



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY

Efecto de la secuencia de alimentación sobre fermentación ruminal, absorción de nutrientes y producción de leche: modelo de simulación

Francisco José Elizondo Caamaño

Magíster en Ciencias Agrarias

opción Ciencias Animales

Diciembre 2021

Tesis aprobada por el tribunal integrado por la Ing. Agr. (PhD) Virginia Beretta (Presidente), Ing. Agr. (PhD) Alejandro Mendoza (vocal), Ing. Agr. (PhD) Francisco Dieguez (vocal), el 17 de diciembre de 2021. Autor: Ing. Agr. Francisco José Elizondo Caamaño. Director: Ing. Agr. (PhD) Pablo Chilibroste.

Para Lourdes, Martín y Santiago, mis soles

AGRADECIMIENTOS

A la UDELAR en su conjunto y la Unidad de Posgrados en particular, por contemplar a quienes ejercemos nuestras profesiones, permitiéndonos continuar con nuestra formación académica.

A Abbas Ahmadi y Peter Robinson, por su invaluable apoyo y contribución en el desarrollo de este trabajo.

Al “Chili”. Excelente profesor, insuperable director, pero ante todo, un enorme amigo.
¡Gracias por no dar por perdido ningún patito!

A mis padres, por darme la oportunidad de formarme en esta hermosa profesión.

A Lourdes, Martín y Santiago, por acompañarme siempre en este camino.

TABLA DE CONTENIDO

	página
PÁGINA DE APROBACIÓN.....	II
AGRADECIMIENTOS	IV
RESUMEN	VIII
SUMMARY	IX
1 <u>INTRODUCCIÓN</u>	1
1.1 EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS DE RUMEN.....	2
1.1.1 <u>Descripción del Modelo “CTR Dairy”</u>	7
1.2 DESARROLLO DE MODELOS PARA LA PREDICCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE.....	12
1.3 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS	13
1.4 OBJETIVO GENERAL.....	15
1.4.1 <u>Objetivos específicos</u>	15
2 <u>MATERIALES Y MÉTODOS</u>	17
2.1 EVALUACIÓN DE LA CONVERSIÓN DE LA PROGRAMACIÓN EN SMART A VBA.....	17
2.2 DESARROLLO DEL “MÓDULO DE PRODUCCIÓN DE LECHE” ..	17
2.2.1 <u>Potencial de producción en función de la Energía absorbida</u>	20
2.2.2 <u>Potencial de producción en función de la Proteína disponible</u>	21

2.2.3	<u>Potencial de producción en función de la glucosa y propiónico absorbido</u>	22
2.2.4	<u>Potencial de producción según ác. grasos de cadena larga absorbidos</u>	23
2.2.5	<u>Definición del Valor de Predicción</u>	24
2.3	VALIDACIÓN DEL MODELO “CTR DAIRY – PRODUCTION”	25
2.3.1	<u>Evaluación matemática de los modelos</u>	30
2.4	EXPERIMENTACIÓN CON “CTR DAIRY – PRODUCTION”	30
3	<u>RESULTADOS</u>	34
3.1	EVALUACIÓN DE LA TRANSCRIPCIÓN A VBA	34
3.2	VALIDACIÓN DEL MODELO “CTR DAIRY – PRODUCTION”	36
3.3	SIMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE ALIMENTACIÓN CON “CTR DAIRY – PRODUCTION”	42
4	<u>DISCUSIÓN</u>	48
4.1	TRANSCRIPCIÓN DEL MODELO “CTR DAIRY” A VBA.....	48
4.2	VALIDACIÓN DEL MODELO “CTR DAIRY – PRODUCTION”	48
4.3	EVALUACIÓN DE DIETAS CON “CTR DAIRY – PRODUCTION”	50
4.4	CONSIDERACIONES FINALES	51
5	<u>BIBLIOGRAFÍA</u>	53
6	<u>ANEXOS</u>	60

6.1	DESCRIPCIÓN DE LAS FRACCIONES DE ALIMENTO UTILIZADAS EN “CTR DAIRY” Y “CTR DAIRY – PRODUCTION”.	60
6.2	COMPOSICIÓN DE LAS DIETAS UTILIZADAS EN LOS TRABAJOS DE VALIDACIÓN DEL “CTR DAIRY - PRODUCTION”	61
6.3	ESQUEMAS DE ALIMENTACIÓN UTILIZADOS EN LOS TRABAJOS DE VALIDACIÓN DEL “CTR DAIRY - PRODUCTION”	68
6.4	COEFICIENTE DE CORRELACIÓN PARA TODAS LAS VARIABLES, ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON SMART Y VBA	79
6.5	EFECTO DE LA SECUENCIA DE ALIMENTACIÓN SOBRE FERMENTACIÓN RUMINAL, ABSORCIÓN DE NUTRIENTES Y PRODUCCIÓN DE LECHE: MODELO DE SIMULACIÓN	81

RESUMEN

Se desarrolló un modelo dinámico de simulación: “CTR Dairy – PRODUCTION” con capacidad de evaluar la digestión y absorción de nutrientes y su posterior transformación en producción de leche, según diferentes estrategias de alimentación integrando cantidad, tipo y momento de suministro de alimentos a los animales. Se partió del modelo “CTR Dairy” (Chilibroste et al., 2008) el cual fue implementado en Visual Basic for Applications Microsoft Office ®. Posteriormente, se desarrolló e integró a “CTR Dairy” un módulo con capacidad de estimar la producción de leche en función de la disponibilidad a nivel metabólico de sustratos glucogénicos (M_G), aminogénicos (M_P), lipogénicos (M_L) y la energía absorbida con estos nutrientes (M_E). El valor esperado de producción (VP) se determinó entre las estimaciones de M_E y M_P , utilizando el criterio de nutriente limitante. Para la validación del modelo se utilizaron 6 trabajos científicos, representando un amplio rango de estrategias de alimentación y producciones (10 a 40 l/d). Los resultados simulados por el modelo vs. los observados en los trabajos científicos se compararon mediante regresión lineal y el error cuadrático medio de predicción (MSPE). Las estimaciones por M_E y M_P tuvieron buenos ajustes en general ($R^2 = 0,92$ y $0,91$, y $MSPE = 38,4$ y $49,1$, respectivamente), siendo el VP el que mostró la mejor precisión y exactitud ($R^2 = 0,95$ y $MSPE = 17,4$, respectivamente). Se experimentó con el “CTR Dairy – PRODUCTION”, planteando dos situaciones productivas (Opción A y B), que utilizaban la misma cantidad y calidad de insumos, pero con diferencias en la estrategia de uso. El modelo predice producciones similares entre las opciones (29,5 vs. 29,49 l/d, para A y B respectivamente) según M_E , pero diferentes según M_P (29,51 vs. 29,14 l/d, en A y B respectivamente). Esta diferencia se puede explicar por una mayor disponibilidad de aminoácidos para absorber a nivel intestinal en la Opción A. “CTR Dairy - PRODUCTION” se presenta como una herramienta útil para la investigación y para su utilización a nivel comercial. Su estructura y nivel de detalle en el manejo de la información, habilita la posibilidad de incorporar nuevos parámetros a evaluar (ej.: excreción de nutrientes, emisiones de metano, etc.).

Palabras clave: modelo, simulación, dinámico, rumen, leche

SUMMARY

Effect of the feeding sequence on ruminal fermentation, nutrient absorption and milk production: simulation model

A dynamic simulation model was developed: "CTR Dairy - PRODUCTION" with the ability to evaluate the digestion and absorption of nutrients and their subsequent transformation into milk production, according to different feeding strategies, integrating quantity, type and moment of food supply to the animals. It was based on the "CTR Dairy" model (Chilibroste et al., 2008) which was implemented in Visual Basic for Applications Microsoft Office ®. Subsequently, a module with the ability to estimate milk production based on the availability at the metabolic level of glucogenic (M_G), aminogenic (M_P), lipogenic (M_L) substrates and the energy absorbed with these nutrients (M_E). The expected production value (VP) was determined between the M_E and M_P estimates, using the limiting nutrient criterion. For the validation of the model, 6 scientific works were used, representing a wide range of feeding strategies and productions (10 to 40 l / d). The results simulated by the model vs. those observed in the scientific works were compared using linear regression and the mean square error of prediction (MSPE). The estimates by M_E and M_P had good adjustments in general ($R^2 = 0.92$ and 0.91 , and $MSPE = 38.4$ and 49.1 , respectively), being the VP the one that showed the best precision and accuracy ($R^2 = 0.95$ and $MSPE = 17.4$, respectively). The "CTR Dairy - PRODUCTION" was experimented with, proposing two productive situations (Option A and B), which used the same quantity and quality of inputs, but with differences in the strategy of use. The model predicts similar productions between the options (29.5 vs. 29.49 l / d, for A and B respectively) according to M_E , but different according to M_P (29.51 vs. 29.14 l / d, in A and B respectively). This difference can be explained by a greater availability of amino acids to be absorbed at the intestinal level in Option A. "CTR Dairy - PRODUCTION" is presented as a useful tool for research and for commercial use. Its structure and level of detail in the management of the information enables the possibility of incorporating new parameters to be evaluated (eg: nutrient excretion, methane emissions, etc.).

Keywords: model, simulation, dynamic, rumen, milk

1 INTRODUCCIÓN

Los rumiantes poseen la capacidad de utilizar forrajes y productos de la industria agrícola (granos y subproductos industriales) para satisfacer sus requerimientos nutricionales. Esta capacidad es principalmente resultado de la fermentación microbiana y de otros procesos que tienen lugar en el rumen. Parte de la mejora en la eficiencia de producción de los rumiantes se ha basado en un conocimiento cuantitativo de los mecanismos y procesos que se dan en el rumen (France et al. 1982). Por esto, la digestión ruminal y sus procesos asociados (p. ej.: metabolismo microbiano, transacciones de nitrógeno, cinética de digestión de la fracción fibra, etc.) han sido objeto de estudio y modelación desde la década del 70.

El uso de modelos de simulación matemáticos permite lograr dos objetivos simultáneamente: primero, describir los mecanismos que se dan dentro de un sistema y expresar sus resultados cuantitativamente y, en segundo lugar, integrar los variados mecanismos de los subsistemas que contribuyen a un mismo sistema bajo estudio, siendo estos subsistemas tan diversos como digestión, metabolismo, lactación, crecimiento, etc. (Thornley y France, 2007).

En los sistemas pastoriles, las decisiones de los animales asociadas al comportamiento en pastoreo, tales como cuándo comenzar y terminar una comida, y la frecuencia e intensidad de consumo dentro de cada una de ellas, determinan la forma y la tasa de suministro de nutrientes para la digestión, el metabolismo y el crecimiento (Gregorini, 2012). Esto determina que en estos sistemas se dé una alimentación discontinua durante el día, donde muchas veces se combina cosecha de forraje mediante pastoreo con la utilización de otros alimentos (p. ej. concentrados y/o ensilajes), lo que plantea el desafío de contar con modelos que representen fielmente esta situación particular (Dijkstra y France, 1996a; Chilibruste et al., 2001).

En este sentido, si bien ha habido un gran desarrollo de modelos que simulen el funcionamiento ruminal (Baldwin et al. 1987; France et al. 1982; Fox et al. 1992; entre otros), pocos han integrado las variaciones dentro del día que se dan en los sistemas

pastoriles. Los trabajos realizados por Gregorini et al. (2013) y Chilibroste et al. (2001; 2008) han estado orientados a levantar estas restricciones, mediante el desarrollo de modelos matemáticos de simulación mecanísticos y dinámicos, que tienen en consideración la cualidad “no estacionaria” de los sistemas de alimentación pastoriles.

El modelo “CTR Dairy” desarrollado por Chilibroste et al. (2008) tiene la capacidad de predecir la disponibilidad de nutrientes glucogénicos, aminogénicos y lipogénicos a nivel metabólico para vacas lecheras en condiciones de alimentación discontinua, aunque sin integrar estos resultados con un resultado productivo en particular como, por ejemplo, la producción de leche.

Otra limitante que presenta el modelo “CTR Dairy”, es que fue implementado en el software SMART (Gerrits et al., 2008), el cual es un lenguaje de código cerrado, lo que presenta una serie de limitantes, como ser, posibilidades de generar una integración o vinculación con otros programas (modelos) actualmente existentes, desarrollar una interfaz que haga el uso del modelo más amigable para el usuario, así como el acceso a eventuales modificaciones/actualizaciones en la estructura del modelo.

Por esto se plantea la necesidad de desarrollar una herramienta que levante las restricciones en el estado actual del modelo “CTR Dairy”, y que además lo haga de fácil implementación, tanto a nivel científico como comercial.

1.1 EVOLUCIÓN DE LOS MODELOS DE RUMEN

Según la definición propuesta por Thornley y France (2007), un modelo matemático es una ecuación o un conjunto de ecuaciones que representan el comportamiento de un sistema. Existe una correspondencia entre las variables del modelo y las variables cuantificables en el sistema.

En la medida que el conocimiento sobre del funcionamiento del rumen se ha ido incrementando, se ha impulsado el desarrollo de modelos matemáticos capaces de

representar los procesos que ocurren a nivel del rumen. Los primeros modelos para representar el sistema ruminal datan de la década del '70. Baldwin et al. (citado por Chilibroste, 2002) en 1970 realizaron una integración cuantitativa del metabolismo combinado de la energía y la proteína con el objetivo de predecir la formación y utilización de productos finales de la fermentación en ovejas. Los resultados fueron limitados por la falta de datos de investigación y capacidad computacional, pero el comportamiento del modelo describía el rendimiento de ácidos grasos volátiles, producción de metano y masa microbiana, que parecía ser realista (Dijkstra y France, 1996a).

Reichl y Baldwin (1975), Baldwin et al. (1977) y Murphy et al. (1982; 1983; 1986), permitieron progresos significativos en la representación del metabolismo microbiano, las transacciones de nitrógeno, la cinética de digestión de la fracción fibra y los aspectos dinámicos del metabolismo de los ácidos grasos volátiles (AGV) en el rumen. Todos estos modelos tienen en común que integran en su construcción una cantidad variable de funciones empíricas, con una pobre base matemática (Chilibroste, 2002). En el modelo elaborado por France et al. (1982), se refuerza la base matemática, estableciendo la representación del sistema en términos de variables de estado, tasas de cambio a través de una serie de ecuaciones diferenciales y la utilización sistemática de integración numérica. En las décadas siguientes se desarrollaron importantes avances con los modelos de Baldwin et al. (1987) en las predicciones de las tasas de producción y absorción de nutrientes, logrando una descripción más comprensiva de las características físicas y química de las dietas, así como del metabolismo de los productos finales de la fermentación (Dijkstra y France, 1996a), y con Danfær (citado por Chilibroste, 2002) en 1990 que desarrolló un modelo dinámico y mecanístico, con el objetivo de predecir la digestión y metabolismo de nutrientes en vacas lecheras.

En la medida que avanzaban los descubrimientos en la investigación se fue dando paso al desarrollo de nuevos modelos que integraban estos hallazgos. Un ejemplo es el modelo Cornell Net Carbohydrate and Protein System (CNCPS), que fue desarrollado con el objetivo de proveer estimaciones de nutrientes disponibles para absorción en vacunos (Fox et al., 1992). El componente ruminal de dicho modelo ha sido reportado

por Russell et al. (1992) y Sniffen et al. (1992). Este modelo contiene en su estructura representaciones mecanísticas (p. ej.: utilización de la energía para crecimiento microbiano y procesos de no-crecimiento, en función de la disponibilidad de sustrato) y empíricas (p. ej.: la degradación del sustrato es representada sin el efecto de la interacción entre carbohidratos y nitrógeno, o el efecto de la actividad microbiana en la degradación de la materia orgánica en el rumen) (Dijkstra et al., 1998).

Una crítica que se ha planteado es que los sistemas de energía metabolizable (EM) y energía neta (EN) ampliamente utilizados para la estimación de requerimientos de energía no tienen en cuenta el hecho de que los animales tienen requerimientos para determinados nutrientes, en lugar de sólo una única exigencia en función de su potencial energético. Si las dietas se equilibran para proveer la misma cantidad de EM o EN, pero el suministro de nutrientes glucogénicos, aminogénicos o lipogénicos difiere, la respuesta del animal puede variar (Kebreab et al., 2009).

En estudios con vacas en lactancia temprana, Van Kneegsel et al. (2007) evaluaron el efecto de dietas isocalóricas, con diferentes concentraciones de nutrientes lipogénicos o glucogénicos, encontrando que las vacas que fueron alimentadas con la dieta lipogénica particionaron mayor cantidad de energía a la leche (mayor producción de grasa en leche). La energía movilizada desde el cuerpo tendió a ser mayor en el grupo lipogénico (balance negativo hasta la semana 9 post parto), mientras que en el grupo alimentado con la dieta glucogénica el balance comenzó a ser positivo a partir de la octava semana post parto. Este estudio confirma que la energía puede ser particionada entre producción de leche y tejido corporal, en dietas isocalóricas, alterando los contenidos de nutrientes lipogénicos y glucogénicos. Variaciones en las respuestas de los animales pueden estar relacionadas a las diferencias en el perfil de nutrientes disponibles para la absorción, o a diferencias en la partición de los nutrientes absorbidos para diversos fines (Dijkstra et al., 2007).

Para determinar pre-experimentalmente, la idoneidad de distintos tipos de suplementos para mejorar la producción de leche en vacas alimentadas con caña de azúcar, Dijkstra et al. (1996b y 1996c) desarrollaron un modelo de estimación de la producción

potencial de leche en función de los nutrientes disponibles (aminoácidos, glucosa, lípidos y energía).

Desde los primeros modelos en la década del '70 ha existido un amplio desarrollo en la investigación de los procesos ruminales y en su modelación, pero la mayoría teniendo al menos un punto en común, considerar un sistema del tipo estacionario. Esto presenta algunas limitaciones para representar la realidad de lo que ocurre en algunos sistemas (p. ej., los pastoriles), donde se dan instancias de alimentación discontinua, períodos de ayuno prolongados, alternancia de alimentos, e incluso cambios a lo largo del día en la composición química de un mismo ingrediente (Chilibroste, 2002).

Otra crítica importante a los sistemas de alimentación basados en energía y proteína existentes es que no pueden predecir el rendimiento, en términos de nivel y composición del producto, cuando se cambian de forma deliberada las estrategias de alimentación (Dijkstra et al., 2007). Una primera aproximación al problema fue elaborada por Chilibroste et al. (1997), quienes desarrollaron un modelo de simulación predictivo y dinámico, que integraba y cuantificaba la dinámica de procesos simultáneos de digestión y pasaje de los nutrientes a través del retículo-rumen, con el objetivo de evaluar el comportamiento nutricional de dietas simples y complejas, con diferentes manejos. Para un amplio rango de condiciones experimentales el modelo mostró buen ajuste en la predicción de consumo de materia seca total y de forraje, aunque fue bajo para la estimación de la degradabilidad ruminal de la fibra detergente neutro (FDN) e intermedia para la degradabilidad de la proteína cruda (PC) (Chilibroste et al., 1997).

Posteriormente, Chilibroste et al. (2001) modificaron el modelo mecanístico dinámico elaborado por Dijkstra et al. (1996b), orientado originalmente para predecir la digestión y absorción de nutrientes en vacas alimentadas con caña de azúcar en condiciones estables de alimentación, para simular un régimen discontinuo de alimentación con pasturas (*Lolium multiflorum*). El protocolo de validación incluía tratamientos con ayuno prolongado de los animales. El modelo predijo de manera

aceptable los pooles ruminales sólidos (materia orgánica, FDN, y Nitrógeno), pero se detectó un incremento en la predicción del error al aumentar los tiempos de ayuno, lo que estaría indicando que eran necesarias mejores definiciones de los inputs del modelo, particularmente las tasas fraccionales de pasaje y degradación. Se concluyó sobre la necesidad de tener tasas fraccionales variables en función de los propios parámetros ruminales y no tasas fraccionales fijas para cualquier condición (Chilibroste et al., 2001).

En el modelo presentado por Chilibroste et al. (2008) se realizaron modificaciones al previamente desarrollado por Chilibroste et al. (2001), las que implicaban la adición de nuevos elementos, como ser considerar la actividad de masticación, un período lag para representar el lapso que existe antes de que la fermentación ruminal o pasaje ocurran, las variaciones diarias en la materia seca del contenido ruminal, predicción del pH ruminal, y adaptaciones en las tasas fraccionales de degradación de la FDN y de absorción de los AGV desde el rumen en función del pH. Los outputs del modelo fueron la predicción de la concentración de metabolitos ruminales, tamaño de los pooles de varias fracciones predefinidas (incluida el agua), y la absorción de nutrientes según tipo (ej.: glucogénicos, aminogénicos, lipogénicos) a nivel de rumen e intestinos delgado y grueso.

Gregorini et al. (2013, 2015) han desarrollado un modelo matemático, mecanístico y dinámico, para simular el patrón diario de pastoreo de la vaca lechera. Este modelo, nombrado por sus autores MINDY, está basado en un grupo de tres modelos: uno que representa la digestión y metabolismo de la vaca lechera, otro que representa las variaciones en consumo en función de las fluctuaciones diarias en el estado interno del animal, y un modelo que simula la estructura del tapiz, la calidad de la pastura y el comportamiento ingestivo en pastoreo. El modelo logró reproducir de manera correcta los patrones de las comidas (ocurrencia temporal y longitudes) en comparación con los reportados en la literatura. Este es un avance considerable en la comprensión y la modelización de la ingesta de forraje y el pastoreo (Gregorini et al., 2013).

Una de las limitantes a la que se enfrenta el desarrollo y validación de modelos de rumen en general (y los dinámicos en particular), es la heterogénea base conceptual de información analítica.

El desarrollo de modelos mecanísticos útiles para estimar la digestibilidad y la ingesta requiere tanto una estimación precisa de los valores de los parámetros como una estructura apropiada del modelo. Se requiere más trabajo para validar los métodos utilizados para estimar los parámetros cinéticos de la digestión. La mayor parte de la validación se ha realizado comparando dos sistemas (por ejemplo, *in vitro* vs. *in situ*) sin validación con datos *in vivo* fiables (Huhtanen et al., 2006).

1.1.1 Descripción del Modelo “CTR Dairy”

“CTR Dairy” (Chilibroste et al., 2008) es un modelo mecanístico de simulación de rumen, dinámico, diseñado para condiciones no estacionarias de alimentación.

El modelo está desarrollado para trabajar con tres grupos de alimentos, de los cuales la pastura puede ser uno de ellos, que pueden ingresar al modelo de forma independiente entre ellos en cualquier régimen horario. Si bien el objetivo inicial de este modelo fue representar los sistemas lecheros en donde las vacas están en pastoreo y son suplementadas con forrajes conservados y concentrados, éste puede adaptarse a un amplio rango de estrategias de alimentación, inclusive a sistemas que integren el uso de dietas totalmente mezcladas (TMR).

El modelo cuenta con 42 variables de estado, 30 de las cuales se refieren a las fracciones insolubles de los alimentos, 8 a las solubles, y 4 a los pools ruminales de amonio, AGV, ácidos grasos de cadena larga y masa microbiana.

Todos los pools (Q_i) son expresados en gramos, excepto el de los AGV que está en moles. El volumen se representa en litros, y las concentraciones se estiman con la relación entre el tamaño del pool en estudio y el volumen.

La unidad de tiempo en la que opera el modelo es en minutos, dado que muchas estrategias de alimentación incluyen eventos de corta duración (p ej: la suplementación con concentrados en la sala de ordeño ocurre en menos de 10 minutos).

Una ecuación diferencial para cada variable de estado describe la tasa de cambio del tamaño del pool con el tiempo (dQ_i/dt), y dado el principio de conservación de la materia, la ecuación genérica que representa todos los procesos sigue este patrón:

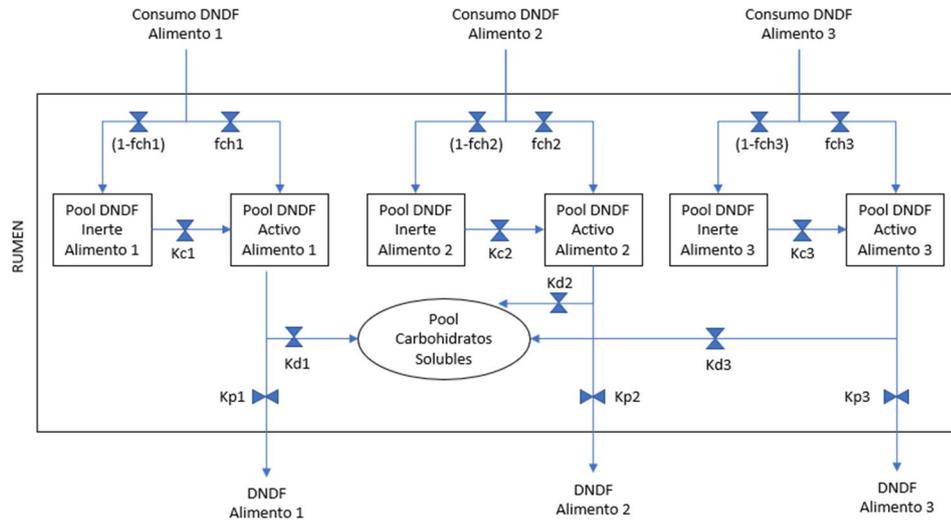
$$dQ_i/dt = \text{Ingreso} - \text{Egreso} + \text{Síntesis} - \text{Utilización}$$

En la simulación de la dinámica ruminal, a los procesos de degradación y pasaje, se incorpora el concepto de *Eficiencia de masticación* (fch) durante la ingestión y la rumia para estimar la liberación de componentes solubles del alimento y la dinámica de partículas de los componentes insolubles del alimento.

$$\text{Eficiencia masticación} = \frac{\text{gramos de componente de alimento liberado}}{100 \text{ g de componente de alimento consumido}}$$

La introducción de este concepto en el modelo implica que, durante la ingestión de un alimento, una fracción del componente del alimento ingerido va a las reservas ruminales donde podrá ocurrir la fermentación (*Pool Activo* del componente) y por tanto pasible de ser liberado por degradación (K_d) o por pasaje (K_p), y la otra fracción del componente del alimento ingresa a un grupo separado que se define como *Pool Inerte*, que no está expuesto ni a la degradación ni al pasaje al estómago. El pasaje del pool inerte al activo es mediado por una tasa fraccionaria de reducción de partículas (K_c); que no representa la rumia *per se*, sino que es una representación del retraso (fase *lag*) antes de que pueda ocurrir la fermentación o la salida del rumen. Este proceso implica hidratación de partículas, adhesión bacteriana y, probablemente masticación por rumia (figuras 1A y 1B).

