agnusdei, M.G., 2009. Improving the McCall herbage growth model. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 52.

Tedeschi, L.O., 2006. Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agr. Syst.* 89, 225-247.

- Tharumaraj, J., Chapman, D.F., Nie, Z.N., Lane, A.P., 2008. Herbage accumulation, botanical composition, and nutritive value of five pasture types for dairy production in southern Australia. *Australian Journal of Agricultural Research* 59, 127-138.
- Thornley, J., H., M., Johnson, I.R.E., 1990. *Plant and crop modelling: a mathematical approach to plant and crop physiology*. Clarendon Press, Oxford, England; New York,.
- White, T.A., Johnson, I.R., Snow, V.O., 2008. Comparison of outputs of a biophysical simulation model for pasture growth and composition with measured data under dryland and irrigated conditions in New Zealand. *Grass and Forage Science* 63, 339-349.
- Wilhelm, W.W., Nelson, C.J., 1978. Irradiance Response of Tall Fescue Genotypes with Contrasting Levels of Photosynthesis and Yield. *Crop Science* 18, 405-408.
- Wong, J.H.H., Randall, D.D., Nelson, C.J., 1983. Photosynthesis in Tall Fescue : IV. Carbon Assimilation Pattern in two Genotypes of Tall Fescue Differing in Net Photosynthesis Rates. *Plant Physiology* 72, 16-21. 10.1104/pp.72.1.16
- Woodward, S., J., R., Rollo, M.D., 2002. Why pasture growth prediction is difficult. *Agronomy* 32, 17-26.
- Ziadi, N., Bélanger, G., Claessens, A., Lefebvre, L., Cambouris, A.N., Tremblay, N., Nolin, M.C., Parent, L.E. (2010) Determination of a critical nitrogen dilution curve for spring wheat. *Agronomy Journal*, 102, 241–250.

Capítulo 3: Evaluación mediante modelación de diferentes estrategias de fertilización nitrogenada en un sistema de cría vacuna.²

Introducción

La industria cárnica en Argentina es un componente importante de su economía, donde los *planteos* de cría, con más de 12 millones de vacas, constituyen la base de este sector (SENASA, 2014). Si bien ha ocurrido un desplazamiento del área destinada a la ganadería a consecuencia de la expansión de la agricultura, el área denominada “pampa inundable” que comprende una superficie de 9 millones de hectáreas, situada en el centro oeste de la región de la Pampa Húmeda (Soriano, 1992), aún es reconocida como la principal área de cría vacuna, donde se produce el 45% de los terneros de Argentina (MINAGRI, 2015). La “pampa inundable” incluye las cuencas del Río Salado y la Depresión de Laprida, las cuales son áreas extremadamente planas con un clima templado-subhúmedo. La lluvia promedio anual es de aproximadamente 800 mm, sin ninguna estacionalidad marcada (Pacín y Oesterheld, 2014). En esta región la producción de carne de los sistemas de cría fluctúa tradicionalmente entre 70 – 80 kg/ha/año, aunque los productores más eficientes alcanzan producciones de 120 a 200 kg/ha/año (Rearte y Pordomingo, 2014). Existen en la zona un conjunto importante de investigaciones científicas en distintos temas en pos de la mejora de los sistemas de producción de carne vacuna (Agnusdei et al., 2007; Hidalgo y Cauhépé, 2009; Mezzadra et al., 1989). También han sido estudiados distintas estrategias de henificación destinadas a compensar los desbalances entre la demanda y la oferta forrajera (Romera et al., 2005a; Romera et al., 2005b), y la comparación de planteos con parición otoñal o de primavera (Romera et al., 2008). En esta zona, la cría normalmente se lleva adelante sobre verdeos, campo natural y pasturas (Arelovich et al., 2011), y dentro de las pasturas, el agropiro y la festuca son ampliamente utilizadas dentro de otras especies forrajeras (Cid et al., 2008). Diferentes autores locales, han demostrado la capacidad de las pasturas de festuca para lograr tasas de producción razonables de forraje de alta calidad (Agnusdei et al., 2001; Lattanzi et al., 2007; Scheneiter y Fontana, 2002). La aplicación de nitrógeno tiene una importante influencia tanto en la producción total, como estacional de las pasturas, contándose con información regional sobre la respuesta de las pasturas a la fertilización nitrogenada (Agnusdei et al., 2010; Errecart et al., 2012). La fertilización con nitrógeno en pasturas y pastizal natural no es una práctica frecuente entre los productores ganaderos (Rearte y

² Berger, H., Agnusdei, M. & Machado, C. F. Feedbase intervention in a cow-calf system in the Flooding Pampas of Argentina: 3. Pasture responses and whole farm impacts of nitrogen fertilization strategies (en evaluación)

Pordomingo, 2014), con lo cual para identificar oportunidades de innovación y potencial adopción, la investigación del impacto de la fertilización nitrogenada sobre la base forrajera y a nivel del establecimiento ganadero requiere de un análisis holístico que muchas veces es difícil de lograrlo experimentalmente a nivel de sistema de producción. La modelación de los sistemas de producción (“whole-farm modelling”), ha demostrado ser una valiosa herramienta para la exploración de sistemas innovadores y para la identificación de brechas en la investigación (Ahuja et al., 2002; Le Gal et al., 2010). En tal sentido, se han logrado simular adecuadamente distintas condiciones para el desarrollo de pasturas de festuca, incluyendo estaciones del año, fertilización nitrogenada y riego, donde se logró un buen ajuste con datos de experimentos locales (Berger et al., 2014). Estas mismas estrategias de fertilización con N no han sido evaluadas a nivel de sistemas de producción de la región, lo cual resulta importante para profundizar la comprensión de las variables clave y factores limitantes de esas condiciones. Por lo tanto el propósito principal de este trabajo fue simular el impacto potencial a nivel del sistema de producción (el establecimiento ganadero), de la fertilización con nitrógeno de pasturas a través de la exploración de distintas estrategias (época de aplicación y % de superficie del campo fertilizada) a través de un rango de carga animal y bajo la variabilidad intra e inter anual del crecimiento de pasturas de festuca en sistemas de cría de la región de Laprida.

Materiales y métodos

Características del sistema de producción y del clima de la zona.

El clima del área de estudio de la región de Laprida (37°33'00"S 60°49'00"O) está caracterizado por inviernos húmedos y fríos y veranos cálidos y secos. Las precipitaciones mensuales históricas y la evaporación potencial para el período 1993-2013 se presentan en la Figura 1. La precipitación anual promedio y su desvío estándar fueron 856 ± 225 y 1147 ± 45 mm/año respectivamente. Las temperaturas mínimas y máximas ocurren en Julio (1,4 °C) y en Enero (30,3 °C), respectivamente.

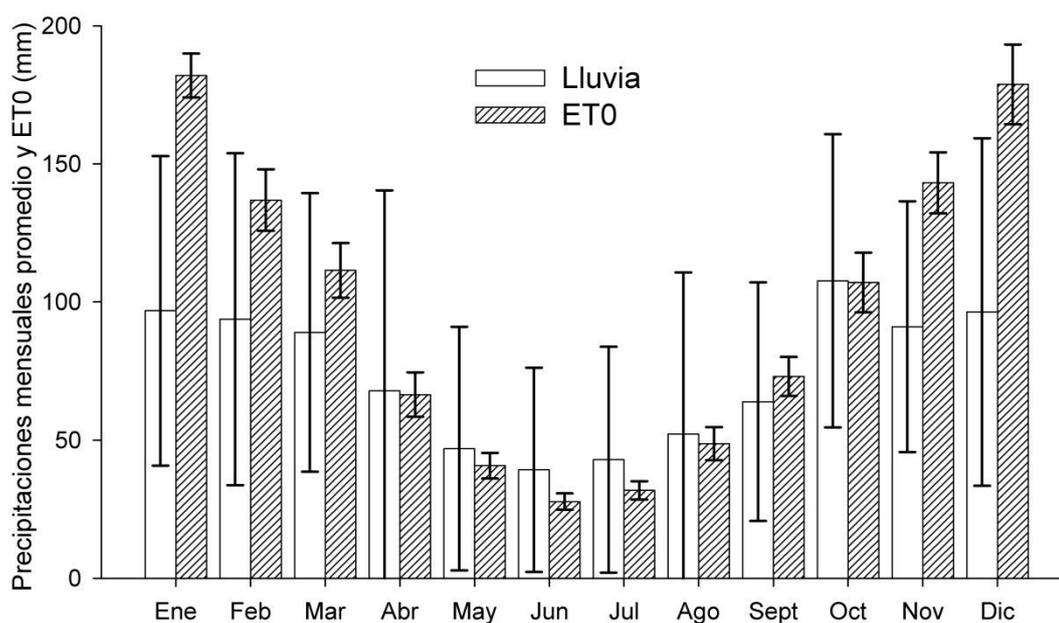


Figura 1: Precipitaciones mensuales promedio (barras blancas), y evapotranspiración potencial (ET0, barras rayadas), en Laprida (1993 - 2013). Las líneas verticales muestran el desvío estándar.

El área es una extensa planicie que constituye parte de la Cuenca alta de los ríos Salado y Quequén que comprende aproximadamente 2 millones de has. El área está constituida por una matriz de bajos con suelos alcalinos pobremente drenados, interrumpidos con pequeñas lomas, con suelos mejor drenados. Los sistemas de engorde de novillos y los sistemas agrícolas se desarrollan en las zonas altas de los campos. La carga animal promedio de los sistemas de cría es de 0,5 cab./ha, aunque alcanza 1,1 cab./ha. En los sistemas más intensificados las tasas de destete fluctúan en un rango ente 70 y 85% (Mosciaro et al., 2012).

Simulación de las respuestas a la fertilización y la variación intra e inter anual de la producción de las pasturas.

En un estudio de simulación, diferentes resultados experimentales de pasturas de festuca fueron representadas exitosamente bajo un amplio rango de condiciones ambientales, incluyendo distintas épocas y niveles de fertilización nitrogenada (Berger et al., 2014), utilizando el modelo de simulación biofísico 'DairyMod' (Johnson et al., 2008). En el estudio mencionado se logró una buena predicción de la acumulación de masa forrajera (kgMS/ha) de pasturas de festuca en

secano, calculándose los siguientes estadísticos: desvío medio (mean bias) -37, r^2 0.80, predicción del error medio (mean prediction error of) 27 %, eficiencia de modelación 0.80 y relación de varianza de 1.10 (Berger et al., 2014). En este estudio, también las tasas de crecimiento de las pasturas fueron simuladas con el mismo modelo (Johnson et al., 2008), donde se implementó un ensayo de corte, donde la pastura era cosechada cuando alcanzaba 2 hojas por macollo, considerándose que los nutrientes retornaban al suelo como orina y heces (opción de simulación del modelo), asumiendo un remanente de 1000 kg MS/ha. Se fertilizó con nitrógeno el 10 de Marzo o el 10 de Agosto con 100 kgN/ha, y el tratamiento testigo no se fertilizó (100N y 0N escenarios respectivamente). Los parámetros edáficos fueron ajustados para representar un suelo de tipo Paleudol Petrocálcico (Staff., 2010), con un perfil franco arcilloso (4.7% MO, pH 6,2).

Las simulaciones se realizaron para cada año del período 1993-2013, y la acumulación de masa forrajera (AMF) diaria fueron presentadas como el promedio mensual de la acumulación diaria de pastura (crecimiento menos senescencia), luego de ajustar a 0 los días con tasas de acumulación de pastura negativas (Cullen et al., 2008). Los datos de temperatura máxima y mínima (°C), lluvia (mm), y humedad relativa del ambiente correspondientes al área de estudio y para dicho período fueron provistas por el Servicio Meteorológico Nacional (<http://www.smn.gov.ar/>). La radiación solar total expresada en MJ/m² y la velocidad del viento en m/seg. fueron obtenidas para el período Octubre 2011 a Diciembre de 2013 de una estación meteorológica automática localizada en las cercanías del área de estudio. Los datos restantes de radiación solar y velocidad del viento (correspondientes al período 1993-2010) fueron estimados utilizando el modelo ClimGen (Stockle et al., 1999) del mismo modo que fuera utilizado en otros trabajos (ej. Abraha y Savage (2006)). Se calculó para cada escenario simulador la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN). La EUN, definida como la relación entre el incremento en la producción de MS de la pastura y el nitrógeno aplicado en la fertilización, fue calculado como un indicador de la eficiencia productiva con la que fue utilizado el nitrógeno adicionado (Zhang y Tillman, 2007). Este usualmente es expresado como la cantidad de forraje producido por cada unidad de nitrógeno aplicada (kgMS/kgN), donde la producción adicional de MS de la pastura es medida durante un periodo de rebrote determinado (Eckard y Franks, 1998).

Simulación y evaluación del impacto de la intensificación a nivel del establecimiento ganadero

En la Figura 2 se presenta la serie de promedios mensual de la tasa neta diaria de acumulación de forraje (kg MS/ha/día) para el periodo 1993-2013. La curva (patrón), de producción de forraje

de cada año fue analizada individualmente tal cual lo realizado por Chapman et al. (2008). A partir de allí se calculó la frecuencia de distribución de estaciones “Secas” (donde la AMF fue menor al 25% del promedio de largo plazo de la AMF). El análisis se focalizó en otoño (Abril, Mayo y Junio) y primavera (Octubre, Noviembre y Diciembre), dado que ellas representan el 77% de la AMF anual promedio de largo plazo, y además son las estaciones donde la respuesta a la fertilización con nitrógeno de las pasturas se expresa en mayor magnitud. Finalmente, se simuló el sistema de cría vacuna utilizando AMF de años sintéticos estimados a través del procedimiento descrito previamente, en años promedio (Promedio), años con otoño seco (Ot-Se), y años con primavera seca (Pri-Se).

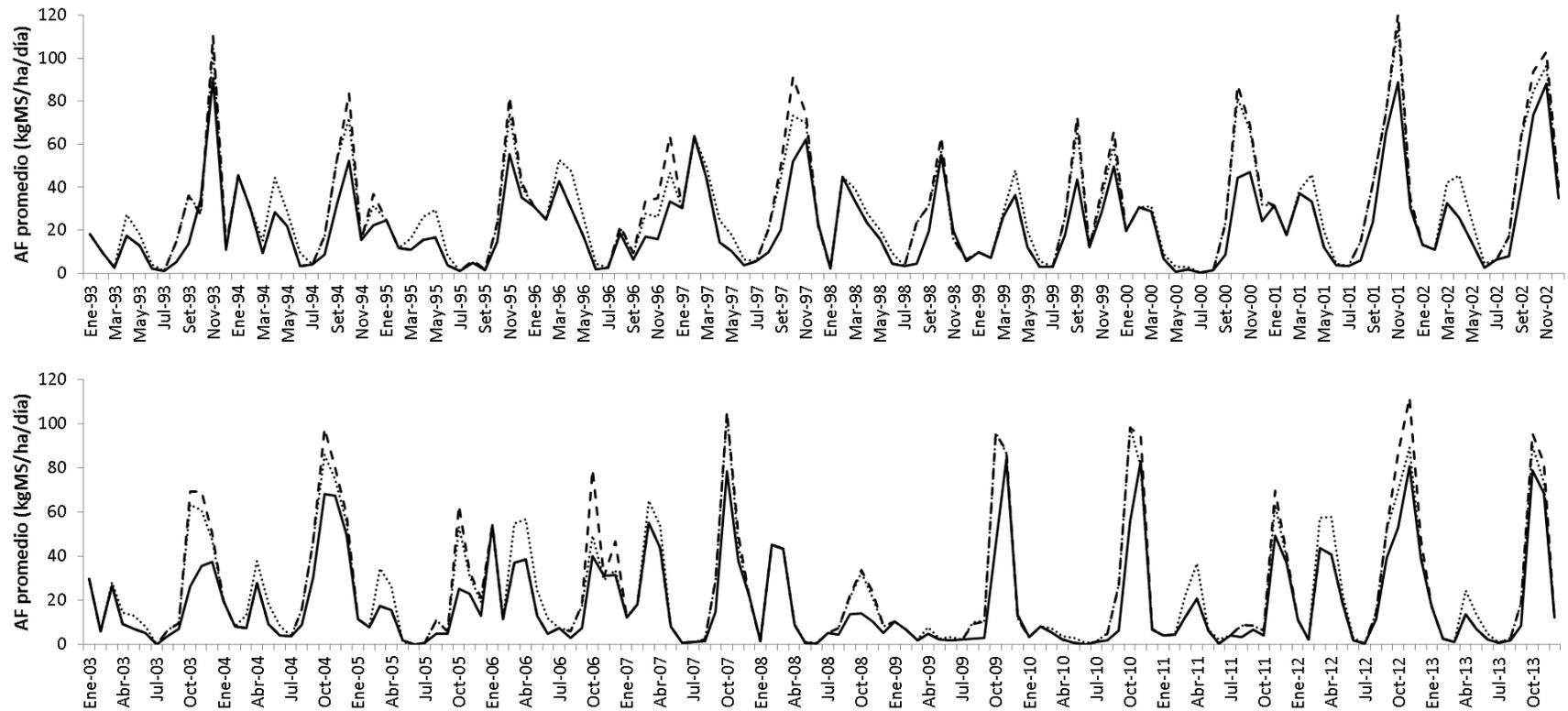


Figura 2: Resultados de tasas de acumulación neta de forraje mensuales (kg MS/ha/día), de simulaciones de largo plazo (1993-2013) para la región de Laprida. Los escenarios simulados fueron tratamientos sin fertilizar, fertilización otoñal o fertilización en primavera con 100kgN/ha (líneas sólida, punteada y discontinua respectivamente).

Para estimar la performance productiva y económica del sistema de cría, se utilizó SIMUGAN, un modelo de simulación bioeconómico de empresas ganaderas (Machado et al., 2010b). Esta herramienta de simulación es un modelo biofísico, dinámico y Web, que provee resultados productivos, económicos y ambientales a partir de reglas/criterios de manejo de los sistemas de producción a simular y detallados componentes biofísicos que representan el consumo y selección de la dieta de forrajes y suplementos, requerimientos de nutrientes y performance reproductiva. Los planteos simulados se orientaron a evaluar el impacto de la fertilización con 100 kgN/ha aplicados a el 20% o el 40% de la superficie del campo al inicio del otoño o primavera (Control 0%, 20%-Ot, 20%-Pri, 40%-Ot y 40%-Pri).

El modelo SIMUGAN requiere como entrada la AMF siendo estos datos obtenidos del procesamiento de la información por tipo de año descripto previamente. Los diferentes planteos del sistema de cría que se construyeron en el modelo de simulación SIMUGAN estaban basados en un estudio participativo con asesores realizado previamente (Machado et al., 2010a), donde se identificaron distintas estrategias de manejo requeridas para la representación de las variables esenciales del sistema de producción: Tamaño y estructura del rodeo, períodos de parición y servicio, así como fecha de destete, además se preestablecieron reglas de contingencia / emergencia tales como destete precoz, confección de reservas forrajeras (rollos) y suplementación con heno. Se asumió una superficie del campo de 600 has. y la estructura del rodeo para el escenario base (0,9 cab/ha) fue 432 vacas y 108 vaquillonas preñadas, incrementándose proporcionalmente el número de animales para lograr cargas de 1,1 y 1,3 cab/ha. Se planteó un servicio de primavera, entre el 1° de noviembre y el 31 de enero, el destete se realizó cada 1° de marzo. El tacto se hizo coincidir con el momento del destete, en que las vacas vacías fueron vendidas como vaca descarte. Los terneros se vendieron en marzo, a excepción de una cantidad de terneras equivalente al 10% de los vientres, las cuales fueron entoradas a los 15 meses de edad. Se implementó un pastoreo rotativo diario, siendo la asignación de pastura función de los valores mensuales prefijados (parámetro definido por el usuario, que estuvo en el rango 1,5 a 10 kg/100kg peso vivo / día). La cobertura de pastura del establecimiento (“whole-farm pasture cover”), definida como la masa forrajera promedio de todos los potreros, expresada en kg MS/ha, fue estimada semanalmente (simulando una recorrida del campo), la cual fue comparada con objetivos prefijados para cada mes (1800 kg MS/ha para el invierno/primavera temprana y verano o 2000 kg MS/ha para otoño y mediados-fin de primavera). A

tal fin, se definió en el modelo una regla para el manejo de las pasturas de modo de ajustar las asignaciones forrajeras predefinidas y también henificación del forraje excedente durante la primavera tardía y verano. En los casos que fue necesario se suplemento con heno durante los meses de julio y agosto en los años Normales, y entre mayo y Agosto o de julio a septiembre en los años Se-Ot y Se-Pri. El heno se suministró a razón de 1,0 Kg/100 kg PV /día en las cargas de 0,9 y 1,1 y 0,6 Kg/100 kg PV /día en la carga de 1.3 cab/ha respectivamente. La estrategia de suplementación estuvo basada (y limitada) en las reservas de heno disponibles a partir de la cosecha de excedentes de forraje. En el caso que la cobertura de forraje promedio del establecimiento cayese debajo de los 1400 kg MS/ha o la condición corporal (CC) de las vacas (escala 1-9, siendo 1 flaca y 9 extremadamente gorda), estuviese debajo de 3 al inicio del entore, se implementaba un destete precoz a partir que los terneros tuvieran un PV de al menos 70 kg. Los terneros destetados precozmente se alimentaban a corral hasta que alcanzaron 150 kg PV (asumido como el peso mínimo para la venta), tal lo sugerido por Continanza et al. (2010). Los escenarios fueron simulados en un rango de cargas fijándose la máxima carga en función de las mínimas coberturas de forraje del establecimiento y CC fijadas como límite (máxima carga animal sostenible).

Las variables evaluadas del sistema de producción fueron: Carga animal que se logró sostener (viable), tasa preñez de vacas y vaquillonas (TP), tasa destete (TD), peso vivo de los terneros al destete (PVD), producción de terneros (kg PV terneros / ha), margen bruto (MB) y rentabilidad productiva, expresada como el retorno obtenido del capital invertido en hacienda y equipamientos (Rent). El margen bruto fue calculado como los ingresos de la venta de terneros destetados, vacas vacías y descarte menos los costos de producción (mano de obra, gastos veterinarios, compra de vaquillonas de reposición adicionales en los casos requeridos, toros y mantenimiento de pasturas), incluyéndose también los costos de comercialización (AACREA, 2015). La Rent. fue calculada como el margen bruto (U\$S) dividido por la suma de la inversión total (U\$S) en animales y los costos de producción sin incluir el capital tierra (Berger et al., 2013).

Resultados

Simulación de la dinámica del crecimiento de las pasturas y las respuestas a la fertilización nitrogenada.

La serie completa de AMF para las pasturas sin fertilizar se presenta en la Figura 2 y la AMF promedio mensual para el período 1993-2013 y su desvío estándar se presentan en la Figura 3. El inicio del crecimiento a la salida del invierno ocurre en Agosto, lo cual fue consistente a lo largo de los años (Figura 3). La acumulación de masa forrajera correspondiente a años promedio (entre $\pm 25\%$ del promedio de largo plazo) se presentó en el 58% de las series, y la variación interanual de la AMF estuvo dada por la presencia de condiciones de otoños y primaveras “Secos”. La AMF anual y su desvío standard (DS) para los años Normal, Ot-Se y Pri-Se fueron $9,1 \pm 1,7$, $6,5 \pm 0,4$ y $7,6 \pm 0,6$ ton MS/ha.año, respectivamente. El análisis de las series de datos de crecimiento de la pastura muestra que Ot-Se y Pri-Se tienen una frecuencia de ocurrencia similar (24%), y solo en 5% de los años analizados estuvieron presentes de manera simultánea.

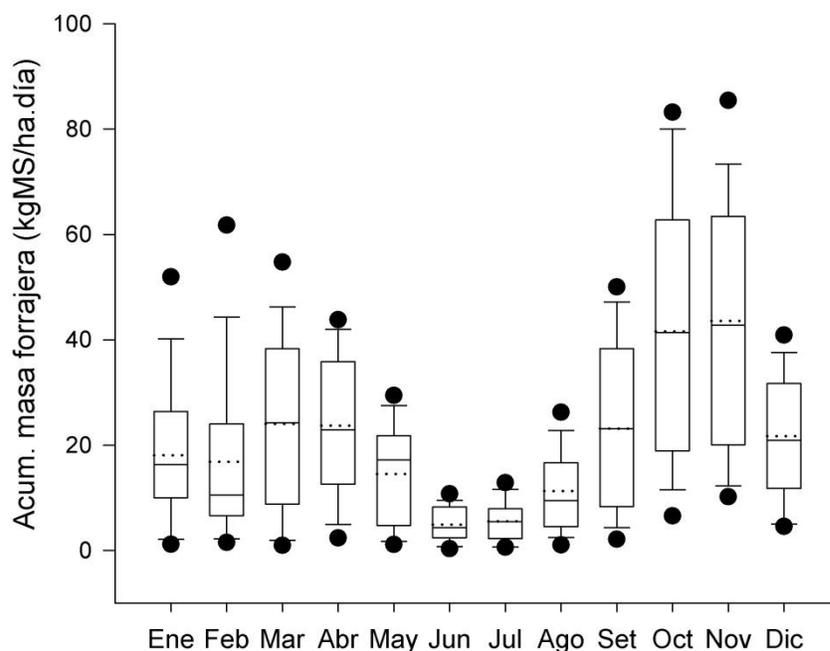


Figura 3: Acumulación forrajera (AMF) de largo plazo (1993-2013), correspondiente a pasturas de festuca de la región de Laprida, Argentina. Box plots muestran los percentiles 10, 25, 75 y 90°. Las líneas punteadas indican la media y los puntos son los percentiles 5 y 95°.