A)



B)

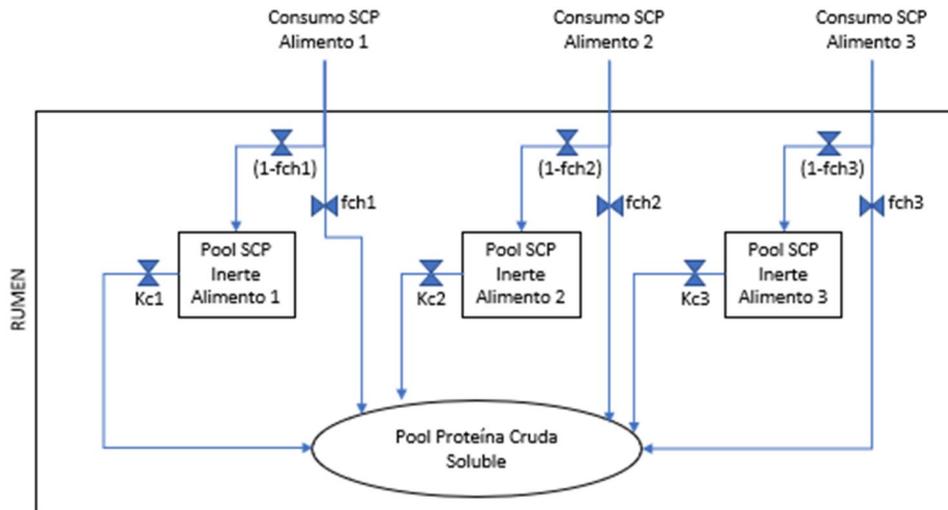


Figura 1A y 1B. Representación de la dinámica de partículas en el modelo para las fracciones fibra detergente neutro degradable (DNDF) y proteína cruda soluble (SCP). fch = eficiencia de masticación durante la comida (g de alimento/100 g de alimento ingerido); Kc = tasa fraccionaria de reducción de partículas (h^{-1}); Kd = tasa de degradación (h^{-1}); Kp = tasa de pasaje (h^{-1}) para una fracción específica del alimento 1, 2 o 3, respectivamente (Chilibroste et al., 2008).

Para cada una de las fracciones de cada alimento se debe reportar su fch, Kd, Kc y Kp.

El modelo incorpora para la estimación de la disponibilidad de nutrientes, el impacto que tiene la reducción del pH ruminal en la digestión de la fibra. Esto es de particular interés en dietas que contienen concentrados, especialmente aquellos con alto contenido de almidón.

El efecto de la concentración ruminal de los AGV (y por tanto del pH ruminal) en la absorción de estos también es tenida en consideración, ya que en el modelo afectan directamente a la tasa fraccional de absorción total de AGV.

Además de la evolución de los 4 pools ruminales mencionados anteriormente (amonio, AGV, ácidos grasos de cadena larga y masa microbiana), el modelo tiene la capacidad de reportar minuto a minuto el volumen y pH ruminal, y la absorción de aminoácidos, lípidos, glucosa y AGV.

Si bien el modelo opera minuto a minuto (originalmente fue propuesto para trabajar bocado a bocado), al momento de implementar la simulación se modificó el ingreso de información por parte del usuario a “horas” y “kg MS/h” para simplificar su utilización. Esto aplica al momento de definir los ingresos de los alimentos a la dieta, como también las tasas.

Cada alimento está caracterizado por su contenido de elementos nitrogenados, carbohidratos y ácidos grasos. Además, cómo fue planteado anteriormente, se deben ingresar los parámetros de cinética ruminal para cada una de las fracciones que así corresponda (cuadro 1).

Cuadro 1. Fracciones de componente

Parámetro	Abreviación	unidad
Materia seca	Dry Matter	%
Amonio	Amonio	g/kg MS
PC degradable	Deg CP	g/kg MS
PC indegradable	UnDig CP	g/kg MS
PC soluble	Sol CP	g/kg MS
Lípidos	Fat	g/kg MS
Ácidos grasos volátiles	VFA	moles/kg MS
Fibra detergente neutro	NDF	g/kg MS
Fibra detergente neutro Degradable	dNDF	g/kg MS
Almidón insoluble	InsolSt	g/kg MS
Almidón soluble	SolSt	g/kg MS
Carbohidratos solubles en agua	WSC	g/kg MS
Tasa pasaje sólidos	Kp(sol)	h ⁻¹
Tasa degradación proteína	Kd(CP)	h ⁻¹
Tasa degradación FDN	Kd(NDF)	h ⁻¹
Tasa degradación almidón insoluble	Kd(InsolSt)	h ⁻¹
Tasa fraccionaria de reducción de partículas	Kc	h ⁻¹
Eficiencia de masticación	f ch	%

Otra información que es requerida para operar es el peso vivo (BW, kg) y la tasa de pasaje del líquido ruminal (KFLEX, h⁻¹).

Para la validación de la precisión de las estimaciones realizadas por el modelo se utilizaron 4 estudios disponibles en la literatura que no fueron incluidos en su desarrollo. Para la selección de estos trabajos se buscó que tuviesen variabilidad en la composición química de los alimentos, nivel y tipo de suplementos, y niveles de producción de leche. Los 4 estudios cubrieron una amplia gama de estrategias de alimentación que incluían animales en pastoreo y estabulados.

La evaluación matemática del error de los valores predichos en relación con los observados se realizó mediante la estimación del Error Cuadrático Medio de Predicción (MSPE por sus siglas en inglés). Para su análisis, el MSPE se dividió en el error debido al sesgo general de predicción, error debido a la desviación de la pendiente de regresión con respecto a la unidad, y error debido a la variación aleatoria.

En general, el MSPE como porcentaje de la media observada fue relativamente bajo (< 10 %) con una gran cantidad de la variación total explicada por la variación aleatoria (> 70 %). El MSPE más bajo fue para el contenido de materia seca del rumen (6,1 %) y el más alto para el pool ruminal de FDN (10,2 %).

1.2 DESARROLLO DE MODELOS PARA LA PREDICCIÓN DE LA PRODUCCIÓN DE LECHE

En una revisión sobre modelos matemáticos de rumiantes lactantes, Sauvant (1996) destacaba las siguientes áreas de investigación sobre las que se requeriría un mayor desarrollo:

- la conexión entre los sub modelos digestivos y metabólicos, con la regulación de consumo
- La producción y absorción de AGV en el retículo-rumen,
- La regulación del sub sistema involucrado en la lactancia
- las regulaciones tendrán que ser modeladas cuidadosamente en el área del metabolismo energético (lípidos e hidratos de carbono). Esto podría llevarse a cabo con el objetivo de comprender y predecir las respuestas del contenido de grasa en leche;
- simular los principales mecanismos implicados en las variaciones de contenido de proteína en leche.

La nutrición ofrece los medios para lograr cambios rápidos en la composición de la leche, pero las relaciones entre los constituyentes del alimento y la composición de la leche son complejos. Se han desarrollado ecuaciones de predicción empíricas para algunos factores, pero la complejidad de las interrelaciones, que implican que se den varias respuestas a un único cambio en la dieta, sugieren la necesidad del desarrollo de modelos mecanicistas que contemplen la completa utilización de los nutrientes (Sutton, 1989; Dijkstra et al., 2007).

La anatomía de las glándulas mamarias, donde los precursores de la leche ingresan desde una única fuente arterial y los productos lácteos se generan estequiométricamente y salen a través de una red de ductos físicamente distinta, permite manejar los datos considerando a las glándulas mamarias como un sistema cerrado (Volpe et al., 2010). Un enfoque en el desarrollo de modelos mecanicistas del sistema mamario ha considerado las concentraciones arteriales de los precursores de la leche como *inputs* a partir de las cuales se puede predecir los rendimientos de los componentes de la leche (Waghorn y Baldwin, 1984; Hanigan y Baldwin, 1994; Hanigan et al. 2001).

Sin embargo, otros autores han propuesto otros mecanismos de funcionamiento para representar lo que sucede, por ejemplo, con la proteína láctea, donde al realizar cambios en el suministro de aminoácidos simples, el rendimiento de ésta no se ajusta a las expectativas previstas según la Ley del Mínimos de von Liebig. Esto se debe a que las glándulas mamarias pueden regular la velocidad de transporte de aminoácidos (Aa) individuales de acuerdo con una necesidad o *set point* dictado por el estado fisiológico, el estado nutricional y la velocidad de extracción de leche de las glándulas mamarias. Los mismos factores influyen en la utilización de Aa por los tejidos espláncnicos y periféricos, en coordinación con el *set point* mamario, para compensar las insuficiencias de Aa de la dieta (Cant et al., 2003).

1.3 VALIDACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS

La validación se ha definido como una comparación de las predicciones del modelo con el mundo real, para determinar si el modelo es adecuado para su propósito previsto (ARS, 1978).

La evaluación del comportamiento del modelo es un paso esencial en el proceso de modelado porque indica el nivel de precisión y exactitud de las predicciones del modelo. La exactitud mide qué tan cerca están los valores predichos por el modelo de los valores verdaderos y la precisión mide qué tan cerca están entre sí los valores individuales predichos por el modelo. En otras palabras, la exactitud es la capacidad

del modelo de predecir los valores correctos y la precisión es la capacidad del modelo de predecir valores similares de manera consistente (Tedeschi, 2006).

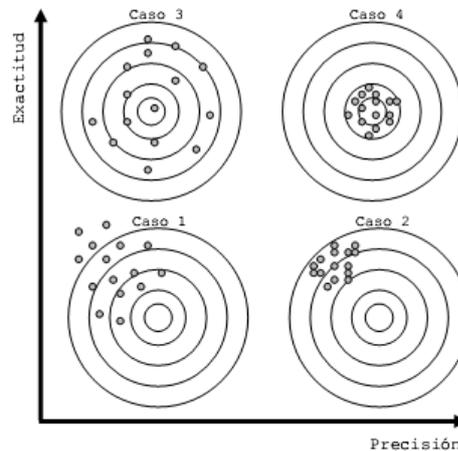


Figura 2. Esquemmatización de Exactitud vs. Precisión. El caso 1 es inexacto e impreciso, el caso 2 es inexacto y preciso, el caso 3 es exacto e impreciso, y el caso 4 es exacto y preciso (Tedeschi, 2006).

El coeficiente de determinación (R^2) es un buen indicador de la precisión: cuanto mayor es el R^2 , mayor es la precisión. Cuando se comparan observados vs. predichos, las estimaciones obtenidas en la regresión, intersección y pendiente son buenos indicadores de la exactitud, cuanto más cercano a cero y uno, respectivamente, mayor es la exactitud (Mayer y Butler, 1993; Tedeschi, 2006).

El R^2 requiere una interpretación cuidadosa. Hay varios malentendidos que rodean este estadístico: (a) un alto coeficiente de correlación no indica que un modelo matemático determinado pueda hacer predicciones útiles, ya que mide la precisión y no la exactitud, (b) un alto coeficiente de correlación no implica que la línea de regresión estimada se ajuste bien a la predicción del modelo ya que la relación puede ser curvilínea, y (c) un R^2 cercano a cero no indica que el observado y los valores predichos por el modelo no están correlacionados porque pueden tener una relación curvilínea (Kutner et al., 2005).

Para medir la exactitud predictiva de un modelo, el “Error cuadrático medio de predicción” (MSPE por sus siglas en inglés) es probablemente la estimación más

común y confiable. El MSEP se estima a partir de la diferencia entre los valores observados (Y_i) y los valores predichos por el modelo ($f(X_1, \dots, X_p)_i$), en lugar del valor predicho por regresión, como sucede en la estimación del “Error cuadrático medio” (Tedeschi, 2006).

$$MSPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - f(X_1, \dots, X_p)_i)^2$$

Un inconveniente de este análisis es que el MSPE (o su raíz) elimina el signo negativo y pondera la desviación por sus cuadrados, lo que da más influencia a los puntos de datos más grandes y no proporciona ninguna información sobre la precisión del modelo (Mitchell y Sheehy, 1997).

Cuando cada par de datos ($f(X_1, \dots, X_p)_i, Y_i$) es mutuamente independiente (es decir, el resultado de un par no depende del resultado de otro par), y el modelo es independiente (es decir, los parámetros del modelo se derivaron de experimentos independientes y no se ajustaron al experimento actual que se predice), la estimación de MSPE es una medida confiable de la exactitud del modelo. No obstante, la confiabilidad disminuirá a medida que el número de observaciones disminuya (Tedeschi, 2006).

1.4 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar un modelo de simulación capaz de evaluar el efecto a nivel digestivo y productivo de diferentes estrategias de alimentación de vacas en pastoreo, integrando secuencias, cantidades y tipos de alimentos consumidos.

1.4.1 Objetivos específicos

- a) Redefinición del modelo “CTR Dairy” (Chilibroste et al., 2008) desde la plataforma SMART (Gerrits et al., 2008), a una plataforma Visual Basic for Applications (VBA), de uso más accesible y plausible de una validación más extensiva.

- b) Desarrollo y validación de un nuevo modelo que integre un “Módulo de producción de leche” al “CTR Dairy”, para estimar la producción tomando en cuenta la disponibilidad a nivel metabólico de sustratos glucogénicos, aminogénicos y lipogénicos. Este nuevo modelo se denominará “CTR Dairy – PRODUCTION”.
- c) Evaluar con esta nueva herramienta, el impacto productivo y económico de diferentes estrategias de alimentación.

2 MATERIALES Y MÉTODOS

La estrategia de investigación desarrollada consistió en los siguientes pasos:

- Transcripción del modelo “CTR Dairy” (Chilibroste et al., 2008) desde su codificación original en SMART (Gerrits et al., 2008) a VBA (Microsoft®).
- Verificación de la recodificación.
- Desarrollo de un nuevo modelo, el “CTR Dairy – PRODUCTION”, que incorporará al “CTR Dairy” un nuevo módulo para la estimación de la producción de leche.
- Validación de las estimaciones de producción realizadas por el nuevo modelo.
- Experimentación con el modelo “CTR Dairy – PRODUCTION”, simulando situaciones de producción con idénticos recursos alimenticios, pero diferentes estrategias de uso.

2.1 EVALUACIÓN DE LA CONVERSIÓN DE LA PROGRAMACIÓN EN SMART A VBA

Una vez culminada la transcripción del modelo “CTR Dairy” original, se realizó la comparación de los resultados obtenidos de las simulaciones ejecutadas en uno y otro lenguaje, para un idéntico ingreso de información.

La comparación de resultados se hizo mediante regresión lineal simple, y se consideró que la transcripción era exitosa cuando el coeficiente de determinación (R^2) $\geq 0,99$ para todas las variables.

2.2 DESARROLLO DEL “MÓDULO DE PRODUCCIÓN DE LECHE”

El modelo que se implementará en este trabajo busca representar en términos absolutos (litros de leche), el impacto que tiene (o no) modificar la oferta de la dieta al animal durante el día, sin integrar en su desarrollo la totalidad de regulaciones implicadas en la producción y composición de leche, priorizando la simplicidad sobre la

complejidad. La estructura del modelo “CTR Dairy” y los *outputs* de información que genera, hacen posible integrar en futuras versiones, submodelos que atiendan con un mayor grado de complejidad el proceso de la síntesis de leche y sus componentes.

La metodología implementada en el desarrollo del “Módulo de producción de leche” básicamente consistió en cuantificar de manera independiente cada uno de los nutrientes (glucogénicos, lipogénicos y aminogénicos) que hay disponibles para la síntesis de leche, y a partir de los requerimientos para sintetizar un litro de leche, estimar la producción diaria que posibilita cada uno de ellos. La producción estará determinada por el nutriente más limitante.

Se implementó el cálculo del potencial de producción de leche en función de la absorción en rumen e intestinos de energía (M_E), aminoácidos (M_P), glucosa más propionato (M_G) y lípidos (M_L), utilizando como insumo la estimación de producción de nutrientes glucogénicos, lipogénicos y aminogénicos generada por el modelo.

La metodología utilizada fue la descrita por Dijkstra et al. (1996c), a la que se le incorporó el efecto de la movilización (ganancia o pérdida) de las reservas corporales en la estimación de los potenciales de producción por energía y proteína.

A modo de ejemplo, en la figura 3 se representa el diagrama de integración del CTR Dairy con el Módulo de Producción de Leche para la estimación por aminoácidos (M_P).

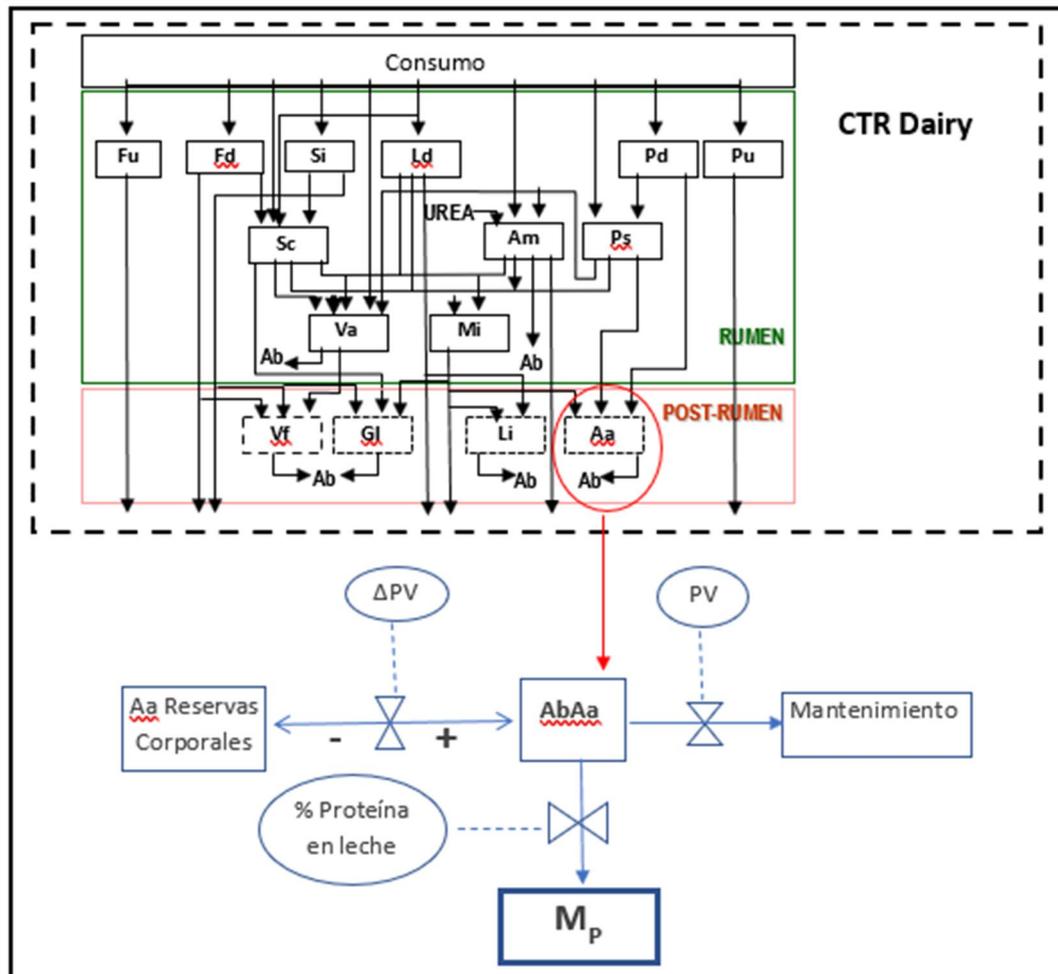


Figura 3. Integración de CTR Dairy con el Módulo Producción de Leche por aminoácidos. Referencias: Aa (Aminoácidos Post - rumen); Ab (Absorción); Am (Aminoácidos); Fd (Fibra degradable en rumen); Fu (Fibra no degradable en rumen); Gl (Glucosa post - rumen); Ld (Ácidos grasos cad. larga en rumen); Li (Ácidos grasos cad. larga post - rumen); Mi (Materia seca microbiana); Pd (Proteína degradable); Ps (Proteína soluble); Pu (Proteína no degradable); Sc (Almidón y azúcares solubles); Si (Almidón insoluble en rumen); Va (AGV en rumen); Vf (AGV post - rumen); Δ PV (Variación peso vivo); PV (Peso vivo); AbAa (Aminoácidos absorbidos); MP (Prod. Leche potencial por aminoácidos).

2.2.1 Potencial de producción en función de la Energía absorbida

El modelo utilizado en la estimación de la producción potencial en función de la energía absorbida tiene en consideración si los animales están en balance negativo o positivo de energía.

Con pérdida de peso:

$$M_E(l/d) = (BWch * YEnBWch + 0,65(A_E - 0,45 W^{0,75}))/E_m$$

Con ganancia de peso:

$$M_E(l/d) = (0,65 * (A_E - 0,45 W^{0,75}) - BWch * REnBWch)/E_m$$

Donde:

- M_E (l/d): potencial de producción de leche en función de la energía absorbida.
- $BWch$ (kg/d): Variación de peso vivo (ganancia o pérdida, según corresponda).
- $YEnBWch$ (MJ/kg): Aporte de energía en reservas movilizadas
- $REnBWch$ (MJ/kg): Contenido de energía en ganancia de reservas corporales.
- A_E (MJ/d): Energía absorbida.
- E_m (MJ/kg): Energía contenida en la leche.
- W : Peso Vivo (kg).

En el caso de animales con pérdida de peso, el aporte de energía para la producción de leche proveniente de la movilización de reservas ($YEnBWch$) es de 19,58 MJ/kg, correspondiente al de una vaca con estado corporal 3 en la escala 1-5 (NRC, 2001). Este valor considera que la energía de las reservas corporales cuando se usa para apoyar la producción de leche tiene una eficiencia de 0,82 (NRC, 2001).

Sí se registran ganancias de peso, el contenido de energía de las reservas incorporadas ($REnBWch$) es de 22,34 MJ/kg, para un animal con igual estado corporal al caso

anterior (NRC, 2001). Para la determinación de este valor se considera que en vacas lactando, la eficiencia de deposición de la energía metabolizable en reservas corporales es de 0,75 (Moe et al., 1971) y la eficiencia para la síntesis de leche es de 0,64 (NRC, 2001).

En ambos casos las variaciones de peso vivo deben ser ingresadas por el usuario.

La Energía absorbida (A_E) es función de la cantidad de aminoácidos (Aa), glucosa (Gl), lípidos (Li) y ácidos grasos volátiles (VFA) absorbidos a nivel ruminal e intestinal, multiplicados por sus contenidos energéticos ($A_a = 18,4$ MJ/kg; $Gl = 15,6$ MJ/kg; $Li = 39,0$ MJ/kg; $VFA = 1,25$ MJ/mol).

La energía contenida en la leche (E_m) se estima multiplicando el contenido de lactosa, proteína y grasa, por sus concentraciones energéticas (16,5, 24,5 y 38,1 MJ/kg, respectivamente). La composición de la leche debe ser ingresada por el usuario.

Se considera una eficiencia de uso de la energía absorbida de 65% y el requerimiento de mantenimiento es de 0,45 MJ/kg $PV^{0,75}$ (ARC, 1980, citado por Dijkstra et al., 1996c).

2.2.2 Potencial de producción en función de la Proteína disponible

Para la estimación del potencial de producción por proteína, también es tomada en cuenta la variación de peso vivo.

Con pérdida de peso:

$$M_p(l/d) = 0,716 * (A_{Aa} + BWch * YAaBWch - 2,3 W^{0,75}) / P_m$$

Con ganancia de peso:

$$M_p(l/d) = 0,716 * (A_{Aa} - BWch * RAaBWch - 2,3 W^{0,75}) / P_m$$

Donde:

- M_p (l/d): Potencial de producción de leche en función de los aminoácidos disponibles.
- A_{Aa} (g/d): Aminoácidos absorbidos
- $BWch$ (kg/d): Variación de peso vivo (ganancia o pérdida, según corresponda).
- $YAaBWch$ (g/kg): Rendimiento de proteína por kg movilizado de reservas.
- $RAaBWch$ (g/kg): Requerimiento de proteína para incorporar reservas corporales.
- P_m (g/l): contenido de proteína en leche.

El aporte de aminoácidos con la pérdida de peso ($YAaBWch$) es de 68 g/kg (NRC, 2001), y para la ganancia de peso ($RAaBWch$) el requerimiento es de 115,3 g/kg, considerando una eficiencia en la ganancia de peso durante la lactancia de 59 % (AFRC, 1993).

Se considera un requerimiento de aminoácidos para mantenimiento de 2,3 g/kg $PV^{0,75}$ (ARC, 1984, citado por Dijkstra et al., 1996c) y una eficiencia uso para la síntesis de proteína láctea de 71,6 % (AFRC, 1993).

Las variaciones de peso y el contenido de proteína en leche deben ser ingresados por el usuario.

2.2.3 Potencial de producción en función de la glucosa y propiónico absorbido

$$M_G(l/d) = \left(A_{Gl} + \left(\frac{A_{Pr}}{2} * 180 \right) - 4,0 W^{0,75} \right) / (1,05 L_m + (0,12 + 0,19)F_m)$$

Donde:

- M_G (l/d): Potencial de producción en función de la glucosa y del propiónico absorbido.
- A_{Gl} (g/d): glucosa absorbida.
- A_{Pr} (mol/d): Absorción de ácido propiónico.
- L_m (g/l): contenido de lactosa en leche.
- F_m (g/l): contenido de grasa en leche.

Para calcular el aporte total de glucosa, se considera que dos moles de propiónico absorbido rinden uno de glucosa, y 1 mol de glucosa pesa 180 g.

Los requerimientos de glucosa para mantenimiento son de 4 g/kg PV^{0,75} (Ørskov, 1980; citado por Dijkstra, 1996c).

Para la síntesis de lactosa el requerimiento de glucosa es de 1,05 g glucosa/g (McDonald et al., 2011).

En la síntesis de grasa láctea se requieren 0,12 g glucosa/g para proveer glicerol (Hanigan y Baldwin, 1994) y 0,19 g glucosa/g grasa láctea para proveer NADPH para síntesis *de novo* de ácidos grasos de cadena larga (Smith et al., 1983; citado por Dijkstra et al., 1996c).

El contenido de lactosa y grasa de la leche deben ser ingresados por el usuario.

Si la producción de leche potencial estimada en función de los lípidos disponibles (M_L) es menor que M_G , se incrementa el requerimiento de glucosa para la síntesis *de novo* de ácidos grasos de cadena larga, por lo que se implementa la siguiente forma de cálculo para M_G :

$$M_G(l/d) = \frac{M_L + (A_{Gl} + \left(\frac{A_{Pr}}{2} * 180\right) - 4,0 W^{0,75} - (0,12 + 0,19) M_L)}{(1,05 L_m + (0,12 + 0,19 + 0,19) F_m)}$$

2.2.4 Potencial de producción según ác. grasos de cadena larga absorbidos

$$M_L(l/d) = A_{Li}/(0,47 F_m)$$

Donde:

- M_L (l/d): estimación de leche según disponibilidad de ácidos grasos.
- A_{Li} (g/d): ácidos grasos de cadena larga absorbidos.
- F_m (g/l): contenido de grasa en leche.