La fertilización nitrogenada incrementó la acumulación de forraje aumentando la producción estacional de la pastura en función de la fecha de aplicación del fertilizante. La aplicación de 100 kgN/ha en Agosto incremento la producción primaveral con una EUN de 20,1 kgMS pastura/kg N y dando como resultado un incremento en la producción anual de un + 25% en los años Promedios. La condición de primavera seca redujo en un 35% la producción pero manteniendo una EUN similar (21,1 kgMS/kgN). Hubo un adelantamiento de la producción de las pasturas a la salida del invierno luego de la fertilización nitrogenada a fin del invierno-inicio de la primavera siendo las respuestas a N en promedio 5,8; 11,6 y 15,0 kgMS extra/ha para la 2°, 1° y 2° quincena de Agosto y Septiembre respectivamente. La respuesta a la fertilización otoñal fue menor que cuando se aplicó en primavera, con una EUN de 8,33 kgMS/kgN en años Promedio durante los 90 días posteriores a la fertilización. Sin embargo, en el presente trabajo cuando se presentaron Ot-Se la EUN bajo a 2.5 kgDM/kgN. La aplicación otoñal mostró adicionalmente una importante respuesta residual en la siguiente primavera, que cuantifico 1,7; 1,1 y 1,5 ton MS /ha extra en la primavera en años Ot-Se, Pri-Se y Promedio (Figura 4). La inclusión del crecimiento extra residual de la pastura en la primavera

siguiente tiene una alta relevancia dado que implica el logro de una EUN similar en fertilizaciones de otoño como de primavera (20,8 y 20,6 kgMS/kgN respectivamente).

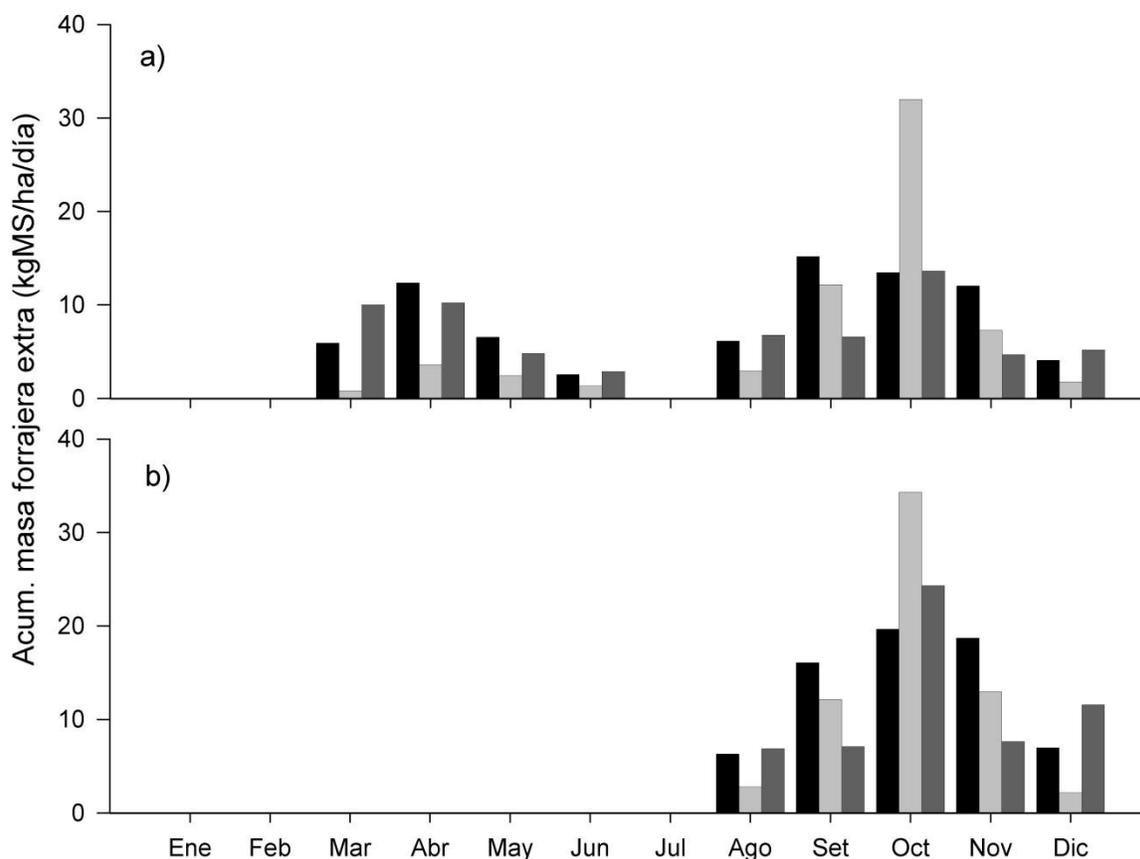


Figura 4: Acumulación de masa forrajera adicional (sobre el tratamiento control= 0 kgN/ha) en respuesta a la fertilización (100kg/ha) de otoño (a) o de primavera (b) en distintos tipos de año (barras negras, gris claro, y gris oscuros son años promedio, con otoño seco o con primavera seca respectivamente).

La aplicación de N en otoño y primavera tuvo una estimación de pérdidas de N por lixiviación reducidas en años Promedio y con primaveras secas (los promedios fueron 5,77 o 3,00 y 1,74 o 0,09 kg N/ha/año respectivamente). Sin embargo, en años con otoños secos (24% de las simulaciones), la fertilización nitrogenada incrementó la lixiviación de N (pérdidas promedios de 14,9 y 4,5 kgN/ha/año para fertilizaciones de otoño y primavera respectivamente). En el caso de los tratamientos control (0N), el N lixiviado fluctuó en un rango de 0,09 a 3,88 kgN/ha/año.

Incorporación del efecto en el sistema de cría vacuna de la variabilidad climática interanual

La acumulación de masa forrajera para los escenarios con fertilización nitrogenada en otoño o primavera para cada tipo de año (Promedio, Ot-Se y Pri-Se), se presentan en la Figura 5.

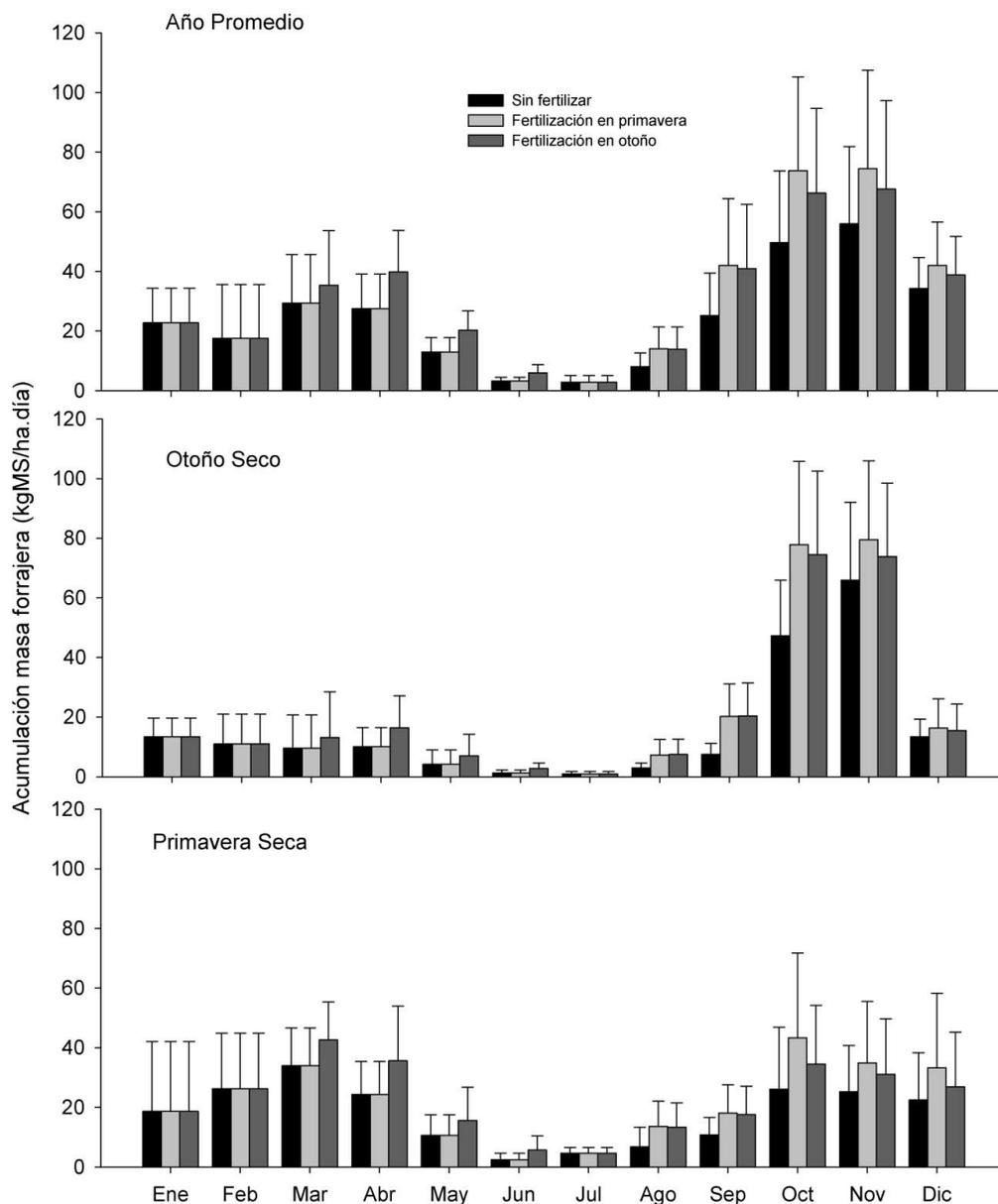


Figura 5: Acumulación de masa forrajero promedio mensual (kgMS/ha.día) para pasturas de festuca afectadas por distintos tipo de año (promedio, otoño seco o primavera seca) en el escenario base con 0N (barras negras) y fertilizadas con N (100kgN/ha) en otoño (barras gris oscuro) o la misma dosis de N en primavera (barras grises claras) en la región de Laprida, Argentina.

La producción de MS en los establecimientos donde el 20% de la superficie fue fertilizada con nitrógeno en otoño significó una disponibilidad extra de pastura, considerando toda el área de pastoreo, de 477, 394 y 397 kg MS/ha.año en Promedio, Ot-Se y Pri-Se respectivamente. Cuando el nitrógeno fue aplicado en primavera a la misma superficie, la producción adicional de forraje fue 413, 394 y 353kg MS/ha.año en Promedio, Ot-Se y Pri-Se respectivamente. La producción extra de MS fue duplicada cuando el área fertilizada de incremento de 20 a 40%.

A 0,9 cab/ha, el tipo de año, la época de fertilización y el área en la cual se aplicó fertilizante no afectó la tasa de preñez, lo cual estuvo levemente por encima de 90% (Tabla 1). En el año Promedio, el sistema fue capaz de sostener una carga de hasta 1,3 cab/ha (CA 1.3), prácticamente sin cambios en las tasas de preñez. Sin embargo, Ot-Se y Pri-Se redujo la tasa de preñez, encontrándose un efecto más marcado en el primer caso. Las tasas de preñez muy bajas de los años secos en los planteos de carga 1,1 cab/ha fueron compensadas por la estrategia de fertilización nitrogenada tanto sí se aplicó en otoño como en primavera, en ambos niveles de superficie y por la activación de una regla de destete precoz (Tabla 1) que redujo los requerimientos nutricionales de lactación de las vacas. La fuerte caída en la tasa de preñez en las alternativas con carga de 1,3 cab/ha dada por la ocurrencia de Ot-Se no pudo ser mitigada con ninguna de las estrategias de fertilización, aunque en el caso de Pri-Se la implementación del destete precoz con la aplicación de N en otoño o primavera en el 40% de la superficie del campo ó al 20% de la superficie durante primavera sí lograron moderar el impacto de la sequía (Tabla 1).

Tabla 1: Tasas de preñez base (%) obtenidas a las cargas de 0,9; 1,1 y 1,3 cab/ha de los escenarios sin fertilizar y las diferencias en relación a los escenarios fertilizados con 100kgN/ha en otoño o primavera (aplicados a 20 o 40% de la superficie del campo), en diferentes tipo de año (en función de los establecimientos fertilizados con 100 kgN/ha en años Promedio o años con otoño o primaveras secos). Los asteriscos indican aquellos escenarios donde se activó la regla de destete precoz.

Carga animal	Tipo de año	Base	Época fertilización			
			Otoño		Primavera	
			Superficie			
			20%	40%	20%	40%
0,9	Promedio	92	0	-2	0	0
	Otoño Seco	92	-1	0	-1	-1
	Prim. Seca	92	1	0	-2	-1
1,1	Promedio	92	0	1	0	-1
	Otoño Seco	*82	9	9	11	9
	Prim. Seca	81	10	10	9	10
1,3	Promedio	87	0	4	2	3
	Otoño Seco	*28	*35	*35	*16	*15
	Prim. Seca	*78	*-1	*13	*10	*13

La producción de terneros (kgPV/ha), se incrementó linealmente en función de la carga animal solo en años del tipo Promedio (Tabla 2). La fertilización nitrogenada durante otoño o primavera en el 20% de la superficie del campo en años del tipo Ot-Se y Pri-Se implicó un aumento en los kg PV destetados en cargas de hasta 1,1 cab/ha, sin lograr beneficios adicionales en la producción al incrementar el área fertilizada al 40% del establecimiento. La activación de la regla de destete precoz en combinación con las diferentes alternativas de fertilización nitrogenada no lograron mitigar el efecto de Ot-Se y Pri-Se en cargas de 1,3 cab/ha donde se redujo la producción (kg PV/ha) de terneros destetados (Tabla 2).

Tabla 2: Producción de PV de terneros de destete a las cargas de 0,9; 1,1 y 1,3 cab/ha en los escenarios sin fertilizar (Base) y el PV adicional producido (kg PV/ha) con 100kgN/ha en Otoño o Primavera (aplicados a 20 o 40% de la superficie del establecimiento), bajo diferentes tipos de año (Promedio, otoño seco o primavera seca, respectivamente). Los asteriscos indican aquellos planteos donde se activó la regla de destete precoz de los terneros.

Carga Animal	Tipo de año	Base	Época fertilización			
			Otoño		Primavera	
			Superficie			
			20%	40%	20%	40%
0,9	Promedio	99	3	1	3	0
	Otoño Seco	95	2	3	3	16
	Prim. Seca	94	5	5	2	3
1,1	Promedio	101	18	18	18	18
	Otoño Seco	*104	6	29	6	10
	Prim. Seca	83	24	30	24	24
1,3	Promedio	133	4	2	1	4
	Otoño Seco	*97	*-3	*0	*0	*0
	Prim. Seca	*81	*9	*15	*11	*15

En años del tipo Promedio, independientemente de la carga animal, la época o el área en que se aplicó fertilizante nitrogenado, siempre hubo un excedente de heno (Figura 6). Contrariamente, con Ot-Se y Pri-Se en la mayoría de los casos el balance anual de reservas de heno fue negativo (las existencias iniciales de heno no se recuperaron al finalizar el año simulado). En general, la confección de heno se incrementó linealmente con el área fertilizada y se redujo con la carga animal (Figura 6).

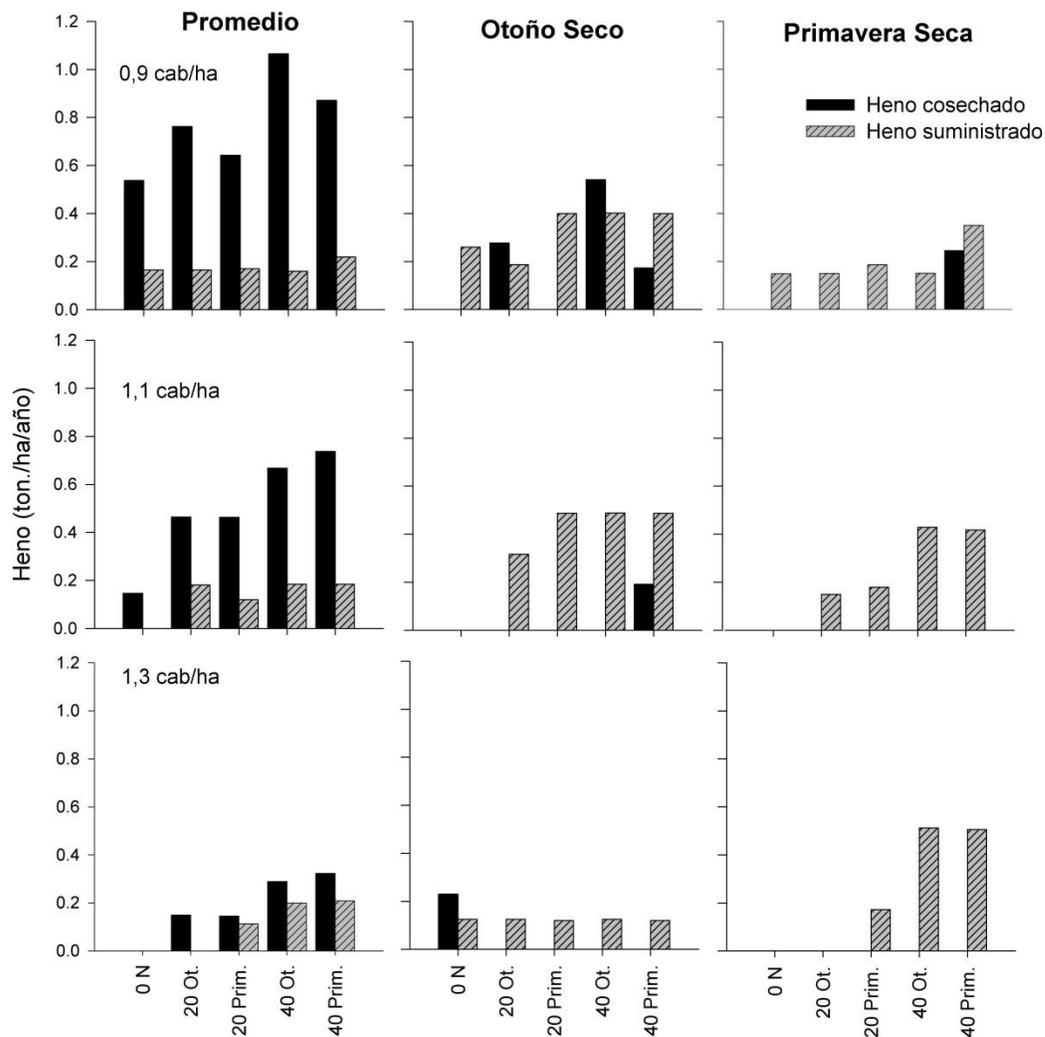


Figura 610: Heno cosechado (ton. heno/ha/año), y suministrados en el siguiente invierno, en cargas de 0,9; 1,1 y 1,3 cab/ha bajo diferentes tipos de año (Años Promedio, izquierda; años con otoño seco, centro; o años con primavera seca, derecha) en planteos fertilizados con 100kgN/ha en otoño (Ot.) o primavera (Prim.) en 20 o 40% de la superficie del campo.

El margen bruto se incrementó linealmente con la carga animal en años del tipo Promedio (Figura 7). Las épocas secas (especialmente Ot-Se), afectaron negativamente el MB lo cual fue compensado en las cargas de 1,1 cab/ha cuando se aplicó nitrógeno al 20% del establecimiento en otoño o en primavera (Figura 7). A cargas de 1,3 cab/ha, los años secos afectaron fuertemente el margen bruto, y ninguna de las estrategias de fertilización con nitrógeno fue capaz de alcanzar los resultados observados en la condición de año Promedio (Figura 6).

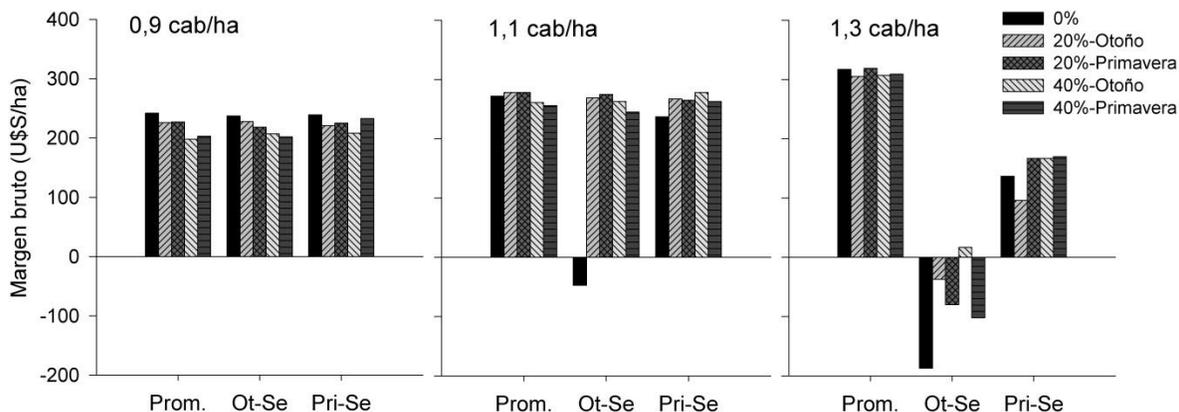


Figura 7: Margen bruto (U\$/ha) para los sistemas de cría vacuna modelados con cargas de 0,9; 1,1 y 1,3 cab/ha de la región de Laprida, Argentina. Los grupos de 5 barras representan los tratamientos de fertilización nitrogenada siendo control (0kg N), 100 kgN/ha en el 20% de la superficie del campo aplicados en otoño o primavera, y 100kgN/ha aplicados al 40% de la superficie del establecimiento en otoño o primavera, bajo diferentes tipos de año: Año promedio (Prom.), o años con otoño seco o primavera seca (Ot-Se o Pri-Se, respectivamente).

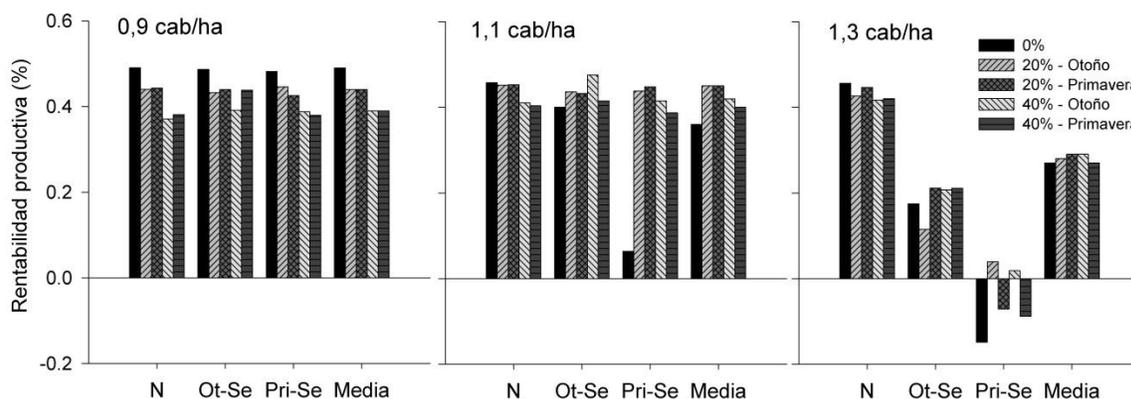


Figura 8: Rentabilidad productiva (expresada como el % de retorno al capital invertido en el rodeo de cría y maquinarias/equipamiento) para los sistemas de cría simulados de la región de Laprida con cargas animales de 0,9; 1,1 y 1,3 cab/ha. Los grupos de cinco barras representan el tratamiento control (0kg N), 100kgN/ha aplicado en el 20% del establecimiento en otoño o primavera, y 100kgN/ha aplicado al 40% de la superficie del campo en otoño o primavera ante diferentes tipos de año: Promedio (Prom.) o años con otoño o primavera secos (Ot-Se ó Pri-Se respectivamente).

La mayor rentabilidad productiva (rentabilidad sin incluir el capital tierra) de 49% se obtuvo en la alternativa de 0,9 cab/ha sin fertilización, mientras que la menor fue registrada en los escenarios con 1,3 cab/ha, donde las diferencias entre los distintos tipos de año fueron más evidentes (Figura 8).

Discusión

Este trabajo de modelación de sistemas de cría ganadera ha permitido identificar oportunidades de innovación y los pro y contras en los aspectos productivos y económicos como respuesta a distintas estrategias de fertilización con nitrógeno en pasturas de festuca de Argentina bajo condiciones de variabilidad interanual del crecimiento de las pasturas. Dichas respuestas fueron evaluadas tanto a nivel del componente pasturas como a escala del sistema de producción.

A nivel de la pastura a lo largo de todo el período (1993-2013) la AMF anual y su desvío estándar (DE) fueron $7,3 \pm 2,0$ ton MS/ha.año respectivamente. Si bien es escasa la información local de largo plazo sobre la pasturas de festuca, en un estudio regional de tres años presentaron una AMF de $6,7 \pm 0,9$ tonMS/ha.año, cercana a nuestros resultados y con una distribución estacional similar (Mazzanti y Arosteguy, 1985). El crecimiento invernal reducido fue el reflejo de las bajas temperaturas, ya que las temperaturas medias por debajo de los 5°C constituyen un límite para estas pasturas C3 (Hutchinson et al., 2000). El inicio de la estación de crecimiento después del invierno ocurre en Agosto, sin verse afectado por el tipo de año (Figura 2 y Figura 3). La máxima AMF fue observada en Octubre-Noviembre, describiendo una estación de crecimiento de primavera prolongada, desde Agosto a Noviembre.