Se requieren en promedio 0,47 g ácidos grasos/g grasa láctea, asumiendo una longitud promedio de 14,3 carbonos, y un 50 % de síntesis *de novo* de ácidos grasos de cadena larga (Dijkstra et al., 1996c).

El usuario debe ingresar el contenido de grasa láctea.

Tanto en este modelo cómo en los de potencial de producción en función de la glucosa y propiónico, no se tiene en cuenta la variación de peso vivo, dado que no es posible relacionar directamente estas variaciones, con cambios en los aportes de glucosa y ácidos grasos para la leche.

2.2.5 Definición del Valor de Predicción

El Valor de Predicción (VP) es la producción de leche que predice el modelo, dada una determinada disponibilidad de nutrientes y requerimientos.

El VP se selecciona entre las producciones potenciales estimadas para M_E y M_P , aplicando el criterio de “nutriente limitante” es decir, se asigna cómo VP a la menor de las estimaciones.

La estimación de producción potencial de leche en base a los ácidos grasos de cadena larga (M_L) no se utilizó para la selección del VP debido a que parte de los ácidos grasos de cadena larga en la leche pueden provenir de la síntesis *de novo*, y si los requerimientos de estos superan los absorbido en el intestino, no necesariamente se estaría limitando la producción de leche (Dijkstra et al., 1996c). Este potencial igualmente se debe estimar, porque su resultado puede afectar la estimación por glucosa disponible (M_G).

El potencial en base a glucosa (M_G) tampoco es utilizado en la determinación del VP ya que no integra en su estimación la variación de peso, pero igualmente se reporta su resultado para proporcionar al usuario información acerca de la disponibilidad de este nutriente.

2.3 VALIDACIÓN DEL MODELO “CTR DAIRY – PRODUCTION”

Para la validación del nuevo modelo (“CTR Dairy – PRODUCTION”) que integra el “Módulo de producción de leche” con el “CTR Dairy”, se seleccionaron trabajos que representasen un amplio rango de situaciones de alimentación (p. ej.: sólo pastura, pastura y suplementos, dietas totalmente mezcladas), y que reportaran una descripción detallada de los consumos y secuencias de suministro de los alimentos. Se priorizó también, que representaran un amplio rango de niveles de producción (p. ej.: 10 a 40 l/d) y etapas de lactancia.

Para facilitar la revisión de la información contenida en los trabajos utilizados en la validación, en el resumen siguiente se conserva la nomenclatura de los tratamientos tal cual está expresada en los trabajos originales

- Mattiauda et al. (2013) – V1

El objetivo de este trabajo fue evaluar los efectos de la restricción de tiempo de acceso a la pastura y el momento de asignación del pastoreo, en el comportamiento de pastoreo, la ingesta diaria de materia seca (DMI), la fermentación ruminal, la producción y composición de leche en vacas lecheras. Veintiuna vacas Holstein produciendo 25,3 kg leche/d, con 60 días de lactancia, y con 550 kg PV promedio, fueron asignadas a uno de los 3 tratamientos siguientes: acceso a una franja diaria de pastura por 8 h entre las 7:00-15:00 h (T7-15), 4 h entre las 07:00 y 11:00 h (T7-11), o 4 h 11:00-15:00 h (T11-15). El período experimental constó de 3 semanas de adaptación y 6 semanas de mediciones. Se ofreció a las vacas una asignación de forraje diaria de 18 kg MS/vaca (a nivel del suelo), 6,1 kg MS / día de un suplemento a base de grano de sorgo molido y 5,2 kg MS / día de ensilaje de maíz. El consumo de forraje fue determinado usando la técnica de n-alcanos. La producción de leche se evaluó diariamente, y la composición en dos días consecutivos por semana.

- Fajardo et al. (2015) – V2

El objetivo de este estudio fue determinar la producción, composición de leche, condición corporal, peso vivo y el comportamiento en pastoreo de vacas lecheras Holstein sometidas a dietas que combinan raciones mezcladas (TMR) y forraje durante sus primeras 10 semanas de lactancia (periodo 1: V2 - p1). Se utilizó un diseño de bloques al azar incompleto, con 41 vacas multíparas a principios de lactancia, asignadas a los siguientes tratamientos: G0 (vacas confinadas, alimentadas 100 % con TMR), G1 (6 h acceso a la pastura + 50 % TMR) y G2 (9 h acceso a la pastura + 50 % TMR). Entre las semanas 11 a 13 de lactancia (período 2: V2 - p2), las vacas del G0 fueron manejadas como G1 (post-TMR), y el G1 continuó como tratamiento control.

En el período 1 la TMR estuvo compuesta por ensilaje de maíz, concentrados energéticos y proteicos, urea y suplementos minerales. En el período 2 el ensilado de maíz fue reemplazado por ensilaje de sorgo. La TMR para el tratamiento G0 fue formulada teniendo en cuenta los requerimientos establecidos por el NRC (2001), para un objetivo de producción de leche de 40 kg/d. El alimento se ofrecía *ad libitum*, ajustándose las cantidades en intervalos semanales. Los tratamientos G1 y G2 tenían la misma oferta diaria en kg de MS que G0, pero diferían en la fuente de alimentación: 50 % de la MS se ofreció como TMR y 50 % como forraje, difiriendo entre ellos en los tiempos de acceso a la pastura (6 y 9 horas, respectivamente). La asignación de forraje se ajustó semanalmente. La producción de leche se evaluó diariamente, y la composición en dos días consecutivos por semana. El consumo de forraje fue evaluado individualmente con la técnica de n-alcanos.

- Pérez-Prieto et al. (2011a) – V3

Se realizó un experimento para estimar la performance, el consumo de forraje y la adaptación del comportamiento en pastoreo de vacas lecheras en pasturas de baja disponibilidad, con distintas asignaciones de forraje LOW, MEDIUM y HIGH (19, 32 y 46 kg materia orgánica / vaca por día, a nivel del suelo, respectivamente). El estudio se llevó a cabo a finales del invierno en una pastura de buena calidad de raigrás perenne y trébol blanco, con una disponibilidad promedio pre-pastoreo de 2,3 t materia orgánica (MO) / ha sobre el nivel del suelo. Cada vaca fue suplementada con 4,4 kg MO de ensilaje de maíz y 2,0 kg MO de concentrado. El acceso a la pastura estaba restringido a 9 h entre los ordeños de la mañana y tarde. Se utilizaron 18 vacas Holstein en mitad de lactación (doce multíparas y seis primíparas). Se utilizó un diseño cuadrado latino ortogonal 3 x 3 con tres períodos consecutivos de 13 días. El consumo de forraje individual fue evaluado con la técnica de n-alcanos. La producción de leche individual se midió cada día. La concentración de grasa y proteína en leche se determinó durante los últimos 4 días de cada periodo experimental. Este trabajo no reportó contenido de lactosa en leche, por lo que fue fijado en 4.9 %

- Pérez-Prieto et al. (2011b) – V4

El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de la suplementación (0 vs 8 kg MS de una mezcla 7:1 de ensilaje de maíz y harina de soja) en el consumo de forraje, producción de leche, y comportamiento en pastoreo, de vacas lecheras en etapa tardía de lactancia, a la que se les ofrecieron dos asignaciones de forraje (LOW PA = 18 vs. HIGH PA = 30 kg de MS/vaca/d; sobre 2,5 cm de suelo. Se utilizaron 12 vacas Holstein multíparas, con un diseño cuadrado latino 4 x 4, con períodos de 14 d. La disponibilidad promedio de forraje fue de 1,8 t de MS/ha (por encima de los 2,5 cm del suelo), de una pastura de Lolium perenne (PC = 11,5 %, ENI = 5,15 MJ/kg de MS y 61,9 % DMO). En los tratamientos que correspondía, el suplemento se ofreció después del ordeño de la mañana (entre las 8 y 9 h). Las vacas tuvieron acceso a la pastura en la mañana de 9 a 16:30 h,

y de tarde de 17:30 a 6:45 h (21 h aproximadamente). El consumo de forraje fue evaluado individualmente con la técnica de n-alcanos. La producción de leche individual se midió diariamente. La concentración de grasa y proteína en leche se determinó durante los últimos 4 días de cada periodo experimental. Este trabajo no reportó el contenido de lactosa en leche, por lo que fue fijado en 4,9 %.

- Kononoff y Heinrichs (2003) – V5

El objetivo de este estudio fue evaluar los efectos de la reducción de la longitud de las partículas de forraje y la inclusión de cáscara de semilla de algodón en el consumo, la digestibilidad, la actividad de masticación y la producción de leche de las vacas en lactancia temprana. Se implementó un diseño experimental de cuadrado latino 2 x 2, donde 16 vacas Holstein multíparas en inicio de lactancia (17 ± 3 d y 677 ± 58 kg PV) estuvieron durante 23 días en cada uno de los tratamientos. Estos consistieron en ofrecer una dieta TMR idéntica en su composición química, a la que se le modificaba el largo de la fibra proveniente del forraje (ensilaje de maíz), y se le incluía o no cáscara de semilla de algodón (0 vs. 8 % de la materia seca ofrecida). Los tratamientos resultantes fueron: **LGNH** (fibra larga del ensilaje sin cáscara), **LGH** (fibra larga con cáscara), **SHNH** (fibra corta del ensilaje sin cáscara) y **SHH** (fibra corta con cáscara). Se incluyeron animales con fistulas ruminales que se utilizaron para las determinaciones en rumen y de actividad de masticación. La alimentación fue ad libitum, con una oferta diaria de alimento a las 8 am. Entre el día 15 y 23 de cada período se registró diariamente la producción individual de leche, y se tomaron muestras para determinar contenido de grasa y proteína. No se determinó contenido de lactosa en leche, por lo que fue fijado en 4,9 %.

- Ben Meir et al. (2018) – V6

El objetivo del trabajo fue identificar y caracterizar vacas Alta Eficiencia (**HE**) vs Baja Eficiencia (**LE**) alimentadas individualmente con una dieta baja en forraje (31,6 % de la MS total proveniente de ensilaje de trigo, y henos de avena y arveja). Las características examinadas para evaluar la eficiencia fueron:

Consumo de Alimento Residual (RFI) y la relación Leche Corregida por Energía/Consumo Diario de Materia Seca (ECM/DMI). Además, se determinó comportamiento ingestivo, rumia y tiempo de descanso, actividad, pH ruminal y producción de metano, digestibilidad in vivo, cambios de peso vivo, producción de leche, composición de la leche y balance energético.

Se utilizaron 155 vacas lecheras Holstein (37 primíparas y 118 multíparas), todas con alto rendimiento lechero (> 35 kg de leche /d), sanas, entre 35 y 180 días en leche (DIM promedio = $125,8 \pm 3,14$).

El experimento incluyó 4 ciclos de 8 semanas cada uno, 42 vacas en cada ciclo. Cada ciclo consistió en 2 semanas de adaptación al establo y régimen de alimentación; 4 semanas adicionales dedicadas al monitoreo diario de la producción y composición de leche, consumo de materia seca, comportamiento ingestivo, pasos por día y eficiencia medida como RFI y ECM / DMI. Las últimas 2 semanas se dedicaron al muestreo de fluidos ruminales y de extracción fecal.

Para los trabajos anteriores, se presenta la descripción de las fracciones de los alimentos, y la composición de cada grupo de alimentos en los Anexo 6.1 y 6.2, y los esquemas de alimentación utilizados en el Anexo 6.3.

Para los trabajos que no contaban con una descripción detallada de la composición química y parámetros de cinética ruminal de los ingredientes, se utilizaron como fuentes de información las tablas de composición de alimentos del NRC (2001), Shield v5.0 (Robinson, 1998), y CTR Dairy (Chilibroste et al., 2008).

La estimación de la variación de peso vivo cuando no fue reportada directamente se estimó en función de las variaciones en estado corporal, teniendo en cuenta una relación de 84,6 kg de PV por punto de variación en estado corporal (NRC, 2001).

2.3.1 Evaluación matemática de los modelos

Para evaluar la precisión y exactitud de las estimaciones realizadas por el modelo los resultados se compararon mediante regresión lineal considerando el R^2 y la desviación respecto a 1 de la pendiente, y mediante el MSPE:

$$MSPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - f(X_1, \dots, X_p)_i)^2$$

donde Y_i son valores observados, y $f(X_1, \dots, X_p)_i$ son los valores predichos por el modelo.

En las pruebas estadísticas, se rechaza la hipótesis nula (H_0) si el valor p asociado al resultado observado fue igual o menor que el nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

2.4 EXPERIMENTACIÓN CON “CTR DAIRY – PRODUCTION”

Para la experimentación con el “CTR Dairy – PRODUCTION”, se plantearon dos situaciones productivas, que utilizan la misma la misma cantidad y calidad de insumos, pero difieren en la estrategia de uso de ellos.

Supuestos asumidos en el ejercicio:

- Establecimiento lechero con 100 animales
- Dos ordeñes diarios (4 AM y 16 PM)
- PV animal promedio: 590 kg; variación de PV: -0,250 kg/d
- Composición de la leche: 3,9 % grasa, 3,5 % proteína y 4,8 % lactosa
- Precio de leche recibido por el productor (U\$S/L): 0,32
- Las dos estrategias de alimentación implicaron la misma cantidad y composición de ingredientes, difiriendo únicamente en la forma y momento de distribución durante el día (cuadro 2)
 - **Opción A:** Pastoreo AM (11 a 15 h). Suplementación con concentrado en sala de ordeño. Oferta de ensilaje de maíz post ordeño AM (38 %) y post ordeño PM (62 %).

- **Opción B:** Pastoreo AM (11 a 15 h). Suplementación con dieta parcialmente mezclada (PMR, por sus siglas en inglés) integrada por la mezcla de concentrado y ensilaje, ofrecidos a la 1 h (50 %) y a las 18 h (50 %).
- Para ambas situaciones se consideran los mismos consumos:
 - Forraje: 5 kg MS
 - Concentrado: 6 kg MS. Compuesto por: 60 % maíz molido, 30 % expeler de soja y 10 % afrechillo de trigo.
 - Ensilaje de maíz: 8 kg MS
- La composición de los ingredientes fue la misma para las dos situaciones (cuadro 3)
- Se asume que el costo de los alimentos y la alimentación es 0 (cero), a los efectos de identificar únicamente las diferencias atribuidas a la producción.

Cuadro 2: Distribución de los consumos de alimentos durante el día para las dos opciones de alimentación.

Hora del día	Opción A			Opción B	
	Pastura (kg MS)	Concentrado (kg MS)	Ensilaje (kg MS)	Pastura (kg MS)	PMR (kg MS)
0					
1					3,5
2					2,8
3					0,7
4		3,0			
5					
6					
7			2,0		
8			1,0		
9					
10					
11	2,0			2,0	
12	1,2			1,2	
13	1,0			1,0	
14	0,8			0,8	
15					
16		3,0			
17					
18			3,0		3,5
19			1,0		2,8
20			0,5		0,7
21			0,5		
22					
23					
Subtotal	5,0	6,0	8,0	5,0	14,0
TOTAL	19,0			19,0	

Se asumieron idénticos patrones de pastoreo para las dos opciones, aun cuando no es esperable que así sea debido a las diferentes formas y momentos de suplementación, y tiempos de ayuno previo al pastoreo. Esto se hizo para identificar las diferencias exclusivamente atribuidas al manejo de la suplementación y simplificar la interpretación de los resultados.

Cuadro 3: Composición química y parámetros de cinética, de los ingredientes utilizados en la simulación

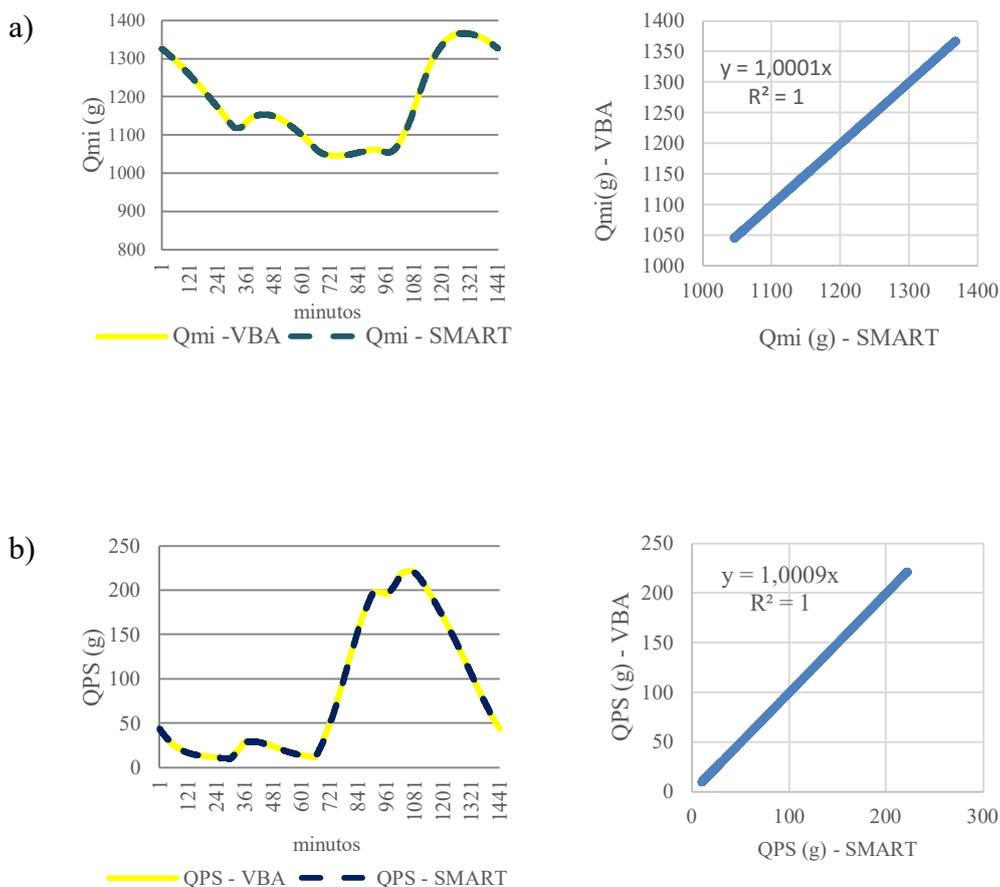
	unidades	Pastura	Concentrado	Ensilaje	Dieta
Amonio	g/kg MS	0,0	0,0	0,0	0,0
PC Degradable Insoluble	g/kg MS	51,2	170,0	26,9	78,5
PC Indegradable	g/kg MS	4,8	8,3	7,4	7,0
PC Soluble	g/kg MS	104,0	38,7	43,7	58,0
PC (calculado)	g/kg MS	160,0	217,0	78,0	143,47
Lípidos	g/kg MS	20,0	33,0	35,0	30,4
AGV	mol/kg MS	0,0	0,0	0,0	0,0
FDN	g/kg MS	600,0	140,0	460,0	395,8
FDN Degradable	g/kg MS	450,0	93,7	230,0	244,8
FDN Indegradable (calculado)	g/kg MS	150,0	46,3	230,0	150,9
Almidón Insoluble en Rumen	g/kg MS	0,0	270,4	156,0	151,1
Almidón Soluble en Rumen	g/kg MS	0,0	183,6	104,0	101,8
Carbohidratos Solubles en Agua	g/kg MS	130,0	109,2	77,0	101,1
Carbohidratos Solubles (calculado)	g/kg MS	130,0	292,8	181,0	202,9
Tasa Pasaje, sólidos	proporción/h	0,041	0,050	0,027	0,038
Tasa Degradación PC degradable	proporción/h	0,070	0,060	0,010	0,040
Tasa Degradación FDN	proporción/h	0,050	0,030	0,020	0,030
Tasa Degradación Almidón Insoluble	proporción/h	0,070	0,080	0,070	0,070
Tasa fraccionaria de reducción de partículas	proporción/h	0,250	0,250	0,250	0,250
Eficiencia Masticación de la MS	0-1	0,250	0,500	0,250	0,330
% MS	%	24,00	88,67	30,00	35,01
PC Total	%	16,00	21,70	7,80	14,35
Consumo MS	kg MS	5,00	6,00	8,00	19,00

3 RESULTADOS

3.1 EVALUACIÓN DE LA TRANSCRIPCIÓN A VBA

La evaluación de la de transcripción se realizó comparando el comportamiento (variación y acumulación diaria) de todas las variables del modelo, en cada uno de los leguajes de programación (SMART y VBA), con una misma fuente de información. Los datos ingresados provinieron de Mattiauda et al. (2013).

En la figura 4 se presenta para 4 variables elegidas al azar, la evolución minuto a minuto y la correlación de los acumulados diarios.



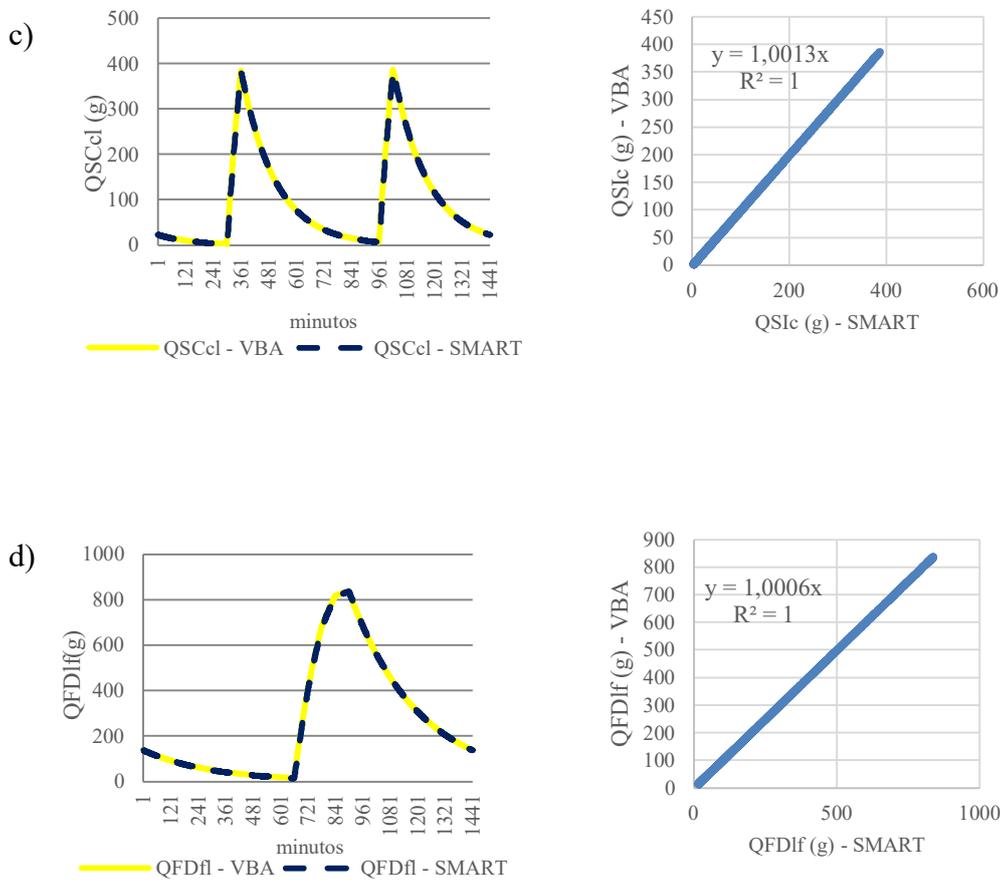


Figura 4. Comparación de resultados obtenidos con VBA y SMART. Evolución diaria (izquierda) y correlación de acumulados (derecha) para 4 variables: a) Pool de microorganismos, b) Pool de proteína soluble, c) Pool de carbohidratos solubles provenientes del concentrado y d) pool de fibra potencialmente degradable proveniente del forraje.

La totalidad de las variables que forman parte del modelo mostraron un comportamiento similar, con un coeficiente de determinación (R^2) superior al 99,98 % (Anexo 6.4).

3.2 VALIDACIÓN DEL MODELO “CTR DAIRY – PRODUCTION”

Para la validación se compararon los valores reportados (Observados) en los trabajos citados en la sección 2.3, con los resultados obtenidos (Simulados) con el modelo “CTR Dairy – PRODUCTION”.

En el cuadro 4 se presentan de forma detallada todas las estimaciones de producción en función de los nutrientes disponibles. También se indica los valores predichos (VP) para cada tratamiento, indicando en las celdas resaltadas cuál de los potenciales de producción fue seleccionado para definirlo.

Cuadro 4. Estimación del potencial de producción de leche según disponibilidad de nutrientes

Referencia	Trat	Obs.	VP	M _E	M _P	M _G	M _L
Mattiauda et al., 2013 (V1)	T 11-15	24,6	26,95	26,95	29,14	24,78	32,99
	T 7-11	23,6	26,17	26,17	28,32	24,28	34,56
	T 7-15	25,4	29,26	29,26	32,05	26,37	34,68
Fajardo et al., 2015 (V2 p1 y p2)	G0	37,2	43,29	49,45	43,29	52,96	32,67
	G1	33,7	29,37	32,20	29,37	34,14	21,77
	G2	33,9	32,77	35,59	32,77	35,07	23,19
	G1	36,3	40,54	43,74	40,54	41,76	31,29
	Post TMR	37,2	40,47	42,73	40,47	41,78	31,81
Perez-Prieto et al., 2011a (V3)	High	26,4	30,52	30,52	35,61	22,29	19,79
	Low	23,9	30,49	30,49	33,97	20,64	17,50
	Medium	25,6	29,80	29,80	35,29	21,55	18,32
Perez Prieto et al., 2011b (V4)	High PA-0	11,7	16,43	16,43	20,48	7,94	9,80
	High PA-8	16,6	19,43	19,43	21,31	16,46	14,31
	Low PA-0	10,1	14,73	14,73	16,30	5,86	8,60
	Low PA-8	15,5	19,09	19,09	20,65	16,64	14,17
Kononoff y Heinrichs, 2003 (V5)	LGH	48,5	52,07	52,07	59,21	47,94	58,15
	LGNH	47,5	50,15	50,15	56,87	41,40	49,34
	SHH	48,7	51,87	51,87	59,43	49,23	59,82
	SHNH	49,3	48,73	48,73	56,30	42,44	52,61
Ben Meir et al., 2018 (V6)	HE	46,5	45,94	49,70	45,94	49,86	70,61
	LE	45,7	54,59	62,98	54,59	61,89	86,38
	ME	45,9	50,00	55,59	50,00	55,92	77,72

Si bien el M_L y M_G no se utilizaron para la selección del VP, es importante tener en cuenta el comportamiento de estas variables ya que aportan información complementaria al análisis de las dietas o rutinas de alimentación propuestas.

El 64 % de los valores predichos fueron determinados por las estimaciones de M_E .

En las figuras 5 a 9 se representa la relación entre los valores Observados y las estimaciones de M_E , M_P , VP, M_G y M_L , respectivamente.

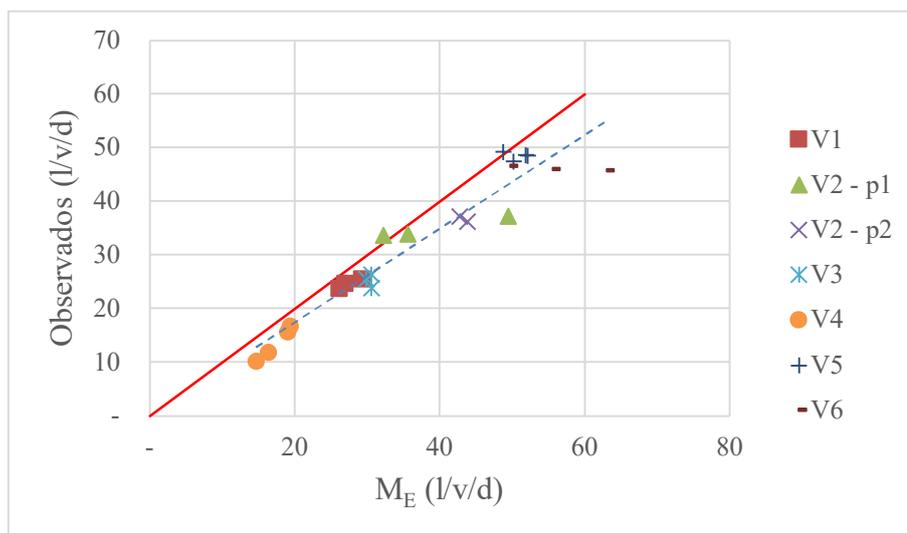


Figura 5. Relación entre el potencial de producción en función de la energía disponible (ME) vs. producción observada en los distintos tratamientos para cada trabajo de la validación (V1, V2...V6). La línea sólida (—) representa $y = x$. La línea punteada (---) representa la regresión ME vs Observados.

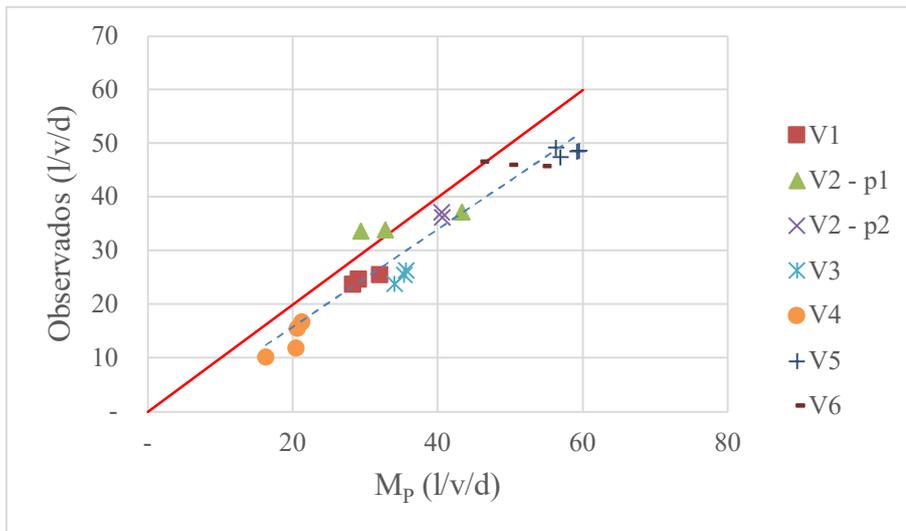


Figura 6. Relación entre el potencial de producción en función de la proteína disponible (M_p) vs. producción observada en los distintos tratamientos para cada trabajo de la validación (V1, V2...V6). La línea sólida (—) representa $y = x$. La línea punteada (---) representa la regresión M_p vs Observados.

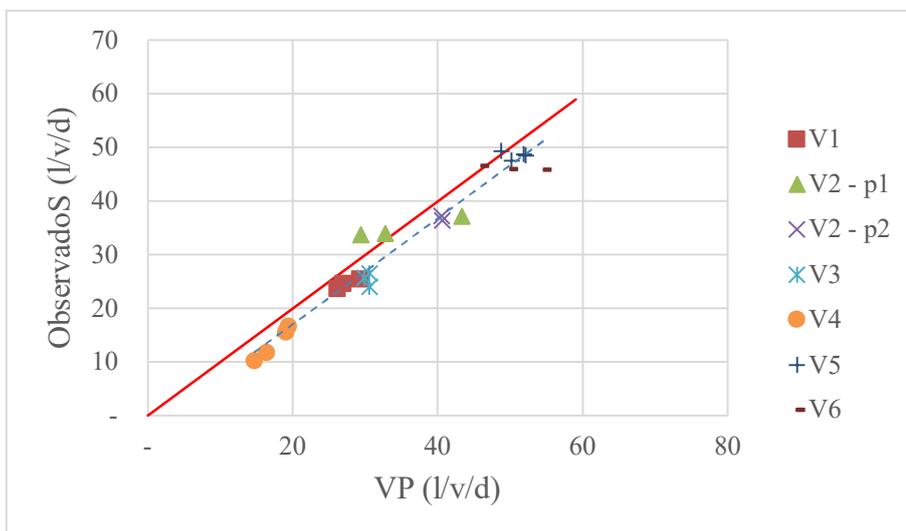


Figura 7. Relación entre los Valores de Predicción (VP) obtenidos con el modelo vs. Observados en los distintos tratamientos para cada trabajo de la validación (V1, V2...V6). La línea sólida (—) representa $y = x$. La línea punteada (---) representa la regresión VP vs Observados.

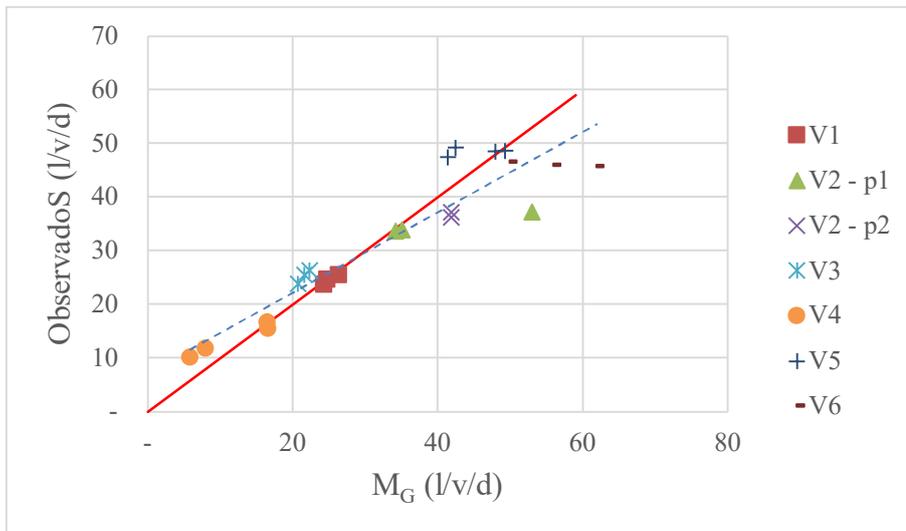


Figura 8. Relación entre el potencial de producción en función de la glucosa disponible (M_G) vs. producción observada en los distintos tratamientos para cada trabajo de la validación (V1, V2...V6). La línea sólida (—) representa $y = x$. La línea punteada (---) representa la regresión M_G vs Observados.

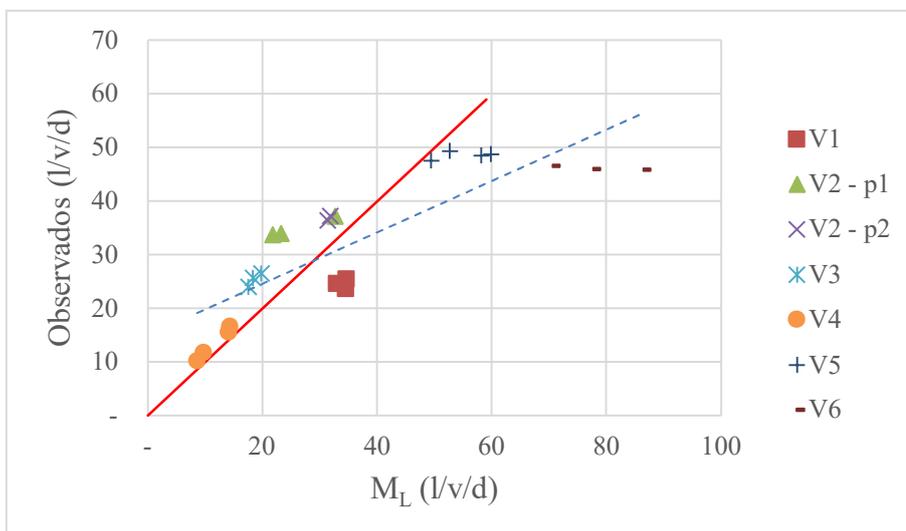


Figura 9. Relación entre el potencial de producción en función de los lípidos disponibles (M_L) vs. producción observada en los distintos tratamientos para cada trabajo de la validación (V1, V2...V6). La línea sólida (—) representa $y = x$. La línea punteada (---) representa la regresión M_L vs Observados.

A excepción del M_L , las relaciones “simulado-observado” muestran un buen agrupamiento de puntos entorno a la recta $y = x$.

En el cuadro 5 se resumen las estimaciones de regresión lineal y MSPE obtenidos de la comparación de resultados de cada uno de los modelos y las producciones de leche observadas.

Cuadro 5. Análisis de regresión lineal y MSPE entre valores observados y las determinaciones de potencial de producción

Modelo	Parámetros	Estimación	LI (95 %)	LS (95 %)	p-valor	R ²	MSPE
VP	<i>a</i>	-2,72	-6,62	1,17	0,1605	0,95	17,4
	<i>b</i>	0,99	0,89	1,09	<0,0001		
M_E	<i>a</i>	-0,03	-4,89	4,82	0,9893	0,92	38,4
	<i>b</i>	0,87	0,75	1,00	<0,0001		
M_P	<i>a</i>	-2,38	-7,70	2,94	0,3622	0,91	49,1
	<i>b</i>	0,91	0,78	1,04	<0,0001		
M_G	<i>a</i>	7,19	2,05	12,33	0,0085	0,86	38,1
	<i>b</i>	0,75	0,61	0,89	<0,0001		
M_L	<i>a</i>	15,00	8,94	21,06	<0,0001	0,71	192,7
	<i>b</i>	0,48	0,34	0,62	<0,0001		

a = intercepto; *b* = coeficiente de regresión; LI (95 %) y LS (95 %) = límites inferior y superior (respectivamente) del intervalo de confianza al 95 %.

El modelo con desempeño más pobre fue la estimación en base a los lípidos disponibles (M_L). En el otro extremo se encuentran las estimaciones de VP, con un ajuste satisfactorio, tanto en precisión como en exactitud.

En todas las evaluaciones se encontró una relación lineal positiva entre las estimaciones de los modelos y los valores Observados.

Para el VP y los modelos utilizados en su definición (M_E y M_P), el intercepto no es diferente de cero, y la pendiente sí lo es, estando el valor 1 entre los límites del intervalo de confianza.

La prueba específica para evaluar la hipótesis de que el coeficiente de regresión es igual a 1 (cuadro 6), no permitió descartar esta hipótesis para VP y M_P , pero sí en las estimaciones por M_E .

Cuadro 6. Resultados de la prueba de hipótesis para el coeficiente de regresión (b).

Modelo	H0	p-valor
VP	$b = 1$	0,81921
M_E	$b = 1$	0,04412
M_P	$b = 1$	0,16869

El análisis de los residuales estudentizados para VP (figura 10) muestra que la totalidad de los valores se encuentran dentro de un rango normal de desvío, no observándose registros atípicos por fuera de los extremos -3 a +3.

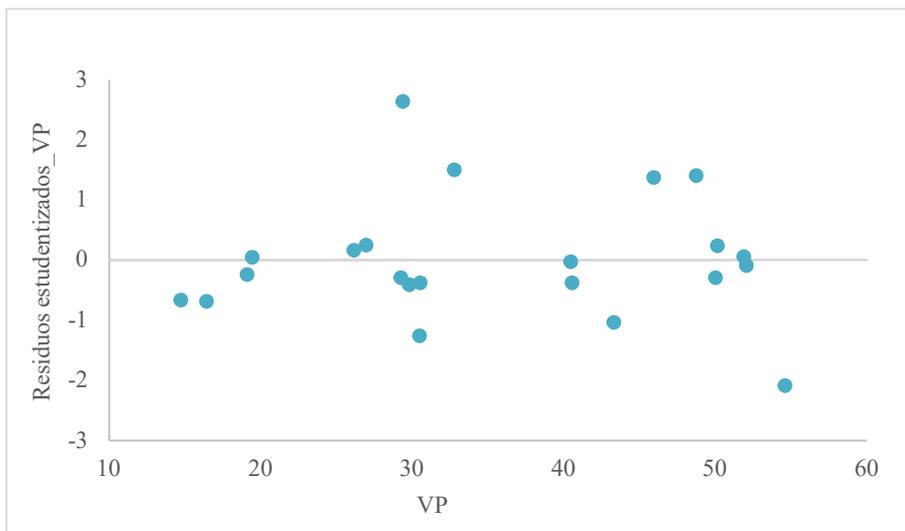


Figura 10. Relación entre residuos estudentizados y los Valores de Predicción (VP)

3.3 SIMULACIÓN DE ESTRATEGIAS DE ALIMENTACIÓN CON “CTR DAIRY – PRODUCTION”

En el cuadro 7 se muestran las estimaciones de producción realizadas por el modelo “CTR Dairy – PRODUCTION”, para las dos estrategias de alimentación planteadas.

Cuadro 7. Resultados productivos esperados con las dos alternativas de alimentación.

	Opción A	Opción B	Diferencia A - B
Producción de leche			
M _P (l/d)	29,51	29,14	0,37
M _E (l/d)	29,50	29,49	0,01
VP (l/d)	29,50	29,14	0,36
Proyección de beneficios			
U\$S/vaca/d	9,44	9,32	0,12
U\$S/rodeo/d	944	932	11
U\$S/rodeo/mes	28789	28439	350

En la Opción A las producciones previstas para la energía y proteína disponibles prácticamente no difieren (29,50 vs. 29,51 litros, respectivamente). En cambio, para la Opción B la producción estaría limitada por la disponibilidad de nutrientes aminogénicos (29,14 vs. 29,49 litros para M_P y M_E, respectivamente).

Entre las dos opciones de alimentación se estima una diferencia de 0,36 l/vaca/d, que trasladado al rodeo (100 animales) y al mes, equivale a una diferencia de U\$S 350, únicamente considerando los ingresos extras por producción con la Opción A.

En el cuadro 8 se presentan los promedios diarios para los principales parámetros ruminales simulados por el modelo

Cuadro 8. Información ruminal (promedios diarios)

	Opción A	Opción B	Diferencia A - B
Volumen (l)	85,2	85,1	0,1
pH	6,5	6,5	
Amonio (mg/l)	361,0	352,9	8,1
AGV (mM/l)	86,9	87,1	- 0,2
Pool Microorganismos (g)	1,530,0	1,525,5	4,5
Pool PC Soluble (g)	42,0	37,3	4,7
Pool Carbohidratos Solubles (g)	53,0	55,3	- 2,3

La mayor diferencia se observa en el pool de Proteína Cruda Soluble (QPS) a favor de la Opción A (12,6 %), lo que estaría explicando la mayor producción esperada con esta estrategia de alimentación, gracias a una mayor disponibilidad de aminoácidos para absorber a nivel intestinal.

En las figuras 11 y 12 se muestra la evolución diaria y las diferencias registradas minuto a minuto en el tamaño del QPS para las dos alternativas de alimentación.

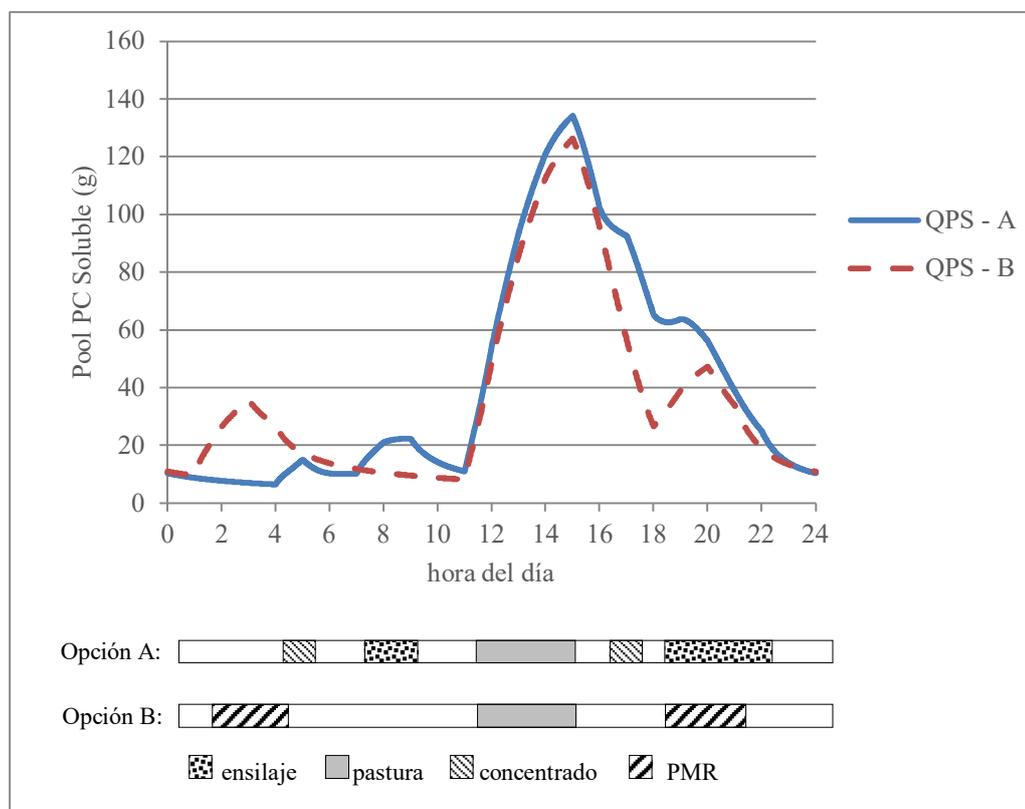


Figura 11. Evolución diaria del QPS para las dos alternativas de alimentación.

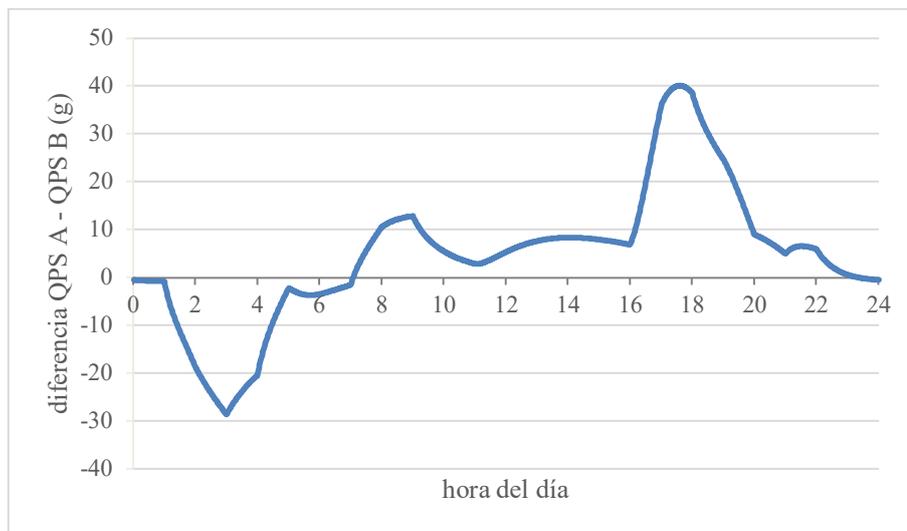


Figura 12. Evolución minuto a minuto de la diferencia en el tamaño del QPS para las dos alternativas de alimentación.

Durante el pastoreo se observa la mayor acumulación en el QPS. Después del pico de acumulación comienza un descenso en el tamaño de este pool, que en la Opción A es atenuado en primera instancia por el consumo de concentrado en el ordeño de la tarde, y posteriormente por el consumo de ensilaje. En la Opción B el decaimiento posterior al pico continúa constante hasta que se revierte la tendencia con el consumo de PMR a las 18 h.

Los dos momentos donde se identifican las mayores diferencias en el tamaño del QPS son en la madrugada a favor de la Opción B cuándo éste recibe la oferta de PMR, y en la tarde a favor de la Opción A, asociado al suministro de concentrado en el ordeño PM. Durante la mayor parte del día la Opción A genera un tamaño del QPS superior a la Opción B.

En las figuras 13 y 14 se muestra la evolución diaria del QPS, pool de carbohidratos solubles (QSC, g) y pool de microorganismos (QM_i, g), para las opciones A y B, respectivamente.

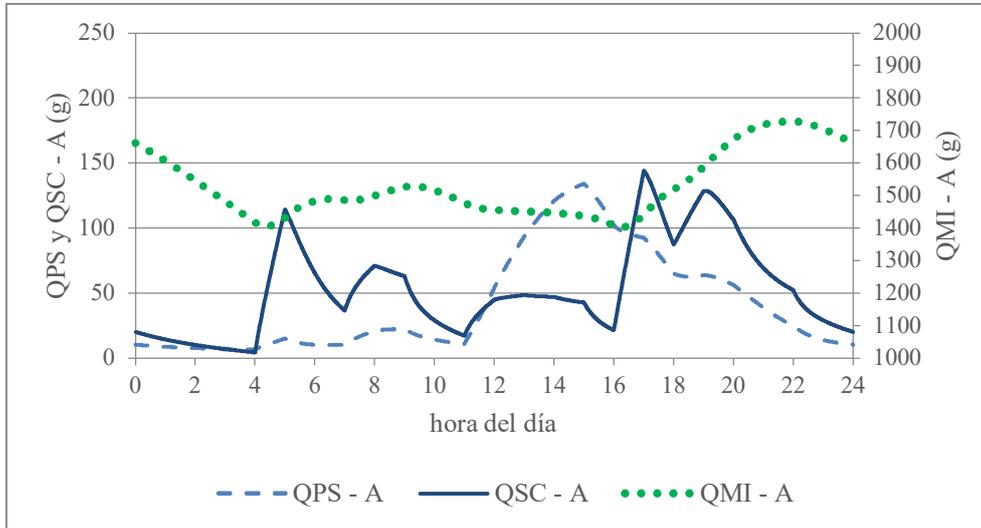


Figura 13. Evolución diaria del pool ruminal de proteínas solubles (QPS), carbohidratos solubles (QSC) y microorganismos (QMi), para la Opción A de alimentación.

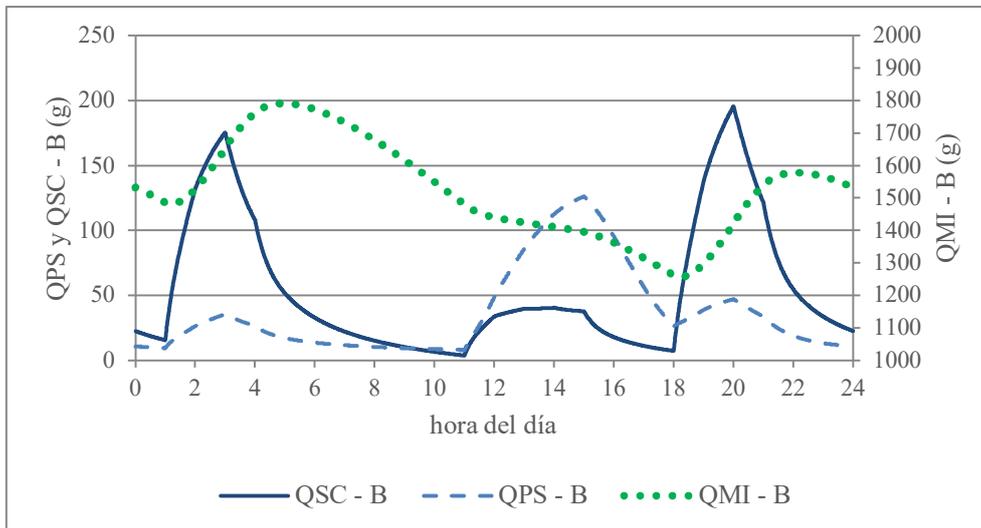


Figura 14. Evolución diaria del pool ruminal de proteínas solubles (QPS), carbohidratos solubles (QSC) y microorganismos (QMi), para la Opción B de alimentación.

La evolución diaria del pool de carbohidratos solubles muestra picos de acumulación asociados directamente a cada evento de alimentación.

La evolución del pool de microorganismos durante el día difiere según el esquema de alimentación. En la Opción A se observa un aumento en la acumulación posterior al último evento de alimentación vespertino, mientras que en la Opción B se aprecian dos picos asociados a los consumos de la PMR, con un decaimiento continuo entre la ocurrencia del primero y el segundo. El comportamiento del QMi para la Opción A fue más estable, con valores que oscilaron entre 1729 y 1403 g, mientras que en la Opción B hubo mayores variaciones, con máximos de 1792 g y mínimos de 1257 g.

En las figuras 15 y 16 se muestra la evolución esperada para la concentración de AGV y el pH ruminal, con las dos alternativas de alimentación.

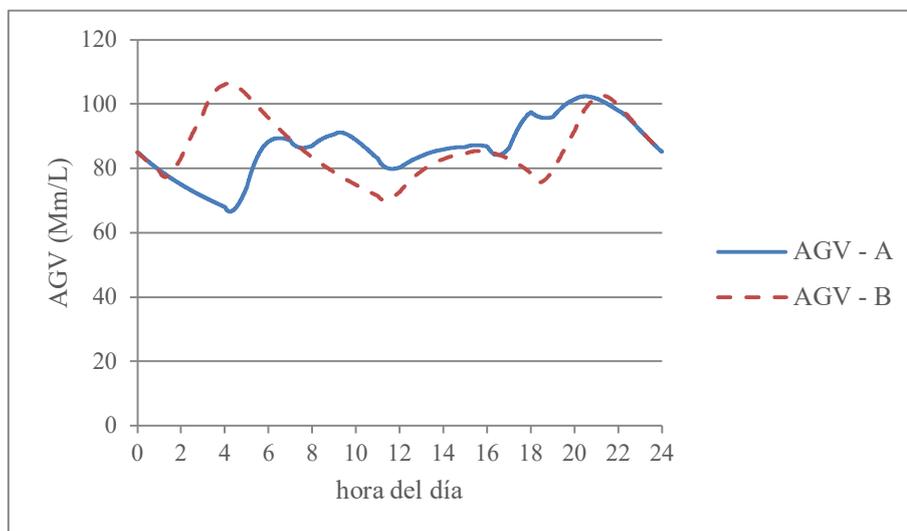


Figura 15. Evolución diaria de la concentración ruminal de AGV, para las dos opciones de alimentación (A y B).