La aplicación de 100 kgN/ha en Agosto incremento la producción primaveral con una EUN de 20,6 kgMS pastura/kg N con un incremento en la producción anual de un + 25% en los años Promedios lo cual concuerda con el rango de 10-23 kgMS/kgN informado por Berger et al., (2014). El adelantamiento de la producción de las pasturas a la salida del invierno se observó claramente en los resultados de este trabajo (Figura 4), tal como es mencionado frecuentemente luego de la fertilización nitrogenada en pasturas de la misma región (Fernández Grecco et al., 1995). La respuesta a la fertilización otoñal fue menor que cuando se aplicó en primavera, con una EUN de 8,33 kgMS/kgN durante los 90 días posteriores a la fertilización (Figura 4). Resultados similares fueron presentados por Berger et al. (2014) con una EUN para fertilizaciones otoñales de 5-7

kgMS/kgN. Cuando se presentaron Ot-Se la EUN estuvo por debajo de los valores promedio disminuyendo a 2,5 kgDM/kgN. Sin embargo, la aplicación otoñal mostró adicionalmente una importante respuesta residual en la siguiente primavera de un 30, 35 y 21% de producción adicional en la primavera en años Ot-Se, Pri-Se y Promedio, respectivamente (Figura 4). La respuesta remanente en la primavera posterior a la fertilización con N en otoño ha sido previamente informada en otros trabajos (Labuschagne et al., 2006), particularmente cuando no son favorables las condiciones de crecimiento posteriores a la fertilización (Sun et al., 2008). Tal retraso en la respuesta en circunstancias en que el crecimiento de las pasturas es bajo podría estar dado por el almacenamiento de nitrógeno en las raíces de las plantas y parte de él fijado por los microbios en el suelo caracterizado por una relación C :N alta, y que puede ser remobilizado a la parte foliar durante la primavera (Lambert y Clark, 1986; Ledgard et al., 1988). Para el presente trabajo, la inclusión del crecimiento extra residual de la pastura en la primavera siguiente tiene una alta relevancia dado que implica el logro de una EUN similar en fertilizaciones de otoño como de primavera (20,8 y 20,01 kgMS/kgN respectivamente), tal como lo hallado por Labuschagne et al. (2006). La aplicación otoñal de N dio como resultado un incremento en el N lixiviado (8,3 kgN/ha/año) en comparación con la fertilización de fin de invierno (2,4 kgN/ha/año). En el caso de las pasturas del tratamiento control (0N), el N lixiviado se estimó en 1,9 kgN/ha/año. Todos estos valores fueron considerablemente más bajos que aquellos medidos en pasturas en base a tréboles, en las que se han registrado pérdidas de N por lixiviación que iban de 16 a 37 kg N/ha/año (Brock et al., 1990), y 60 a 80 kg N/ha/año (Field et al., 1985). En un experimento local, realizado en la misma región y tipos de suelos, para evaluar la eficiencia de uso de los fertilizantes nitrogenados aplicados a pasturas, las pérdidas por lixiviación fueron prácticamente nulas dada la presencia de un horizonte B de tipo nátrico con alto contenido de arcilla que limita en gran medida el movimiento del agua en el suelo (Barbieri et al., 2006). Si bien se requiere más resultados experimentales sobre este importante aspecto ambiental, este estudio de simulación indica una condición de bajo riesgo de lixiviación de N en este tipo de suelos cuando se fertiliza con 100 kg N/ha en otoño o en primavera.

Implicancias de la intensificación en el sistema de producción ganadero.

En un año de tipo promedio, sin fertilización, el sistema sostuvo una carga animal de hasta 1,3 cab/ha (CA 1,3) incrementándose linealmente tanto los kg PV/ha de terneros destetados (Tabla 2) como el margen bruto (Figura 7). La presencia de otoños y primaveras secas redujeron la

producción anual de las pasturas en un 29 y un 17%, pero solo afectaron negativamente a la performance del sistema de producción cuando la carga animal fue mayor a 0,9 cab/ha (Tablas 1, 2 y Figura 7). Sin embargo, ha sido planteado que el análisis de los sistemas de producción basado en años “promedio” conducirá indefectiblemente a errores críticos para el sistema de producción (Chapman et al., 2008). En este trabajo, sí solamente se hubiesen considerado los años de tipo Promedio, las alternativas de carga animal 1,3 cab/ha hubieran sido seleccionadas como la mejor opción para alcanzar el mayor margen bruto con la base forrajera utilizada (Figura 7), sin necesidad de aplicar fertilizantes nitrogenados. Sin embargo, esta conclusión sería incorrecta en el 42% de las veces por la presencia de años del tipo Ot-Se y Pri-Se. Esto indica el alto riesgo del sistema de producción planteado en las estaciones secas, particularmente en otoños secos lo cual resalta la importancia de lograr un mejor entendimiento de las interacciones clima-sistema de producción cuando se exploran innovaciones en la base forrajera.

En las cargas animales más altas, los otoños secos resultaron más negativos que las primaveras secas para la tasa de preñez (Tabla 1), siendo aún más críticos en el margen bruto resultante (Figura 7). El fuerte impacto negativo sobre el sistema de producción de los otoños secos puede estar asociado al hecho que el déficit en la oferta forrajera coincidió con el período en que las vacas se encuentran recuperando condición corporal, con la época de parición, y el inicio del servicio (Morris et al., 1994). En los planteos de 1,1 cab/ha de carga animal, sin fertilizar, Ot-Se además disparó una regla de destete precoz para reducir en la vaca los requerimientos nutricionales asociados a la lactación, lo cual redujo la productividad del sistema al producir terneros más livianos. La recría de los terneros destetados precozmente para llevarlos al peso de venta (150 kgPV/cab), requirió incurrir en costos adicionales de alimentación, pero esta estrategia es ampliamente recomendada como una herramienta de manejo táctica (Galli et al., 2005), por lo cual fue implementada en estas simulaciones. La confección de heno (rollos) permitió no solo conservar el forraje excedente para cubrir futuros déficits en la oferta forrajera, sino también mantener las pasturas en condiciones adecuadas (Romera et al., 2005a; Romera et al., 2005b). En años del tipo promedio, independientemente de la carga animal, la estación del año o la superficie fertilizada, en todos los casos hubo un excedente (Figura 6). Contrariamente, en años tipo Ot-Se y Pri-Se el balance fue negativo en la mayoría de los casos, pero fue más grave en los otoños secos, lo cual implica que bajo tales condiciones hay una reducción de las reservas de heno en el ciclo productivo.

En años de tipo promedio, la fertilización nitrogenada no mejoró la performance biofísica de los sistemas de producción, entonces los costos adicionales del N y los mayores gastos de henificación (Figura 6), hicieron que el margen bruto se viese reducido (Figura 7). Contrariamente, cuando Ot-Se afectó de manera crítica el margen bruto en las alternativas con carga animal de 1,1 y 1,3 cab/ha (-47 y -187 U\$S/ha, respectivamente), la fertilización nitrogenada en el 20% de la superficie del establecimiento durante otoño o primavera permitió solo en la carga animal de 1,1 cab/ha que el margen bruto se equipare a los niveles de los años tipo promedio (Figura 7). Estos resultados no estuvieron correlacionados con el impacto de la fertilización nitrogenada sobre la producción adicional de la pastura, dado que la EUN en los otoños secos fue casi un tercio de la respuesta al N en años promedio (2,5 y 8,3 kg MS/kgN en otoño seco y años promedio respectivamente). Sin embargo el efecto de diferimiento de la respuesta para la próxima primavera posibilitó que la productividad de la pastura se incremente hasta 17,7 kg MS/kg N lo que aseguro mejores condiciones de alimentación durante el invierno y la época de servicio posibilitando el logro de altas tasas de preñez (Tabla 1).

Cuando se incluye el capital tierra en el cálculo de rentabilidad se han reportado valores de 4,5% para los sistemas de cría vacuna locales (Pacín y Oesterheld, 2014). En el presente trabajo, dado que la tierra fue mantenida constante entre las alternativas, la rentabilidad fue estimada solo para el capital invertido en el rodeo y los costos operativos, tal como lo realizado en trabajos previos (Berger et. Al, 2013). Esto lógicamente da como resultado magnitudes mayores, pero resulta más fácil de comparar las alternativas para los sistemas de cría que se llevan adelante en campos alquilados de la región (Modernel et al., 2016). Ante cargas de 1,1 cab/ha, la fertilización nitrogenada en el 20% de la superficie del establecimiento en otoño o en primavera produjo en promedio un alto retorno al capital invertido (45%) en el rodeo (Figura 7). La menor rentabilidad productiva a 1,3 cab/ha de carga animal (27%), reflejo el mayor capital en animales y la pobre resiliencia del planteo productiva ante la presencia de sequías (Figura 8). Dados los resultados precedentes, se evidencia que el cálculo del VMA constituye una herramienta valuable como ayuda para la toma de decisiones para el manejo de los planteos ganaderos en un contexto de variabilidad climática.

Conclusiones

En años de tipo Promedio, el incremento de la carga animal hasta 1,3 cab/ha resultó en una alternativa altamente atractiva, pero ante la presentación de sequías, particularmente en otoño en los planteos con cargas por encima de 0,9 cab/ha el margen bruto disminuyó importantemente afectado, y solo se recuperó en cargas de hasta 1,1 cab/ha por la fertilización del 20% del establecimiento en cualquiera de las dos estaciones. Finalmente, este estudio aplicó exitosamente un enfoque integrador, utilizando en combinación una serie de herramientas de simulación dinámica permitiendo la profundización de las respuestas de los sistemas de cría y la identificación de áreas de vacancia en investigación en lo que respecta a fertilización con N para este tipo particular de sistemas ganaderos. Los resultados destacan la importancia clave de considerar el diferimiento de la respuesta al N de otoño a la primavera y la consideración de las interacciones del sistema con las variaciones climáticas. Esto en particular requiere de la profundización de estudios de modelación e investigación de campo para identificar oportunidades para generar innovaciones rentables de la base forrajera de tales sistemas.

Bibliografía

AACREA, 2015. Series de precios agropecuarios (Agricultural long-term prices series).

Abraha, M.G., Savage, M.J., 2006. Potential impacts of climate change on the grain yield of maize for the midlands of KwaZulu-Natal, South Africa. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 115, 150-160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2005.12.020>

Agnusdei, M., Assuero S.G., Lattanzi, F.A., Marino, A. (2010a) Critical N concentration can vary with growth conditions in forage grasses: implications for plant N status assessment and N deficiency diagnosis. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 88, 215–230.

Agnusdei, M., Assuero, S.G., Fernández Grecco, R.C., Cordero, J.J., Burghi, V.H., 2007. Influence of sward condition on leaf tissue turnover in tall fescue and tall wheatgrass swards under continuous grazing. *Grass and Forage Science* 62, 55-65. [10.1111/j.1365-2494.2007.00561.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.2007.00561.x)

Agnusdei, M., Colabelli, M.R., Fernández Grecco, R.C., 2001. Crecimiento estacional de forraje de pasturas y pastizales naturales para el sudeste bonaerense. (Natural grassland and pasture seasonal herbage growth in the South-east of the Buenos Aires Province, Argentina) *Boletín Técnico* N° 152. CERBAS, INTA EEA Balcarce, pp. 1-17.

Ahuja, L.R., Ma, L., Howell, T.A., 2002. *Whole System Integration and Modeling - Essential to Agricultural Science and Technology in the 21st Century*, Agricultural System Models in Field Research and Technology Transfer. Lewis Publishers, Boca Raton, London, New York, Washington D.C., pp. 1-7.

Arelovich, H.M., Bravo, R.D., Martínez, M.F., 2011. Development, characteristics, and trends for beef cattle production in Argentina. *Animal Frontiers* 1, 37-45. [10.2527/af.2011-0021](https://doi.org/10.2527/af.2011-0021)

Barbieri, P.A., Echeverría, H.E., Rozas, H.R.S., Picone, L.I., 2006. Nitrogen use efficiency from urea applied to a tall wheatgrass (*Elytrigia elongata*) prairie in a sodic soil. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 46, 535-543. <http://dx.doi.org/10.1071/EA04180>

Berger, H., Machado, C., Zabala, C., Fernández Rosso, C., Burges, J., 2013. Modelling the effect of maize silage and oat winter forage crop on cow-calf systems in Argentina, International Grassland Congress, Sydney, pp. 1192-1193.

Berger, H., Machado, C.F., Agnusdei, M., Cullen, B.R., 2014. Use of a biophysical simulation model (DairyMod) to represent tall fescue pasture growth in Argentina. *Grass and Forage Science* 69, 441-453. [10.1111/gfs.12064](https://doi.org/10.1111/gfs.12064)

Brock, J.L., Ball, P.R., Carran, R.A., 1990. Impacts of management on leaching of nitrate from pastures. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* 52, 207-210.

Chapman, D.F., Kenny, S.N., Beca, D., Johnson, I.R., 2008. Pasture and forage crop systems for non-irrigated dairy farms in southern Australia. 2. Inter-annual variation in forage supply, and business risk. *Agr. Syst.* 97, 126-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agry.2008.02.002>

Cid, M.S., Ferri, C.M., Brizuela, M.A., Sala, O., 2008. Structural heterogeneity and productivity of a tall fescue pasture grazed rotationally by cattle at four stocking densities. *Grassland Science* 54, 9-16. [10.1111/j.1744-697X.2008.00099.x](https://doi.org/10.1111/j.1744-697X.2008.00099.x)

Continanza, G., Sciotti, A., Faverín, C., Fernández, H.H., Burges, J., 2010. Impact of early weaning on physical productivity and economic results of a grazing management system., in: Machado, C., Wade, M., Carneiro da Silva, S., Agnusdei, M., De Faccio Carvalho, P., Morris, S.T., Beskow, W. (Eds.), *An overview of research on pastoral-based systems in southern part of South America. International Workshop. Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de Bs. As. , Tandil, Argentina*, pp. 291-293.

Cullen, B.R., Eckard, R.J., Callow, M.N., Johnson, I.R., Chapman, D.F., Rawnsley, R.P., Garcia, S.C., White, T., Snow, V.O., 2008. Simulating pasture growth rates in Australian and New Zealand grazing systems. *Australian Journal of Agricultural Research* 59, 761-768. <http://dx.doi.org/10.1071/AR07371>

Eckard, R.J., Franks, D.R., 1998. Strategic nitrogen fertiliser use on perennial ryegrass and white clover pasture in north-western Tasmania. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 38, 155-160. <http://dx.doi.org/10.1071/EA97022>

Errecart, P.M., Agnusdei, M.G., Lattanzi, F.A., Marino, M.A., 2012. Leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings as predictors of tall fescue nitrogen nutrition status. *Field Crops Research* 129, 46-58. <http://dx.doi.org/10.1016/j.fcr.2012.01.008>

Fernández Grecco, R.C., Mazzanti, A., Echeverría, H.E., 1995. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el crecimiento de forraje de un pastizal natural de la Pampa Deprimida bonaerense (Argentina). *Revista Argentina de Producción Animal* 15, 173-176.

Field, T.R.O., Ball, P.R., Theobald, P.W., 1985. Leaching of nitrate from sheep-grazed pastures. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* 46, 209-214.

Galli, I., Monje, A., Vittone, S., Sampedro, D., Busto, C., 2005. Destete precoz en cría vacuna. Manual para la toma de decisiones y ejecución de la técnica. Serie Manual de Cría Vacuna. Vol.2. INTA, Argentina.

Hidalgo, L.G., Cauhépe, M.A., 2009. Argentine rangeland quality influences reproduction of yearling pregnant heifers? *Grassland Science* 55, 74-78. [10.1111/j.1744-697X.2009.00141.x](http://dx.doi.org/10.1111/j.1744-697X.2009.00141.x)

Hutchinson, G.K., Richards, K., Risk, W.H., 2000. Aspects of accumulated heat patterns (growing degree-days) and pasture growth in Southland., *Proceedings of the New Zealand Grassland Association Invercargill, New Zealand*, , pp. 81-85.

Johnson, I.R., Chapman, D.F., Snow, V.O., Eckard, R.J., Parsons, A.J., Lambert, M.G., Cullen, B.R., 2008. DairyMod and EcoMod: biophysical pasture-simulation models for Australia and New Zealand. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 621-631. <http://dx.doi.org/10.1071/EA07133>

Labuschagne, J., Hardy, M.B., Agenbag, G.A., 2006. The effects of strategic nitrogen fertiliser application during the cool season on perennial ryegrass-white clover pastures in the Western Cape Province 2. Dry matter production. *South African Journal of Plant and Soil* 23, 262-268.
10.1080/02571862.2006.10634764

Lambert, M.G., Clark, D.A., 1986. Effects of late-autumn nitrogen application on hill country pastures and sheep production. *Proceedings of the New Zealand Grassland Association* 47, 211 - 215

Lattanzi, F.A., Mazzanti, A., Wade, M.H., 2007. Seasonal animal production of temperate and Mediterranean tall fescue cultivars under continuous variable stocking with close control of sward state. *Australian Journal of Agricultural Research* 58, 203-213. <http://dx.doi.org/10.1071/AR06164>

Le Gal, P.Y., Merot, A., Moulin, C.H., Navarrete, M., Wery, J., 2010. A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. *Environmental Modelling & Software* 25, 258-268. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.12.013>

Ledgard, S.F., Steele, K.W., Feyter, C., 1988. Influence of time of application on the fate of ¹⁵N-labelled urea applied to dairy pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 31, 87-91.
10.1080/00288233.1988.10421368

Machado, C., Burges, J.C., Berger, H., Faverín, C., Steffanazzi, I., 2010a. First steps in the use of a web whole-farm model to foster the feedback between beef cattle extension and research. , in: Machado, C.F., Wade, M., Carneiro Da Silva, S., Agnusdei, M., Fachio Carvalho, P., Morris, S.T., Beskow, W., Montossi, F. (Eds.), *An Overview of Research on Pastoral-Based Systems in South America*. . UNCPBA, Tandil, Argentina.

Machado, C.F., Morris, S.T., Hodgson, J., Arroqui, M.A., Mangudo, P.A., 2010b. A web-based model for simulating whole-farm beef cattle systems. *Computer and Electronics in Agriculture* 74, 129-136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2010.07.007>

- Mazzanti, A., Arosteguy, J.C., 1985. Comparación del rendimiento estacional de forraje de cultivares de *Festuca arundinacea* Schreb. (Comparison of the forage seasonal yield of cultivars of *festuca arundinacea* Schreb.). *Revista Argentina de Producción Animal* 5, 157-165.
- Mezzadra, C., Paciaroni, R., Vulich, S., Villarreal, E., Melucci, L., 1989. Estimation of milk consumption curve parameters for different genetic groups of bovine calves. *Animal Science* 49, 83-87. <http://dx.doi.org/10.1017/S000335610000427X>
- MINAGRI, 2015. Dirección De Análisis Económico Pecuario Dirección Nacional De Estudios y Análisis Económico Del Sector Pecuario - Existencias bovinas SENASA.
- Modernel, P., Rossing, W.A., Corbeels, M., Dogliotti, S., Picasso, V., Tiftonell, P., 2016. Land use change and ecosystem service provision in Pampas and Campos grasslands of southern South America. *Environmental Research Letters* 11, 113002.
- Morris, S.T., Brookes, I.M., Parker, W.J., McCutcheon, S.N., 1994. Biological efficiency: How relevant is this concept to beef cows in a mixed livestock, seasonal pasture supply context? *Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production* 54, 333-336.
- Mosciaro, M.A., Natinzon, P.C., Tosi, J.C., 2012. Análisis de la situación actual y de la sustentabilidad económica de sistemas característicos de los territorios de Cerbas. . Informe de avance conjunto del Proyecto Sistemas de Información Productiva, Socioeconómica y de Fortalecimiento de la Capacidad de Gestión Local de Los Territorios del CERBAS (BASUR 720071) y del Proyecto Competitividad y Sustentabilidad de los Sistemas de Producción. .
- Pacín, F., Oesterheld, M., 2014. In-farm diversity stabilizes return on capital in Argentine agro-ecosystems. *Agr. Syst.* 124, 51-59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2013.10.008>
- Rearte, D.H., Pordomingo, A.J., 2014. The relevance of methane emissions from beef production and the challenges of the Argentinean beef production platform. *Meat Science* 98, 355-360. <http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.021>

Romera, A.J., Burges, J., Cesar, Morris, S.T., Hodgson, J., Woodward, S.J.R., 2008. Modelling spring and autumn calving systems in beef herds of the Salado region of Argentina. *Livestock Science* 115, 62-72. 10.1016/j.livsci.2007.06.013

Romera, A.J., Morris, S.T., Hodgson, J., Stirling, W.D., Woodward, S.J.R., 2005a. Comparison of haymaking strategies for cow-calf systems in the Salado Region of Argentina using a simulation model. 1. Effect of herbage mass at cutting and cow stocking rate under a rigid system of management. *Grass and Forage Science* 60, 399-408. 10.1111/j.1365-2494.2005.00492.x

Romera, A.J., Morris, S.T., Hodgson, J., Stirling, W.D., Woodward, S.J.R., 2005b. Comparison of haymaking strategies for cow-calf systems in the Salado Region of Argentina using a simulation model. 2. Incorporation of flexibility in the decision rules. *Grass and Forage Science* 60, 409-416. 10.1111/j.1365-2494.2005.00493.x

Scheneiter, O., Fontana, S., 2002. Producción y calidad de forraje de pasturas puras y en mezcla de festuca alta [*festuca arundinacea schreb*] y trébol blanco [*trifolium repens l.*]. *Revista de tecnología agropecuaria*. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Centro Regional Buenos Aires Norte. Estación Experimental Agropecuaria Pergamino. INTA. EEA Pergamino 7, 42-46.

SENASA, 2014. Datos de las Campañas de Vacunación Antiaftosa.

Soriano, A., 1992. Río de la Plata Grasslands., in: Coupland, R.T. (Ed.), *Ecosystems of the World*, pp. 367-407.

Staff., S.S., 2010. *Keys to Soil Taxonomy* 11th ed. ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Stockle, C.O., Campbell, G.S., Nelson, R., 1999. *ClimGen Manual*. Biological Systems. Engineering Department, Washington State University, Pullman, WA.

Sun, X., Luo, N., Longhurst, B., Luo, J., 2008. Fertiliser Nitrogen and Factors Affecting Pasture Responses. *The Open Agriculture Journal* 2, 35-42.

<http://dx.doi.org/10.2174/1874331500802010035>

Zhang, B., Tillman, R., 2007. A decision tree approach to modelling nitrogen fertiliser use efficiency in New Zealand pastures. *Plant and Soil* 301, 267-278. 10.1007/s11104-007-9445-8

Capítulo 4: Estimación del valor económico del alimento adicional en sistemas de cría en condiciones de variabilidad interanual.³

Introducción

En los sistemas ganaderos pastoriles siempre hay fluctuación en la oferta de alimentos con períodos de sobreoferta y otros donde se encuentran déficits en el forraje disponible originados en la variación estacional e interanual del crecimiento de las pasturas (Moore et al., 2009). Las prácticas de manejo que pueden reducir la frecuencia o intensidad de los déficits en la oferta forrajera pueden mejorar en gran medida la rentabilidad de los sistemas ganaderos (Bell et al., 2016). Los sistemas ganaderos de cría en Argentina son el corazón de la importante industria cárnica nacional, y estos se caracterizan por tener estrategias de manejo basadas en bajo uso de insumos y baja demanda de trabajo, donde la alimentación depende casi enteramente en el pastoreo (Arelovich et al., 2011; Rearte y Pordomingo, 2014). Hay antecedentes de evaluaciones de distintas tecnologías para el manejo de estos sistemas a los fines de explorar su potencial productivo, por ejemplo confección y uso de heno (Romera et al., 2005) y la respuesta a la fertilización nitrogenada estratégica (Capítulo 3). Diferentes fuentes externas de alimentos pueden ser una opción en algunas circunstancias, pero estas deben cubrir las necesidades de nutrientes con una relación de costos apropiada de modo de mantener la rentabilidad del emprendimiento. Por lo tanto, es importante destacar que cualquier evaluación de respuesta biofísica productiva de las pasturas y la producción animal requiere estar acoplada a la evaluación económica de las mismas (Moore et al., 2009). En todos los casos, la estimación del posible retorno económico de la implementación de cambios en el planteo forrajero debe tener en cuenta como esto puede impactar sobre el sistema de producción en su conjunto, sobre todo a nivel sistema (Bell et al., 2008).

Un enfoque alternativo para el análisis de la presupuestación forrajera en las planificaciones de los sistemas ganaderos es la estimación del beneficio económico que se puede lograr agregando alimento adicional (esto es alimento adicionado a la cantidad normalmente consumida durante un ciclo de producción), lo que permite a los productores poder analizar sí ellos pueden o no producir alimento a un costo suficientemente bajo como para lograr un margen económico (Chapman et al.,

³ Berger, H.; Bilotto, F.; Bell, L.W. & Machado, C.F. Feedbase intervention in a cow-calf system in the Flooding Pampas of Argentina: 2. Estimation of the marginal value of additional feed. *Agricultural Systems*, Volume 158, 2017, Pages 68-77, ISSN 0308-521X, <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.09.004>.

2011). Un indicador económico apropiado del alimento adicionado a un sistema es el valor marginal del alimento (VMA), el cual cuantifica el impacto el valor de un kg MS o MJ de energía metabolizable extra en la rentabilidad del sistema de producción, el cual va a depender en función del sistema ganadero bajo análisis (Bell et al., 2008). En el caso de los sistemas de cría, la eficiencia con la cual el forraje adicional puede ser pastoreado y así aumentar los kg de ternero destetado así como la preñez resultan determinantes en el resultado económico de estos (Morris et al., 1994). Por lo tanto el VMA es función de una diversidad de aspectos del sistema (clima, tierra disponible, recursos forrajeros disponibles, tipo de sistema ganadero, precios de insumos y valores de la producción, etc.), lo cual significa que para su estimación es esencial representar adecuadamente el sistema de producción en su conjunto. La existencia de trabajos previos de modelación que incluyeron la estimación del crecimiento de las pasturas (Berger et al., 2014) y la disponibilidad de un modelo bioeconómico de sistemas ganaderos con la capacidad de capturar las interacciones del sistema y los efectos posteriores (Machado et al., 2010b), constituyen una oportunidad para estimar el VMA para los sistemas ganaderos de Argentina, para utilizarse como un indicador para la toma de decisiones respecto a la producción o adquisición de alimento para estos planteos productivos. Adicionalmente, la mayoría de las veces las decisiones de manejo tales como suministrar alimento extra son tomadas en función de la situación actual del sistema sin incluir en el análisis la posible evolución de este en el tiempo, aunque las probabilidades de que ocurran distintos eventos o situaciones en general están implícitas en los procesos de decisión (Behrendt et al., 2013). La combinación de la estimación de VMA y la evaluación de riesgo considerando la variabilidad del clima y de los valores de los insumos y la producción pueden proveer importante información que sirva de ayuda a los productores para definir mejores estrategias de manejo. El desarrollo de tales análisis en sistemas de cría vacuna de la Argentina constituyen el principal objetivo de este trabajo, junto con la demostración de un ejemplo de como el análisis sistémico puede ser utilizado para identificar el valor económico de distintas intervenciones en la base forrajera bajo diferentes condiciones climáticas y de manejo del planteo de cría.