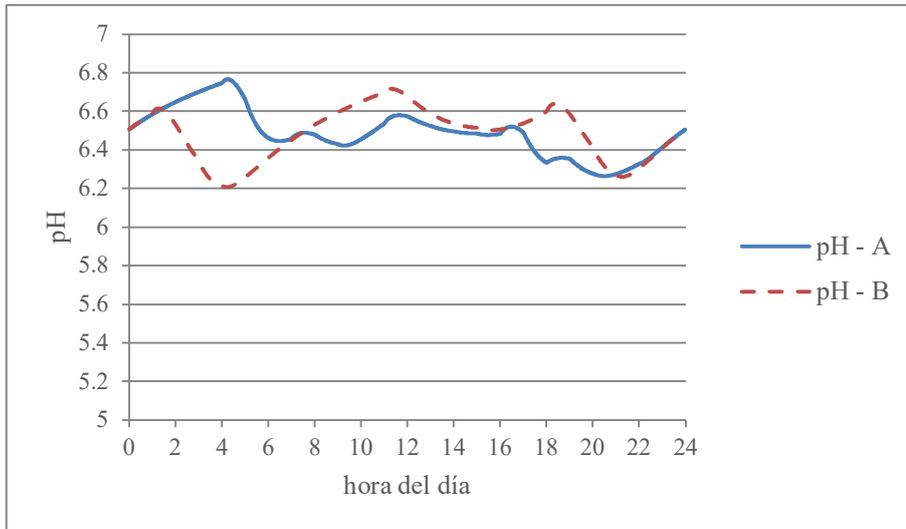


Figura 16. Evolución diaria del pH ruminal, para las dos opciones de alimentación (A y B).

La evolución de la curva de concentración de los AGV tiene un patrón similar a la del pool de microorganismos.

Para las dos estrategias de alimentación el pH ruminal durante el día osciló entre 6,2 y 6,8. El mayor contraste de las curvas se da en las primeras horas del día (2 a 5 AM), cuando la concentración de AGV es mínima en la Opción A, y máxima en la Opción B.

4 DISCUSIÓN

4.1 TRANSCRIPCIÓN DEL MODELO “CTR DAIRY” A VBA

Para la totalidad de las variables del modelo, la comparación entre los resultados obtenidos con el programa SMART y con el codificado en VBA, mostraron un alto grado de concordancia, con un coeficiente de determinación cercano a 1.

En base a estos resultados se aceptó como válido y concluido satisfactoriamente el proceso de transcripción del modelo “CTR Dairy” desde SMART a VBA.

4.2 VALIDACIÓN DEL MODELO “CTR DAIRY – PRODUCTION”

La evaluación general del comportamiento del modelo en base a disponibilidad de energía (M_E) y aminoácido (M_P) muestra que tuvieron buenos niveles de precisión y exactitud ($R^2 = 0,92$ y $0,91$; y $MSPE = 38,4$ y $49,1$ respectivamente).

El VP definido por el criterio de “nutriente limitante” entre las previsiones realizadas por M_E y M_P , presenta muy buenos valores de ajuste entre los valores observados y simulados ($R^2 = 0,95$ y $MSPE = 17,4$).

Los niveles de precisión y exactitud obtenidos con VP son comparables a los logrados por otros modelos mecanicistas de vasto desarrollo científico. En una evaluación de los modelos CNCPS v5 y v6, con datos de tres estudios publicados que incluían animales en un amplio rango de producción y días de lactancia, primíparas y multíparas, Tylutki et al. (2008) reportaron para la predicción de producción de leche una precisión que oscilo entre $R^2 = 0,86$ y $0,89$; y un $MSPE = 19,9$ y $14,6$ para CNCPS v5 y v6, respectivamente. Para el modelo Nutrient Requirements of Dairy Cattle, la comparación de la ingesta de EN_L (estimada a partir del consumo de materia seca real y la concentración de EN_L) con la utilización de EN_L (estimaciones del modelo de mantenimiento, producción de leche real y cambios de peso vivo) obtuvo un ajuste de $R^2 = 0,61$ (NRC, 2001).

En el análisis más detallado de los resultados individuales provistos por M_E y M_P , aunque la mayoría de los valores estén por debajo de la línea $y=x$ (figuras 5 y 6, respectivamente), y esto podría interpretarse como una sobrestimación sistemática, los parámetros de regresión obtenidos estarían indicando un comportamiento adecuado, con los intercepto no distintos a cero ($p = 0,99$ y $0,36$ para M_E y M_P , respectivamente), y el coeficiente de regresión no diferentes de 1 en el caso de M_P ($p = 0,169$). En cambio, para las estimaciones de M_E el coeficiente de regresión sí fue diferente de 1 ($p = 0,045$).

Este comportamiento para M_E podría explicarse por los valores reportados en las producciones más altas, donde se observa un mayor desvío respecto a la recta. Estos puntos se corresponden al trabajo de Ben Meir et al. (2018) donde específicamente se evaluó la eficiencia energética de los animales. Estos autores reportaron para el grupo LE (baja eficiencia) un consumo de materia seca 24,5 % superior al de HE (alta eficiencia), sin que se hayan detectado diferencias en la producción de ECM (leche corregida por energía). En las estimaciones por M_E , se integran estos mayores consumos en mayores producciones, generando para estas situaciones una sobrestimación de producción. El modelo “CTR Dairy” (y por ende en “CTR Dairy – PRODUCTION”) trabaja con el animal promedio de la población, por lo tanto no está preparado para detectar ese tipo de variaciones en la eficiencia de utilización de nutrientes.

El modelo de estimación por lípidos disponibles (M_L) fue el que obtuvo la más baja precisión y exactitud ($R^2 = 0,71$ y $MSPE = 192,7$ respectivamente). Esto estaría explicado por las características intrínsecas al proceso de acumulación de grasa en leche y los supuestos asumidos al momento de diseñar el modelo para M_L (Dijkstra et al., 1996c).

En el 45 % de los casos M_L fue menor a M_G lo cual estaría indicando que en estas situaciones, las estimaciones del potencial de producción por glucosa absorbida estuvieron afectadas por el déficit de ácidos grasos de cadena larga, haciendo el

proceso menos eficiente energéticamente por un incremento en el requerimiento de glucosa para la síntesis *de novo* (Baldwin et al., 1980).

El modelo M_G tuvo un nivel de exactitud similar al de M_E e incluso superior al de M_P (MSPE 38,1; 38,4 y 49,1 respectivamente), y una precisión aceptable ($R^2 = 0,86$). Esto estaría indicando que este modelo tiene margen de mejora en la medida que se pueda incorporar en su estructura el efecto de las variaciones de peso en el aporte de nutrientes glucogénicos para la síntesis de leche.

4.3 EVALUACIÓN DE DIETAS CON “CTR DAIRY – PRODUCTION”

El modelo “CTR Dairy – PRODUCTION” estima para las dos estrategias de alimentación un potencial de producción en función de la energía disponible similar, pero con diferencias para el M_P (29,51 y 29,14 litros, Opciones A y B respectivamente). Estas diferencias estarían explicadas por la evolución diaria que tiene el pool de proteína soluble en cada una de las estrategias, generándose una acumulación mayor a lo largo del día en el esquema que se ofreció el concentrado separado del ensilaje. La mayor disponibilidad de AA disponibles para el proceso de síntesis de proteína microbiana puede haber determinado un mayor flujo de estos nutrientes a la glándula mamaria. El modelo simula un 1,1 % más de aminoácidos absorbidos para Opción A frente a la B.

Si bien el modelo no identifica diferencias importantes en el tamaño promedio del pool de microorganismos, sí permite observar cómo es su variación a lo largo del día, y la influencia que tiene en él la evolución del QSC. Al haber mayor disponibilidad de carbohidratos digeridos, mejora la producción diaria de proteínas microbianas al proporcionar más energía para el crecimiento (Hoover y Stokes, 1991).

La alta interrelación entre la actividad microbiana y la producción de ácidos grasos volátiles (Bergman, 1990; Dijkstra, 1994) explicarían la similitud encontrada entre los patrones diarios de las curvas de QMi y concentración de AGV.

La evolución del pH ruminal estimado estaría indicando que en ninguna de las dos opciones propuestas sería esperable un efecto adverso de la dieta o su manejo en la actividad ruminal. Se ha establecido que el pH crítico para el mantenimiento de una digestibilidad aceptable del forraje estaría por encima de 5,8 (Russell y Wilson, 1996; Wales et al., 2004).

4.4 CONSIDERACIONES FINALES

En una revisión sobre los efectos de la sincronización de la disponibilidad de N y energía en la función ruminal y las respuestas en producción de vacas lecheras, Cabrita et al. (2006) analizaron los efectos de alterar la sincronización de las dietas cambiando los ingredientes o alterando la frecuencia de alimentación (dietas totales o ingredientes), encontrando que la evidencia de los beneficios es contradictoria, tanto para la síntesis de proteína microbiana como para maximizar la producción de leche. Sin embargo, los autores plantean una serie de elementos que podrían estar interfiriendo con los resultados observados, y plantean alternativas para solucionarlos, incluida la necesidad de contar con modelos que representen mejor la fase *lag* previa a la digestión y pasaje ruminal.

El modelo “CTR Dairy – PRODUCTION” se adapta a esos requerimientos, siendo al momento de publicación del presente trabajo, el único con la capacidad de predecir el efecto en la secuencia de alimentación a lo largo del día sobre la evolución de los parámetros ruminales (p. ej.: volumen, pH, tamaño del pool de microorganismos, etc.), disponibilidad de nutrientes glucogénicos, aminogénicos y lipogénicos, y en la producción de leche.

La implementación y desarrollo de “CTR Dairy - PRODUCTION” codificado en su totalidad en VBA y, por tanto, accesible mediante Microsoft EXCEL ®, permite disponer de una herramienta con posibilidades de mayor difusión en el área de la investigación, donde puede ser utilizado, por ejemplo, para simular el efecto de diferentes manejos nutricionales que impliquen en uso de ingredientes con diferentes momentos de inclusión, previo a la realización de trabajos experimentales.

Otra implicancia de esto es que también se habilita la posibilidad del uso a nivel comercial, es decir, ser utilizado por los asesores o productores para decidir cuál o cuáles son las mejores combinaciones en la cantidad, tipo y momento de uso de los recursos alimenticios que optimizan el uso de estos.

Por último, y relacionado con los puntos anteriores, el nivel de detalle de la información manejado en el desarrollo del modelo “CTR Dairy – PRODUCTION”, y la estructura de la codificación, habilita la posibilidad de en futuras versiones incorporar otros parámetros a evaluar, como pueden ser las emisiones de metano o la excreta de nutrientes al ambiente.

5 **BIBLIOGRAFÍA**

- AFRC (Agricultural and Food Research Council). 1993. Energy and protein requirements of ruminants: An advisory manual. Technical committee on responses to nutrients. Alderman G, Cottrill BR. (Eds.). Wallingford: CAB International. 159 pp.
- ARS (Agricultural Research Service). 1978. Concepts for using modeling as a research tool. Washington DC, Estados Unidos. 18 pp.
- Baldwin RL, Thornley JHM, Beever DE. 1987. Metabolism of the lactating cow. II. Digestive elements of a mechanistic model. *Journal of Dairy Research*, 54: 107-131.
- Baldwin RL, Smith NE, Taylor J, Sharp M. 1980. Manipulating metabolic parameters to improve growth rate and milk secretion. *Journal of Animal Science*, 51: 1416-1428.
- Baldwin RL, Koong LJ, Ulyatt MJ. 1977. A dynamic model of ruminant digestion for evaluation of factors affecting nutritive value. *Agricultural Systems*, 2: 255-288.
- Ben Meir YA, Nikbachat M, Fortnik Y, Jacoby S, Levit H, Adin G, Cohen Zinder M, Shabtay A, Gershon E, Zachut M, Mabjeesh SJ, Halachmi I, Miron J. 2018. Eating behavior, milk production, rumination, and digestibility characteristics of high- and low-efficiency lactating cows fed a low-roughage diet. *Journal of Dairy Science*, 101: 1–12.
- Bergman EN. 1990. Energy contributions of volatile fatty acids from the gastrointestinal tract in various species. *Physiological Reviews*. 70 (2), 567–590. doi:10.1152/physrev.1990.70.2.567
- Cabrita A, Dewhurst R, Fernandes J, Mira da Fonseca A. 2006. Evaluation of the effects of synchronising the availability of N and energy on rumen function and production responses of dairy cows – a review. *Animal Research*, 55: 1-24.

- Cant JP, Berthiaume R, Lapierre H, Luimes PH, McBride BW, Pacheco D. 2003. Responses of the bovine mammary glands to absorptive supply of single amino acids. *Canadian Journal of Animal Science*, 83: 341-355.
- Chilibroste P, Dijkstra J, Robinson PH, Tamminga S. 2008. A simulation model “CTR Dairy” to predict the supply of nutrients in dairy cows managed under discontinuous feeding patterns. *Animal Feed Science and Technology*, 143: 148-173.
- Chilibroste P. 2002. Evaluación de modelos detallados de rumen para predecir disponibilidad de nutrientes en sistemas intensivos de producción de leche bajo pastoreo. *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal*, 10: 232-240.
- Chilibroste P, Dijkstra J, Tamminga S. 2001. Design and evaluation of a non-steady state rumen model. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 49: 297–312.
- Chilibroste P, Aguilar C, García F. 1997. Nutritional evaluation of diets. Simulation of digestion and passage of nutrients through rumen-reticulum. *Animal Feed Science and Technology*, 68: 259-275.
- Dijkstra J, Kebreab E, Mills JAN, Pellikaan WF, Lopez S, Bannink A, France J. 2007. Predicting the profile of nutrients available for absorption: From nutrient requirement to animal response and environmental impact. *Animal*, 1: 99–111. doi: 10.1017/S1751731107657760.
- Dijkstra J, France J, Davies DR. 1998. Different Mathematical Approaches to Estimating Microbial Protein Supply in Ruminants. *Journal of Dairy Science*, 81: 3370–3384.
- Dijkstra J, France J. 1996a. A comparative evaluation of models of whole rumen function. *Annales de Zootechnie*, 45: 175-192.

- Dijkstra J, France J, Neal HDSC, Assis AG, Aroeira LJM, Campos OF. 1996b. Simulation of digestion in cattle fed sugarcane: model development. *The Journal of Agricultural Science*, 127: 231–246.
- Dijkstra J, France J, Assis AG, Neal HDSC, Campos OF, Aroeira LJM. 1996c. Simulation of digestion in cattle fed sugarcane: prediction of nutrient supply for milk production with locally available supplements. *The Journal of Agricultural Science*, 127: 247–260.
- Dijkstra J. 1994. Production and absorption of volatile fatty acids in the rumen. *Livestock Production Science*, 39: 61-69.
- Fajardo M, Mattiauda DA, Motta G, Genro TC, Meikle A, Carriquiry M, Chilibruste P. 2015. Use of mixed rations with different access time to pastureland on productive responses of early lactation holstein cows. *Livestock Science*, 181: 51–57.
- Fox DG, Sniffen CJ, O'Connor JD, Russell JB, Van Soest PJ. 1992. A Net Carbohydrate and Protein System for evaluating cattle diets: III Cattle requirements and diet adequacy. *Journal of Animal Science*, 70: 3578-3596.
- France J, Thornley JHM, Beever DE. 1982. A mathematical model of the rumen. *Journal of Agricultural Science (Cambridge)*, 99: 349-353.
- Gerrits WJJ, Kebreab E, Kramer MR, Dijkstra J. 2008. Simulation exercises for MSc students animal science: rumen digestion and pig growth. In: France, J, Kebreab, E. (Eds.). *Mathematical Modelling in Animal Nutrition*. Wallington, UK: CAB International. 544-566.
- Gregorini P, Villalba JJ, Provenza FD, Beukes PC, Forbes JM. 2015. Modelling preference and diet selection patterns by grazing ruminants: A development in a mechanistic model of a grazing dairy cow, MINDY. *Animal Production Science*, 55, 360–375.

- Gregorini P, Beukes PC, Romera AJ, Levy G, Haniga MD. 2013. A model of diurnal grazing patterns and herbage intake of a dairy cow, MINDY: model description. *Ecological Modelling*, 270: 11–29.
- Gregorini P. 2012. Diurnal grazing pattern: Its physiological basis and strategic management. *Animal Production Science*, 52 (7): 416–430.
- Hanigan MD, Crompton LA, Metcalf JA, France J. 2001. Modelling mammary metabolism in the dairy cow to predict milk constituent yield, with emphasis on amino acid metabolism and milk protein production: model construction. *Journal of Theoretical Biology*, 213: 223-239.
- Hanigan MD, Baldwin RL. 1994. A mechanistic model of mammary gland metabolism in the lactating cow. *Agricultural Systems*, 45: 369-419.
- Hoover WH, Stokes SR. 1991. Balancing Carbohydrates and Proteins for Optimum Rumen Microbial Yield. *Journal of Dairy Science*, 74: 3630-3644.
- Huhtanen P, Ahvenjärvi S, Weisbjerg MR, Nørgaard P. 2006. Digestion and passage of fibre in ruminants. In: Sejrsen K, Hvelplund T, Nielsen MO. (Eds). *Ruminant physiology: Digestion, metabolism and impact of nutrition on gene expression, immunology and stress*. Wageningen: Wageningen Academic Publishers. 87 - 135.
- Kebreab E, Dijkstra J, Bannink A, France J. 2009. Recent advances in modeling nutrient utilization in ruminants. *Journal of Animal Science*, 87: 111–122.
- Kononoff PJ, Heinrichs AJ. 2003. The effect of corn silage particle size and cottonseed hulls on cows in early lactation. *Journal of Dairy Science*, 86: 2438–2451.
- Kutner MH, Nachtsheim CJ, Neter J, Li W. 2005. *Applied linear statistical models*. 5th Ed. New York: McGraw-Hill Irwin. 1396 pp.
- Mattiauda DA, Tamminga S, Gibb MJ, Soca P, Bentancur O, Chilibruste P. 2013. Restricting access time at pasture and time of grazing allocation for holstein

- dairy cows: Ingestive Behaviour, Dry Matter Intake and Milk Production. *Livestock Science*, 152: 53–62.
- Mayer DG, Butler DG. 1993. Statistical validation. *Ecological Modelling*, 68: 21-32.
- McDonald P, Edwards RA, Greenhalgh JFD, Morgan CA, Sinclair LA, Wilkinson RG. 2011. *Animal Nutrition* (7th Ed). Harlow: Pearson. 712 pp.
- Mitchell PL, Sheehy JE. 1997. Comparison of predictions and observations to assess model performance: a method of empirical validation. In: Kropff, M.J., Teng, P.S., Aggarwal, P.K., Bouma, J., Bouman, B.A.M., Jones, J.W., Van Laar, H.H. (Eds.). *Applications of Systems Approaches at the Field Level*. Boston: Kluwer Academic Publishers. 437–451.
- Moe PW, Tyrrell HF, Flatt WP. 1971. Energetics of body tissue mobilization. *Journal of Dairy Science*, 54: 548-553.
- Murphy MR, Baldwin RL, Ulyatt MJ. 1986. An update of a dynamic model of ruminant digestion. *Journal of Animal Science*, 62: 1412-1422.
- Murphy MR, Baldwin RL, Ulyatt MJ, Koong LJ. 1983. A quantitative analysis of rumination patterns. *Journal of Animal Science*, 56: 1237-1240.
- Murphy MR, Baldwin RL, Koong LJ. 1982. Estimation of stoichiometric parameters for rumen fermentation of roughage and concentrate diets. *Journal of Animal Science*, 55: 411-421.
- NRC (National Research Council). 2001. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Seventh Revised Edition*, 2001. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9825>.
- Pérez-Prieto LA, Peyraud JL, Delagarde R. 2011a. Pasture intake, milk production and grazing behaviour of dairy cows grazing low-mass pastures at three daily allowances in winter. *Livestock Science*, 137: 151–160.

- Pérez-Prieto LA, Peyraud JL, Delagarde R. 2011b. Substitution rate and milk yield response to corn silage supplementation of late-lactation dairy cows grazing low-mass pastures at 2 daily allowances in autumn. *Journal of Dairy Science*, 94: 3592–3604.
- Reichl JR, Baldwin RL. 1975. Rumen modeling: rumen input-output balance models. *Journal of Dairy Science*, 58 (6): 879-890.
- Robinson PH. 1998. SHIELD (version 5.0) Dairy Ration Evaluator. [En línea]. 17 de diciembre de 2021.
https://animalscience.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk446/files/inline-files/shldman_0.pdf.
- Russell JB, Wilson DB. 1996. Why are ruminal cellulolytic bacteria unable to digest cellulose at low pH? *Journal of Dairy Science*, 79: 1503-1509.
- Russell JB, O'Connor JD, Fox DG, Van Soest PJ, Sniffen CJ. 1992. A Net Carbohydrate and Protein System for evaluating cattle diets. 1. Ruminal fermentation. *Journal of Animal Science*, 70: 3551-3561.
- Sauvant D. 1996. A comparative evaluation of models of lactating ruminant. *Annales de Zootechnie*, 45: 215-235.
- Sniffen CJ, O'Connor JD, Van Soest PJ, Fox DG, Russell JB. 1992. A Net Carbohydrate and Protein System for evaluating cattle diets. 2. Carbohydrate and protein availability. *Journal of Animal Science*, 70: 3562-3577.
- Sutton JD. 1989. Altering Milk Composition by Feeding. *Journal of Dairy Science*, 72: 2801-2814.
- Tedeschi LO. 2006. Assessment of the adequacy of mathematical models. *Agricultural Systems*, 89: 225-247.
- Thornley JHM, France J. 2007. Role of Mathematical Models. En: Thornley JHM, France J. (Eds.). *Mathematical Models in Agriculture: Quantitative Methods for*

the Plant, Animal and Ecological Sciences. Trowbridge, UK: CAB International. 1-18.

Tylutki TP, Fox DG, Durbal VM, Tedeschi LO, Russell JB, Van Amburgh ME, Pell AN. 2008. Cornell Net Carbohydrate and Protein System: A model for precision feeding of dairy cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 143(1-4): 174–202.

Van Knegsel ATM, van den Brand H, Dijkstra J, van Straalen WM, Heetkamp MJW, Tamminga S, Kemp B. 2007. Dietary Energy Source in Dairy Cows in Early Lactation: Energy Partitioning and Milk Composition. *Journal of Dairy Science*, 90: 1467–1476.

Volpe V, Cant J, Boston R, Susmel P, Moate P. 2010. Development of a dynamic mathematical model for investigating mammary gland metabolism in lactating cows. *The Journal of Agricultural Science*, 148: 31-54.

Waghorn GC, Baldwin RL. 1984. Model of metabolite flux within mammary gland of the lactating cow. *Journal of Dairy Science*, 67: 531-544.

Wales WJ, Kolver ES, Thorne PL, Egan AR. 2004. Diurnal variation in ruminal pH on the digestibility of highly digestible perennial ryegrass during continuous culture fermentation. *Journal of Dairy Science*, 87: 1864–1871.

6 ANEXOS

6.1 DESCRIPCIÓN DE LAS FRACCIONES DE ALIMENTO UTILIZADAS EN “CTR DAIRY” Y “CTR DAIRY – PRODUCTION”.

Nombre	unidad	Descripción
Amonio	g/kg MS	Por varios métodos de ensayo
PC Degradable	g/kg MS	PC supuestamente degradada ruminalmente
PC Indegradable	g/kg MS	PC supuestamente no degradada ruminalmente
PC Soluble	g/kg MS	PC supuestamente solubilizada en rumen
PC (calculado)	g/kg MS	
Lípidos	g/kg MS	Análisis por ensayo de extracto de éter
AGV	moles/kg MS	Por varios métodos de ensayo
FDN	g/kg MS	El ensayo incluye amilasa y se expresa sin cenizas residuales.
FDN Degradable	g/kg MS	30 h <i>in vitro</i> FDN digerido
FDN Indegradable (calculada)	g/kg MS	
Almidón Insoluble en Rumen	g/kg MS	Almidón no liberado de una bolsa de nylon <i>in sacco</i> a las 0 h
Almidón Soluble en Rumen	g/kg MS	Almidón liberado de una bolsa de nylon <i>in sacco</i> a las 0 h
Carbohidratos Solubles en Agua	g/kg MS	Por varios métodos de ensayo
Carbohidratos Solubles (calculados)	g/kg MS	
Tasa Pasaje, Sólidos	1/h	Rango 0,01 a 0,10 / h; Tasa de pasaje de sólidos en el rumen
Tasa Degradación, PC Degradable	1/h	Rango 0,03 a 0,25 / h; <i>In sacco</i> tasa de degradación
Tasa Degradación, FDN Degradable	1/h	Rango 0,01 a 0,12/h; <i>In sacco</i> tasa de degradación
Tasa Degradación, Almidón Insoluble	1/h	Rango 0,03 a 0,25/h; <i>In sacco</i> tasa de degradación
Tasa Fraccionaria de Reducción de Partículas	1/h	Valores por defecto: 0,20 (ensilaje y concentrados), 0,15 (pastos y heno)
Eficiencia de Masticación de la MS ^(a)	0-1	Valores por defecto: 0,50 (ensilaje y concentrados), 0,25 (pasto y heno)

^(a) Los gramos de MS de un alimento liberados/100 g de componente de alimento consumidos durante la alimentación y la rumia.

6.2 COMPOSICIÓN DE LAS DIETAS UTILIZADAS EN LOS TRABAJOS DE VALIDACIÓN DEL “CTR DAIRY - PRODUCTION”

- *Mattiauda et al. (2013) – VI*

Tratamiento				T 7 – 15	T 7 - 11	T 11 -15
	Pastura (prom)	Concentrado	Ensilaje	Dieta Completa	Dieta Completa	Dieta Completa
Amonio						
PC Degradable	101,3	94,8	23,5	78,4	79,0	74,2
PC Indegradable	10,2	46,7	6,5	20,8	22,3	18,9
PC Soluble	91,2	43,7	38,1	61,5	60,4	61,5
PC (calculado)	202,7	185,3	68,0	160,6	161,7	154,6
Lípidos	25,0	83,0	35,0	46,0	48,3	44,1
AGV	-	0	0,0	0,0	0,0	0,0
FDN	360,7	377,2	486,0	399,1	394,2	410,8
FDN Degradable	216,4	178,1	243,0	212,1	206,9	216,6
FDN Indegradable (calculada)	144,3	199,1	243,0	187,0	187,3	194,2
Almidón Insoluble en Rumen	-	160,0	156,0	89,5	96,9	97,4
Almidón Soluble en Rumen	-	110,8	104,0	61,0	66,0	66,0
Carbohidratos Solubles en Agua	315,0	65,1	77,0	176,6	165,1	164,9
Carbohidratos Solubles (calculados)	315,0	175,9	181,0	237,6	231,2	230,9
Tasa Pasaje, Sólidos	0,045	0,045	0,027	0,04	0,040	0,038
Tasa Degradación, PC Degradable	0,100	0,11	0,01	0,08	0,08	0,07
Tasa Degradación, FDN Degradable	0,030	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03
Tasa Degradación, Almidón Insoluble	0,010	0,08	0,07	0,05	0,05	0,05
Tasa Fraccionaria de Reducción de Partículas	0,250	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Eficiencia de Masticación de la MS	0,250	0,50	0,25	0,33	0,34	0,32

• *Fajardo et al. (2015) Período 1 - V2 p1*

Tratamiento				G0	G1	G2
	Pastura	Concentrado	Ensilaje	Dieta Completa	Dieta Completa	Dieta Completa
Amonio	0,0	0	0	0	0	0
PC Degradable	46,7	162,2	26,9	101,3	86,3	82,5
PC Indegradable	4,4	6,8	7,4	7,1	6,3	6,1
PC Soluble	94,9	58,7	43,7	51,9	63,7	66,7
PC (calculado)	146,0	227,6	78,0	160,3	156,4	155,4
Lípidos	20,0	24,0	35,0	29,0	26,5	25,9
AGV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
FDN	531,0	158,5	460,0	294,2	359,3	375,7
FDN Degradable	398,3	77,9	230,0	146,3	215,6	233
FDN Indegradable (calculada)	132,8	80,7	230,0	147,9	143,7	142,7
Almidón Insoluble en Rumen	0,0	221,8	156,0	192,2	139,3	126,1
Almidón Soluble en Rumen	0,0	202,6	104,0	158,2	114,7	103,8
Carbohidratos Solubles en Agua	130,0	80,9	77,0	79,2	93,1	96,7
Carbohidratos Solubles (calculados)	130,0	283,6	181,0	237,4	207,9	200,5
Tasa Pasaje, Sólidos	0,041	0,049	0,027	0,039	0,039	0,04
Tasa Degradación, PC Degradable	0,07	0,11	0,01	0,07	0,07	0,07
Tasa Degradación, FDN Degradable	0,05	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03
Tasa Degradación, Almidón Insoluble	0,07	0,09	0,07	0,08	0,08	0,08
Tasa Fraccionaria de Reducción de Partículas	0,25	0,29	0,25	0,27	0,27	0,27
Eficiencia de Masticación de la MS	0,25	0,53	0,25	0,40	0,36	0,35

• *Fajardo et al. (2015) Período 2 – V2 p2*

Tratamiento				Post TMR	G1
	Pastura	Concentrado	Ensilaje	Dieta Completa	Dieta Completa
Amonio	0,0	0,0	0,0	0	0,0
PC Degradable	58,9	162,2	10,4	86,5	85,2
PC Indegradable	5,5	6,8	28,3	14,2	13,7
PC Soluble	119,6	58,7	47,3	67,4	69,9
PC (calculado)	184,0	227,6	86,0	168,11	168,9
Lípidos	20,0	24,0	35,0	27,1	26,7
AGV	0,0	0,0	0,5	0,2	0,2
FDN	550,0	158,5	377,0	318,4	329,3
FDN Degradable	440,0	77,9	245,0	213,4	224,0
FDN Indegradable (calculada)	110,0	80,7	132,0	105,1	105,3
Almidón Insoluble en Rumen	0,0	221,8	105,4	133,8	127,5
Almidón Soluble en Rumen	0,0	202,6	0,0	88	83,9
Carbohidratos Solubles en Agua	170,0	80,9	19,0	77,6	82,0
Carbohidratos Solubles (calculados)	170,0	283,6	19,0	165,7	165,9
Tasa Pasaje, Sólidos	0,045	0,049	0,030	0,041	0,041
Tasa Degradación, PC Degradable	0,08	0,11	0,01	0,07	0,07
Tasa Degradación, FDN Degradable	0,05	0,02	0,04	0,04	0,04
Tasa Degradación, Almidón Insoluble	0,01	0,09	0,3	0,15	0,14
Tasa Fraccionaria de Reducción de Partículas	0,25	0,29	0,25	0,27	0,27
Eficiencia de Masticación de la MS	0,25	0,53	0,5	0,46	0,45

• *Pérez-Prieto et al. (2011a) – V3*

Tratamiento				LOW	MEDIUM	HIGH
	Pastura (prom)	Concentrado	Ensilaje	Dieta Completa	Dieta Completa	Dieta Completa
Amonio	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PC Degradable	82,7	73,6	22,1	70,5	73,4	72,0
PC Indegradable	7,8	6,2	6,1	6,9	7,2	7,1
PC Soluble	168,2	39,0	35,8	108,7	115,5	113,8
PC (calculado)	258,7	118,7	64,0	186,03	196,14	192,9
Lípidos	20,0	34,3	35,0	26,4	26,2	26,0
AGV	0,0	0,0	0,0	0	0	0,0
FDN	491,3	235,4	411,0	406,5	408,0	402,5
FDN Degradable	393,1	161,7	206,0	300,3	302,1	298,5
FDN Indegradable (calculada)	98,3	73,7	205,0	106,2	105,9	103,9
Almidón Insoluble en Rumen	0,0	192,6	156,0	79,4	77,6	74,7
Almidón Soluble en Rumen	0,0	212,9	104,0	78,3	76,5	73,7
Carbohidratos Solubles en Agua	170,0	137,3	77,0	147,3	147,9	148,7
Carbohidratos Solubles (calculados)	170,0	350,2	181,0	225,7	224,4	222,4
Tasa Pasaje, Sólidos	0,045	0,047	0,027	0,043	0,043	0,043
Tasa Degradación, PC Degradable	0,08	0,16	0,01	0,09	0,09	0,09
Tasa Degradación, FDN Degradable	0,05	0,03	0,02	0,04	0,04	0,04
Tasa Degradación, Almidón Insoluble	0,01	0,13	0,07	0,06	0,05	0,05
Tasa Fraccionaria de Reducción de Partículas	0,25	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25
Eficiencia de Masticación de la MS	0,25	0,50	0,25	0,33	0,32	0,32

• *Pérez-Prieto et al. (2011b) – V4*

Tratamientos				LOW PA - 0	LOW PA - 8	HIGH PA - 0	HIGH PA - 8
	Pastura (prom)	Concentrado	Ensilaje	Dieta Completa	Dieta Completa	Dieta Completa	Dieta Completa
Amonio	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
PC Degradable	47,5	410,9	22,1	42,6	60,0	46,7	63,1
PC Indegradable	4,5	7,5	6,1	4,0	5,4	4,4	5,6
PC Soluble	96,6	79,7	35,8	86,5	68,8	94,9	73,8
PC (calculado)	148,5	498,0	64,0	133,0	134,1	146,0	142,6
Lípidos	20,0	15,0	35,0	20,0	26,3	20,0	26,4
AGV	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
FDN	592,0	91,0	411,0	592,0	478,6	600,0	474,8
FDN Degradable	444,0	27,3	206,0	444,0	311,1	450,0	307,7
FDN Indegradable (calculada)	148,0	63,7	205,0	148,0	167,4	150,0	167,1
Almidón Insoluble en Rumen	0,0	20,0	156,0	0,0	70,2	0,0	71,0
Almidón Soluble en Rumen	0,0	20,0	104,0	0,0	47,2	0,0	47,8
Carbohidratos Solubles en Agua	130,0	306,0	77,0	130,0	118,0	130,0	118,1
Carbohidratos Solubles (calculados)	130,0	326,0	181,0	130,0	165,2	130,0	165,8
Tasa Pasaje, Sólidos	0,041	0,046	0,027	0,041	0,035	0,041	0,035
Tasa Degradación, PC Degradable	0,07	0,08	0,01	0,07	0,04	0,07	0,04
Tasa Degradación, FDN Degradable	0,05	0,01	0,02	0,05	0,03	0,05	0,03
Tasa Degradación, Almidón Insoluble	0,07	0,12	0,07	0,07	0,07	0,07	0,07
Tasa Fraccionaria de Reducción de Partículas	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Eficiencia de Masticación de la MS	0,25	0,50	0,25	0,25	0,27	0,25	0,27

- *Kononoff y Heinrichs (2003) – V5*

Tratamientos	LGH y SHH	LGNH y SHNH
	Dieta Completa	Dieta Completa
Amonio	0,2	0,3
PC Degradable	101,3	104,0
PC Indegradable	12,1	11,1
PC Soluble	56,1	55,8
Crude Protein (calculated)	170,6	172,3
Lípidos	47,4	44,6
AGV	0,3	0,4
Neutral Detergent Fiber (aNDF)	307,3	299,3
Degraded NDF (dNDF)	176,8	207,4
Undegraded NDF (calculated)	130,5	91,9
Almidón Insoluble en Rumen	148,0	137,1
Almidón Soluble en Rumen	102,3	94,9
Carbohidratos Solubles en Agua	69,7	75,6
Carbohidratos Solubles (calculados)	172,1	170,5
Tasa Pasaje, Sólidos	0,036	0,033
Tasa Degradación, PC Degradable	0,04	0,04
Tasa Degradación, FDN Degradable	0,02	0,03
Tasa Degradación, Almidón Insoluble	0,07	0,08
Tasa Fraccionaria de Reducción de Partículas	0,27	0,27
Eficiencia de Masticación de la MS	0,40	0,37

- *Ben Meir et al. (2018) – V6*

Tratamientos	HE - LE - ME
	Dieta Completa
Amonio	12,1
PC Degradable	87,9
PC Indegradable	9,5
PC Soluble	64,8
Crude Protein (calculated)	224,8
Lípidos	59,0
AGV	0,1
Neutral Detergent Fiber (aNDF)	312,2
Degraded NDF (dNDF)	174,4
Undegraded NDF (calculated)	137,7
Almidón Insoluble en Rumen	148,1
Almidón Soluble en Rumen	109,8
Carbohidratos Solubles en Agua	110,3
Carbohidratos Solubles (calculados)	220,2
Tasa Pasaje, Sólidos	0,047
Tasa Degradación, PC Degradable	0,06
Tasa Degradación, FDN Degradable	0,03
Tasa Degradación, Almidón Insoluble	0,07
Tasa Fraccionaria de Reducción de Partículas	0,29
Eficiencia de Masticación de la MS	0,47

6.3 ESQUEMAS DE ALIMENTACIÓN UTILIZADOS EN LOS TRABAJOS DE VALIDACIÓN DEL “CTR DAIRY - PRODUCTION”

- *Mattiauda et al. (2013) – V1*

Tratamiento	T 7 - 15			T 7 - 11		
	Consumo (kg MS)			Consumo (kg MS)		
Hora del día	Pastura	Concentrado	Ensilaje	Pastura	Concentrado	Ensilaje
0						
1						
2						
3						
4						
5		3,05			3,05	
6						
7	2,10			2,82		
8	1,60			1,50		
9	0,90			1,26		
10				1,02		
11	1,80					
12	1,00					
13	0,90					
14						
15		3,05			3,05	
16			4,70			4,30
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
subtotal	8,30	6,10	4,70	6,60	6,10	4,30
TOTAL	19,10			17,00		

- *Mattiauda et al. (2013) – V1 (continuación)*

Tratamiento	T 11 - 15		
	Consumos (kg MS)		
Hora del día	Pastura	Concentrado	Ensilaje
0			
1			
2			
3			
4			
5		3,05	
6			
7			
8			
9			
10			
11	3,00		
12	1,50		
13	0,90		
14	1,30		
15		3,05	
16			4,70
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
subtotal	6,70	6,10	4,70
TOTAL		17,50	

- *Fajardo et al. (2015) Período 1 - V2 p1*

Tratamiento	G0		
	Consumos (kg MS)		
Hora del día	Pastura	Concentrado	Ensilaje
0			
1			
2			
3			
4			
5		0,86	0,70
6			
7		2,30	1,88
8		1,72	1,41
9		1,15	0,94
10			
11			
12			
13			
14		0,57	0,47
15			
16		2,58	2,11
17		2,58	2,11
18			
19			
20		1,72	1,41
21		0,86	0,70
22			
23			
subtotal	0,00	14,36	11,75
TOTAL		26,10	

• *Fajardo et al. (2015) Período 1 - V2 p1 (continuación)*

Tratamiento	G1			G2		
	Consumos (kg MS)			Consumos (kg MS)		
Hora del día	Pastura	Concentrado	Ensilaje	Pastura	Concentrado	Ensilaje
0						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8	2,00			1,70		
9	1,50			1,00		
10	0,80			0,50		
11						
12	0,80			0,60		
13	0,40					
14						
15						
16		4,79	3,92			
17		3,19	2,61	1,80		
18				1,30		
19				0,60		
20					4,72	3,86
21					3,15	2,57
22						
23						
subtotal	5,50	7,98	6,53	7,50	7,87	6,44
TOTAL	20,00			21,80		

- *Fajardo et al. (2015) Período 2 – V2 p2*

Tratamiento	Post TMR			G1		
	Consumos (kg MS)			Consumos (kg MS)		
Hora del día	Pastura	Concentrado	Ensilaje	Pastura	Concentrado	Ensilaje
0						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8	1,80			2,00		
9	1,40			1,80		
10	0,80			1,00		
11						
12	0,80			1,00		
13	0,60			0,70		
14						
15						
16		6,70	5,48		6,53	5,35
17		4,47	3,65		4,36	3,56
18						
19						
20						
21						
22						
23						
subtotal	5,40	11,17	9,14	6,50	10,89	8,91
TOTAL	25,70			26,30		

• *Pérez-Prieto et al. (2011a) – V3*

Tratamiento	LOW			MEDIUM		
	Consumos (kg MS)			Consumos (kg MS)		
Hora del día	Pastura	Concentrado	Ensilaje	Pastura	Concentrado	Ensilaje
0						
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8	1,25			1,25		
9	1,25			1,21		
10	1,08			0,77		
11	0,86			0,92		
12	0,66			0,66		
13	1,03			1,03		
14	1,03			1,10		
15	0,95			1,06		
16	0,48			0,95		
17						
18						
19		2,30	1,05		2,30	1,05
20		1,15	0,53		1,15	0,53
21		1,15	0,53		1,15	0,53
22						
23						
Subtotal	8,60	4,60	2,11	8,96	4,60	2,11
TOTAL	15,31			15,67		

- *Pérez-Prieto et al. (2011a) – V3 (continuación)*

Tratamiento	HIGH		
	Consumos (kg MS)		
Hora del día	Pastura	Concentrado	Ensilaje
0			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8	1,37		
9	1,25		
10	0,91		
11	0,86		
12	0,72		
13	1,15		
14	1,20		
15	1,10		
16	1,00		
17			
18			
19		2,30	1,05
20		1,15	0,53
21		1,15	0,53
22			
23			
Subtotal	9,56	4,60	2,11
TOTAL	16,28		

- **Pérez-Prieto et al. (2011b) – V4**

Tratamiento	LOW PA - 0	LOW PA - 8		
	Consumos (kg MS)	Consumos (kg MS)		
Hora del día	Pastura	Pastura	Concentrado	Ensilaje
0				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8			1,00	6,80
9	2,40	1,40		
10	2,00	1,20		
11	1,80	0,80		
12	1,60	0,60		
13				
14				
15				
16				
17				
18	2,00	1,80		
19	1,60	1,00		
20	0,20	0,80		
21				
22				
23				
Subtotal	11,60	7,60	1,00	6,80
TOTAL	11,60	15,40		

- *Pérez-Prieto et al. (2011b) – V4 (continuación)*

Tratamiento	HIGH PA - 0	HIGH PA - 8		
	Consumos (kg MS)	Consumos (kg MS)		
Hora del día	Pastura	Pastura	Concentrado	Ensilaje
0				
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8			1,00	6,70
9	2,40	1,20		
10	2,10	1,10		
11	1,90	0,80		
12	1,80	0,60		
13	0,70			
14				
15				
16				
17				
18	2,10	1,80		
19	1,80	1,00		
20	0,30	0,80		
21				
22				
23				
Subtotal	13,10	7,30	1,00	6,70
TOTAL	13,10	15,00		

- *Kononoff y Heinrichs (2003) – V5*

Tratamiento	LGH	LGNH	SHH	SHNH
	Consumos (kg MS)			
Hora del día	TMR	TMR	TMR	TMR
0	1,08	1,19	1,58	1,55
1	1,08	0,65	0,11	0,62
2	1,19	0,14	0,53	0,31
3	0,00	0,51	0,21	0,41
4	0,32	0,28	0,11	0,31
5				
6				
7				
8	1,73	2,50	1,68	1,86
9	1,83	1,20	1,37	0,62
10	0,54	1,57	1,47	2,58
11	2,47	2,08	1,89	1,34
12	1,83	1,20	1,05	1,03
13	1,40	1,39	1,68	1,03
14	2,59	1,39	2,63	1,44
15	1,19	2,31	2,11	1,75
16	2,16	1,57	1,68	2,06
17	1,40	1,39	1,89	2,18
18	1,29	0,65	1,79	1,24
19	1,08	3,06	1,16	2,16
20	2,48	0,74	2,21	1,34
21	0,32	0,19	0,63	1,03
22	0,86	0,19	1,47	0,52
23	0,76	1,48	1,05	0,72
TOTAL	27,60	25,69	28,31	26,10

- *Ben Meir et al. (2018) – V6*

Tratamiento	HE	LE	ME
	Consumos (kg MS)		
Hora del día	TMR	TMR	TMR
0	0,43	0,45	0,44
1	0,87	0,89	0,88
2	1,04	0,89	0,88
3	0,43	0,89	0,70
4	0,22	0,45	0,35
5	0,22	0,23	0,22
6	0,69	0,71	0,70
7	1,56	2,23	1,97
8	1,95	2,05	2,20
9	0,43	0,45	0,44
10	0,43	0,45	0,35
11	1,95	3,03	2,82
12	1,91	1,96	1,94
13	0,52	0,53	0,53
14	1,04	1,16	1,06
15	1,95	2,85	2,82
16	1,04	1,07	1,06
17	0,78	0,71	0,79
18	1,39	1,96	1,58
19	1,74	2,67	1,76
20	1,22	1,34	1,25
21	1,04	0,45	0,53
22	1,74	3,39	2,64
23	0,69	0,71	0,70
TOTAL	25,30	31,50	28,60

**6.4 COEFICIENTE DE CORRELACIÓN PARA TODAS LAS VARIABLES,
ENTRE LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON SMART Y VBA**

VARIABLE	ID	Coef. Determinac (R ²)
Volumen	V	0,999999554
pH	pH	0,99999357
Pool Amonio	QAM	0,999974353
Pool AGV	QVA	0,99999761
Pool Proteína Soluble	QPS	0,999999352
Pool Carbohidratos solubles	QSC	0,999996149
Pool Lípidos	QLI	0,999964578
Pool Microorganismos	QMI	0,999991932
Pool Proteína indegradable del forraje (largo)	QPUfl	0,999999534
Pool Proteína indegradable del forraje	QPUf	0,99980792
Pool Proteína degradable del forraje (largo)	QPDfl	0,999999536
Pool Proteína degradable del forraje	QPDf	0,999998018
Pool Proteína soluble del forraje (largo)	QPSfl	0,999997546
Pool Fibra indegradable del forraje (largo)	QFUfl	0,999999536
Pool Fibra indegradable del forraje	QFUf	0,999992484
Pool Fibra degradable del forraje (largo)	QFDfl	0,999999536
Pool Fibra degradable del forraje	QFDf	0,999997609
Pool Almidón insoluble del forraje (largo)	QSIfl	0,999999536
Pool Almidón insoluble del forraje	QSI f	0,99999844
Pool Azúcares solubles atrapados en forraje (largo)	QSCfl	0,999997546
Pool Proteína indegradable del ensilaje (largo)	QPUsl	0,999999574
Pool Proteína indegradable del ensilaje	QPU s	0,999874817
Pool Proteína degradable del ensilaje (largo)	QPDsl	0,999999575
Pool Proteína degradable del ensilaje	QPD s	0,999998355
Pool Proteína soluble del ensilaje (largo)	QPSsl	0,999997608
Pool Fibra indegradable del ensilaje (largo)	QFUsl	0,999999574
Pool Fibra indegradable del ensilaje	QFU s	0,999889897
Pool Fibra degradable del ensilaje (largo)	QFDsl	0,999999574
Pool Fibra degradable del ensilaje	QFD s	0,999997398
Pool Almidón insoluble del ensilaje (largo)	QSIsl	0,999999575
Pool Almidón insoluble del ensilaje	QSI s	0,999997985

ANEXO 6.4 (continuación)

VARIABLE	ID	Coef. Determinac (R ²)
Pool Azúcares solubles atrapados en ensilaje (largo)	QSCsl	0,999997613
Pool Proteína indegradable del concentrado (largo)	QPUcl	0,999999821
Pool Proteína indegradable del concentrado	QPUc	0,999998306
Pool Proteína degradable del concentrado (largo)	QPDcl	0,99999982
Pool Proteína degradable del concentrado	QPDc	0,999998894
Pool Proteína soluble del concentrado (largo)	QPScl	0,999998238
Pool Fibra indegradable del concentrado (largo)	QFUcl	0,99999982
Pool Fibra indegradable del concentrado	QFUc	0,999998645
Pool Fibra degradable del concentrado (largo)	QFDcl	0,999999821
Pool Fibra degradable del concentrado	QFDc	0,999998626
Pool Almidón insoluble del concentrado (largo)	QSIcl	0,999999821
Pool Almidón insoluble del concentrado	QSIc	0,999998719
Pool Azúcares solubles atrapados en concentrado (largo)	QSCcl	0,99999824

6.5 EFECTO DE LA SECUENCIA DE ALIMENTACIÓN SOBRE FERMENTACIÓN RUMINAL, ABSORCIÓN DE NUTRIENTES Y PRODUCCIÓN DE LECHE: MODELO DE SIMULACIÓN

Elizondo, F. y Chilibroste, P.

Octubre, 2021.

RESUMEN

Se desarrolló un modelo dinámico de simulación denominado “CTR Dairy – PRODUCTION”, apto para operar en condiciones discontinuas de alimentación con capacidad de evaluar la producción y absorción de nutrientes para los procesos de síntesis metabólica y la producción de leche en vacas lecheras. Se partió del modelo “CTR Dairy” (Chilibroste et al., 2008) al que se le integró un módulo con la capacidad de estimar la producción de leche en función de la disponibilidad a nivel metabólico de sustratos glucogénicos, lipogénicos, aminogénicos (M_P), y la energía absorbida a partir de estos nutrientes (M_E). El valor esperado de producción (VP) se determinó entre las estimaciones de M_E y M_P , utilizando el criterio de nutriente limitante. Para la validación matemática del “CTR Dairy – PRODUCTION” se utilizaron 6 trabajos científicos, cubriendo un amplio rango de estrategias de alimentación y producciones individuales (10 a 40 l/d). Los resultados provistos por el modelo (Simulados) vs. los reportados por los trabajos científicos (Observados) se compararon mediante regresión lineal y el error cuadrático medio de predicción (MSPE). Las estimaciones por M_E y M_P tuvieron buenos ajustes en general ($R^2 = 0,92$ y $0,91$, y $MSPE = 38,4$ y $49,1$; respectivamente), y el VP tuvo muy buenos niveles de precisión y exactitud ($R^2 = 0,95$ y $MSPE = 17,4$, respectivamente). Con el “CTR Dairy - PRODUCTION”, se simularon dos situaciones productivas, con idénticos recursos, pero diferentes formas de suministros de los alimentos. Entre las estrategias de alimentación se detectó una diferencia de aproximadamente medio litro (29,50 vs. 29,14 l/d), explicada fundamentalmente por las diferencias en el tamaño del pool de proteína soluble, y su impacto en la absorción de aminoácidos. “CTR Dairy - PRODUCTION” se presenta

como una herramienta útil para la investigación y el trabajo profesional a nivel comercial.

Palabras clave: modelo, simulación, dinámico, rumen, leche.

ABSTRACT

A dynamic simulation model called "CTR Dairy - PRODUCTION" was developed, suitable to operate in discontinuous feeding conditions with the ability to evaluate the production and absorption of nutrients for metabolic synthesis processes and milk production in dairy cows. It was based on the "CTR Dairy" model (Chilibroste et al., 2008) to which a module was integrated with the ability to estimate milk production based on the availability at the metabolic level of glucogenic, lipogenic, aminogenic substrates (M_P), and the energy absorbed from these nutrients (M_E). The expected production value (PV) was determined between the M_E and M_P estimates, using the limiting nutrient criterion. For the mathematical validation of the "CTR Dairy - PRODUCTION" 6 scientific papers were used, covering a wide range of feeding strategies and individual productions (10 to 40 l/d). The results provided by the model (Simulated) vs. those reported by the scientific papers (Observed) were compared by linear regression and the mean square error of prediction (MSPE). The estimates by M_E and M_P had good adjustments in general ($R^2 = 0.92$ and 0.91 , and $MSPE = 38.4$ and 49.1 , respectively), and the VP had very good levels of precision and accuracy ($R^2 = 0.95$ and $MSPE = 17.4$, respectively). With the "CTR Dairy - PRODUCTION", two production situations were simulated, with identical resources, but different forms of food supplies. Among the feeding strategies, a difference of approximately half a liter (29.50 vs. 29.14 l / d) was detected, mainly explained by the differences in the size of the soluble protein pool, and its impact on the absorption of amino acids. "CTR Dairy - PRODUCTION" is presented as a useful tool for research and professional work at a commercial level.

Keywords: model, simulation, dynamic, rumen, milk.

INTRODUCCIÓN

En los sistemas pastoriles, las decisiones de los animales asociadas al comportamiento en pastoreo, tales como cuándo comenzar y terminar una comida, y la frecuencia e intensidad de consumo dentro de cada una de ellas, determinan la forma y la tasa de suministro de nutrientes para la digestión, el metabolismo y el crecimiento (Gregorini, 2012). Esto determina que en estos sistemas se dé una alimentación discontinua durante el día, donde muchas veces se combina cosecha de forraje mediante pastoreo con la utilización de otros alimentos (p. ej. concentrados y/o ensilajes), lo que plantea el desafío de contar con modelos que representen fielmente esta situación particular (Dijkstra y France, 1996a; Chilibraste et al. 2001).