Materiales y métodos

El estudio se basó en sistemas de cría propios de la región de Laprida (37°33'00"S 60°49'00"W), Argentina, siendo las condiciones similares a las presentadas en el capítulo 3. El área es una vasta planicie baja que constituye parte de la cuenca alta de los ríos Salado y Quequen, abarcando

aproximadamente 2 millones de ha. El paisaje está constituido por una matriz de bajos, con suelos alcalinos y pobremente drenados, interrumpidos por pequeñas lomadas, con suelos mejor drenados. Esta región está caracterizada por inviernos fríos y húmedos y veranos secos y cálidos. Las precipitaciones y la evapotranspiración potencial promedio y su desvío estándar son 856 ± 225 y 1147 ± 45 mm/año respectivamente. La mínima y máxima temperatura diaria ocurren en julio ($7,4$ °C) y en enero ($22,2$ °C) respectivamente. Los sistemas ganaderos de recría y engorde se encuentran en los suelos más altos. La carga animal de los sistemas de cría promedia 0,5 cab/ha, pero en los sistemas más intensificados alcanza a 1,1 cab/ha, alcanzando un porcentaje de destete de 70 a 85% (Mosciaro et al., 2012). La estrategia de trabajo utilizada fue generar los datos de producción de pasturas con un modelo biofísico para alimentar un modelo dinámico de simulación de sistemas agro-ganaderos para luego utilizar los resultados de este para estimar la distribución de probabilidades de ocurrencia del valor marginal del alimento y variables explicativas del sistema ganadero. La descripción de los distintos pasos así como la integración “en serie” de los modelos se describe a continuación:

Datos de crecimiento de las pasturas y acumulación de masa forrajera.

Se utilizó la información de largo plazo (1993-2013), de la acumulación de masa forrajera promedio mensual de pasturas de festuca [AMF, expresada como el promedio mensual de la acumulación neta de masa forrajera diaria (crecimiento menos senescencia) luego de ajustar a 0 los días con acumulación negativa de forraje], y la frecuencia de presentación de estaciones secas que fueron obtenidas de los resultados del Capítulo 3. Para este cometido se implementó en el modelo de simulación Dairymod (Johnson et al., 2008) un ensayo de corte donde las pasturas eran defoliadas cada vez que alcanzaban el estado de dos hojas, considerando en los cálculos el retorno de los nutrientes del forraje cortado como heces y orina (simulando un pastoreo), asumiéndose un remanente de 700 kg MS/ha. Los parámetros para la modelación del suelo fueron establecidos para representar un suelo del tipo Paleudol Petrocalcico (Staff., 2010), con un perfil limo-arcillosos (4.7% MO, pH 6.2). Cada año del período 1993-2013 fue simulado separadamente utilizando datos locales de temperatura máxima y mínima diarios (°C), precipitaciones (mm), humedad relativa media, radiación solar total y velocidad del viento. La AMF anual y su desvío estándar (DS) fueron 7364 ± 2061 kgMS/ha.año respectivamente (Figura 1). Chapman et al. (2008) sugirieron un método para clasificar datos multiaños de pasturas para aplicarlos a análisis de sistemas de producción

(“whole-farm”), estrategia que es aplicada en este trabajo. El crecimiento de las pasturas se analizó en cada año y estación, donde aquellos cuya AMF fue igual o menor al 50% (25° percentil, Figura 1), del promedio de largo plazo fue clasificado como “Seco”. Posteriormente, se construyeron años sintéticos, a partir de los datos de largo plazo, con estaciones promedio o con solo una de las estaciones consideradas como “Seca” y el resto clasificadas como promedio. Consecuentemente, se describen tasas de crecimiento típicas para años promedio (Promedio), o con todas las AMF estacionales dentro del promedio excepto las correspondientes a otoño (Ot-Seco), invierno (Inv-Seco), primavera (Prim-Seca), o verano (Ver-Seco).

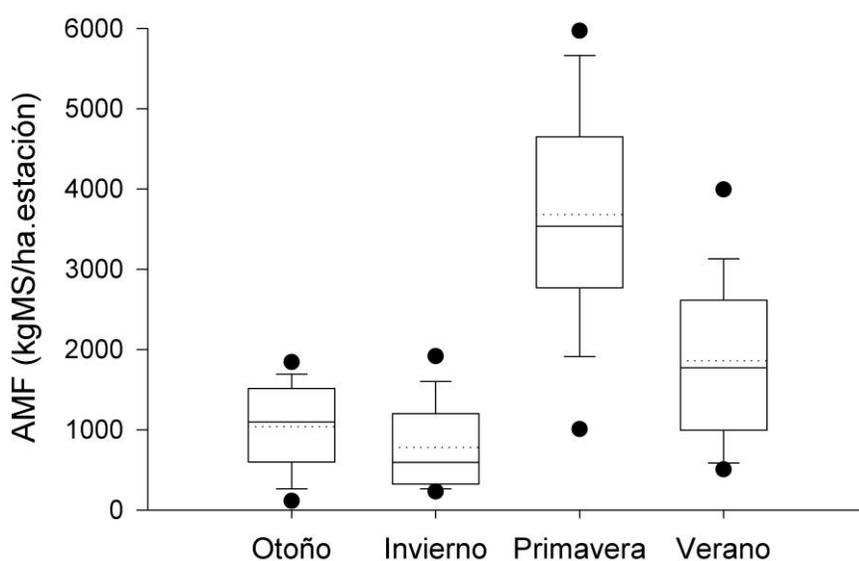


Figura 1: Resultados de largo plazo (1993-2013), de acumulación de masa forrajera (AMF), estacional de pasturas de festuca de la región de Laprida, Argentina. Las cajas muestran los percentiles 10°, 25°, 75° y 90°. Las líneas punteadas indican la media y los puntos son los 5° y 95° percentiles. Los primeros cuartiles (parte de debajo de las cajas) corresponden a las estaciones secas denominadas Ot-Se, Inv-Se, Pri-Se y Ver-Se para Otoño, Invierno, Primavera y Verano respectivamente.

Simulación del sistema ganadero.

Las AMFs estimadas se utilizaron para construir los planteos de los sistemas productivos, tomando como base un trabajo previo de modelación con metodología participativa realizado con asesores profesionales (Machado et al., 2010a). Estos planteos (o escenarios) se representaron en SIMUGAN,

un modelo de sistemas agropecuarios que representa las condiciones de los sistemas ganaderos de Argentina (Machado et al., 2010b). Este modelo web representa de manera dinámica el impacto de variables tales como la disponibilidad de pastura, asignación de forraje para el pastoreo, manejo de las pasturas y de los rodeos, tiempo transcurrido desde el parto en vacas multíparas, condición corporal, cambios de peso vivo y el manejo reproductivo sobre la eficiencia reproductiva del rodeo, el cual es un factor clave para estimar la performance de los sistemas de cría vacuna. Los escenarios construidos representan los patrones más frecuentes del crecimiento del forraje y los desvíos típicos identificados en los resultados de AMF simuladas (patrones de años Normal, Oton-Seco, Inv-Seco, Prim-Seca, Ver-Seco). El modelo de simulación Simugan utiliza las AMF diarias promedio de cada mes como dato de entrada para calcular de manera dinámica las tasas de crecimiento utilizando esta información y la masa de láminas disponibles en cada potrero. Aunque la disponibilidad de alimento se rige por la asignación de forraje (Kg MS/100 kg PV), internamente el consumo de forrajes se calcula a partir de las características de la pastura, en función de la asignación de láminas (Kg MS/100 kg PV) y la masa de láminas (kg MS/ha) (Figura 2, A), tamaño del animal, estado fisiológico (Figura 2, B) número de animales dentro de cada categoría según surja del sub-modelo que representa la dinámica del rodeo.

El escenario base representa un campo de 600 has (dividido en 10 cuadros de 60 has), con un rodeo de 432 vacas (entre 3 y 10 años) y 108 vaquillonas preñadas (2 años), dando como resultado una carga de 0,9 cab/ha. El servicio se realizó entre el 1° de noviembre y el 31 de enero de cada año y, naciendo los terneros entre el 3 de Agosto y el 5 de noviembre. El manejo de las pasturas y el rodeo fue el mismo utilizado en el Capítulo 3. Cada 1° de marzo los terneros se destetan y venden a excepción de un número de terneras equivalente al 10% del rodeo de vacas, las cuales entran en servicio a los 15 meses de edad. El tacto coincidió con el mes en que se realizaba el destete, vendiéndose junto con los terneros las vacas vacías y las de descarte (viejas). Se utilizó pastoreo rotativo diario y la asignación de pastura se predefinía para cada mes (entre 1,5 y 10 kg/100 kg PV/día). La disponibilidad de pastura del establecimiento (en adelante masa forrajera promedio, MFP en kg MS/ha en un momento dado en el conjunto de potreros) se monitorea semanalmente, utilizándose para el control dos reglas de manejo. Primero, la masa forrajera de pastura se comparaba con los límites mínimos de MFP predefinidos para cada mes (1800 kg MS/ha para invierno/primavera temprana y verano o 2000 kg MS/ha para otoño y primavera avanzada) y

consecuentemente, dependiendo sí la desviación respecto a estos límites fuese negativa o positiva, una regla de asignación de pastura se activaba dentro del modelo para ajustar hacia arriba o abajo respectivamente las asignaciones predefinidas. El monitoreo semanal de la MFP promedio del establecimiento (kg MS/ha), se agrupaban por mes y se utilizaban como una variable adicional para identificar déficits en la oferta forrajera. Por lo tanto, se calculó la frecuencia de meses donde el promedio de la MFP del campo se encontrara por debajo del mínimo preestablecido (1800 kg MS/ha para invierno/ primavera temprana y verano o 2000 kg MS/ha para otoño y primavera tardía). Segundo, los excedentes de pastura, cuando la MFP estaba por encima del objetivo mensual, se activa una regla de conservación de forraje (realización de rollos de heno) durante la primavera tardía y verano. Entre los potreros sin pastorear, aquel de mayor masa forrajera se destina a la realización de rollos, dejando un remanente de 1000 kgMS/ha. La condición corporal de las vacas (CC en la escala 1-9, siendo 1: muy flaca, 9: muy gorda), se monitorea cada mes y el CC promedio del rodeo al inicio del servicio se utiliza como un indicador de la performance del sistema de producción dado que es un factor clave para el éxito reproductivo de los vientres (Richards et al., 1986). Si la MFP promedio mensual disminuye por debajo de 1400 kgMS/ha o la condición corporal está por debajo de 3 al inicio del servicio, se implementa un destete precoz cuando los terneros alcanzan 70 kg PV. Los terneros de destete precoz se alimentan a corral con un concentrado hasta los 150 kg PV (el mínimo peso para la venta), de acuerdo a lo sugerido por Continanza et al. (2010). Los escenarios simulados se limitan a un rango dado por la máxima carga animal sostenible, definido por las mínimas masa forrajera de pasturas y las CC previamente establecidas. No se realiza suplementación con heno de modo de posibilitar la cuantificación específica del impacto de la adición de alimento extra al pasto estacional disponible para pastoreo.

Los escenarios se simularon incluyendo cargas de 0,9; 1,0; 1,1; 1,2 y 1,3 cab/ha, en base al límite impuesto por mínimo mensual prefijados para la masa forrajera de pastura y la CC. Posteriormente cada escenario fue simulado nuevamente incorporando al sistema el alimento extra, el cual representaba el 10% de la AMF anual de la pastura del escenario base. Este 10% se distribuyó en 5 alternativas diferentes, homogéneamente a lo largo del año (0,83 % para cada mes del año), o agregando la totalidad del alimento en una de las cuatro estaciones, solamente en otoño (Abril, Mayo y Junio), invierno (Julio, Agosto y Septiembre), primavera (Octubre, Noviembre y Diciembre), o verano (Enero, Febrero y Marzo), lo cual implicó que para cada mes de estas

estaciones se asignó 3,33% de la AMF anual. En cada caso, el alimento se prorratea por día y se adiciona al dato diario de crecimiento de la pastura (Figura 2 A), asumiendo que tiene los mismos atributos nutritivos de la pastura en crecimiento (Chapman et al., 2011). Por lo tanto, se evaluaron la combinación de cinco tipos de año (Normal, Oton-Seco, Inv-Seco, Prim-Seca, Ver-Seco), cinco cargas (0,9; 1,0; 1,1; 1,2 y 1,3 cab/ha), y cinco opciones de adición de alimento extra (cada una de las cuatro estaciones o distribuido homogéneamente a lo largo de todo el año). Finalmente, los resultados de todo el conjunto de escenarios (con y sin alimento adicional en los distintos momentos del ciclo productivo) se utilizaron para calcular el valor marginal del alimento (Figura 2, C) en un modelo de simulación económico *ad-hoc*.

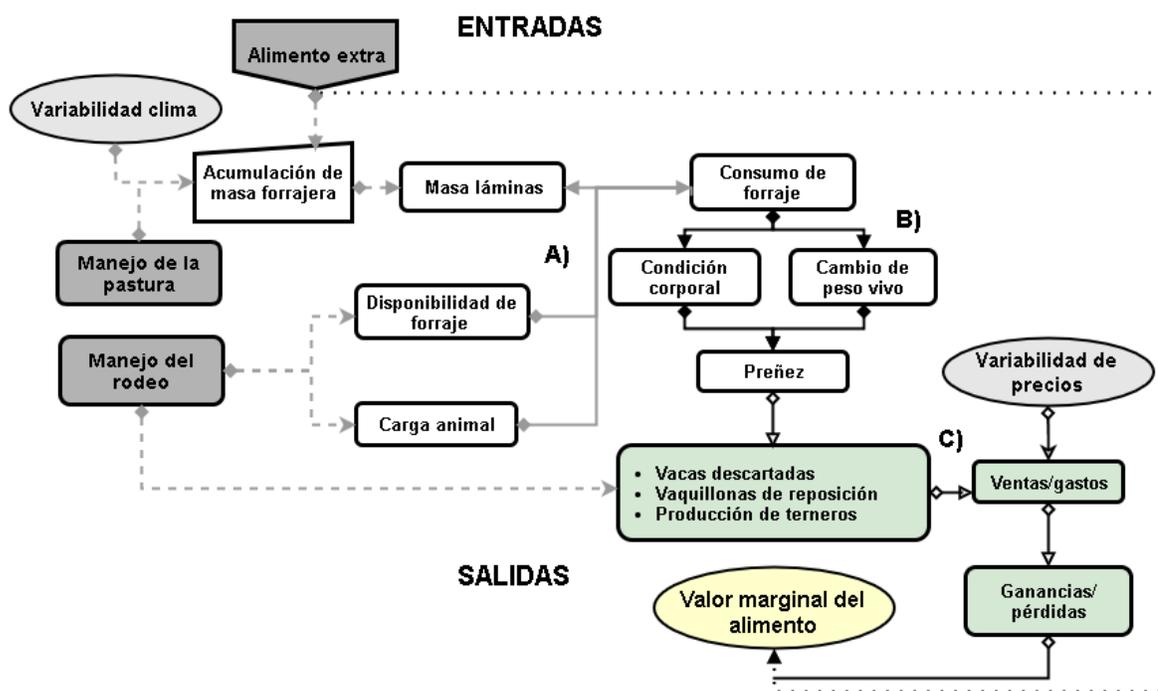


Figura 2: Diagrama de procesos que describe las interacciones de la acumulación de masa forrajera (AMF), el alimento adicional extra (ADE), la performance animal (cambio de peso vivo, condición corporal, y performance reproductiva expresada como tasa de preñez). Las flechas grises sólidas indican las interacciones entre las variables de la pastura y las de los animales (A), las líneas sólidas negras, las interacciones entre la oferta y la demanda de alimento (B), las líneas punteadas negras la cantidad de alimento extra agregado, las líneas punteadas grises muestran los datos de entrada y las flechas negras huecas los resultados productivos y económicos (C).

Estimación del valor marginal del alimento.

El valor marginal del alimento (U\$S/kgMS.ha) se estimó a partir de la diferencia entre el MB de los escenarios base y el MB de aquellos escenarios donde el alimento extra se adicionó, dividiéndolo por la cantidad de alimento extra [Ecuación 1, (McEvoy et al. 2011)].

$$\text{Valor marginal del alimento} = \frac{\Delta \text{margen bruto por hectárea}}{\Delta \text{ en alimento extra}} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Δ en alimento extra

Los resultados biofísicos (kg PV de ternero destetado, kg PV de vacas a venta, rollos de pastura confeccionados, compra de vaquillonas de reposición y cantidad de terneros destetados precozmente) de los escenarios simulados en SIMUGAN con distinta carga animal y tipos de año se organizaron en matrices. Cada matriz se compone por 5 columnas (escenarios de época de adición de alimento extra: base/sin, anual, verano, otoño, invierno y primavera), y 5 filas representando cada tipo de año (Normal, Oton-Seco, Inv-Seco, Prim-Seca, Ver-Seco).

Las series de precios (ajustadas por inflación) para todos los insumos y productos se tomaron de datos publicados por la Asociación Argentina de Consorcios Regionales de Experimentación Agrícola (AACREA, 2015). La base de datos históricos de precios del periodo 1992-2015 en pesos Argentinos fue convertida a U\$S (a la tasa de cambio actual del Banco de la Nación Argentina). Para el análisis se utilizó un período de 15 años de modo de evitar la presencia de cambios estructurales (por ejemplo costos de producción de fertilizantes, cambios del transporte o cambios estructurales en la demanda por fertilizantes) que pudiesen reducir la capacidad de los precios históricos para estimar la distribución de precios probable para el futuro. Las distribuciones de probabilidad de precios de la producción y de los insumos más importantes se estimaron utilizando el software BestFit (Palisade Corporation, Newfield, New York) y la selección de la mejor distribución para cada serie de precios se basó en el ajuste de probabilidades (Tabla 1). Estas funciones se incorporaron y utilizaron en un modelo @Risk (Palisade Corporation, Newfield, New York) asociado a una planilla de cálculo (MS Excel) para estimar el VMA en distintos escenarios con diferentes estrategias de alimentación.

Para la estimación del margen bruto se incluyeron las venta de terneros, vacas vacías y descarte menos (kgPV) multiplicados por los precios de mercado (Tabla 1). Los costos de producción (mano

de obra, sanidad, compra de vaquillonas de reposición adicionales (cuando fue necesario), y toros, y mantenimiento de las pasturas que incluyó el costo incurrido en la confección de heno de los excedentes de forraje (Tabla 1), así como los gastos de comercialización. La henificación es una práctica comúnmente utilizada en estos sistemas inicialmente como reserva, pero también como un medio para controlar la masa forrajera para preservar su calidad y productividad de las pasturas. En las simulaciones se confeccionaron rollos cuando la disponibilidad de pastura promedio del establecimiento excedió 2000 kgMS/ha dentro del período comprendido entre Octubre y Febrero. El heno conservado en cada escenario y el costo de su confección se incluyó en el cálculo del MB pero sin utilizarlo en el sistema. Esto implicó que el VMA en algunas circunstancias fuese negativo dados los altos costos de henificación.

Cada iteración del modelo incluyó 3 pasos:

- Cálculo del MB para cada combinación de tipo de año y alternativa de adición de alimento adicional para el cálculo de los resultados físicos (desde las matrices de variables productivas) y las funciones de variabilidad de precios.
- El VMA se determinó a través de la comparación de los resultados de los MB de las alternativas de agregado de alimento adicional con el escenario base correspondiente a cada tipo de año.
- Estimación de los VMAs para cada opción de agregado de alimento en función de la probabilidad de ocurrencia de cada tipo de año (utilizando una función de probabilidad triangular construida a partir de la probabilidad de ocurrencia de cada tipo de año).

El modelo @Risk se aplicó utilizando la técnica de simulación Monte Carlo estableciéndose 10000 iteraciones por cada simulación (escenarios de carga animal de 0,9; 1,0; 1,1; 1,2 y 1,3 cab/ha). La salida fue función de la distribución acumulada de probabilidad (FPA) de VMA. Esta función da la probabilidad (% en el eje “y”) de que el VMA (U\$S /kgMS en el eje “x”) podía ser menor o igual que el valor indicado en x.

Tabla 1: Parámetros y distribuciones utilizados en el modelo de riesgo.

Unidades Tipo distribución seleccionada	Insumos pastura				Productos			Alimentación destete precoz			
	Glifosato (48 %)	Herbicida (2,4-D)	Fosfato diamónico	Semilla	Costo confección n rollos	Terneros destetados	Vacas descartadas	Vaquillonas	Grano soja	Grano Maíz	Suplemento N no proteico
	U\$\$.l ⁻¹	U\$\$.l ⁻¹	U\$\$.tn ⁻¹	U\$\$.kg ⁻¹	U\$\$.rollo s ⁻¹	U\$\$.kg PV ⁻¹	U\$\$.kg PV ⁻¹	U\$\$.kg PV ⁻¹	U\$\$.ton ⁻¹	U\$\$.ton ⁻¹	U\$\$.ton ⁻¹
Parámetros	Beta	Weibull	ExtValue	Beta General	Triangular min=12,2 6 m. probable= 13,14 max=24,6 8	ExtValue	InvGauss	Logistica	Logistica	Beta General	Weibull
	$\alpha=0,53$	$\alpha=1,46$	$\alpha=548,73$	$\alpha=0,70$		$\alpha=1,84$	$\mu=0,3$	$\alpha=1,51$	$\alpha=259,14$	$\alpha=1,36$	$\alpha=3,79$
	$\alpha=0,81$	$\beta=1,01$	$\beta=42,38$	$\alpha=1,19$		$\beta=0,29$	$\lambda=1,3$	$\beta=0,11$	$\beta=19,49$	$\alpha=1,64$	$\beta=156,5$
Min											
Max	1.75	2.73	$-\infty$	1.19	12.26	$-\infty$	0.4592	$-\infty$	$-\infty$	94.44	318.66
Media	4.07	$+\infty$	$+\infty$	3.7	24.68	$+\infty$	$+\infty$	$+\infty$	$+\infty$	169.16	$+\infty$
Des. Est.	2.67	3.65	573.19	2.12	16.69	2.00	0.7634	1.51	259.14	128.27	460.08
Unidades	0.74	0.64	54.36	0.71	2.83	0.366	0.1473	0.1936	35.35	18.67	41.65

Resultados

Impacto de la adición de alimento extra sobre la producción y variabilidad de los sistemas de cría vacuna.

La frecuencia de presentación de déficits en la oferta forrajera se incrementó a medida que aumento la carga animal (Figura 3). El agregado de alimento extra tuvo un impacto positivo en todas las épocas, pero la reducción del riesgo de presentación de un déficit de alimento fue más alta en invierno y menor en verano. En cada estación, la capacidad de la adición de alimento extra para reducir el riesgo de déficits en la oferta forrajera se afectó por el momento del año en que este fue provisto. Por ejemplo, la frecuencia de déficits en la oferta forrajera durante el invierno en los escenarios de 1,3 cab/ha (Figura 3, invierno), se redujo de 0,71 a 0,15 por la adición del 10% de alimento extra durante el invierno, pero la frecuencia de ocurrencia no se modificó (esta permaneció en 0,71, similar a la situación base), cuando se agregó alimento extra en verano. En algunos escenarios, la activación de distintas reglas de manejo hizo que se modifique la frecuencia de presentación de déficits en la oferta forrajera. Por ejemplo, la frecuencia de déficits de alimento en otoño (Figura 3, otoño) en los escenarios base fueron mayores en cargas de 1,1 cab/ha (0,53) que en cargas de 1,2 cab/ha (0,46) debido a la activación de la regla de destete precoz en los escenarios de mayor carga animal. En el caso de la carga 1,3 cab/ha la regla de destete precoz también se activó en el escenario base (Figura 3, otoño), pero la frecuencia de déficits en la disponibilidad de alimento se incrementó igualmente hasta 0,71 dada el exceso de carga animal.

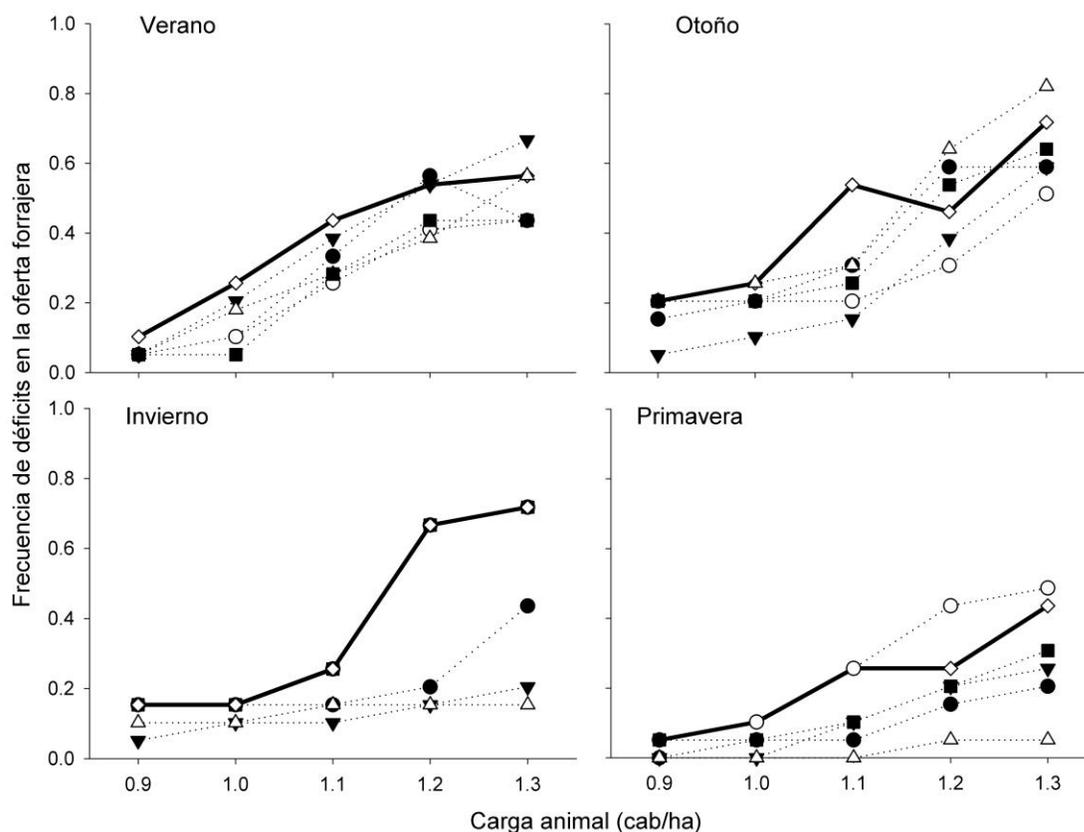


Figura 3: Frecuencia de déficits estacionales de alimento (% de meses en los que el promedio de la masa forrajera de pastura del establecimiento fuese < 1800 kg MS/ha en invierno/inicio primavera y verano o <2000 kg MS/ha en otoño y primavera tardía) en escenarios de sistemas de cría vacuna simulados a cargas animales crecientes (0,9 a 1,3 cab/ha) y la adición de alimento extra. El alimento extra se agregó incrementando 10% la AMF para cada mes del año (anual, círculo llenos), o agregando la totalidad del alimento extra en una de las estaciones del año por vez (círculos abiertos, triángulos llenos, triángulos huecos y cuadrados rellenos corresponden a verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente). Los escenarios base (sin alimento extra), están representados por las líneas sólidas con diamantes huecos. La regla de destete precoz se activo en los escenarios base (sin adición de alimento extra), a cargas de 1,2 y 1,3 cab/ha.

La condición corporal de las vacas al inicio del servicio (1° de Noviembre), se redujo a medida que se incrementó la carga animal (Figura 4 A). La adición de alimento extra en otoño tuvo el mayor impacto sobre la CC en todo el rango de cargas animales de los escenarios evaluados, la cual se incrementó respecto a los escenarios base en 0,8; 1,0; 1,2; 1,4; y 1,1 puntos de CC en las cargas de 0,9; 1,0; 1,1; 1,2 y 1,3 cab/ha respectivamente (Figura 4 A). Ante bajas cargas, las tasas de preñez

fueron altas (>85%) y la provisión de alimento extra no tuvo ningún efecto (Figura 4 B), sin embargo las tasas de preñez se redujeron frecuentemente a mayores cargas (Figura 4 B), reflejando el patrón de la CC de los vientres al inicio del período de servicio. La provisión de alimento extra en otoño permitió reducir la caída en la preñez, mientras que la provisión de alimento en primavera y verano tuvo un efecto mínimo (Figura 4 B).

La producción de terneros (y su variación) fue mayor a las mayores cargas animales (Figura 4, C). La adición de alimento extra en otoño e invierno fueron las alternativas más efectivas para incrementar las ventas de terneros, incrementando esta variable entre un 9 y 12% en los escenarios de 1,2 cab/ha y 11 y 14% en los escenarios de 1,3 cab/ha respectivamente. Probablemente el efecto más importante de la adición de alimento extra en otoño e invierno fue la reducción de la variación interanual en las ventas de terneros en los planteos de mayor carga (por ejemplo en Figura 4 C la carga de 1,3 cab/ha el coeficiente de variación se redujo de 7,4 en el escenario base a 2,6 y 1,4 % con la adición de alimento en otoño e invierno, respectivamente).

El análisis de largo plazo del VMA mostro un impacto positivo consistente del agregado de alimento adicional del forraje en aquellos planteos que tuviesen una carga animal superior a 1,0 cab/ha, mientras que el VMA resultó negativo a las cargas más bajas. El VMA fue negativo en todos los escenarios de 0,9 cab/ha, excepto cuando se adicionó alimento en verano (Figura 3). Los VMA registrados fueron mayores en otoño, seguidos por los de invierno y cuando el alimento fue distribuido homogéneamente a lo largo del año (Figura 3).

La confección de heno se redujo con la carga animal (Figura 4 D), reflejando la menor frecuencia con que la masa forrajera de la pastura promedio del establecimiento estuvo por encima de 2000 kgMS/ha, siendo prácticamente nula la producción de heno por encima de 1,1 cab/ha. La producción de heno aumentó cuando el alimento extra fue provisto en invierno y primavera (permitiendo que aumente la masa forrajera de la pastura), pero la provisión de forraje adicional en verano y otoño no tuvo impacto en la producción de heno.

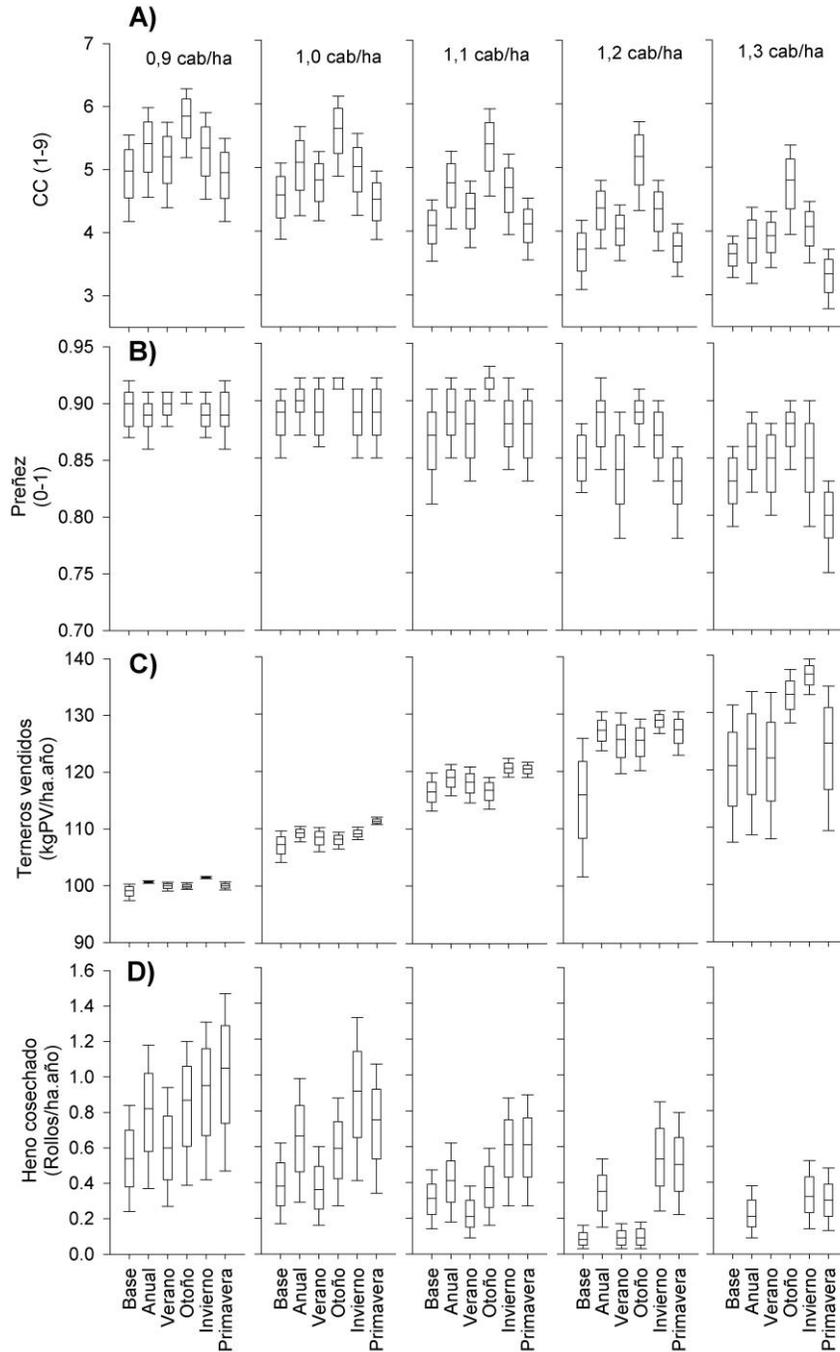


Figura 4: Indicadores productivos de sistemas productivos ganaderos de la región de Laprida simulados en el período 1993 a 2013 a las cargas animales de 0,9; 1,0; 1,1; 1,2 y 1,3 cab/ha, donde se agregó o no alimento extra anualmente, en verano, otoño, invierno o primavera: (A) Condición corporal (CC) de las vacas al inicio del servicio; (B) tasa de preñez (vacas preñadas/vacas en servicio); (C) Terneros de destete vendidos (kg PV/ha/año); (D) Heno confeccionado (rollos heno/ha/año). Los box plots muestran la mediana y los percentiles 10, 25, 75 y 90°. Los escenarios con carga animal 1,3 cab/ha sin y con adición de alimento en verano y otoño no tuvieron heno cosechado.

Estimación del valor marginal del alimento extra

En años promedio, el VMA siempre estuvo por debajo de 0.045 U\$\$/kgMS (Figura 5) y la presencia de años con estaciones secas dio como resultado mayores VMA. El efecto de la época en que es adicionado el alimento extra resultó más evidente en años con otoño, primavera y verano secos. Los años con otoños secos presentaron los mayores retornos cuando el alimento se adicionó durante el otoño e invierno (Figura 5). En términos generales, el VMA fue mayor a medida que la carga animal se incrementó, con la excepción de los años con otoño seco donde la adición de un 10% extra de forraje mostró el mayor retorno a 1,2 cab/ha.

Cuando se analiza las funciones de distribución de probabilidad acumulada de VMA las diferencias comenzaron a ser evidentes por encima de 0,9 cab/ha (Figura 6), donde los escenarios del rango de carga animal de 1,0 a 1,3 cab/ha, el VMA otoñal resultó usualmente el mayor. El suministro de alimento extra en invierno generó los mayores retornos en el 60% de los casos ante cargas animales de 1,3 cab/ha (hasta 0,094 U\$\$/kgMS de alimento extra adicionado en otoño e invierno tuvieron las mismas probabilidades de ocurrencia). La variabilidad observada en el VMA fue mayoritariamente explicada por la variación biofísica, dado que el efecto aislado de la variación de precios de los insumos y productos mostraron un efecto mínimo a través de los escenarios con distinta carga animal (Figura 7).

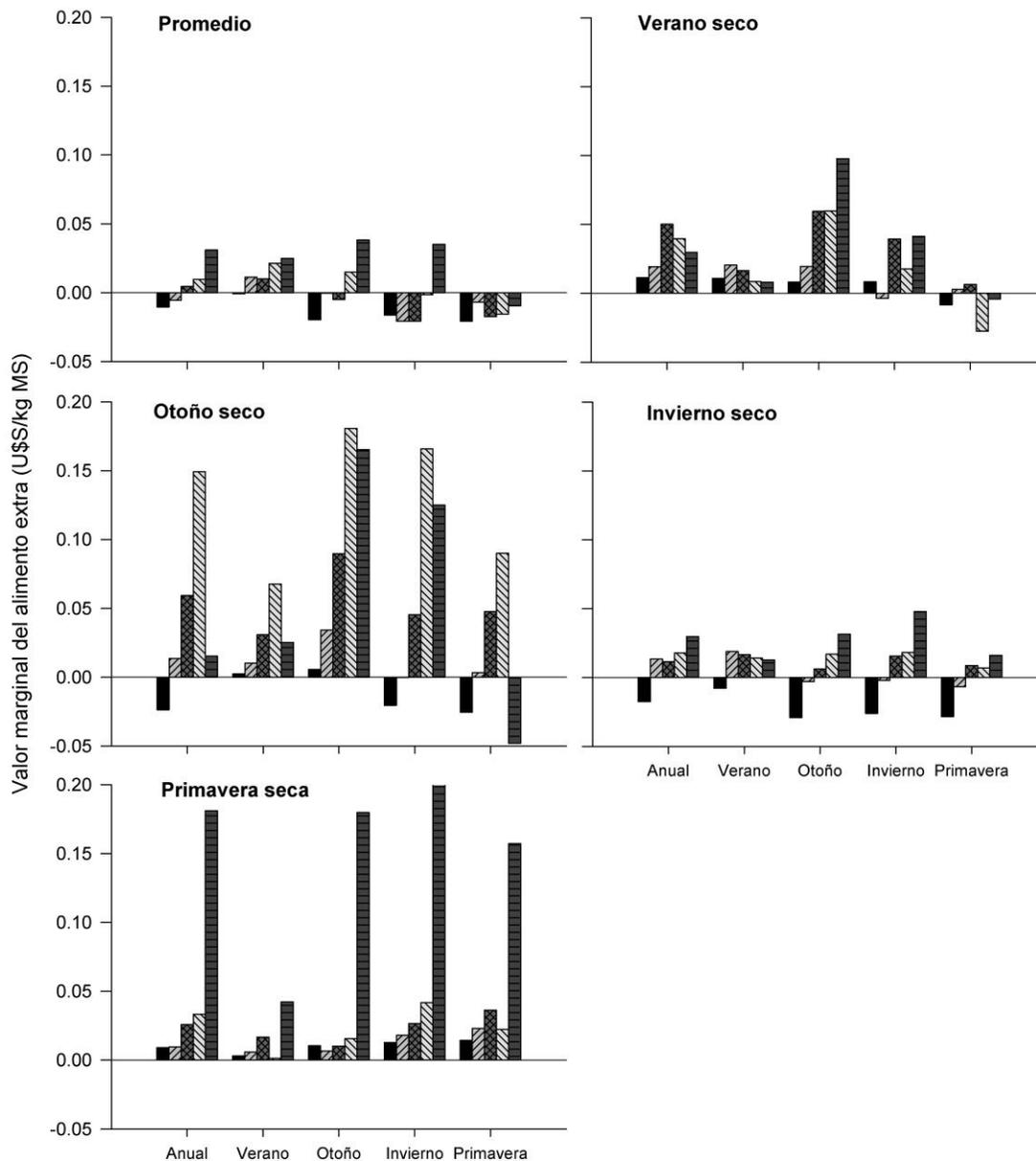


Figura 5: Valor marginal del alimento adicionado a sistemas de cría de la Depresión de Laprida en años promedio y años con la presentación de verano, otoño, invierno o primavera secos con carga animal creciente de 0,9 (barras negras), 1,0 (barras gris claro con líneas cruzadas), 1,1 (barras grises cuadriculadas), 1,2 (barras blancas con líneas cruzadas) y 1,3 cab/ha (barras gris oscuro con líneas horizontales). El alimento fue agregado incrementando el 10% de la AMF de cada mes a lo largo del año (Anual), o agregando la cantidad total en una de las estaciones del año por vez (Verano, Otoño, Invierno o Verano, respectivamente).

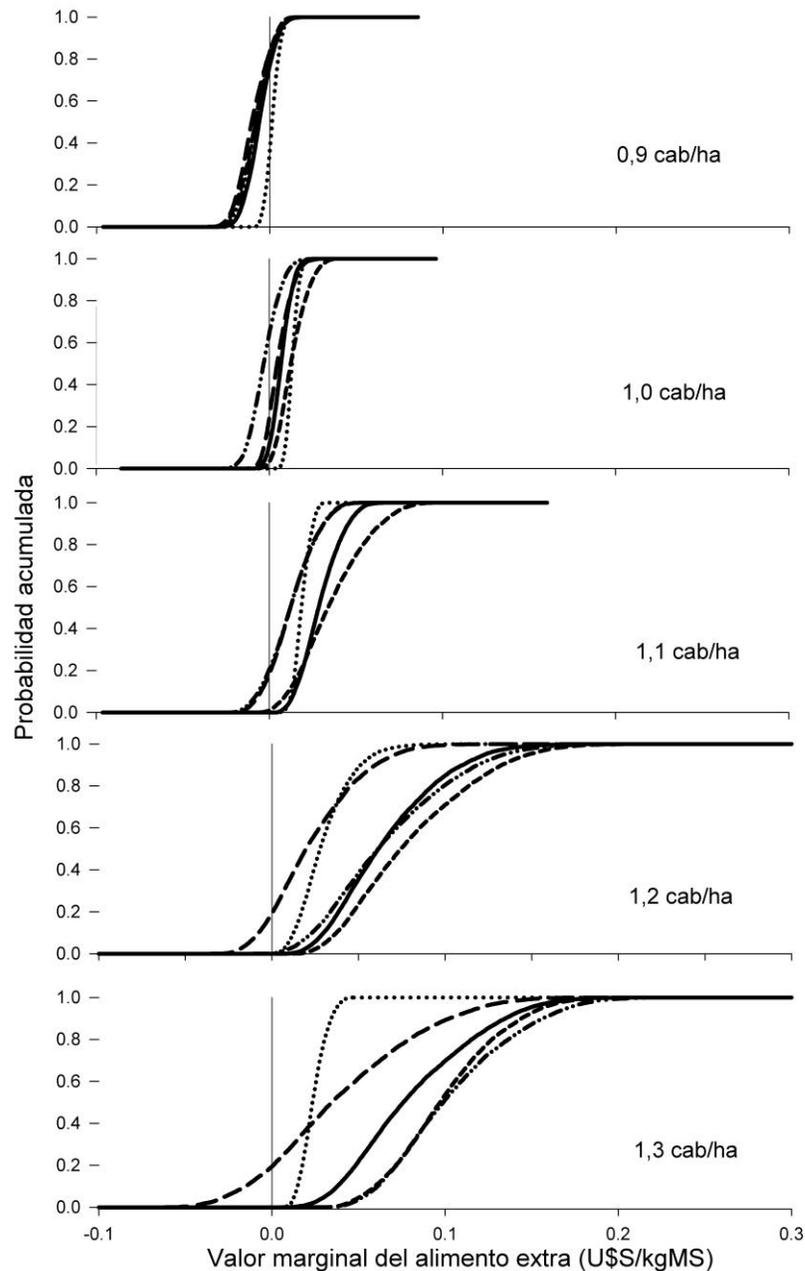


Figura 6: Probabilidad acumulada del valor marginal del alimento adicionado a sistemas de cría con carga animal creciente (0,9 a 1,3 cab/año) de la Depresión de Laprida asociados a variabilidad en la producción de forraje y variabilidad económica (dada por la variabilidad de precios de los insumos y de las ventas de la producción). El alimento fue agregado incrementando el 10% de la AMF de cada mes a lo largo del año (Anual, línea sólida), o agregando la cantidad total en una de las estaciones del año por vez (líneas punteadas, líneas discontinuas cortas, líneas discontinuas y puntos, o líneas discontinuas largas corresponden a Verano, Otoño, Invierno o Primavera, respectivamente).

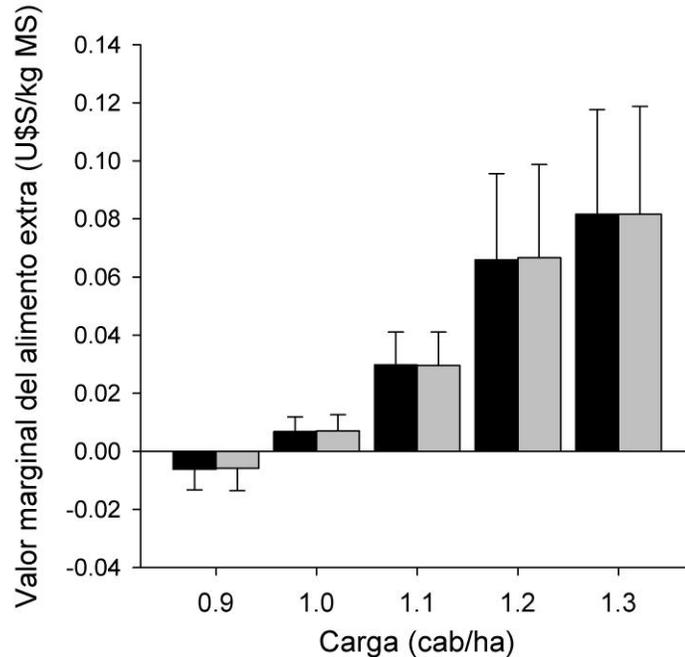


Figura 7: Valor marginal del alimento adicionado durante otoño en escenarios con carga animal creciente (0,9 a 1,3 cab/ha), estimado en escenarios con precios fijos (barras negras) e incluyendo la variabilidad de precios (barras grises).

Discusión

Los efectos del calentamiento global no será adverso en todos los lugares, sin embargo se prevé un incremento importante de las sequías en diferentes partes del mundo afectando la disponibilidad estacional de forraje y el crecimiento de los cultivos forrajeros en los sistemas ganaderos (Nardone et al., 2010). Entre los sistemas de producción ganaderos, la cría vacuna depende casi exclusivamente en los recursos forrajeros a través del pastoreo directo, lo cual los hace muy sensibles a tales eventos climáticos extremos (Baumont et al., 2008). El presente análisis muestra como la variabilidad climática afecta el valor marginal del alimento (Figura 5 y 6), lo cual tendría que ser tenido en cuenta al momento de evaluar los costos de fuentes de alimento alternativas con posibilidad de ser incorporadas en estos sistemas de cría vacuna. Mucho mayores VMA fueron

estimados en años con estaciones bajo condición de sequía en comparación a los calculados utilizando las condiciones climáticas promedio (Figura 5), siendo el mayor VMA en las situaciones de otoño seco, particularmente a cargas mayores a 0,9 cab/ha.

El cálculo del valor marginal del alimento se ha limitado generalmente a estudios enfocados a situaciones climáticas promedio (Ludemann y Smith, 2015; McEvoy et al., 2011). En este trabajo se innovó en la estimación del VMA incluyendo el riesgo de la variación interanual del crecimiento de las pasturas y de los mercados, lo cual provee un enfoque más holístico para el asesoramiento que si se considerase solo las condiciones de clima y precios promedio (Figura 6). La estimación del valor marginal del alimento está circunscripta a sistemas ganaderos específicos (Bell et al., 2008), aunque la metodología de modelación desarrollada en este caso puede ser fácilmente ajustada para identificar integralmente oportunidades de innovación para planteos forrajeros alternativos y otros sistemas ganaderos regionales. Los resultados muestran que el VMA se incrementó con la carga animal (Figura 6), donde la oferta forrajera de manera creciente cubre de manera más ajustada la demanda de alimentos y por lo tanto se incrementa la frecuencia/intensidad de los déficits en la oferta forrajera (Figura 3).

La variabilidad de precios de los insumos y productos del planteo productivo no tuvo impacto en el análisis del VMA (Figura 7), siendo las respuestas biofísicas del sistema las que tuvieron la mayor relevancia para el análisis y comprensión del comportamiento del VMA. Esto era en cierta medida previsible, en función de que estos sistemas ganaderos utilizan muy pocos insumos (Rearte y Pordomingo, 2014), sumado a una baja variación de precios de la producción animal (Tabla 1). Sin embargo, la inclusión de la variabilidad de precios en la estimación del VMA puede ser de utilidad en sistemas de producción de carne de base pastoril más intensivos, como aquellos que incluyen además de la cría, la recría y la terminación (Latimori et al., 2008; Rearte y Pordomingo, 2014).

Un buen ajuste entre la demanda estacional y la disponibilidad de alimentos es clave para alcanzar el potencial productivo de los sistemas de producción de carne vacuna (Moore et al., 2009). El manejo de los sistemas de cría de Argentina busca acoplar los requerimientos nutricionales a la oferta de alimentos estableciendo el servicio en primavera (Rearte y Pordomingo, 2014). De este modo, los mayores requerimientos durante la lactancia ocurren en el pico de crecimiento de forraje en primavera, pero aun así en otoño e invierno la producción de forraje limita la capacidad de carga de

los sistemas de producción. La cuantificación del VMA permitió confirmar la relevancia de estas estaciones, pero además posibilitó la identificación precisa del valor monetario para los diferentes tipos de año (Figura 5) y la cuantificación de la probabilidad de ocurrencia (Figura 6). La posibilidad de incluir la variabilidad interanual en los procesos de decisión estratégicos para la maximización de la renta y minimización del riesgo constituyen un desafío permanente para los sistemas pastoriles (Vogeler y Cichota, 2016). La carga animal es una decisión estratégica que debe conjugar el tipo de año para generar las respuestas del sistema de producción en su conjunto, gobernadas en este caso por los resultados biofísicos (Figura 7).

La mayor respuesta del VMA durante el otoño y en invierno en nuestros resultados puede deberse en nuestro caso principalmente a dos condiciones: en primer término, una mejora en el cambio de peso vivo y condición corporal (Figura 4A) que incrementan las tasas de preñez y disminuyen la variabilidad en los resultados (Figure 4B). En rodeos sanos, la longitud del anestro posparto es función inversa de la condición corporal (Kunkle et al., 1994), y el cambio del peso vivo tiene un efecto aditivo sobre la performance reproductiva (Spitzer et al., 1995). Es importante destacar que ambos factores están explícitamente representados en el modelo matemático utilizado (Machado et al 2010b). En segundo término, dado que al aumentar la carga animal, una mayor proporción de recursos forrajeros es cosechado por los animales y consecuentemente una menor cantidad es henificada (Figura 4C), esa condición conduce a una reducción de los costos variables.

Las ventas de terneros de destete se incrementaron moderadamente de 100 a 130 kg/ha cuando la carga animal del planteo de cría se incrementó un 44% (Figura 4 C). Esto puede estar asociado al rango limitado de carga animal utilizado en el experimento (0,9 a 1,3 cab/ha), que en todos los caso estuvo por encima de los valores promedio de los sistemas de cría tradicionales de la región, que va de 0,6 a 1,0 cab/ha (Rearte y Pordomingo, 2014). No es esperable un incremento de la producción de terneros de destete por encima de 1,3 cab/ha, dado que la tasa de preñez disminuyo a altas cargas (Figura 4), incrementando la tasa de descarte de vacas, disminuyendo la venta de terneras por alto recambio y obteniéndose menores pesos de destete dada la mayor frecuencia de activación de la regla de destete precoz.