En este sentido, si bien ha habido un gran desarrollo de modelos que simulen el funcionamiento ruminal (Baldwin et al. 1987; France et al. 1982; Fox et al. 1992; etc.), pocos han integrado las variaciones dentro del día que se dan en los sistemas pastoriles. Los trabajos realizados por Gregorini et al. (2013) y Chilibraste et al. (2001; 2008) han estado orientados a levantar estas restricciones, mediante el desarrollo de modelos de matemáticos de simulación mecanísticos y dinámicos, que tienen en consideración la cualidad “no estacionaria” de los sistemas de alimentación pastoriles.

El modelo “CTR Dairy” desarrollado por Chilibraste et al. (2008) tiene la capacidad de predecir la disponibilidad de nutrientes glucogénicos, aminogénicos y lipogénicos a nivel metabólico para vacas lecheras en condiciones de alimentación discontinua, aunque sin integrar estos resultados con un resultado productivo en particular como, por ejemplo, la producción de leche.

El objetivo de este trabajo fue el desarrollo y validación de un nuevo modelo que integre un módulo para la estimación de la producción de leche al “CTR Dairy”, teniendo en cuenta la disponibilidad a nivel metabólico de sustratos glucogénicos, aminogénicos y lipogénicos. A este nuevo modelo se le denominó “CTR Dairy – PRODUCTION”.

MATERIALES Y MÉTODOS

“CTR Dairy” (Chilibroste et al., 2008) es un modelo mecanístico de simulación de rumen, dinámico, diseñado para condiciones no estacionarias de alimentación. El modelo está desarrollado para trabajar con tres grupos de alimento (la pastura puede ser uno de ellos), que pueden ingresar al modelo de forma independiente entre ellos en cualquier régimen horario. La unidad de tiempo en la que opera el modelo es en minutos, aunque al momento de implementar la simulación se modificó el ingreso de información por parte del usuario a “horas” y “kg MS/h” para simplificar su utilización. Esto aplica al momento de definir los ingresos de los alimentos a la dieta, como también para las tasas.

Cada alimento está caracterizado por su contenido de elementos nitrogenados, carbohidratos y ácidos grasos. Además, se deben ingresar los parámetros de cinética ruminal para cada una de las fracciones (cuadro 1).

Cuadro 1. Fracciones de componente

Parámetro	unidad
Materia seca	%
Amonio	g/kg MS
PC degradable	g/kg MS
PC indegradable	g/kg MS
PC soluble	g/kg MS
Lípidos	g/kg MS
Ácidos grasos volátiles	moles/kg MS
Fibra detergente neutro	g/kg MS
Fibra detergente neutro Degradable	g/kg MS
Almidón insoluble	g/kg MS
Almidón soluble	g/kg MS
Carbohidratos solubles en agua	g/kg MS
Tasa pasaje sólidos	h ⁻¹
Tasa degradación proteína	h ⁻¹
Tasa degradación FDN	h ⁻¹
Tasa degradación almidón insoluble	h ⁻¹
Tasa fraccionaria de reducción de partículas	h ⁻¹
Eficiencia de masticación	%

También deben ser ingresados por el usuario el peso vivo (BW, kg) y la tasa de pasaje del líquido ruminal (KFLEX, h⁻¹).

El modelo “CTR Dairy” predice las variaciones diarias en la materia seca del contenido ruminal, el pH ruminal, y las adaptaciones en las tasas fraccionales de degradación de la FDN y de absorción de los AGV desde el rumen en función del pH. Los outputs del modelo son la predicción de la concentración de metabolitos ruminales, tamaño de los pools de varias fracciones predefinidas (ej.: agua, fibra degradable e indegradable, carbohidratos y proteínas solubles, etc.), y la absorción de nutrientes glucogénicos, aminogénicos, lipogénicos a nivel de rumen y tracto posterior.

Desarrollo del módulo para la estimación de la producción de leche

Para la estimación de la producción de leche, se incorporó un módulo para el cálculo del potencial de producción de leche en función de la absorción en rumen e intestinos de energía (M_E) y aminoácidos (M_P), utilizando como insumo la estimación de producción de nutrientes glucogénicos, lipogénicos y aminogénicos generada por el modelo. La producción está determinada por el nutriente más limitante. Esta metodología fue la descrita por Dijkstra et al. (1996b), a la que se le incorporó el efecto de la movilización (ganancia o pérdida) de las reservas corporales en la estimación de los potenciales de producción por energía y proteína.

Potencial de producción en función de la energía absorbida

El modelo utilizado en la estimación de la producción potencial en función de la energía absorbida tiene en consideración si los animales están en balance negativo o positivo de energía.

Con pérdida de peso:

$$M_E(l/d) = (BWch * YEnBWch + 0,65(A_E - 0,45 W^{0,75}))/E_m$$

Con ganancia de peso:

$$M_E(l/d) = (0,65 * (A_E - 0,45 W^{0,75}) - BWch * REnBWch) / E_m$$

Donde:

- M_E (l/d): potencial de producción de leche en función de la energía absorbida.
- $BWch$ (kg/d): Variación de peso vivo (ganancia o pérdida, según corresponda).
- $YEnBWch$ (MJ/kg): Aporte de energía en reservas movilizadas
- $REnBWch$ (MJ/kg): Contenido de energía en ganancia de reservas corporales.
- A_E (MJ/d): Energía absorbida.
- E_m (MJ/kg): Energía contenida en la leche.
- W : Peso Vivo (kg).

En el caso de animales con pérdida de peso, el aporte de energía para la producción de leche proveniente de la movilización de reservas ($YEnBWch$) es de 19,58 MJ/kg, correspondiente al de una vaca con estado corporal 3 en la escala 1-5 (NRC, 2001). Este valor considera que la energía de las reservas corporales cuando se usa para apoyar la producción de leche tiene una eficiencia de 0,82 (NRC, 2001).

Sí se registran ganancias de peso, el contenido de energía de las reservas incorporadas ($REnBWch$) es de 22,34 MJ/kg, para un animal con igual estado corporal al caso anterior (NRC, 2001). Para la determinación de este valor se considera que en vacas lactando, la eficiencia de deposición de la energía metabolizable en reservas corporales es de 0,75 (Moe et al., 1971) y la eficiencia para la síntesis de leche es de 0,64 (NRC, 2001).

En ambos casos las variaciones de peso vivo deben ser ingresadas por el usuario.

La Energía absorbida (A_E) es función de la cantidad de aminoácidos (Aa), glucosa (Gl), lípidos (Li) y ácidos grasos (VFA) absorbidos a nivel ruminal e intestinal,

multiplicados por sus contenidos energéticos ($A_a = 18,4$ MJ/kg; $G_l = 15,6$ MJ/kg; $L_i = 39,0$ MJ/kg; $VFA = 1,25$ MJ/mol).

La energía contenida en la leche (E_m) se estima multiplicando el contenido de lactosa, proteína y grasa, por sus concentraciones energéticas (16,5; 24,5 y 38,1 MJ/kg respectivamente).

Se considera una eficiencia de uso de la energía absorbida de 65 % y el requerimiento de mantenimiento es de 0,45 MJ/kg $PV^{0,75}$ (ARC, 1980, citado por Dijkstra et al., 1996b).

Potencial de producción en función de la proteína disponible

Para la estimación del potencial de producción por proteína, también es tomada en cuenta la variación de peso vivo.

Con pérdida de peso:

$$M_p(l/d) = 0,716 * (A_{Aa} + BWch * YAaBWch - 2,3 W^{0,75}) / P_m$$

Con ganancia de peso:

$$M_p(l/d) = 0,716 * (A_{Aa} - BWch * RAaBWch - 2,3 W^{0,75}) / P_m$$

Donde:

- M_p (l/d): Potencial de producción de leche en función de los aminoácidos disponibles.
- A_{Aa} (g/d): Aminoácidos absorbidos
- $BWch$ (kg/d): Variación de peso vivo (ganancia o pérdida, según corresponda).
- $YAaBWch$ (g/kg): Rendimiento de proteína por kg movilizado de reservas.
- $RAaBWch$ (g/kg): Requerimiento de proteína para incorporar reservas corporales.
- P_m (g/l): contenido de proteína en leche.

El aporte de aminoácidos con la pérdida de peso ($YAaBWch$) es de 68 g/kg (NRC, 2001), y para la ganancia de peso ($RAaBWch$) el requerimiento es de 115,3 g/kg,

considerando una eficiencia en la ganancia de peso durante la lactancia de 59 % (AFRC, 1993).

Se considera un requerimiento de aminoácidos para mantenimiento de $2,3 \text{ g/kg PV}^{0,75}$ (ARC, 1984, citado por Dijkstra et al., 1996b) y una eficiencia uso para la síntesis de proteína láctea de 71,6 % (AFRC, 1993).

En todos los casos, las variaciones de peso vivo (kg) y la composición de leche (% grasa, % proteína y % lactosa) deben ser ingresados por el usuario.

Definición del Valor de Predicción

El Valor de Predicción (VP) es la producción de leche que predice el modelo, dada una determinada disponibilidad de nutrientes y requerimientos.

El VP se selecciona entre las producciones potenciales estimadas para M_E y M_P , aplicando el criterio de “nutriente limitante” es decir, se asigna cómo VP a la menor de las estimaciones.

Validación del “CTR Dairy – PRODUCTION”

Para la validación de las estimaciones de producción del “CTR Dairy – PRODUCTION” se seleccionaron trabajos que representasen un amplio rango de situaciones de alimentación (p. ej.: sólo pastura, pastura y suplementos, dietas totalmente mezcladas), y que reportaran una descripción detallada de los consumos y secuencias de suministro de los alimentos. Se priorizó también, que representaran un amplio rango de niveles de producción (p. ej.: 10 a 40 l/d) y etapas de lactancia (cuadro 2).

Cuadro 2. Trabajos científicos utilizados para la validación de las estimaciones de producción.

Referencia	Vacas	Manejo alimentación	Tratamientos
Mattiauda et al. (2013) V1	90 – 130 d Lact. 25.3 l	Pastoreo con suplementación en sala ordeño con concentrados, y ensilaje después ordeño PM	T 7 – 15: 8 h pastoreo
			T 7 – 11: 4 h pastoreo
			T 11 – 15: 4 h pastoreo
Fajardo et al. (2015) V2 – p1	0 – 60 d Lact. 35 l	A un grupo de animales sólo se le ofreció TMR, y a los otros dos, una combinación de TMR y pastoreo	G0: 100 % TMR
			G1: 50 % TMR + 6 h pastoreo
			G2: 50 % TMR + 9 h pastoreo
Fajardo et al. (2015) V2 – p2	60 – 90 d Lact. 36.6 l	6 h pastoreo más TMR	Post – TMR: 50 % TMR + 6 h pastoreo
			G1: 50 % TMR + 6 h pastoreo
Pérez-Prieto et al. (2011a) V3	125 – 164 d Lact. 28 l	9 h pastoreo con oferta de concentrado y ensilaje entre los ordeños PM y AM. Entre tratamientos se modificó la asignación de forraje	Low: 19 kg MO/v/d Asig. forraje
			Medium: 32 kg MO/v/d
			High: 46 kgMO/v/d
Pérez-Prieto et al. (2011b) V4	230 – 286 d Lact. 17.9 l	Combinación de diferentes asignaciones de pastura (PA) con dos niveles de suplementación. Acceso a 21 h de pastoreo.	Low PA–0: 18kgMS PA + 0 kgMS supl.
			Low PA–8: 18 kgMS PA+ 8 kgMS supl.
			High PA–0: 30 kgMS PA + 0 kgMS supl
			High PA–8: 30 kgMS PA + 8 kgMS supl.
Kononoff y Heinrichs (2003) V5	17 ± 3 d Lact 48.5 l	Oferta de TMR con diferentes longitudes de fibra, con y sin oferta de cáscara de semilla de algodón	LGNH: fibra larga del ensilaje sin cáscara
			LGH: fibra larga con cáscara
			SHNH: fibra corta del ensilaje sin cáscara
			SHH: fibra corta con cáscara
Ben Meir et al. (2018) V6	35 – 180 d Lact. > 35 l	Oferta de TMR individualmente.	LE: vacas de baja eficiencia
			ME: vacas de eficiencia media
			HE: vacas de alta eficiencia

Para los trabajos que no contaban con una descripción detallada de la composición química y parámetros de cinética ruminal de los ingredientes, se utilizaron como fuentes de información las tablas de composición de alimentos del NRC (2001), Shield v5.0 (Robinson, 1998), y CTR Dairy (Chilibroste et al., 2008).

La estimación de la variación de peso vivo cuando no fue reportada directamente se estimó en función de las variaciones en estado corporal, teniendo en cuenta una relación de 84,6 kg de PV por punto de variación en estado corporal (NRC, 2001).

Evaluación matemática del modelo

Para evaluar la precisión y exactitud de las estimaciones realizadas por el modelo los resultados se compararon mediante regresión lineal considerando el R^2 y la desviación respecto a 1 de la pendiente, y mediante el MSPE:

$$MSPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_i - f(X_1, \dots, X_p)_i)^2$$

donde Y_i son valores observados, y $f(X_1, \dots, X_p)_i$ son los valores predichos por el modelo.

En las pruebas estadísticas, se rechaza la hipótesis nula (H_0) si el valor p asociado al resultado observado fue igual o menor que el nivel de significancia $\alpha = 0,05$.

El modelo CTR Dairy – PRODUCTION fue implementado en Visual Basic for Application (Microsoft ®), por lo que el usuario lo puede operar a través de la interfase del programa EXCEL (Microsoft ®).

Experimentación con “CTR Dairy – PRODUCTION”

Para la experimentación con el “CTR Dairy – PRODUCTION”, se plantearon dos situaciones productivas, que utilizan la misma la misma cantidad y calidad de insumos, pero difieren en la estrategia de uso de ellos.

Supuestos asumidos en el ejercicio:

- Establecimiento lechero con 100 animales
- Dos ordeños diarios (4 AM y 16 PM)
- PV animal promedio: 590 kg; variación de PV: -0,250 kg/d

- Composición de la leche: 3.9 % grasa, 3.5 % proteína y 4.8 % lactosa
- Precio de leche recibido por el productor (U\$S/l): 0,32
- Las dos estrategias de alimentación implicaron la misma cantidad y composición de ingredientes, difiriendo únicamente en la forma y momento de distribución durante el día (cuadro 3)
 - **Opción A:** Pastoreo AM (11 a 15 h). Suplementación con concentrado en sala de ordeño. Oferta de ensilaje de maíz post ordeño AM (38 %) y post ordeño PM (62 %).
 - **Opción B:** Pastoreo AM (11 a 15 h). Suplementación con dieta parcialmente mezclada (PMR, por sus siglas en inglés) integrada por la mezcla de concentrado y ensilaje, ofrecidos a la 1 h (50 %) y a las 18 h (50%).
- Para ambas situaciones se consideran los mismos consumos:
 - Forraje: 5 kg MS
 - Concentrado: 6 kg MS. Compuesto por: 60 % maíz molido, 30 % expeler de soja y 10 % afrechillo de trigo.
 - Ensilaje de maíz: 8 kg MS

Cuadro 3: Distribución de los consumos de alimentos durante el día para las dos opciones de alimentación.

Hora del día	Opción A			Opción B	
	Pastura (kg MS)	Concentrado (kg MS)	Ensilaje (kg MS)	Pastura (kg MS)	PMR (kg MS)
0					
1					3,5
2					2,8
3					0,7
4		3,0			
5					
6					
7			2,0		
8			1,0		
9					
10					
11	2,0			2,0	
12	1,2			1,2	
13	1,0			1,0	
14	0,8			0,8	
15					
16		3,0			
17					
18			3,0		3,5
19			1,0		2,8
20			0,5		0,7
21			0,5		
22					
23					
Subtotal	5,0	6,0	8,0	5,0	14,0
TOTAL	19,0			19,0	

RESULTADOS

Validación del Modelo “CTR Dairy – PRODUCTION”

Para la validación se compararon los valores reportados (Observados) en los trabajos citados en el cuadro 2, con los resultados obtenidos (Simulados) con el modelo “CTR Dairy – PRODUCTION”.

En el cuadro 4 se presentan de forma detallada todas las estimaciones de producción en función de los nutrientes disponibles y los valores predichos (VP) para cada

tratamiento, indicando en las celdas resaltadas cuál de los potenciales de producción fue utilizado para definirlo.

Cuadro 4. Estimación del potencial de producción de leche según disponibilidad de nutrientes

Referencia	Trat	Obs,	VP	M _E	M _P
Mattiauda et al., 2013 (V1)	T 11-15	24,6	26,95	26,95	29,14
	T 7-11	23,6	26,17	26,17	28,32
	T 7-15	25,4	29,26	29,26	32,05
Fajardo et al., 2015 (V2 p1 y p2)	G0	37,2	43,29	49,45	43,29
	G1	33,7	29,37	32,20	29,37
	G2	33,9	32,77	35,59	32,77
	G1	36,3	40,54	43,74	40,54
	Post TMR	37,2	40,47	42,73	40,47
Perez-Prieto et al., 2011a (V3)	High	26,4	30,52	30,52	35,61
	Low	23,9	30,49	30,49	33,97
	Medium	25,6	29,80	29,80	35,29
Perez Prieto et al., 2011b (V4)	High PA-0	11,7	16,43	16,43	20,48
	High PA-8	16,6	19,43	19,43	21,31
	Low PA-0	10,1	14,73	14,73	16,30
	Low PA-8	15,5	19,09	19,09	20,65
Kononoff y Heinrichs, 2003 (V5)	LGH	48,5	52,07	52,07	59,21
	LGNH	47,5	50,15	50,15	56,87
	SHH	48,7	51,87	51,87	59,43
	SHNH	49,3	48,73	48,73	56,30
Ben Meir et al., 2018 (V6)	HE	46,5	45,94	49,70	45,94
	LE	45,7	54,59	62,98	54,59
	ME	45,9	50,00	55,59	50,00

El 64 % de los valores predichos fueron determinados por las estimaciones de M_E.

En las figuras 1, 2 y 3 se representa la relación entre los valores Observados y las estimaciones de M_E, M_P y VP, respectivamente.

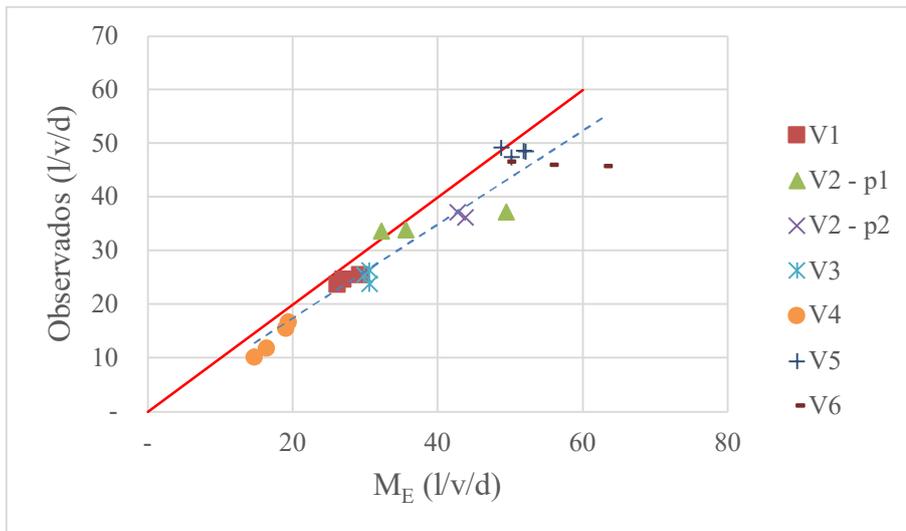


Figura 1. Relación entre el potencial de producción en función de la energía disponible (M_E) vs. producción observada en los distintos tratamientos para cada trabajo de la validación (V1, V2...V6). La línea sólida (—) representa $y = x$. La línea punteada (---) representa la regresión M_E vs Observados.

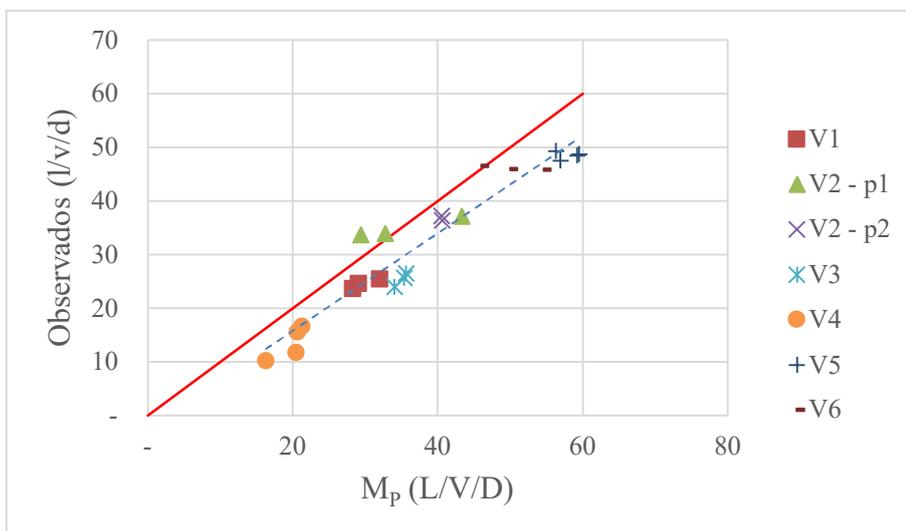


Figura 2. Relación entre el potencial de producción en función de la proteína disponible (M_P) vs. producción observada en los distintos tratamientos para cada trabajo de la validación (V1, V2...V6). La línea sólida (—) representa $y = x$. La línea punteada (---) representa la regresión M_P vs Observados.

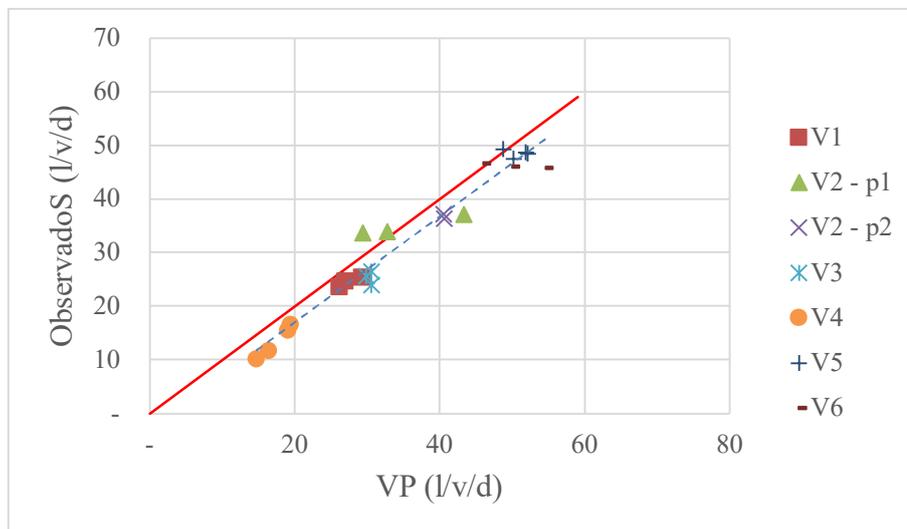


Figura 3. Relación entre los Valores de Predicción (VP) obtenidos con el modelo vs. Observados en los distintos tratamientos para cada trabajo de la validación (V1, V2...V6). La línea sólida (—) representa $y = x$. La línea punteada (---) representa la regresión VP vs Observados.

En el cuadro 5 se resumen las estimaciones de regresión lineal y MSPE obtenidos de la comparación de resultados de cada uno de los modelos y las producciones de leche observadas.

Cuadro 5. Análisis de regresión lineal y MSPE entre valores observados y las determinaciones de potencial de producción

Modelo	Parámetros	Estimación	LI (95 %)	LS (95 %)	p-valor	R ²	MSPE
VP	<i>a</i>	-2,72	-6,62	1,17	0,1605	0,95	17,4
	<i>b</i>	0,99	0,89	1,09	<0,0001		
M _E	<i>a</i>	-0,03	-4,89	4,82	0,9893	0,92	38,4
	<i>b</i>	0,87	0,75	1,00	<0,0001		
M _P	<i>a</i>	-2,38	-7,70	2,94	0,3622	0,91	49,1
	<i>b</i>	0,91	0,78	1,04	<0,0001		
	<i>b</i>	0,48	0,34	0,62	<0,0001		

a = intercepto; *b* = coeficiente de regresión; LI (95 %) y LS (95 %) = límites inferior y superior (respectivamente) del intervalo de confianza al 95 %.

En todas las evaluaciones se encontró una relación lineal positiva entre las estimaciones de los modelos y los valores Observados.

Para el VP y los modelos utilizados en su definición (M_E y M_P), el intercepto no es diferente de cero, y la pendiente sí lo es, estando el valor 1 entre los límites del intervalo de confianza.

La prueba específica para evaluar la hipótesis de que el coeficiente de regresión es igual a 1 (cuadro 6), no permitió descartar esta hipótesis para VP y M_P , pero sí en las estimaciones por M_E .

Cuadro 6. Resultados de la prueba de hipótesis para el coeficiente de regresión (b).

Modelo	H0	p-valor
VP	$b = 1$	0,81921
M_E	$b = 1$	0,04412
M_P	$b = 1$	0,16869

Simulación de estrategias de alimentación con “CTR Dairy – PRODUCTION”

En el cuadro 7 se muestran las estimaciones de producción realizadas por el modelo “CTR Dairy – PRODUCTION”, para las dos estrategias de alimentación planteadas.

Cuadro 7. Resultados productivos esperados con las dos alternativas de alimentación.

	Opción A	Opción B	Diferencia A - B
Producción de leche			
M_P (l/d)	29,51	29,14	0,37
M_E (l/d)	29,50	29,49	0,01
VP (l/d)	29,50	29,14	0,36
Proyección de beneficios			
U\$\$/vaca/d	9,44	9,32	0,12
U\$\$/rodeo/d	944	932	11
U\$\$/rodeo/mes	28789	28439	350

En la Opción A las producciones previstas para la energía y proteína disponibles prácticamente no difieren (29,50 vs. 29,51 litros, respectivamente). En cambio, para la Opción B la producción estaría limitada por la disponibilidad de nutrientes aminogénicos (29,14 vs. 29,49 litros, para M_P y M_E respectivamente).

Entre las dos opciones de alimentación se estima una diferencia de 0,36 l/vaca/d, que trasladado al rodeo (100 animales) y al mes, equivale a una diferencia de U\$S 350, únicamente considerando los ingresos extras por producción con la Opción A.