Esta información provee a los productores el costo de indiferencia estacional para las distintas fuentes de alimento (Chapman et al., 2011). En términos prácticos, hay múltiples alternativas para

proveer alimento en otoño en los sistemas de cría estudiados, pero se requiere dimensionar su atractivo económico. La suplementación con heno es una opción frecuentemente citada (Romera et al., 2005; capítulo 3 de esta tesis), aunque el heno de producción propia es casi nulo en planteos de alta carga, y en esos casos se necesitaría comprarlo. Adicionalmente, hay otras opciones de recursos forrajeros como los verdeos de avena (Berger et al., 2013) y el sorgo forrajero diferido (Stefanazzi et al., 2011) pero ambos compiten en el uso de la tierra con los recursos forrajeros perennes. Una opción alternativa está dada por la fertilización nitrogenada a principios de otoño, lo cual permite lograr un crecimiento extra de pastura en otoño con una EUN 8,3 kg MS/kg N (Capítulo 3 de esta tesis). Actualmente, algunos productores utilizan silos de autoconsumo para el suministro de balanceados concentrados (que integran granos, suplementos minerales y fuentes proteicas). Los valores de estas opciones de alimentos expresados por kg MS (corregido por la energía metabolizable que contienen), en el caso del heno, sorgo diferido, verdeo de avena, fertilización otoñal de las pasturas o concentrados suministrados a través de silos de autoconsumo fueron 0,16; 0,07; 0,05; 0,04 y 0,12 U\$S/kg MS, respectivamente. En el caso de considerarse los valores promedios de VMA para la adición de alimento extra en otoño, la fertilización nitrogenada y los verdeos de avena fueron las opciones que podrían ser más rentables a las cargas de 1,2 y 1,3 cab/ha (Figura 3). Estos costos aplicados a la Figura 5, proveen información adicional al productor en términos de la probabilidad de ocurrencia permitiendo una anticipación efectiva del riesgo asociado. La opción más barata para la adición de alimento extra resultó la fertilización nitrogenada otoñal en pasturas (seguido de cerca por los verdeos de avena), la cual fue rentable en el 40, 88 y 100% de las veces a cargas de 1,1; 1,2 y 1,3 cab/ha respectivamente (Figura 5). Estos resultados fueron en cierta medida inesperados, dado que la fertilización con N no es una tecnología usualmente aplicada en los sistemas de cría vacuna (Rearte y Pordomingo, 2014), mientras que si es el caso de verdeos de avena como un recurso de forraje otoño-invernal ampliamente difundido (Arelovich et al., 2004).

El incremento de la producción de forraje a través de la fertilización nitrogenada de pasturas en otoño brindaría algunas ventajas adicionales tales como la reducción del área sembrada con verdeos (Pacín y Oesterheld, 2015), servicios ecosistémicos como un reservorio de C secuestrado en la MO en el suelo ocupado por pasturas (Lemaire et al., 2011) y además en algunos casos un crecimiento extra del crecimiento de forraje en primavera (Capítulo 3 de esta tesis). En este sentido, una mayor productividad lograda a partir de especies forrajeras perennes se destaca como una estrategia para

mejorar la rentabilidad, el manejo del riesgo y la mitigación de los impactos ambientales en los sistemas agropecuarios (Llewellyn et al., 2014). En el caso de los verdeos de avena se han reportado algunos casos de enfermedades nutricionales, causantes de mortalidad en los animales tales como hipomagnesemia (Brizuela y Cseh, 2003) o baja respuesta animal causada por un desbalance del contenido de energía y proteína del forraje (Arelovich et al., 2003) que son factores que demandan precaución en el uso de estos recursos como única fuente de alimento en los sistemas de cría. Sin embargo, en el caso pasturas de festuca sujetas a un manejo intensivo como el descrito e incluyendo fertilización N de otoño y asignadas a vacas preñadas, también requiere investigación de campo adicional sobre la posibilidad de presentación de desórdenes metabólicos. Adicionalmente, es importante hacer notar que las alternativas que contemplan la compra de alimentos (heno y concentrados) no son económicamente atractivos en relación a los VMA estimados.

Si bien los costos de distintas fuentes de alimento extra pueden cambiar o pueden aparecer (ej. la disponibilidad en la región de nuevos subproductos de la industria, una fuente más accesible de fertilizantes nitrogenados, etc.) o cambios en el valor de la producción animal modificando entonces las estimaciones del VMA, el resultado práctico de este tipo de análisis es brindar el respaldo para las decisiones vinculadas a la presupuestación forrajera con un enfoque prospectivo (Chapman et al., 2009). En los últimos tiempos los productores de la región han incorporado en sus planteos la recría y terminación a los fines de minimizar el riesgo mediante diversificación temporal de ventas y de categorías (Rearte y Pordomingo, 2014). El grado con que estos planteos puedan alterar el balance entre la oferta y la demanda de forraje y como influyen y/o modifican el VMA ante las condiciones de variabilidad climática imperantes, requerirá seguramente de investigaciones complementarias.

Conclusiones

En este estudio se aplicó una combinación de modelos biofísicos y económicos para el análisis cuantitativo del valor marginal del alimento adicional para un sistema ganadero particular de la región de la Pampa Deprimida de Argentina. El enfoque utilizado demostró que el análisis de los sistemas ganaderos para identificar los impactos y el valor relativo del alimento adicional se puede utilizar para identificar de qué modo se pueden lograr los mayores beneficios por la inclusión de este

alimento. El análisis mostró un impacto positivo consistente por la adición de alimento adicional en otoño e invierno en los sistemas de cría vacuna con cargas medias a altas. Tal información resulta de utilidad para ayudar a quienes manejan estos sistemas para analizar alternativas económicamente viables para cubrir baches de la oferta forrajera en sistemas de cría vacuna. Este análisis además demostró como la variabilidad climática influencia el valor marginal del alimento, el cual se debe tener en cuenta cuando se evalúan los costos de recursos alimenticios alternativos que puedan ser incorporados a un sistema de producción. En particular, el VMA fue altamente variable en los planteos más intensivos, con mayor carga animal y los VMA estimados fueron más altos en estaciones secas que si se consideran solo los años promedio.

Bibliografía

AACREA, 2015. Series de precios agropecuarios (Agricultural long-term prices series).

Arelovich, H.M., Arzadún, M.J., Laborde, H.E., Vasquez, M.G., 2003. Performance of beef cattle grazing oats supplemented with energy, escape protein or high quality hay. *Animal Feed Science and Technology* 105, 29-42. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-8401\(03\)00045-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-8401(03)00045-2)

Arelovich, H.M., Bravo, R.D., Martínez, M.F., 2011. Development, characteristics, and trends for beef cattle production in Argentina. *Animal Frontiers* 1, 37-45. [10.2527/af.2011-0021](https://doi.org/10.2527/af.2011-0021)

Arelovich, H.M., Laborde, H.E., Arzadún, M. J. , Vásquez, M.G., 2004. Influence of hay quality and pasture location on performance of beef cattle grazing oats. *Spanish Journal of Agricultural Research* 2 53-61.

Baumont, R., Jouven, M., Deux, N., Farruggia, A., 2008. How can farms with beef cattle systems based on permanent pasture cope with extreme climatic years? Results of a study using the whole-farm simulator SEBIEN., *Proceedings of the 8th European International Farming Systems Association symposium*, pp. 8-10.

Behrendt, K., Scott, J.M., Cacho, O., Jones, R., 2013. Simulating the impact of fertiliser strategies and prices on the economics of developing and managing the Cicerone Project farmlets under climatic uncertainty. *Animal Production Science* 53, 806-816. <http://dx.doi.org/10.1071/AN11173>

Bell, L.W., Moore, A.D., Thomas, D.T., 2016. Feed-base strategies that reduce risk of feed-gaps in livestock systems across Australia's mixed farming zone, in: *Production, A.S.o.A. (Ed.), Animal Production in Australia Proceedings of the 31st Biennial Conference of the Australian Society of Animal Production.*, Adelaide, p. ID 1118.

Bell, L.W., Robertson, M.J., Revell, D.K., Lilley, J.M., Moore, A.D., 2008. Approaches for assessing some attributes of feed-base systems in mixed farming enterprises. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 789-798. <http://dx.doi.org/10.1071/EA07421>

Berger, H., Machado, C., Zabala, C., Fernández Rosso, C., Burges, J., 2013. Modelling the effect of maize silage and oat winter forage crop on cow-calf systems in Argentina, International Grassland Congress, Sydney, pp. 1192-1193.

Berger, H., Machado, C.F., Agnusdei, M., Cullen, B.R., 2014. Use of a biophysical simulation model (DairyMod) to represent tall fescue pasture growth in Argentina. *Grass and Forage Science* 69, 441-453. [10.1111/gfs.12064](https://doi.org/10.1111/gfs.12064)

Brizuela, M.A., Cseh, S.B., 2003. Mineral composition and tetanogenic potential of winter annual forage grasses sowed at different dates (in spanish). *Rev. Arg. de Prod. Anim.* 23, 91-101.

Chapman, D.F., Cullen, B.R., Johnson, I.R., Beca, D., 2009. Interannual variation in pasture growth rate in Australian and New Zealand dairy regions and its consequences for system management. *Animal Production Science* 49, 1071-1079. <http://dx.doi.org/10.1071/AN09054>

Chapman, D.F., Kenny, S.N., Beca, D., Johnson, I.R., 2008. Pasture and forage crop systems for non-irrigated dairy farms in southern Australia. 2. Inter-annual variation in forage supply, and business risk. *Agr. Syst.* 97, 126-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2008.02.002>

Chapman, D.F., Kenny, S.N., Lane, N., 2011. Pasture and forage crop systems for non-irrigated dairy farms in southern Australia: 3. Estimated economic value of additional home-grown feed. *Agr. Syst.* 104, 589-599. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2011.06.001>

Continanza, G., Sciotti, A., Faverín, C., Fernández, H.H., Burges, J., 2010. Impact of early weaning on physical productivity and economic results of a grazing management system., in: Machado, C., Wade, M., Carneiro da Silva, S., Agnusdei, M., De Faccio Carvalho, P., Morris, S.T., Beskow, W. (Eds.), *An overreview of research on pastoral-based systems in southern part of South America. International Workshop. Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de Bs. As. , Tandil, Argentina*, pp. 291-293.

Johnson, I.R., Chapman, D.F., Snow, V.O., Eckard, R.J., Parsons, A.J., Lambert, M.G., Cullen, B.R., 2008. DairyMod and EcoMod: biophysical pasture-simulation models for Australia and New Zealand. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 621-631.

<http://dx.doi.org/10.1071/EA07133>

Kunkle, W.E., Sand, R.S., Rae, D.O., 1994. Effect of body condition on productivity in beef cattle., Factors affecting calf crop., Fields, M. J.; Sand, R. S. ed. CRC Press, Boca Raton, USA, pp. 167-176.

Latimori, N.J., Kloster, A.M., García, P.T., Carduza, F.J., Grigioni, G., Pensel, N.A., 2008. Diet and genotype effects on the quality index of beef produced in the Argentine Pampeana region. *Meat Science* 79, 463-469. <http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2007.10.008>

Lemaire, G., Hodgson, J., Chabbi, A., 2011. Grassland productivity and ecosystem services. CABI. 10.1079/9781845938093.0000

Llewellyn, R.S., Robertson, M.J., Hayes, R.C., Ferris, D., Descheemaeker, K., Revell, C., 2014. Developing the role of perennial forages for crop–livestock farms: a strategic multi-disciplinary approach. *Crop and Pasture Science* 65, 945-955. <http://dx.doi.org/10.1071/CP14111>

Ludemann, C.I., Smith, K.F., 2015. A comparison of methods to assess the likely on-farm value for meat production systems of pasture traits and genetic gain through plant breeding using phalaris (*Phalaris aquatica* L.) as an example. *Grass and Forage Science*, n/a-n/a. 10.1111/gfs.12164

Machado, C., Burges, J.C., Berger, H., Faverín, C., Steffanazzi, I., 2010a. First steps in the use of a web whole-farm model to foster the feedback between beef cattle extension and research. , in: Machado, C.F., Wade, M., Carneiro Da Silva, S., Agnusdei, M., Fachio Carvalho, P., Morris, S.T., Beskow, W., Montossi, F. (Eds.), *An Overview of Research on Pastoral-Based Systems in South America*. UNCPBA, Tandil, Argentina.

Machado, C.F., Morris, S.T., Hodgson, J., Arroqui, M.A., Mangudo, P.A., 2010b. A web-based model for simulating whole-farm beef cattle systems. *Computer and Electronics in Agriculture* 74, 129-136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2010.07.007>

McEvoy, M., O'Donovan M, Shalloo, L., 2011 Development and application of an economic ranking index for perennial ryegrass cultivars. *Journal of Dairy Science* 94, 1627-1639. <http://dx.doi.org/10.3168/jds.2010-3322>

Moore, A.D., Bell, L.W., Revell, D.K., 2009. Feed gaps in mixed-farming systems: insights from the Grain & Graze program. *Animal Production Science* 49, 736-748.

<http://dx.doi.org/10.1071/AN09010>

Morris, S.T., Brookes, I.M., Parker, W.J., McCutcheon, S.N., 1994. Biological efficiency: How relevant is this concept to beef cows in a mixed livestock, seasonal pasture supply context?

Proceedings of the New Zealand Society of Animal Production 54, 333-336.

Mosciaro, M.A., Natinzon, P.C., Tosi, J.C., 2012. Análisis de la situación actual y de la sustentabilidad económica de sistemas característicos de los territorios de Cerbas. . Informe de avance conjunto del Proyecto Sistemas de Información Productiva, Socioeconómica y de Fortalecimiento de la Capacidad de Gestión Local de Los Territorios del CERBAS (BASUR 720071) y del Proyecto Competitividad y Sustentabilidad de los Sistemas de Producción. .

Nardone, A., Ronchi, B., Lacetera, N., Ranieri, M.S., Bernabucci, U., 2010. Effects of climate changes on animal production and sustainability of livestock systems. *Livestock Science* 130, 57-69.

[10.1016/j.livsci.2010.02.011](http://dx.doi.org/10.1016/j.livsci.2010.02.011)

Pacín, F., Oesterheld, M., 2015. Closing the technological gap of animal and crop production through technical assistance. *Agr. Syst.* 137, 101-107. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2015.04.007>

Rearte, D.H., Pordomingo, A.J., 2014. The relevance of methane emissions from beef production and the challenges of the Argentinean beef production platform. *Meat Science* 98, 355-360.

<http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.021>

Richards, M.W., Spitzer, J.C., and Warner, M.B., 1986. Effect of varying levels of postpartum nutrition and body condition at calving on subsequent reproductive performance in beef cattle. *J. Anim. Sci.* 62, 300-306.

Romera, A.J., Morris, S.T., Hodgson, J., Stirling, W.D., Woodward, S.J.R., 2005. Comparison of haymaking strategies for cow-calf systems in the Salado Region of Argentina using a simulation model. 1. Effect of herbage mass at cutting and cow stocking rate under a rigid system of management. . *Grass and Forage Science* 60, 399-408. [10.1111/j.1365-2494.2005.00492.x](http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2494.2005.00492.x)

Spitzer, J.C., Morrison, D.G., Wetteman, R.P., Faulkner, L.C., 1995. Reproductive responses and calf birth and weaning weights as affected by body condition at parturition and postpartum weight gain in primiparous beef cows. *Journal Animal Science* 73, 1251-1257. doi:/1995.7351251x

Staff., S.S., 2010. *Keys to Soil Taxonomy* 11th ed. ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC.

Stefanazzi, I.N., Burges, J.C., Machado, C.F., Berger, H., Faverín, C., Pordomingo, A.J., Di Marco, O.N., 2011. Simulation of cow-calf productivity with the use of deferred sorghum., *Congreso Argentin de Producción Animal - 1st Joint Meeting ASAS-AAPA, Mar del Plata - Argentina*, p. 213.

Vogeler, I., Cichota, R., 2016. Deriving seasonally optimal nitrogen fertilization rates for a ryegrass pasture based on agricultural production systems simulator modelling with a refined AgPasture model. *Grass and Forage Science* 71, 353-365. 10.1111/gfs.12181

Capítulo 5: Discusión general

En los capítulos 2, 3 y 4 se realizó una discusión específica de acuerdo a los resultados más relevantes en cada caso. En este capítulo, se rescatará algunos de ellos, pero procurando avanzar en una discusión transversal, no solo incluyendo los hallazgos más significativos sino considerando particularmente la metodología empleada y las implicancias que la misma podría aportar a una mayor integración entre la investigación y la extensión, y a un trabajo interdisciplinario e interinstitucional en el abordaje territorial.

En respuesta a la hipótesis planteada, en su conjunto, el proyecto tuvo como objetivo general explorar alternativas específicas de intensificación de sistemas de cría de la zona de la Depresión de Laprida, Buenos Aires, procurando mejoras tanto cuantitativas como de estabilidad de la producción y performance económica en condiciones de variabilidad interanual. Como estrategia instrumental, se requirió evaluar y calibrar un modelo de simulación biofísico y clima-dependiente del crecimiento de pasturas templadas e integrarlo a un simulador integral bioeconómico de empresas agropecuarias (“whole farm”). Habitualmente en el transcurso de cualquier proyecto de investigación las preguntas sobre las que se trabaja pueden sufrir cierta evolución, y más en particular en los estudios de modelación (Romera, 2004). En este caso, los ajustes que se le realizaron a los objetivos específicos fueron: En el primero, se focalizó el trabajo en evaluar, calibrar y utilizar un modelo de simulación de pasturas existente en lugar de desarrollarlo. En el segundo, los planteos de intensificación ganaderos se centraron en el manejo de las pasturas de festuca, explorando interrogantes surgidas de módulos productivos experimentales/demostrativos (Bilotto, 2014; INTA, 2013a). El abordaje para estos planteos se focalizó en aspectos referidos a la performance y sostenibilidad productivo-económica, estrategia aplicada en otros trabajos abocados a indagar cuestiones referidas a las opciones de manejo de los recursos forrajeros y el pastoreo en sistemas ganaderos (Bell et al., 2016; Chapman et al., 2013). Finalmente, los objetivos específicos se integraron del siguiente modo:

- Evaluar y calibrar un modelo biofísico y clima-dependiente de pasturas a partir de los modelos disponibles, para simular el crecimiento de pasturas de festuca bajo condiciones locales y estimar el impacto de distintas estrategias de manejo forrajero sobre su productividad (Capítulo 2).

- Evaluar mediante simulación el impacto de la intensificación de sistemas de cría de la Depresión de Laprida, Buenos Aires en base a fertilización nitrogenada de pasturas de festuca y aumento de la carga animal sobre las respuestas productiva y económica bajo condiciones de variabilidad climática interanual (Capítulo 3).
- Cuantificar mediante simulación la capacidad de respuesta de sistemas de cría vacuna de la Depresión de Laprida, Buenos Aires ante el agregado de alimento extra (valor marginal del alimento) y condiciones de variabilidad climática y de precios (Capítulo 4).

Los sistemas ganaderos de cría en Argentina se caracterizan por tener estrategias de manejo basadas en bajo uso de insumos y baja demanda de trabajo, donde la alimentación depende casi enteramente en el pastoreo (Arelovich et al., 2011; Rearte y Pordomingo 2014). Por lo tanto, las alternativas de intensificación de los mismos, pasan fundamentalmente por un buen manejo forrajero que optimice su utilización. Los estudios de esta tesis se orientaron a sistemas ganaderos del área de influencia de la Depresión de Laprida (Olavarría, Benito Juárez, Laprida y La Madrid) de la Pcia. de Buenos Aires, Argentina. Como fue mencionado en el capítulo 1, esta posee una superficie aproximada de 2 millones de hectáreas, en su mayoría con suelos de aptitud ganadera (28% aptitud ganadera, 43% ganadera-agrícola, y 29% agrícola). La ganadería vacuna para la producción de carne es la principal actividad agropecuaria y ocupa el 75% de la superficie del territorio. La cría y el engorde se desarrollan en unos 3.000 establecimientos de casi 720 ha de superficie promedio. El stock vacuno de 1.950.000 cabezas (promedio 2002-2015) representa el 3,6% del total de la provincia de Buenos Aires (Recavarren, 2016). En esta región, cobra particular importancia el desarrollo de innovaciones en el manejo de los sistemas de producción para el potencial incremento en la productividad. En este sentido y para la misma región experimental, Pacín y Oesterheld (2015) han planteado que el hecho de contar con asistencia técnica en los establecimientos agropecuarios de la región posibilitó un incremento del 96% de la producción de los planteos de cría, con un 70% más de estabilidad. Los autores mencionados no profundizan en las causas de sus hallazgos, pero la misma podría deberse a una mayor aplicación de tecnologías de manejo disponibles, que en general presentan muy baja adopción. Esta condición se la menciona habitualmente como “brecha tecnológica” que expresa la diferencia entre la situación promedio actual y el potencial loggable con dichas tecnologías (Rearte y Pordomingo, 2014).

En cuanto al manejo forrajero, este estudio de modelación incorpora las buenas prácticas de manejo de pasturas (BPM) basadas en la dinámica de recambio de tejido foliar y al uso eficiente de los recursos disponibles (Agnusdei et al., 2007; Lattanzi, 1998), lo cual no solo tiene implicancias en la productividad, sino también en la estructura y la calidad nutritiva de la pastura (Insúa et al., 2016; Insúa et al., 2013). Este manejo incluye prácticas que posibilitan el uso eficiente del N en los agroecosistemas, independientemente de la fuente del mismo (fertilizantes, fijación biológica o mineralización por MO), promoviendo un acople razonable entre la oferta y la demanda de N requerida para asegurar una alta eficiencia de uso de este nutriente (Agnusdei et al., 2010). La utilización de la fertilización nitrogenada como herramienta para mejorar el ajuste entre la oferta y la demanda de forraje en planteos ganaderos de base pastoril surge como una opción relevante para el diseño y evaluación de estrategias de manejo para las que se dispone de un cuerpo de información importante a nivel de parcelas experimentales (e.g. Lattanzi 1998; Marino y Agnusdei 2007 y Mazzanti y Arosteguy 1985). Concomitantemente, la aplicación de BPM en un módulo demostrativo-experimental de pasturas de festuca integrado a un campo comercial de la zona de Laprida, Provincia de Buenos Aires (Bilotto, 2014), generó información relevante para la transferencia de estas prácticas. Debido a la variabilidad interanual relacionada a la dependencia climática, cualquier mejora que potencialmente pueda lograrse en la productividad y rentabilidad de los sistemas ganaderos a través de la incorporación de cambios en la composición y/o manejo de la cadena forrajera, solo es posible dimensionarla adecuadamente si el análisis incluye las interacciones entre estas y la variabilidad climática (Chapman et al., 2008b). Resulta claro que incluir esta consideración a la experimentación de campo a nivel sistema, aunque no es imposible, implicaría importantes dificultades operativas y de costos.

En este proyecto orientado al análisis del impacto a nivel del sistema de producción de prácticas de manejo a nivel del lote de pastura, resultó crucial el desarrollo de un abordaje metodológico riguroso según los estándares internacionales de este tipo de estudios de sistemas involucrando modelos matemáticos. El punto de partida fue un análisis exploratorio de distintos modelos de crecimiento de pasturas, enfocado en sus características particulares en cuanto a la representación de los procesos del crecimiento vegetal, estructuras, complejidad y requerimientos de información, así como su aplicabilidad a la evaluación de sistemas de producción locales (Berger et al., 2010; ANEXO). Fruto de ese análisis se seleccionó al modelo (DairyMod, Johnson et al., 2008), en virtud

de su enfoque mecanístico, robusto y disponible en un software estable, que además permitió trabajar de manera articulada con el grupo desarrollador/administrador perteneciente a la Universidad de Melbourne- Australia, capitalizando de este modo la experiencia previa de calibración a otras condiciones (Por ej. Chapman et al., 2009; Cullen et al., 2009 y Rawnsley et al., 2009).

Modelación biofísica del crecimiento de pastura de festuca

Romera et al (2005a) compararon la masa forrajera acumulada de distintos tipos de ensayos con agropiro (*Thinopirum Ponticum*), respecto a la simulada por el módulo de pasturas de un modelo “whole-farm” que integraba al modelo McCall (McCall et al., 2003). Aunque dicha evaluación fue considerada aceptable por los autores de acuerdo a los objetivos de la investigación, no se realizó una descripción detallada de las condiciones de los ensayos y la diversidad de condiciones experimentales representadas en el modelo. La calibración para pasturas de festuca del modelo de simulación DairyMod, que es mucho más mecanístico, mostró una representación satisfactoria para una diversidad de condiciones experimentales (Capítulo 2). Las evaluaciones previas del modelo de simulación DairyMod se basaron en registros de corte de larga data en lotes bajo producción (Cullen et al., 2008), estrategia utilizada también con otros modelos (Barret et al., 2004). En el caso particular de esta tesis, se utilizaron datos de experimentos más detallados con niveles progresivos de utilización de aplicación de N en ciclos de rebrotes de pasturas en distintas estaciones bajo condiciones de secano y riego (Capítulo 2, Figura 1 y Tabla 2). La disponibilidad de esta información de campo y el acceso a los autores de los mismos para acceder a detalles de datos no publicados o presentados agrupados, permitió explorar opciones de mejora y calibrar el modelo. Y así disponer de gran flexibilidad predictiva. Esto permitió simular y analizar distintas estrategias de fertilización N bajo distintas condiciones ambientales y épocas para el diseño de alternativas de manejo de las pasturas de los sistemas de producción ganadera de la región de la Cuenca del Salado. El trabajo de calibración incluyó la propuesta de mejora y evaluación preliminar de la incorporación en los cálculos de las simulaciones de la curva de referencia de la dilución crítica de N donde la concentración sigue una función matemática $N\% = 4.8 AMF^{-0.32}$ (Lemaire y Salette, 1984). DairyMod posee una asunción implícita donde la concentración óptima de N para el crecimiento de las plantas (N_{opt}) permanece constante independientemente de la acumulación de masa forrajera (AMF). Las simulaciones de las pasturas requeridas para el estudio de las alternativas de

intensificación de los planteos de cría vacuna (Capítulos 2 y 3), contemplaron un manejo ajustado de la disponibilidad de forraje de pre y pos-pastoreo manteniendo la biomasa de la pastura en un rango acotado minimizando así el impacto de utilizar un valor fijo de N_{opt} , dado que la mejora propuesta no fue posible implementarla para estas simulaciones. Esto no fue posible dado que la actualización del software es centralizada y como tiene un amplio uso en distintas líneas de investigación y transferencia a nivel internacional (ej. Browne et al., 2011; Chapman et al., 2013 y Rawnsley et al., 2009), esto requiere que los cambios se deban realizar de manera planificada y concertada entre los usuarios, demandando un tiempo que excede a los preestablecidos para la presente tesis. Posteriormente, confirmando estos avances, los resultados promisorios fueron tomados por Vogeler y Cichota (2016) que incorporaron esa mejora propuesta en esta tesis para la simulaciones de pasturas de raigrás bajo riego al módulo de pasturas templadas (AgPasture) que está basado en esta misma plataforma de modelos DairyMod/EcoMod/SGS Pasture Model (Li et al., 2011), y se encuentra integrado al simulador APSIM (Keating et al., 2003).