En el cuadro 8 se presentan los promedios diarios para los principales parámetros ruminales simulados por el modelo

Cuadro 8. Información ruminal (promedios diarios)

	Opción A	Opción B	Diferencia A - B
Volumen (l)	85,2	85,1	0,1
pH	6,5	6,5	-
Amonio (mg/l)	361,0	352,9	8,1
AGV (mM/l)	86,9	87,1	- 0,2
Pool Microorganismos (g)	1,530,0	1,525,5	4,5
Pool PC Soluble (g)	42,0	37,3	4,7
Pool Carbohidratos Solubles (g)	53,0	55,3	- 2,3

La mayor diferencia se observa en el pool de Proteína Cruda Soluble (QPS) a favor de la Opción A (12,6 %), lo que estaría explicando la mayor producción esperada con esta estrategia de alimentación, gracias a una mayor disponibilidad de aminoácidos para absorber a nivel intestinal.

En las figuras 4 y 5 se muestra la evolución diaria y las diferencias registradas minuto a minuto en el tamaño del QPS para las dos alternativas de alimentación.

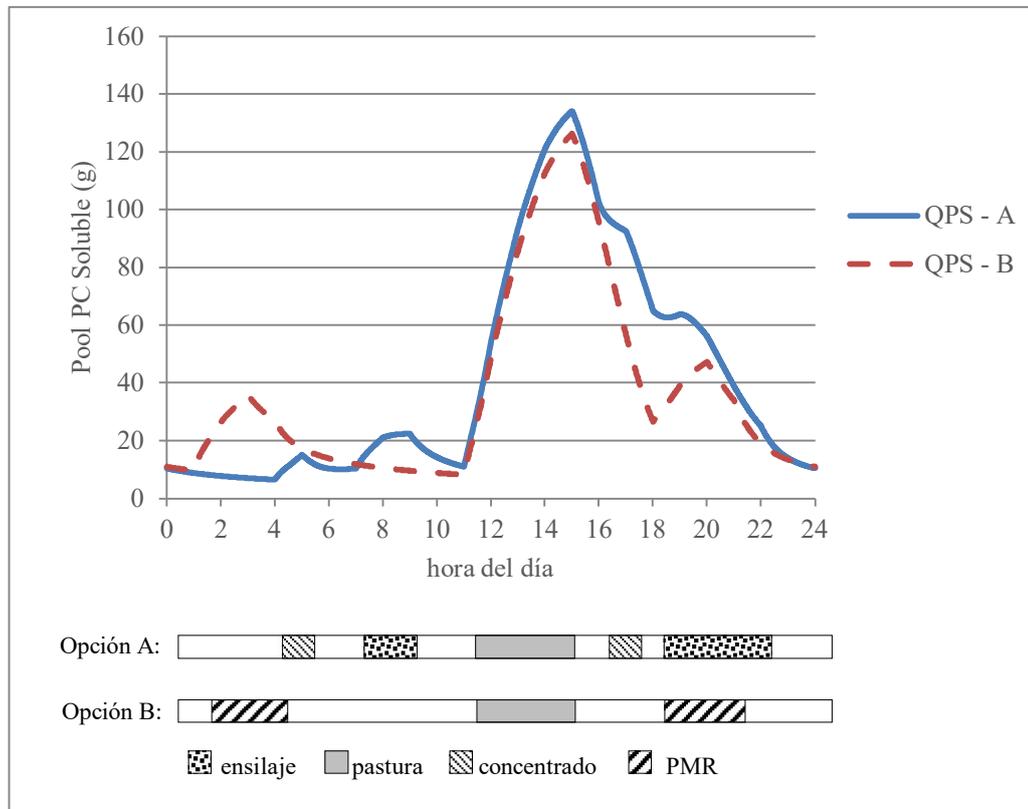


Figura 4. Evolución diaria del QPS para las dos alternativas de alimentación.

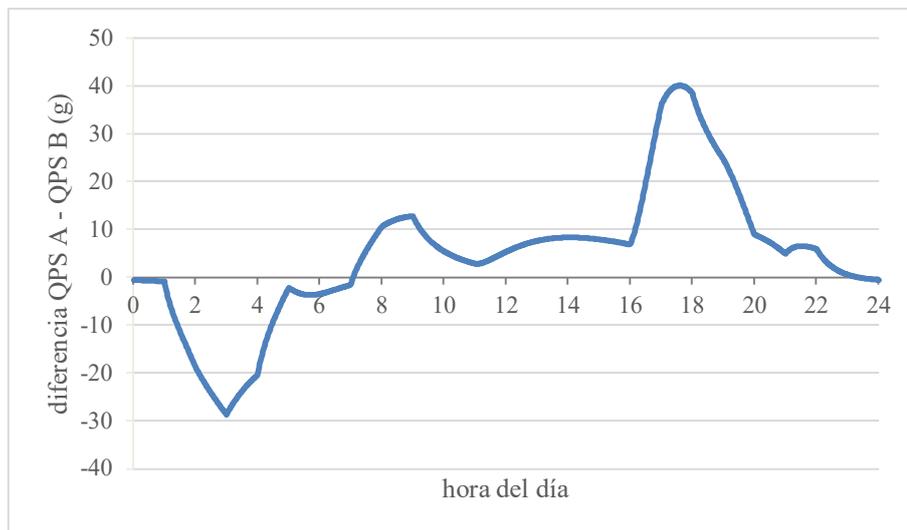


Figura 5. Evolución minuto a minuto de la diferencia en el tamaño del QPS para las dos alternativas de alimentación.

Durante el pastoreo se observa la mayor acumulación en el QPS. Después del pico de acumulación comienza un descenso en el tamaño de este pool, que en la Opción A es atenuado en primera instancia por el consumo de concentrado en el ordeño de la tarde, y posteriormente por el consumo de ensilaje. En la Opción B el decaimiento posterior al pico continúa constante hasta que se revierte la tendencia con el consumo de PMR a las 18 h.

Los dos momentos donde se identifican las mayores diferencias en el tamaño del QPS son en la madrugada a favor de la Opción B cuando éste recibe la oferta de PMR, y en la tarde a favor de la Opción A, asociado al suministro de concentrado en el ordeño PM. Durante la mayor parte del día la Opción A genera un tamaño del QPS superior a la Opción B.

En las figuras 6 y 7 se muestra la evolución diaria del QPS, pool de carbohidratos solubles (QSC, g) y pool de microorganismos (QMi, g), para las opciones A y B, respectivamente.

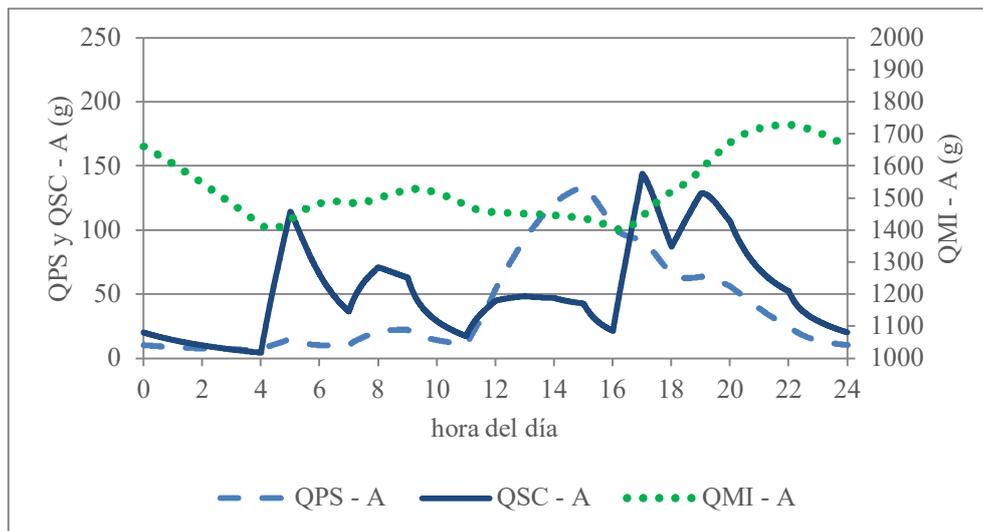


Figura 6. Evolución diaria del pool ruminal de proteínas solubles (QPS), carbohidratos solubles (QSC) y microorganismos (QMi), para la Opción A de alimentación.

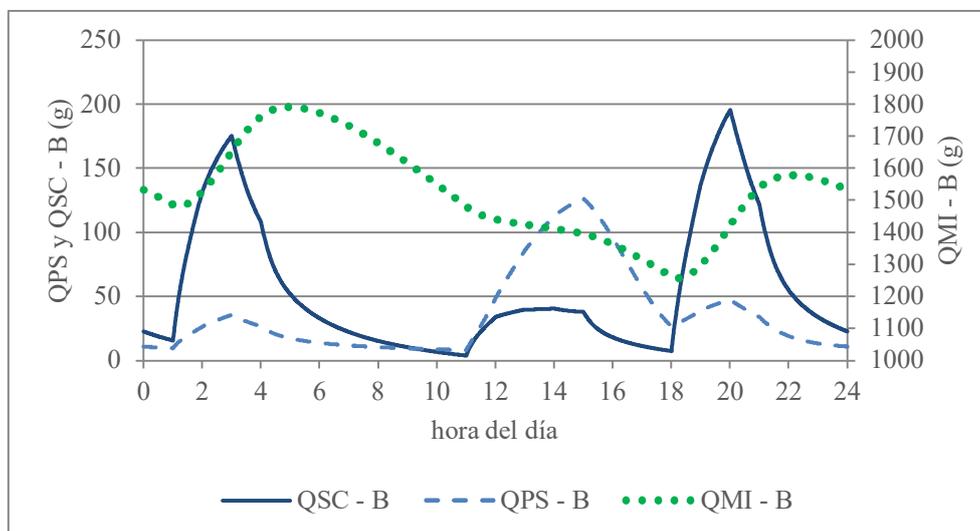


Figura 7. Evolución diaria del pool ruminal de proteínas solubles (QPS), carbohidratos solubles (QSC) y microorganismos (QMi), para la Opción B de alimentación.

La evolución diaria del pool de carbohidratos solubles muestra picos de acumulación asociados directamente a cada evento de alimentación.

La evolución del pool de microorganismos durante el día difiere según el esquema de alimentación. En la Opción A se observa un aumento en la acumulación posterior al último evento de alimentación vespertino, mientras que en la Opción B se aprecian dos picos asociados a los consumos de la PMR, con un decaimiento continuo entre la ocurrencia del primero y el segundo. El comportamiento del QMi para la Opción A fue más estable, con valores que oscilaron entre 1729 y 1403 g, mientras que en la Opción B hubo mayores variaciones, con máximos de 1792 g y mínimos de 1257 g.

En las figuras 8 y 9 se muestra la evolución esperada para la concentración de AGV y el pH ruminal, con las dos alternativas de alimentación.

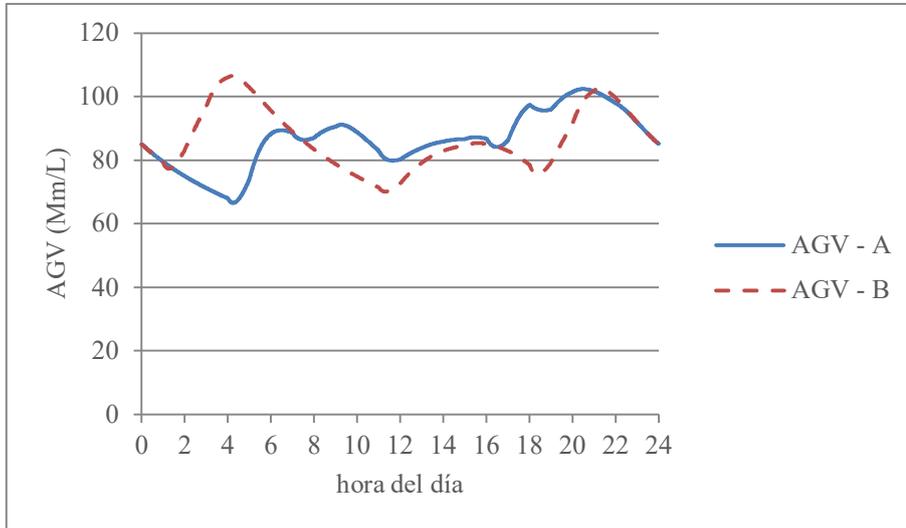


Figura 8. Evolución diaria de la concentración ruminal de AGV, para las dos opciones de alimentación (A y B).

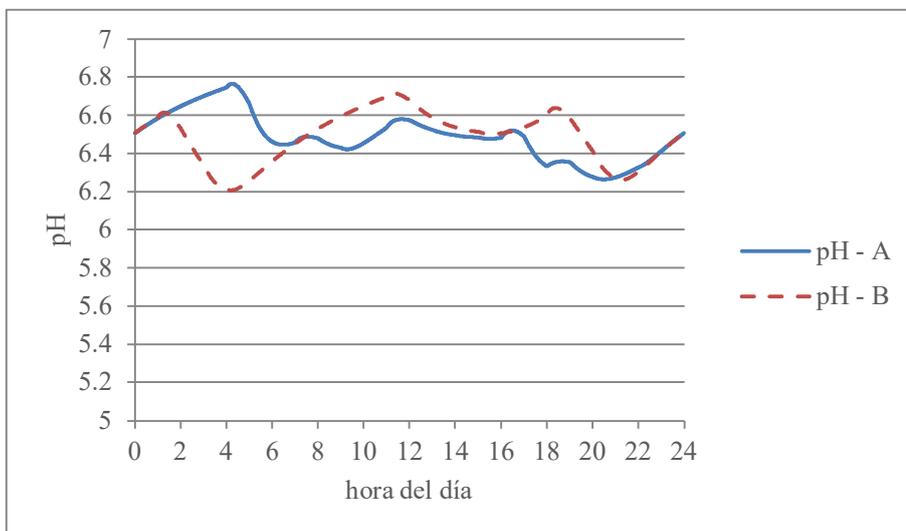


Figura 9. Evolución diaria del pH ruminal, para las dos opciones de alimentación (A y B).

La evolución de la curva de concentración de los AGV tiene un patrón similar a la del pool de microorganismos.

Para las dos estrategias de alimentación el pH ruminal durante el día osciló entre 6,2 y 6,8. El mayor contraste de las curvas se da en las primeras horas del día (2 a 5 AM), cuando la concentración de AGV es mínima en la Opción A, y máxima en la Opción B.

DISCUSIÓN

Validación del Modelo “CTR Dairy – PRODUCTION”

La evaluación general del comportamiento del modelo en base a disponibilidad de energía (M_E) y aminoácido (M_P) muestra que tuvieron buenos niveles de precisión y exactitud ($R^2 = 0,92$ y $0,91$; y $MSPE = 38,4$ y $49,1$ respectivamente).

El VP definido por el criterio de “nutriente limitante” entre las previsiones realizadas por M_E y M_P , presenta muy buenos valores de ajuste entre los valores observados y simulados ($R^2 = 0,95$ y $MSPE = 17,4$).

Los niveles de precisión y exactitud obtenidos con VP son comparables a los logrados por otros modelos mecanicistas de vasto desarrollo científico. En una evaluación de los modelos Cornell Net Carbohydrate and Protein System (CNCPS) v5 y v6, con datos de tres estudios publicados que incluían animales en un amplio rango de producción y días de lactancia, primíparas y multíparas, Tylutki et al. (2008) reportaron para la predicción de producción de leche una precisión que osciló entre $R^2 = 0,86$ y $0,89$, y un $MSPE = 19,9$ y $14,6$ para CNCPS v5 y v6, respectivamente. Para el modelo Nutrient Requirements of Dairy Cattle, la comparación de la ingesta de EN_L (estimada a partir del consumo de materia seca real y la concentración de EN_L) con la utilización de EN_L (estimaciones del modelo de mantenimiento, producción de leche real y cambios de peso vivo) obtuvo un ajuste de $R^2 = 0,61$ (NRC, 2001).

En el análisis más detallado de los resultados individuales provistos por M_E y M_P , aunque la mayoría de los valores estén por debajo de la línea $y=x$ (figuras 3 y 4, respectivamente), y esto podría interpretarse como una sobrestimación sistemática, los parámetros de regresión obtenidos estarían indicando un comportamiento

adecuado, con los intercepto no distintos a cero ($p = 0,99$ y $0,36$ para M_E y M_P , respectivamente), y el coeficiente de regresión no diferentes de 1 en el caso de M_P ($p = 0,169$). En cambio, para las estimaciones de M_E el coeficiente de regresión sí fue diferente de 1 ($p = 0,045$).

Este comportamiento para M_E podría explicarse por los valores reportados en las producciones más altas, donde se observa un mayor desvío respecto a la recta. Estos puntos se corresponden al trabajo de Ben Meir et al. (2018) donde específicamente se evaluó la eficiencia energética de los animales. Estos autores reportaron para el grupo LE (baja eficiencia) un consumo de materia seca 24,5 % superior al de HE (alta eficiencia), sin que se hayan detectado diferencias en la producción de ECM (leche corregida por energía). En las estimaciones por M_E , se integran estos mayores consumos en mayores producciones, generando para estas situaciones una sobrestimación de producción. El modelo “CTR Dairy” (y por ende en “CTR Dairy – PRODUCTION”) trabaja con el animal promedio de la población, por lo tanto no está preparado para detectar ese tipo de variaciones en la eficiencia de utilización de nutrientes.

Evaluación de Dietas con “CTR Dairy – PRODUCTION”

El modelo “CTR Dairy – PRODUCTION” estima para las dos estrategias de alimentación un potencial de producción en función de la energía disponible similar, pero con diferencias para el M_P (29,51 y 29,14 litros, Opciones A y B respectivamente). Estas diferencias estarían explicadas por la evolución diaria que tiene el pool de proteína soluble en cada una de las estrategias, generándose una acumulación mayor a lo largo del día en el esquema que se ofreció el concentrado separado del ensilaje. La mayor disponibilidad de AA disponibles para el proceso de síntesis de proteína microbiana puede haber determinado un mayor flujo de estos nutrientes a la glándula mamaria. El modelo simula un 1,1 % más de aminoácidos absorbidos para Opción A frente a la B.

Si bien el modelo no identifica diferencias importantes en el tamaño promedio del pool de microorganismos, sí permite observar cómo es su variación a lo largo del día, y la influencia que tiene en él la evolución del QSC. Al haber mayor disponibilidad de carbohidratos digeridos, mejora la producción diaria de proteínas microbianas al proporcionar más energía para el crecimiento (Hoover y Stokes, 1991).

La alta interrelación entre la actividad microbiana y la producción de ácidos grasos volátiles (Bergman, 1990; Dijkstra, 1994) explicarían la similitud encontrada entre los patrones diarios de las curvas de QMi y concentración de AGV.

La evolución del pH ruminal estimado estaría indicando que en ninguna de las dos opciones propuestas sería esperable un efecto adverso de la dieta o su manejo en la actividad ruminal. Se ha establecido que el pH crítico para el mantenimiento de una digestibilidad aceptable del forraje estaría por encima de 5,8 (Russell y Wilson, 1996; Wales et al., 2004).

En una revisión sobre los efectos de la sincronización de la disponibilidad de N y energía en la función ruminal y las respuestas en producción de vacas lecheras, Cabrita et al. (2006) analizaron los efectos de alterar la sincronización de las dietas cambiando los ingredientes o alterando la frecuencia de alimentación (dietas totales o ingredientes), encontrando que la evidencia de los beneficios es contradictoria, tanto para la síntesis de proteína microbiana como para maximizar la producción de leche. Sin embargo, los autores plantean una serie de elementos que podrían estar interfiriendo con los resultados observados, y plantean alternativas para solucionarlos, incluida la necesidad de contar con modelos que representen mejor la fase *lag* previa a la digestión y pasaje ruminal.

CONSIDERACIONES FINALES

El modelo “CTR Dairy – PRODUCTION” es, al momento de publicación del presente trabajo, el único modelo con la capacidad de predecir el efecto en la secuencia de alimentación a lo largo del día sobre la evolución de los parámetros ruminales (p. ej.:

volumen, pH, tamaño del pool de microorganismos, etc.), disponibilidad de nutrientes glucogénicos, aminogénicos y lipogénicos, y en la producción de leche.

La implementación y desarrollo de “CTR Dairy - PRODUCTION” codificado en su totalidad en VBA y, por tanto, accesible mediante Microsoft EXCEL ®, permite disponer de una herramienta con posibilidades de mayor difusión en el área de la investigación, donde puede ser utilizado, por ejemplo, para simular el efecto de diferentes manejos nutricionales que impliquen en uso de ingredientes con diferentes momentos de inclusión, previo a la realización de trabajos experimentales.

Otra implicancia de esto es que también se habilita la posibilidad del uso a nivel comercial, es decir, ser utilizado por los asesores o productores para decidir cuál o cuáles son las mejores combinaciones en la cantidad, tipo y momento de uso de los recursos alimenticios que optimizan el uso de estos.

Por último, y relacionado con los puntos anteriores, el nivel de detalle de la información manejado en el desarrollo del modelo “CTR Dairy – PRODUCTION”, y la estructura de la codificación, habilita la posibilidad de en futuras versiones incorporar otros parámetros a evaluar, como pueden ser las emisiones de metano o la excreta de nutrientes al ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- AFRC (Agricultural and Food Research Council). 1993. Energy and protein requirements of ruminants: An advisory manual. Technical committee on responses to nutrients. Alderman G, Cottrill BR. (Eds.). Wallingford: CAB International. 159 pp.
- Baldwin, R.L., J.H.M. Thornley, D.E. Beever. 1987. Metabolism of the lactating cow. II. Digestive elements of a mechanistic model. *Journal of Dairy Research*, 54: 107-131.

- Ben Meir, Y.A., M. Nikbachat, Y. Fortnik, S. Jacoby, H. Levit, G. Adin, M. Cohen Zinder, A. Shabtay, E. Gershon, M. Zachut, S. J. Mabweesh, I. Halachmi, J. Miron. 2018. Eating behavior, milk production, rumination, and digestibility characteristics of high- and low-efficiency lactating cows fed a low-roughage diet. *Journal of Dairy Science*, 101: 1–12.
- Bergman, E.N. 1990. Energy contributions of volatile fatty acids from the gastrointestinal tract in various species. *Physiological Reviews*, 70 (2): 567–590. doi:10.1152/physrev.1990.70.2.567.
- Cabrita, A., R. Dewhurst, J. Fernandes, A. Mira da Fonseca. 2006. Evaluation of the effects of synchronising the availability of N and energy on rumen function and production responses of dairy cows – a review. *Animal Research*, 55: 1-24.
- Chilibroste, P., J. Dijkstra, P. H. Robinson, S. Tamminga 2008. A simulation model “CTR Dairy” to predict the supply of nutrients in dairy cows managed under discontinuous feeding patterns. *Animal Feed Science and Technology*, 143: 148-173.
- Chilibroste, P., J. Dijkstra, S. Tamminga. 2001. Design and evaluation of a non-steady state rumen model. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 49: 297–312.
- Dijkstra, J., J. France. 1996a. A comparative evaluation of models of whole rumen function. *Annales de Zootechnie*, 45: 175-192.
- Dijkstra, J., J. France, A. G. Assis, H. D. S. C. Neal, O. F. Campos, L. J. M. Aroeira. 1996b. Simulation of digestion in cattle fed sugarcane: prediction of nutrient supply for milk production with locally available supplements. *Journal of Agricultural Sciences*, 127: 247–260.
- Dijkstra, J. 1994. Production and absorption of volatile fatty acids in the rumen. *Livestock Production Science*, 39: 61-69.

- Fajardo, M., D. A. Mattiauda, G. Motta, T. C. Genro, A. Meikle, M. Carriquiry, P. Chilbroste. 2015. Use of mixed rations with different access time to pastureland on productive responses of early lactation holstein cows. *Livestock Science*, 181: 51–57.
- Fox, D. G., C. J. Sniffen, J. D. O'Connor, J. B. Russell, P. J. Van Soest. 1992. A Net Carbohydrate and Protein System for evaluating cattle diets: III Cattle requirements and diet adequacy. *Journal of Animal Science*, 70: 3578-3596.
- France, J., J. H. M. Thornley, D. E. Beaver. 1982. A mathematical model of the rumen. *Journal of Agricultural Science (Cambridge)*, 99: 349-353.
- Gregorini, P., P. C. Beukes, A. J. Romera, G. Levy, M. D. Haniga. 2013. A model of diurnal grazing patterns and herbage intake of a dairy cow, mindy: Model description. *Ecological Modelling*, 270: 11– 29.
- Gregorini, P. 2012. Diurnal grazing pattern: Its physiological basis and strategic management. *Animal Production Science*, 52 (7): 416–430.
- Hoover, W.H., S. R. Stokes. 1991. Balancing Carbohydrates and Proteins for Optimum Rumen Microbial Yield. *Journal of Dairy Science*, 74: 3630-3644.
- Kononoff, P. J., A. J. Heinrichs. 2003. The effect of corn silage particle size and cottonseed hulls on cows in early lactation. *Journal of Dairy Science*, 86: 2438–2451.
- Mattiauda, D.A., S. Tamminga, M. J. Gibb, P. Soca, O. Bentancur, P. Chilbroste. 2013. Restricting access time at pasture and time of grazing allocation for holstein dairy cows: Ingestive Behaviour, Dry Matter Intake and Milk Production. *Livestock Science*, 152: 53–62.
- Moe, P.W., H. F. Tyrrell, W. P. Flatt. 1971. Energetics of body tissue mobilization. *Journal of Dairy Science*, 54: 548-553.

- NRC (National Research Council). 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Seventh Revised Edition, 2001. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9825>.
- Pérez-Prieto, L.A., J. L. Peyraud, R. Delagarde. 2011a. Pasture intake, milk production and grazing behaviour of dairy cows grazing low-mass pastures at three daily allowances in winter. *Livestock Science*, 137: 151–160.
- Pérez-Prieto, L.A., J. L. Peyraud, R. Delagarde. 2011b. Substitution rate and milk yield response to corn silage supplementation of late-lactation dairy cows grazing low-mass pastures at 2 daily allowances in autumn. *Journal of Dairy Science*, 94: 3592–3604.
- Robinson PH. 1998. SHIELD (version 5.0) Dairy Ration Evaluator. [En línea]. 17 de diciembre de 2021.
https://animalscience.ucdavis.edu/sites/g/files/dgvnsk446/files/inline-files/shldman_0.pdf.
- Russell, J.B., D. B. Wilson. 1996. Why are ruminal cellulolytic bacteria unable to digest cellulose at low pH? *Journal of Dairy Science*, 79: 1503-1509.
- Tylutki, T.P., D. G. Fox, V. M. Durbal, L. O. Tedeschi, J. B. Russell, M. E. Van Amburgh, A. N. Pell. 2008. Cornell Net Carbohydrate and Protein System: A model for precision feeding of dairy cattle. *Animal Feed Science and Technology*, 143(1-4): 174–202.
- Wales, W.J, E. S. Kolver, P. L. Thorne, A. R. Egan. 2004. Diurnal variation in ruminal pH on the digestibility of highly digestible perennial ryegrass during continuous culture fermentation. *Journal of Dairy Science*, 87: 1864–1871.