La metodología aplicada se sustentó en la aplicación de conocimientos de base ecofisiológica para el ajuste de los parámetros (Capítulo 2, Tabla 2), y la utilización de indicadores estadísticos para la evaluación de modelos de simulación (Bland y Altman, 1986 y Tedeschi, 2006), presentados en la Tabla 4 y Figura 9 del Capítulo 2. Si bien este enfoque resultó adecuado para la complejidad del modelo utilizado, el proceso de calibración a futuro podría ser refinado a través de la exploración de alternativas para la identificación de parámetros críticos del modelo tales como la metodología de Morris (Ben Touhami et al., 2013), y/o la el método Bayesiano para la calibración de parámetros a los fines de reducir la incertidumbre respecto a los valores utilizados en los distintos parámetros (Ben Touhami y Bellocchi, 2015).

En este sentido, la metodología y el proceso realizado, pueden facilitar la ampliación de la calibración a más condiciones con la disponibilidad de información de campo adicional, pudiendo incorporarse nuevos hallazgos de importancia para sistemas ganaderos como es el caso de la calidad forrajera y los mecanismos que la controlan (Insúa et al., 2016). Esto contribuiría y complementarían a la información disponible en la región sobre producción de agropiro, pastura, campo natural, verdeos de verano, festuca, pasto llorón, gramma y pastura de implantación a partir de estimaciones realizadas con datos de índice de vegetación de diferencia normalizada obtenidos de imágenes satelitales (Oosterheld y Paruelo, 2014). Esta información que permite generar series históricas

posibilita futuros análisis de riesgo, y la misma se encuentra disponible en el Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección - LART (<http://www.agro.uba.ar/laboratorios/lart/sistemas>).

Claramente pueden identificarse diferentes estrategias de modelación para estudiar la variabilidad de la producción forrajera. En estudios de la región de sistemas de cría vacuna y que incluían diferentes estrategias de conservación de forrajes, se realizaron simulaciones de largos períodos de tiempo dependientes de una extensa base de datos climática (se generaron simulaciones con series artificiales 50 años a partir de la combinación aleatoria de registros de datos climáticos de 30 años), haciendo énfasis en indicadores de variabilidad por ejemplo desvío estándar, coeficiente de variación, etc. (Romera et al., 2005a y Romera et al., 2005b). Por otro lado, otros autores focalizan en la identificación y modelación de distintos tipos de años climáticos que representen los principales desvíos en la producción de los recursos forrajeros (Chapman et al., 2008b). La ventaja de este último enfoque, es que se visualizan más directamente las situaciones típicas (ej. Años con otoño seco, primavera húmeda etc.), en las cuales los profesionales del sector y productores están más familiarizados a interpretar por ser parte de sus propias experiencias en la operación de los sistemas. Sobre la base que esto podría facilitar futuros procesos participativos de discusión y análisis (Larocque et al., 2010; van Delden et al., 2010; Voinov y Bousquet, 2010), como los que se pretenden con la continuidad de este trabajo (ver título “*Oportunidades y desafíos para el uso de modelos de simulación para colaborar con la identificación de oportunidades de innovación de estos sistemas*”), y por lo tanto la estrategia seleccionada en esta tesis.

Los resultados de las simulaciones permitieron evaluar cuantitativamente la influencia de la variabilidad climática sobre la respuesta a la fertilización nitrogenada tanto en otoño como en primavera. Los resultados más relevantes surgieron por un lado a nivel del comportamiento de las pasturas en función de la fertilización nitrogenada donde se cuantificó un incremento de la producción anual de +25% y el adelantamiento de la primavera y fundamentalmente la cuantificación de un efecto residual de la fertilización otoñal en la siguiente estación de crecimiento, en la primavera (Capítulo 2, Figura 4), lo que redundó en una eficiencia de uso del N similar a las aplicaciones de fin de invierno/inicio de primavera. Esto tendría importantes implicancias, dado que este diferimiento en el impacto de la fertilización sobre el crecimiento de la pastura compensa prácticamente la reducción de la respuesta en otoños secos (Capítulo 2, Figura 5), independizando la decisión de fertilizar según el tipo de año climático.

Impactos a nivel de sistema de producción de la intensificación de carga animal, fertilización N y de provisión de alimento extra en un contexto de variabilidad climática

A los fines de escalar la respuesta a la fertilización con nitrógeno de las pasturas a nivel del sistema de producción con creciente intensificación en un marco de variabilidad climática, se requirió necesariamente la integración de modelos biofísicos y económicos que representen los procesos involucrados. Por otro lado, también resultó clave el desarrollo de una estrategia de simulación que permitiesen representar y visibilizar los procesos implícitos de modo de facilitar el análisis de los resultados y transferencia de los principales hallazgos. La metodología utilizada se adaptó de experiencias asimilables que consideraban el acople de modelos en serie (Chapman et al., 2012 y Chapman et al., 2008a). En este caso en particular (Figura 1), se utilizó el modelo simulación de pasturas DairyMod junto con el modelo “whole-farm” Simugan para la evaluación de la respuesta a la fertilización, sumando un modelo económico y de riesgo construido ad-hoc para la estimación del VMA. La integración de los modelos de simulación de pasturas y del sistema ganadero, requiere que el modelo “whole-farm” mantenga la condición de las pasturas dentro del rango en el cual se simulaba su crecimiento en el modelo de pasturas. Este se pudo lograr por contar Simugan con la posibilidad de implementar reglas de manejo para este fin (Machado et al 2010b) y para asegurar la estabilidad/viabilidad (masa forrajera mínima, condición corporal de los animales etc.) de los sistemas evaluados. Estas reglas no solo facilitan el acople de modelos, sino también que mejoran la representación de los sistemas simulados mediante la incorporación de pautas de manejo propias de estos sistemas en cuestión (Moore et al., 2014). En este sentido, las reglas constituyen una forma natural de expresar/sintetizar el conocimiento sobre el sistema, además el hecho de explicitar el manejo en estas reglas permite focalizar los esfuerzos de investigación en el rediseño de los sistemas productivos y la traducción del manejo simulado en recomendaciones técnicas a aplicarse en los planteos productivos (Woodward et al., 2008). En resumen, esta forma de integración conceptual y cuantitativa de modelos permite capitalizar los procesos de desarrollo y aplicación ya realizados sin la necesidad de construcción de softwares que los articulen. La estrategia implementada coincide con los últimos avances en el desarrollo de enfoques / estrategias de modelación (Robertson et al., 2012), en las que se destacan el acople de distintos tipos de modelos para abordar aspectos/cuestiones dinámicas y de valoración del riesgo. Sin embargo, siempre es importante tener

presente la escala de tiempo que trabaja cada modelo, y posibles limitaciones conceptuales que pudieran afectar la eficiencia de la integración para representar el problema de estudio.

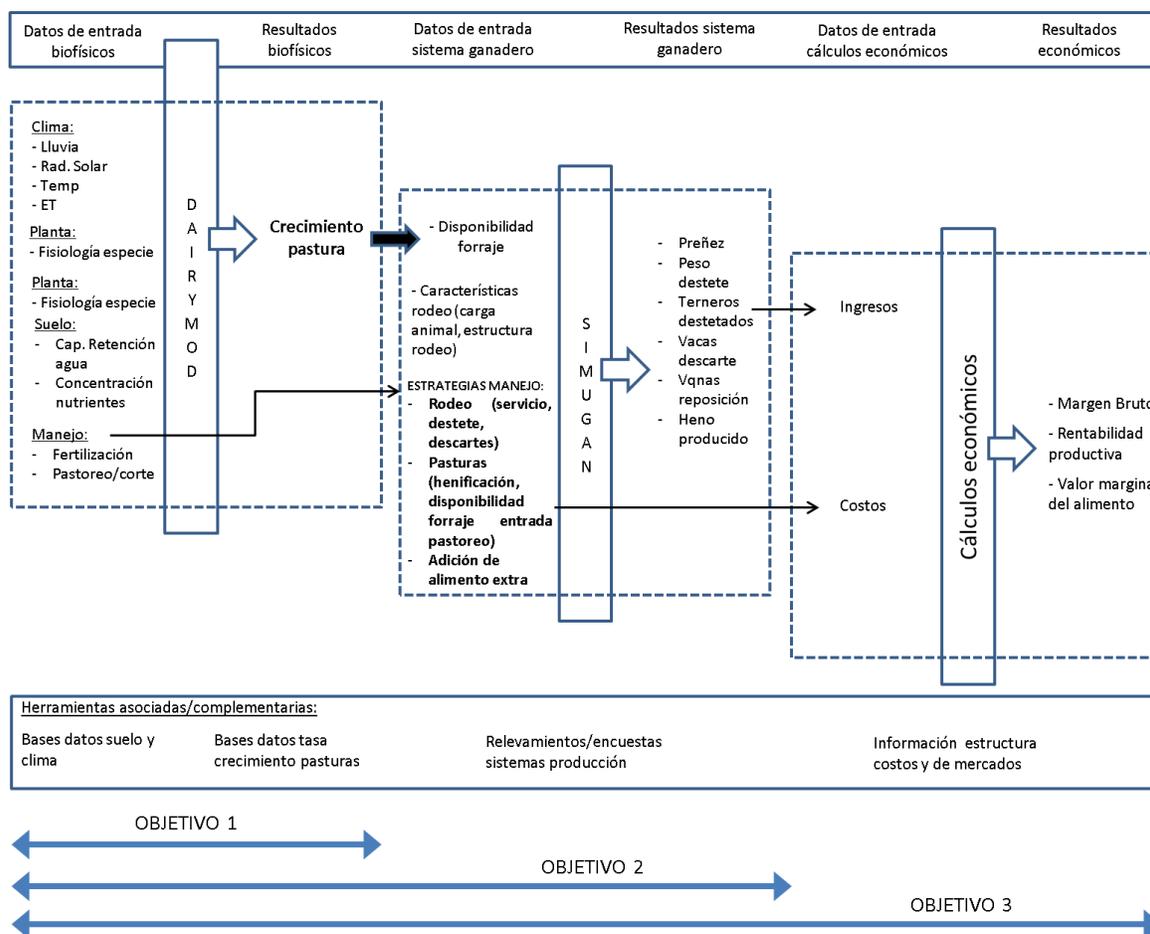


Figura 1: Representación esquemática de la estrategia de modelación utilizada para evaluar el impacto de la fertilización nitrogenada en sistemas de cría vacuna de la Depresión de Laprida. El alcance/rol de cada modelo de simulación está indicado por las líneas punteadas y las flechas en la base indican la correspondencia con los objetivos de la tesis. La transferencia de información entre los modelos está indicada por flechas.

La investigación con modelos facilita la identificación de potenciales innovaciones en los sistemas que deben confirmarse con investigación disciplinaria complementaria y de ahí la importancia de la integración de la modelación con el trabajo de campo (Moore et al., 2014). Dentro de la exploración con modelos, la metodología del “Valor Marginal del Alimento Adicional” VMA (Bell et al., 2008), es una herramienta que permite cuantificar la respuesta productivo-económica de un sistema ante la adición de alimento adicional en diferentes momentos del año. De este modo, VMA refleja el grado de desajuste entre la oferta y demanda de forraje de los sistemas ganaderos de base pastoril,

posibilitando poner en términos económicos las alternativas de mitigar esos posibles desajustes. La estimación del VMA en sistemas de cría (Objetivo 3) requirió modelar cuantitativamente el impacto de la alimentación sobre la performance reproductiva de los vientres con Simugan (Machado et al., 2010b), integrando los resultados biofísicos en el modelo ad-hoc (Capítulo 4, Figura 2) para el análisis económico y de riesgo (Figura 1). La presentación de resultados se realizó de dos maneras: Por un lado, se trabajó en la simulación y estudio de las principales variables productivas en años individuales, clasificados e identificados a partir de la comparación de la producción de forraje estacional en relación al promedio histórico (Chapman et al., 2008b). Por otro lado, se realizaron simulaciones estocásticas utilizando las variables productivas relevantes de los escenarios evaluados y las variables económicas que determinan la performance económica del sistema (Capítulo 4, Figura 6), analizándose los resultados como función de probabilidad acumulada, tal como lo realizado en estudios similares (Fariña et al., 2011; Scott et al., 2013). Estos dos enfoques permitieron identificar y analizar en profundidad los factores, las variables claves en la performance del sistema posibilitando relacionar la información provista con situaciones similares registradas en la historia del sistema de producción y por otro dimensionar la probabilidad de ocurrencia de los resultados esperados, en función de las decisiones de manejo que dependerán de los recursos alimenticios disponibles y la actitud/posicionamiento frente al riesgo por parte del productor (Chapman et al., 2013).

La modelación de estrategias de fertilización nitrogenada en pasturas de festuca de sistemas de cría vacuna ha permitido identificar oportunidades de innovación, además de los pros y contras en los aspectos productivos y económicos bajo condiciones de variabilidad interanual del crecimiento de las pasturas. Si bien la EUN lograda en las dos épocas de fertilización simuladas fue diferente (al considerar los primeros rebrotes luego de aplicado el fertilizante), el impacto sobre el sistema productivo fue similar (Capítulo 3, Tablas 1 y 2). Es importante destacar que se observó un mayor impacto en el sistema de producción en las condiciones de presentación de estaciones secas, otoño o primavera, donde la fertilización nitrogenada permitió sostener la productividad y resultados económicos a niveles similares a un año promedio, aunque observándose interacciones con la carga animal (a altas cargas, aun fertilizando, se pierde resiliencia frente a las variaciones climáticas). Todos estos resultados requieren confirmación experimental a campo, pero permitirían una mayor flexibilidad operativa y organizativa en la implementación de las estrategias de fertilización en estos

planteos de cría vacuna, donde su implementación resulta muchas veces compleja al no contar muchas veces con equipamiento y/o condiciones del terreno para fertilizar a la salida del invierno. El análisis de las simulaciones muestra que para lograr la mejor respuesta a la fertilización de los sistemas de cría bajo estudio, la superficie en la cual se debería aplicar el fertilizante nitrogenado es más bien reducida. Esto, si bien resulta de un análisis de un sistema en particular, la información emergente de estos trabajos sugiere que la mejor respuesta bajo variabilidad interanual se da con la fertilización del 20% en de la superficie del establecimiento, lo que aporta elementos cuantitativos a la planificación y manejo de los sistemas pastoriles respaldando la implementación de buenas prácticas de manejo (Capítulo 3).

La evaluación de la fertilización abarcó dos épocas en las que se incrementó la producción de forraje, quedando remanente el interrogante de cómo se comportaría el sistema, ante el aumento de la disponibilidad de forraje en otros momentos del año, y como resultaría el impacto de la fertilización respecto al uso de otras alternativas de provisión de alimento en términos comparativos. Nuestros resultados muestran que la adición de alimento extra en otoño podría mejorar la rentabilidad de los sistemas y reducir su variabilidad (Capítulo 4, Figuras 5 y 6). Sin embargo, la respuesta dependió de la carga animal de los planteos de cría y de la presentación de estaciones secas. La adición de alimento extra comenzó a ser rentable a partir de cargas de 1,1 cab/ha., siendo de poco valor en años promedio, pero alcanzando las mayores magnitudes con la presentación de otoños secos. Estos resultados evidencian la importancia de considerar las condiciones de variabilidad climática y de carga animal al analizar la incorporación de cambios tecnológicos en los planteos productivos. La inclusión de la variabilidad interanual, de tipos de años con situaciones donde la producción de forraje se desvía del promedio histórico (particularmente sequías), fueron claves en el análisis de los resultados y la cuantificación del impacto de las prácticas/medidas de manejo evaluadas. Esto se condice con la asunción de que la metodología del VMA está orientada a la exploración de mejoras en planteos productivos, pero sin implicar cambios en la estrategia que rige el sistema (Chapman et al., 2011).

La estimación del valor marginal del alimento se perfila como un indicador que puede ser de gran utilidad en la planificación y manejo de los recursos forrajeros de los sistemas de producción ganaderos (Chapman et al., 2011). Este indicador constituye una herramienta cuantitativa para analizar opciones de manejo contemplando las oportunidades y situaciones particulares de

producción, incrementándose el potencial de esta herramienta (utilidad/relevancia), cuando se incluyen en el análisis los desvíos en la producción forrajera y su frecuencia de presentación (Capítulo 4). La comparación de la oferta del mercado o propia producción de alimentos para los animales con el valor marginal calculado para distintas situaciones (tipo de año) y su probabilidad de presentación (ver probabilidad acumulada, Capítulo 4, Figura 6). Por ejemplo, en términos prácticos hay múltiples alternativas para proveer alimento en otoño en los sistemas de cría estudiados y que fueron discutidos ampliamente en el Capítulo 4. Entre ellos la suplementación con heno, los verdes de avena, el sorgo diferido, la fertilización nitrogenada de pasturas a principios de otoño o silos de autoconsumo para el suministro de concentrados balanceados (granos, suplementos minerales y fuentes proteicas), cuyos valores expresados por kg MS (corregido por la energía metabolizable que contienen) pueden ser comparados con el VMA, tal como se presenta en la Figura 2. El VMA aumenta de manera sostenida con la carga, siendo los promedios -0,008; 0,013; 0,038; 0,081 y 0,1 U\$S/ kgMS para 0,9; 1,0; 1,1; 1,2 y 1,3 respectivamente, entonces sí se compara el costo de por ejemplo la producción adicional de forraje a través de la fertilización nitrogenada (0,04 U\$S/kgMS) vemos que su implementación resultaría viable en planteos productivos que tengan al menos una carga animal de 1,1 cab/ha. Sin embargo, es importante tener en cuenta la frecuencia en que la práctica será rentable, lo cual se puede dimensionar relacionando estos datos con la función de probabilidad acumulada del VMA (Capítulo 4, Figura 6). Esta comparación permitió dimensionar la relación costo-beneficio en relación al impacto biofísico esperado en el sistema, pero traducido en términos económicos.

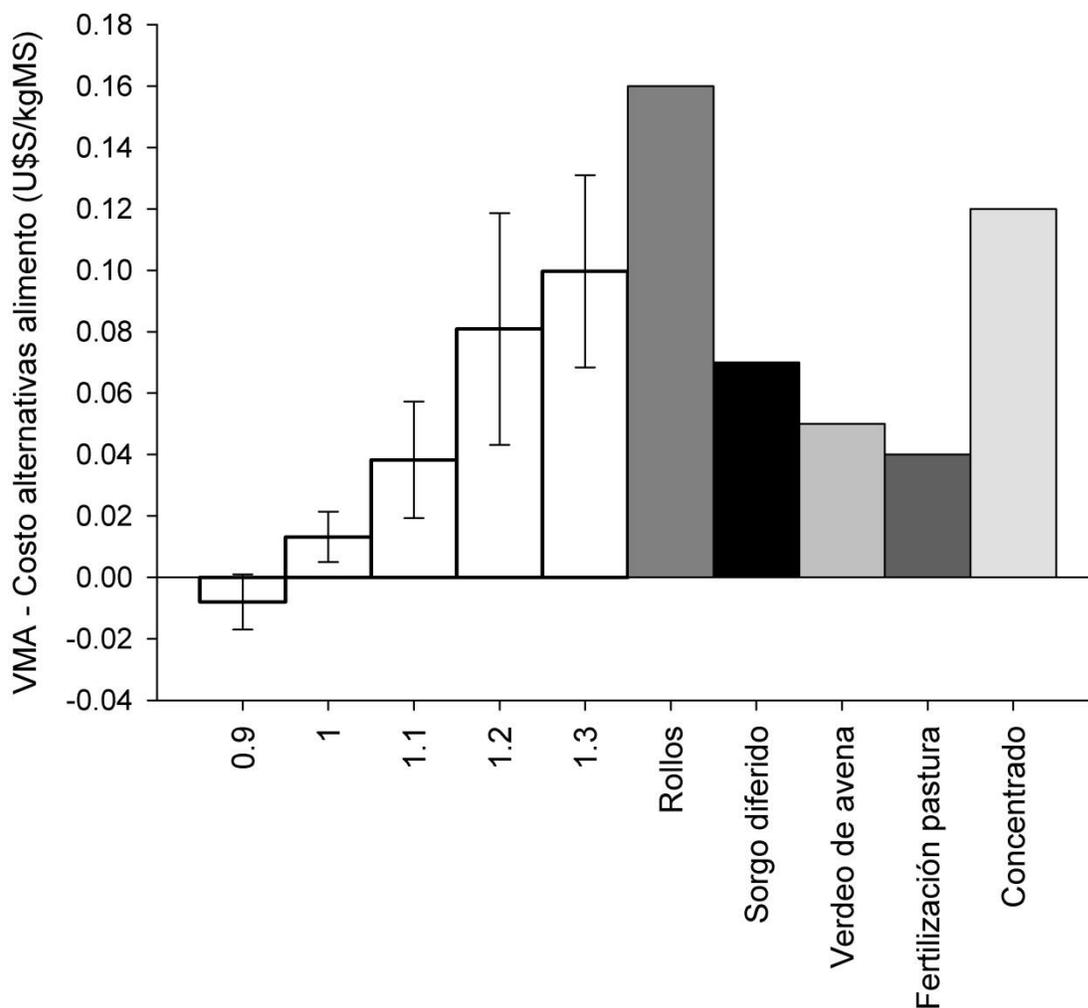


Figura 2: Comparación de distintas fuentes de alimento en relación al valor marginal del alimento extra (VMA) adicionado en otoño a planteos de cría vacuna de la Depresión de Laprida.

La utilización del valor marginal del alimento permitió identificar la época donde una oferta extra de alimento tendría el mayor impacto, como el caso de otoño (Capítulo 4, Figura 5). Esto posibilita, de un modo práctico y sencillo, no solamente mensurar y comparar que tan atractivas resultan distintos recursos forrajeros o alimentos disponibles, sino también la oportunidad económica de aumentar la oferta de alimento estacional mediante la fertilización N de las pasturas en virtud de tener estimadas las posibilidades de respuesta a la aplicación de este nutriente. En este sentido, los resultados de la estimación del VMA confirman los obtenidos en el análisis de la fertilización nitrogenada, donde la aplicación de nitrógeno en otoño surge como la opción de mayor impacto en la productividad y estabilidad del sistema de cría vacuna analizado.

Oportunidades y desafíos para el uso de modelos de simulación para colaborar con la identificación de oportunidades de innovación de estos sistemas.

El uso de los modelos de simulación como laboratorios de aprendizaje colectivo tiene posibilidades de fomentar una mejor interacción con la investigación de campo, formación interdisciplinaria de recursos humanos bajo un enfoque del tipo investigación-acción, trabajo que se ve facilitado por un buen sustento de cooperación institucional (Machado y Berger, 2012). El desarrollo de la tesis contó con la interacción con referentes de distintas áreas temáticas y el respaldo científico-técnico de especialistas a través de la complementación y potenciación de capacidades de instituciones como la Universidad Nacional del Centro de la Pcia. de Buenos Aires (UNICEN) y la unidad integrada INTA Balcarce, que incorporara a la Universidad Nacional de Mar del Plata. En esta última, las actividades estuvieron insertas en proyectos institucionales, instrumentos para la ejecución de los temas priorizados por los programas y planes del INTA tanto de investigación como de extensión, asegurando la pertinencia y relevancia de la temática para los sistemas de productivos de la región bajo estudio. Este marco de trabajo se encuentra formalizado mediante una red interinstitucional de modelación de sistemas agropecuarios de la región Buenos Aires Sur (MODASUR) donde intervienen distintas Instituciones (INTA, UNCPBA, UNMDP, CIC –Comisión de Investigaciones Científicas y el Instituto de la Promoción de la Carne Vacuna Argentina, IPCVA). Esta carta acuerdo tiene como propósito "Identificar de forma interinstitucional áreas de vacancia para la ganadería e interactuar para coordinar acciones con distintos equipos institucionales que trabajan en modelación, investigación a campo y transferencia" (Machado et al., 2015). Del mismo modo, se fomentó y posibilitó las vinculaciones y trabajos conjuntos con grupos de referencia de Australia, con la Universidad de Melbourne (Capítulo 2 y 3) y con CSIRO –, Toowoomba (Capítulo 4).

El valor de la modelación como complemento de la investigación de campo es ampliamente reconocido, particularmente donde se incluyen los impactos productivos, económicos y ambientales (Beukes et al., 2014; Romera et al., 2017; Taylor y Eckard, 2016 y Vogeler y Cichota, 2016). La modelación pre-experimental es cada vez más importante para desarrollar y evaluar las hipótesis, el diseño de tratamientos y los datos a registrar, al igual que la post-experimental permitiendo extender, difundir ampliamente los resultados y explorar interacciones complejas y/o efectos adicionales de los tratamientos experimentales (Eckard et al., 2014).

A partir de esta tesis, se abrió un espacio de discusión y análisis en relación al funcionamiento del modelo y cuestiones surgidas en un módulo experimental de pasturas de festuca integrado a un campo comercial de la zona de Laprida, en el marco del Proyecto con Enfoque Territorial Centro Oeste y el Proyecto de pasturas ecológicamente eficientes y de bajo carbono en ganadería (INTA, 2013b). Esto dio origen al trabajo de evaluación de épocas y área a fertilizar con nitrógeno en pasturas (Capítulo 3). Este proceso dio inicio a una secuencia de ciclos de diagnóstico y análisis del módulo productivo, discusión y prueba de estrategias de manejo con el apoyo de los modelos de simulación para luego abrir la posibilidad de la utilización de esta información como retroalimentación a las actividades de experimentación del módulo (Martín et al 2011, Figura 3). Esta experiencia abre un espacio promisorio para el fortalecimiento y consolidación de la articulación investigación–extensión en un marco de trabajo interdisciplinario (Machado et al. 2015), donde la captura de la complejidad de las interacciones entre los componentes de los sistemas sería casi imposible de cuantificar sin la utilización de un enfoque cuantitativo riguroso a través de modelos de simulación que integren los procesos críticos de estos sistemas (Johnson, 2017).

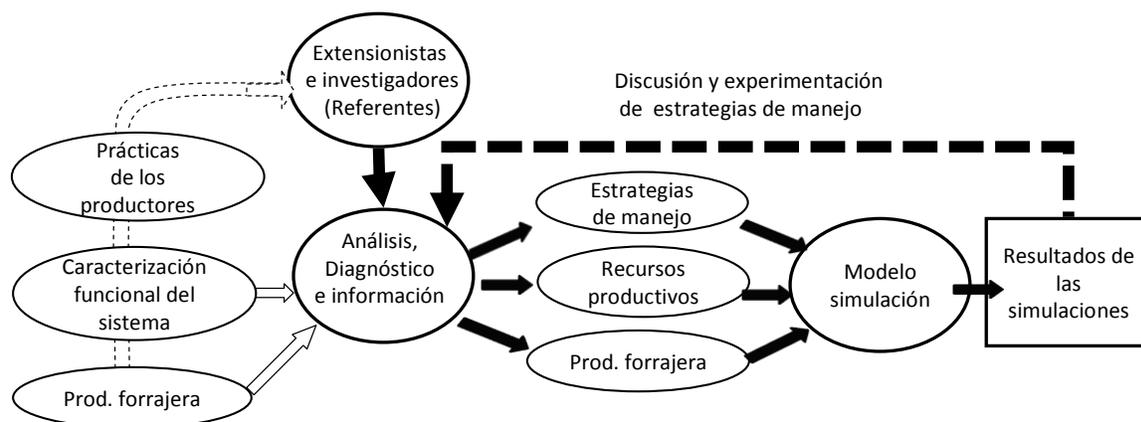


Figura 3: Evaluación de alternativas tecnológicas en el marco de un proceso participativo (adaptado de Martín et al., 2011).

Los sistemas de producción agropecuarios están sujetos crecientemente a presiones ambientales, lo cual sucede en un contexto donde los márgenes económicos son cada vez más estrechos, generando una demanda adicional en la habilidad de las áreas de investigación y extensión para evaluar y promover nuevas tecnologías para lograr mejoras en la performance financiera y ambiental de los sistemas de base pastoril (Snow et al., 2014). Para lograr esa integralidad, se requieren modelos y/o metodologías de modelación de creciente complejidad (Eckard et al., 2014). Frente a esta realidad,

la existencia de un marco de articulación interinstitucional y multidisciplinario, constituye una fortaleza de las capacidades de trabajo que propician ulteriores avances en la temática. Dentro de los posibles áreas de estudio, seguramente se deba considerar la inclusión de diferentes recursos forrajeros, inclusión de recría y terminación, abordaje de cuestiones ambientales (emisiones GHG) y socio-productivas, entre otros aspectos de importancia.

Conclusiones

A partir de los trabajos y resultados de esta tesis surgieron distintos aspectos relevantes para la investigación y para la innovación en tecnologías/estrategias de manejo de los sistemas ganaderos de base pastoril de la Depresión de Laprida, Argentina. Estos se describen a continuación:

- El modelo de simulación DairyMod simuló con una precisión razonable la acumulación de masa forrajera de pasturas de festuca en ambientes templados de Argentina en un amplio rango de condiciones climáticas y de manejo, incluyendo estaciones del año, sin la aplicación y con dosis moderadas de fertilizante nitrogenado y riego. Proyectado en estudios de sistemas, la utilización de la fertilización nitrogenada durante otoño o primavera presentó los mejores resultados económicos (MB y rentabilidad productiva) cuando se aplicó en el 20% de la superficie del establecimiento. El impacto de la fertilización en situaciones de año promedio fue mayor en los planteos de carga alta con 1,3 cab/ha y cuando se incluyó el efecto de la variabilidad climática, donde los otoños secos resultaron más negativos que las primaveras secas para la tasa de preñez y la performance económica, la carga intermedia con 1,1 cab/ha resultó la alternativa en que hubo una mejor respuesta, al permitir lograr resultados similares a la situación de año normal.
- La variabilidad climática surge como una variable clave a considerar en el análisis de sistemas de producción pastoriles y las tecnologías plausibles de incorporarse a estos. Las implicancias y conclusiones para la adopción de tecnologías cambian de manera contundente sí se consideran solo las situaciones promedio o sí se consideran las fluctuaciones climáticas. La producción de terneros y el MB se incrementó linealmente con la carga animal en los años “normales”, sin embargo ante condiciones de sequía los planteos de mayores cargas fueron más afectados, condicionando su estabilidad productiva-económica y el impacto de las medidas de manejo como la fertilización y el agregado de alimento adicional. El impacto

de la fertilización en los sistemas de producción fue mayor ante condiciones de sequía donde la productividad de los sistemas se veía reducido, contribuyendo a minimizar el impacto negativo de esta condición climática. Esta mayor vulnerabilidad de los planteos de cargas medias-altas se vió reflejada en la estimación del VMA, el cual se incrementó marcadamente cuando se incluyó la variabilidad climática.

- La estimación del valor marginal del alimento indican que este resultó mayor en las situaciones de otoño seco, particularmente a cargas mayores a 0,9 cab/ha, siendo el otoño el momento más oportuno para la adición de alimento extra en planteos con cargas de hasta 1,2 cab/ha, y en la situación de mayor carga el invierno fue la época más propicia.
- Un importante activo del proyecto es la exitosa integración de distintos tipos de modelos biofísicos y económicos de acuerdo a los objetivos planteados. Esto permitió la cuantificación de medidas de manejo de los recursos forrajeros, tales como la fertilización nitrogenada, y la implementación del cálculo del valor marginal del alimento.

La tesis en su conjunto hace manifiesta, en términos cuantitativos, la necesidad de integrar/escalar los resultados de la investigación disciplinaria a nivel de los sistemas de producción y también en términos económicos, incorporando los efectos de la variabilidad climática, de modo de reducir la brecha entre la producción científica y la generación de innovaciones en los emprendimientos comerciales. Así mismo, se destaca la aplicación de metodologías que permiten sintetizar información resultante de estudios de modelación complejos, las cuales posiblemente puede facilitar la labor de transferencia y extensión.

Bibliografía

Agnusdei, M., Assuero, S.G., Fernández Grecco, R.C., Cordero, J.J., Burghi, V.H., 2007. Influence of sward condition on leaf tissue turnover in tall fescue and tall wheatgrass swards under continuous grazing. *Grass and Forage Science* 62, 55-65. 10.1111/j.1365-2494.2007.00561.x

Agnusdei, M., Assuero, S.G., Lattanzi, F.A., Marino, A., 2010. Critical N concentration can vary with growth conditions in forage grasses: implications for plant N status assessment and N deficiency diagnosis. *Nutr Cycl Agroecosyst* 88, 215-230. 10.1007/s10705-010-9348-6

Arelovich, H.M., Bravo, R.D., Martínez, M.F., 2011. Development, characteristics, and trends for beef cattle production in Argentina. *Animal Frontiers* 1, 37-45. 10.2527/af.2011-0021

Barrett, P.D., Laidlaw, A.S., Mayne, C.S., 2004. An evaluation of selected perennial ryegrass growth models for development and integration into a pasture management decision support system *Journal of Agricultural Science* 142: 327-334.

Bell, L.W., Robertson, M.J., Revell, D.K., Lilley, J.M., Moore, A.D., 2008. Approaches for assessing some attributes of feed-base systems in mixed farming enterprises. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 789-798. <http://dx.doi.org/10.1071/EA07421>

Bell, L.W., Moore, A.D., Thomas, D.T., 2016. Feed-base strategies that reduce risk of feedgaps in livestock systems across Australia's mixed farming zone. In: *Production A.S.O.A. (Ed.), Animal Production in Australia Proceedings of the 31st Biennial Conference of the Australian Society of Animal Production*, (Adelaide, p. ID 1118).

Ben Touhami, H., Bellocchi, G., 2015. Bayesian calibration of the Pasture Simulation model (PaSim) to simulate European grasslands under water stress. *Ecological Informatics* 30, 356-364. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecoinf.2015.09.009>

Ben Touhami, H., Lardy, R., Barra, V., Bellocchi, G., 2013. Screening parameters in the Pasture Simulation model using the Morris method. *Ecological Modelling* 266, 42-57. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2013.07.005>

Berger, H., Machado, C.F., Agnusdei, M.G. 2010. Review of climate-driven temperate pasture models applied to whole farm simulations En: MACHADO, C.F. (Eds.) An overview of research on pastoral-based systems in the southern part of south America. Tandil. Editorial Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. pp 18-27.

Beukes, P.C., Gregorini, P., Romera, A.J., Woodward, S.L., Khaembah, E.N., Chapman, D.F., Nobilly, F., Bryant, R.H., Edwards, G.R., Clark, D.A., 2014. The potential of diverse pastures to reduce nitrogen leaching on New Zealand dairy farms. *Animal Production Science* 54, 1971-1979. <http://dx.doi.org/10.1071/AN14563>

Bilotto, F., 2014. Manejo ecofisiológico de pasturas de festuca para una ganadería de alto rendimiento, Fac. Cs. Vet. UNICEN, p. 68.

Bland, J.M., Altman, D.G., 1986. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurements. *The Lancet* 327, 307-310.

Browne, N.A., Eckard, R.J., Behrendt, R., Kingwell, R.S., 2011. A comparative analysis of on-farm greenhouse gas emissions from agricultural enterprises in south eastern Australia. *Animal Feed Science and Technology* 166–167, 641-652. <http://dx.doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.045>

Chapman, D., Rawnsley, R.P., Cullen, B., Clark, D., 2013. Inter-annual variability in pasture herbage accumulation in temperate dairy regions: causes, consequences, and management tools, *Proceedings of the 22nd International Grassland Congress, Sydney, Australia*, pp. 798-805.

Chapman, D.F., Cullen, B.R., Johnson, I.R., Beca, D., 2009. Interannual variation in pasture growth rate in Australian and New Zealand dairy regions and its consequences for system management. *Animal Production Science* 49, 1071-1079. <http://dx.doi.org/10.1071/AN09054>

Chapman, D.F., Dassanayake, K., Hill, J.O., Cullen, B.R., Lane, N., 2012. Forage-based dairying in a water-limited future: Use of models to investigate farming system adaptation in southern Australia. *Journal of Dairy Science* 95, 4153-4175.

- Chapman, D.F., Kenny, S.N., Beca, D., Johnson, I.R., 2008a. Pasture and forage crop systems for non-irrigated dairy farms in southern Australia. 1. Physical production and economic performance. *Agr. Syst.* 97, 108-125. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2008.02.001>
- Chapman, D.F., Kenny, S.N., Beca, D., Johnson, I.R., 2008b. Pasture and forage crop systems for non-irrigated dairy farms in southern Australia. 2. Inter-annual variation in forage supply, and business risk. *Agr. Syst.* 97, 126-138. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2008.02.002>
- Chapman, D.F., Kenny, S.N., Lane, N., 2011. Pasture and forage crop systems for non-irrigated dairy farms in southern Australia: 3. Estimated economic value of additional home-grown feed. *Agr. Syst.* 104, 589-599. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2011.06.001>
- Cullen, B.R., Eckard, R.J., Callow, M.N., Johnson, I.R., Chapman, D.F., Rawnsley, R.P., Garcia, S.C., White, T., Snow, V.O., 2008. Simulating pasture growth rates in Australian and New Zealand grazing systems. *Australian Journal of Agricultural Research* 59, 761-768. <http://dx.doi.org/10.1071/AR07371>
- Cullen, B.R., Johnson, I.R., Eckard, R.J., Lodge, G.M., Walker, R.G., Rawnsley, R.P., McCaskill, M.R., 2009. Climate change effects on pasture systems in south-eastern Australia. *Crop & Pasture Science* 60, 933-942.
- Eckard, R.J., Snow, V.O., Johnson, I.R., Moore, A.D., 2014. The challenges and opportunities when integrating animal models into grazing system models for evaluating productivity and environmental impact. *Animal Production Science* 54, 1896-1904. <http://dx.doi.org/10.1071/AN14551>
- Fariña, S.R., Alford, A., Garcia, S.C., Fulkerson, W.J., 2011. An integrated assessment of business risk for pasture-based dairy farm systems intensification. *Agr. Syst.* 115, 10-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2012.10.003>
- Insúa, J.R., Agnusdei, M.G., Machado, C.F., Berger, H., 2016. Modelación de la calidad nutritiva de pasturas defoliadas. *Rev Investigación Agropecuaria (RIA)* 42, 317-323.

Insua, J.R., Di Marco, O.N., Agnusdei, M.G., 2013. Calidad nutritiva de láminas de “festuca alta” (*Festuca arundinacea* Schreb) en rebrotes de verano y otoño. *Rev Investigación Agropecuaria (RIA)* 39, 267-272.

INTA (2013a) Proyecto Nacional 262921 “Producción, calidad y manejo sustentables de las pasturas templadas y megatérmicas” <https://inta.gob.ar/proyectos/AEFP-262921> (consulta 12 de febrero de 2018)

INTA (2013b) Proyecto Regional 720142 (CERBAS) “Contribución a la mejora sustentable de la productividad ganadera en el centro y sur de Buenos Aires” <https://inta.gob.ar/proyectos/BASUR-720142> (consulta 12 de febrero de 2018) Johnson, I.R., Chapman, D.F., Snow, V.O., Eckard, R.J., Parsons, A.J., Lambert, M.G., Cullen, B.R., 2008. DairyMod and EcoMod: biophysical pasture-simulation models for Australia and New Zealand. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 48, 621-631. <http://dx.doi.org/10.1071/EA07133>

Johnson T. H. (2017) Turning knowledge into practical benefit: a producer case-study increasing the return on investment in science. *Animal Production Science*, 1-12. <https://doi.org/10.1071/AN16038>

Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18, 267-288. [http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301\(02\)00108-9](http://dx.doi.org/10.1016/S1161-0301(02)00108-9)

Larocque, G.R., Bhatti, J.S., Ascough II, J.C., Liu, J., Luckai, N., Mailly, D., Archambault, L., Gordon, A.M., 2010. An analytical framework to assist decision makers in the use of forest ecosystem model predictions. *Environmental Modelling & Software* xxx (in press), 1-9.

Lattanzi, F.A., 1998. Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el crecimiento de festucas de tipo templado y mediterráneo, Programa de Posgrado en Ciencias Agrarias - Curso de Posgrado en Producción Animal. Universidad Nacional de Mar del Plata (UNMdP), Balcarce, p. 161.

Lemaire, G., Salette, J., 1984. Relation entre dynamique de Coissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de gramíes fourrageas. I. Etude de l'effet du milieu. *Agronomie* 4, 423-430.

Li, F.Y., Snow, V.O., Holzworth, D.P., 2011. Modelling the seasonal and geographical pattern of pasture production in New Zealand. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 54, 331-352. 10.1080/00288233.2011.613403

Machado, C., Bilotto, F., Berger, H., Mangudo, P., Arroqui, M., 2015. Evaluación de oportunidades de innovación de sistemas productivos de carne bovina con modelos de simulación, XXIV Congreso de la Asociación Latinoamericana de Producción Animal y XL Congreso de la Sociedad Chilena de Producción Animal, Sochipa. A. G. , Puerto Varas, Chile, pp. 69-73.

Machado, C., Burges, J.C., Berger, H., Faverín, C., Steffanazzi, I., 2010a. First steps in the use of a web whole-farm model to foster the feedback between beef cattle extension and research. , in: Machado, C.F., Wade, M., Carneiro Da Silva, S., Agnusdei, M., Fachio Carvalho, P., Morris, S.T., Beskow, W., Montossi, F. (Eds.), *An Overview of Research on Pastoral-Based Systems in South America*. . UNCPBA, Tandil, Argentina.

Machado, C.F., Berger, H., 2012. Uso de modelos de simulación para asistir decisiones en sistemas de producción de carne. *Rev. Arg. de Prod. Anim.* 32, 87-105.

Machado, C.F., Morris, S.T., Hodgson, J., Arroqui, M.A., Mangudo, P.A., 2010b. A web-based model for simulating whole-farm beef cattle systems. *Computer and Electronics in Agriculture* 74, 129-136. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2010.07.007>

Marino, A., Agnusdei, M., 2007. Manejo estacional del suministro de nitrógeno en pasturas de *Festuca arundinacea* Scrieb (sudeste bonaerense, Argentina): Crecimiento y eficiencia en el uso de recursos [Seasonal management of N provision to tall fescue pastures (south-east of the Buenos Aires Province, Argentina): Pasture growth and seasonal resource use efficiencies.], APPA - ALPA, Cusco, Perú, pp. 1-6.

Martin, G., Theau, J.-P., Therond, O., Martin-Clouaire, R., Duru, M., 2011. Diagnosis and simulation: a suitable combination to support farming systems design. *Crop and Pasture Science* 62, 328-336. <http://dx.doi.org/10.1071/CP10361>

Mazzanti, A., Arosteguy, J.C., 1985. Comparación del rendimiento estacional de forraje de cultivares de *Festuca arundinacea* Schreb. (Comparison of the forage seasonal yield of cultivars of *festuca arundinacea* Schreb.). *Revista Argentina de Producción Animal* 5, 157-165.

McCall, D.G., Bishop-Hurley, G. J., 2003. A pasture growth model for use in a whole-farm dairy production model. *Agr. Syst.* 76, 1183-1205.

Moore, A.D., Holzworth, D.P., Herrmann, N.I., Brown, H.E., de Voil, P.G., Snow, V.O., Zurcher, E.J., Huth, N.I., 2014. Modelling the manager: Representing rule-based management in farming systems simulation models. *Environmental Modelling & Software* 62, 399-410. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.09.001>

Pacín, F., Oesterheld, M., 2015. Closing the technological gap of animal and crop production through technical assistance. *Agric. Syst.* 137, 101–107. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2015.04.007>.

Oesterheld, M., Paruelo, J.M., 2014. Sistema de seguimiento forrjero. Laboratorio de Análisis Regional y Teledetección-IFEVA-Facultad de agronomía-UBA.

Rawnsley, R.P., Cullen, B.R., Turner, L.R., Donaghy, D.J., Freeman, M., Christie, K.M., 2009. Potential of deficit irrigation to increase marginal irrigation response of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.) on Tasmanian dairy farms. *Crop and Pasture Science* 60, 1156-1164. <http://dx.doi.org/10.1071/CP08446>

Rearte, D.H., Pordomingo, A.J., 2014. The relevance of methane emissions from beef production and the challenges of the Argentinean beef production platform. *Meat Science* 98, 355-360. <http://dx.doi.org/10.1016/j.meatsci.2014.06.021>

Recavarren, P., 2016. La producción agropecuaria en Olavarría, Benito Juárez, Laprida y Gral. La Madrid: evolución y desafíos a futuro, in: INTA, E. (Ed.), p. 143.

Robertson, M.J., Pannell, D.J., Chalak, M., 2012. Whole-farm models: a review of recent approaches. *Australian Farm Business Management Journal* 9, 13-26.

Romera, A.J., 2004. Simulation of cow-calf systems in the Salado region of Argentina. Massey University, Palmerston North, New Zealand.

Romera, A.J., Doole, G.J., Beukes, P.C., Mason, N., Mudge, P.L., 2017. The role and value of diverse sward mixtures in dairy farm systems of New Zealand: An exploratory assessment. *Agr. Syst.* 152, 18-26. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agsy.2016.12.004>

Romera, A.J., Morris, S.T., Hodgson, J., Stirling, W.D., Woodward, S.J.R., 2005a. Comparison of haymaking strategies for cow-calf systems in the Salado Region of Argentina using a simulation model. 1. Effect of herbage mass at cutting and cow stocking rate under a rigid system of management. *Grass and Forage Science* 60, 399-408. 10.1111/j.1365-2494.2005.00492.x

Romera, A.J., Morris, S.T., Hodgson, J., Stirling, W.D., Woodward, S.J.R., 2005b. Comparison of haymaking strategies for cow-calf systems in the Salado Region of Argentina using a simulation model. 2. Incorporation of flexibility in the decision rules. *Grass and Forage Science* 60, 409-416. 10.1111/j.1365-2494.2005.00493.x

Romera, A.J., Morris, S.T., Hodgson, J., Stirling, W.D., Woodward, S.J.R., 2005c. Comparison of haymaking strategies for cow-calf systems in the Salado Region of Argentina using a simulation model. 3. Exploratory risk assessment. *Grass and Forage Science* 60, 417-422. 10.1111/j.1365-2494.2005.00494.x

Scott, J.F., Cacho, O.J., Scott, J.M., 2013. Economic risk analysis of different livestock management systems. *Animal Production Science* 53, 788-795. <http://dx.doi.org/10.1071/AN11249>

Snow, V.O., Rotz, C.A., Moore, A.D., Martin-Clouaire, R., Johnson, I.R., Hutchings, N.J., Eckard, R.J., 2014. The challenges and some solutions to process-based modelling of grazed agricultural systems. *Environ. Model. Softw.* 62 (0), 420-436.

Taylor, C., Eckard, R., 2016. Comparative analysis of greenhouse gas emissions from three beef cattle herds in a corporate farming enterprise. *Animal Production Science* 56, 482-494. <http://dx.doi.org/10.1071/AN15579>

Tedeschi, L.O., 2006. Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agr. Syst.* 89, 225–247.

van Delden, H., Seppelt, R., White, R., Jakeman, A.J., 2010. A methodology for the design and development of integrated models for policy support. *Environmental Modelling & Software* (in press), 1-14. 10.1016/j.envsoft.2010.03.021

Vogeler, I., Cichota, R., 2016. Deriving seasonally optimal nitrogen fertilization rates for a ryegrass pasture based on agricultural production systems simulator modelling with a refined AgPasture model. *Grass and Forage Science* 71, 353-365. 10.1111/gfs.12181

Voinov, A., Bousquet, F., 2010. Modelling with stakeholders. *Environmental Modelling & Software* 25, 1268-1281.

Woodward, S., J., R., , Romera, A.J., Lovatt, S., J., 2008. Better simulation modelling to support farming systems innovation: review and synteshis. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 51, 235-252.

ANEXO

Revisión de modelos de simulación de pasturas clima dependientes para utilizarse en la simulación de sistemas de producción ganaderos.¹

Introducción

Un factor clave para los modelos de simulación de sistemas ganaderos es que tan realista es la estimación del crecimiento del forraje. A tal fin hay disponibles distintas alternativas en la literatura, por lo cual se llevó a cabo una breve revisión de modelos de simulación clima dependiente de pasturas templadas. El objetivo del presente trabajo fue analizar la representación de los procesos de crecimiento de pasturas en modelos de simulación biofísicos disponibles en la literatura a los fines de seleccionar los más apropiados para aplicarlos a la evaluación de sistemas de producción locales.

Materiales y métodos

Se comparó las estrategias y modo de representación de los procesos biológicos más relevantes para la simulación del crecimiento de pasturas. Se identificaron 6 modelos, analizándose 3 de ellos: GRAZPLAN (GRP, Moore et al. 1997), el modelo de McCall's (MC, McCall & Bishop Hurley, 2003; Romera et al. 2009), y el submodelo de crecimiento de forrajes del modelo de Hurley (HPM, Thornley et al. 1989).

Resultados

Las diferencias entre los modelos radican esencialmente en la simulación del crecimiento de las pasturas (Tabla 1). Los modelos de McCall's y GRASPLAN vinculan directamente este a la interceptación de luz, pero en el caso del modelo de Hurley el crecimiento nuevo está asociado a las concentraciones de sustratos (carbono y nitrógeno). Adicionalmente MC y GRP abordan la representación del efecto del pastoreo sobre el índice de área foliar (IAF) a través de una función

¹ Berger, H., Machado, C.F., Agnusdei, M.G. 2010. Review of climate-driven temperate pasture models applied to whole farm simulations En: MACHADO, C.F. (Eds.) An overview of research on pastoral-based systems in the southern part of south America. Tandil. Editorial Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Argentina. pp 18-27.

empírica que relaciona las masas forrajeras de pre y pos-pastoreo. Por otro lado, HPM resuelve esto modelando la dinámica de hojas por edades, aunque incrementando en gran medida la complejidad del modelo. Por último, merece destacarse el procedimiento que utiliza MC para los cálculos de la senescencia de las láminas y la dinámica de la fenología de GRP.

Tabla 1: Comparación de las principales características de tres modelos de simulación clima dependiente de pasturas.

Modelo	Procesos						
	IL	FOT	CP	SEN	FEN	VE	Dg
HPM	Mecanístico	Empírico	Mecanístico	Categorías de edades de hojas.	Vegetativo	Lámina y tallos (4 edades) Raíces: 4 edades	No modelado
GRP	Mecanístico	Empírico	Empírico	Categorías de tejidos	Fenología de la planta	Material vivo, senescente, muerto y broza. Raíces: un solo compartimento	5 clases de digestibilidad
MC	Empírico	Empírico	Empírico	Vida foliar	Vegetativo/reproductivo	Material vivo y muerto.	No modelado

HPM: Hurley Pasture (Thornley et al. 1989), **GRP,** GRAZPLAN (, Moore et al. 1997), **MC:** McCall (McCall & Bishop Hurley, 2003; Romera et al. 2009), Intercepción luz (IL), Eficiencia fotosíntesis (FOT), nuevo crecimiento pastura (CP) senescencia (SEN), Fenología (FEN), variables de estado de la planta (VE) y digestibilidad (Dg).

Conclusiones

Los modelos de simulación de sistemas de producción ganaderos requieren la simulación de la fenología y digestibilidad de las pasturas (así como el IAF y senescencia, vinculados a dichas variables), de modo de poder estimar el efecto de distintos manejos del pastoreo tanto sobre las plantas como los animales. En función de lo antedicho se prosigue en la evaluación y calibración para las condiciones locales del modelo DairyMod - EcoMod/SGS (Johnson et al. 2003) que fuera desarrollado tomando como base el modelo de Hurley, incluyendo la modelación de la digestibilidad del forraje.

Bibliografía

Johnson, I. R., Lodge, G. M. And White, R. E. (2003) The sustainable grazing systems pasture model: description, philosophy and application to the SGS national experiment. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 43 (711-728)

McCall, D. G. and Bishop-Hurley, G. J. (2003). A pasture growth model for use in a whole-farm dairy production model. *Agricultural Systems* 76, 1183-1205.

Moore, A., D., Donnelly, J., R. and Freer, M. (1997). GRAZPLAN: Decision support systems for Australian grazing enterprises. III. Pasture growth and soil moisture submodels, and the GrassGro DSS. *Agricultural Systems* 55(4), 535-582.

Romera, A. J.; McCall, D. G.; Lee, J. M. and Agnusdei, M. G. (2009). Improving the McCall herbage growth model. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 52(477-494).

Thornley, J. H. M. & Verberne, E. L. J. (1989). A model of nitrogen flows in grassland. *Plant, Cell and Environment* 12, 863-886.