



FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO

**PREDICCIÓN DEL CONSUMO DIARIO DE VACAS EN PASTOREO
MEDIANTE ANÁLISIS ACÚSTICO.**

Marina de las Mercedes Lorenzón

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE DOCTOR EN CIENCIAS AGRARIAS

DIRECTOR: Dr. Julio Ricardo Galli

CO- DIRECTOR: Dr. Diego Milone

2021

PREDICCIÓN DEL CONSUMO DIARIO DE VACAS EN PASTOREO MEDIANTE ANÁLISIS ACÚSTICO

Marina de las Mercedes Lorenzón

Ingeniera Agrónoma – Universidad Nacional de Entre Ríos

Esta Tesis es presentada como parte de los requisitos para optar al grado académico de Doctor en Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de Rosario y no ha sido previamente presentada para la obtención de otro título en ésta u otra Universidad. La misma contiene los resultados obtenidos en investigaciones llevadas a cabo en el Campo Experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNR, Zavalla, Santa Fe, durante el período comprendido entre julio y noviembre de 2017 bajo la dirección del Dr. Julio Ricardo Galli.

Marina de las Mercedes Lorenzón

Dr. Julio Ricardo Galli

Dr. Diego Milone

Defendida: 29 junio de 2022_

AGRADECIMIENTOS

A Julio Galli por su apoyo y guía en todo este importante proceso de formación.

A Alejandra Planisich y Marcelo Larripa por ser grandes compañeros de ensayos de campo.

A mis padres Cristina y Rolando que siempre creyeron en mí.

A mi hermano Augusto por ser incondicional siempre

A Pedro mi compañero de vida

A José Luis Romero, Federico García Arias y Marcela Cian mis amigos de cátedra que siempre me acompañan.

A Miriam Gallardo referente y amiga.

A la UNIVERSIDAD ARGENTINA PÚBLICA Y GRATUITA

DEDICATORIAS

A Ignacio, Maite y Lucas los amores de mi vida

PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES A CONGRESOS

1. LORENZÓN, M.; PLANISICH, A.; LARRIPA, M.; GALLI, J. 2018. Cambios en la tasa de consumo de vacas lecheras a través de un turno de pastoreo. 41° Congreso de Asociación Argentina de Producción Animal. Revista Argentina de Producción Animal, Volumen_ 38 Suplemento: 1. Página: 264..
2. LORENZÓN, M.; PLANISICH, A.; SALLOVITZ, M.; MILONE, D.; LARRIPA, M.; GALLI, J. 2021. Estimación del consumo de vacas durante un turno de pastoreo mediante el registro acústico. 43° Congreso de Asociación Argentina de Producción Animal. RAPA Revista Argentina de Producción Animal, Volumen: 41. Suplemento: 1.
3. LORENZÓN, M.; MILONE, D.; UTSUMI, S.; PLANISICH, A.; GALLI, J. 2021. Uso de un método acústico para estimar el consumo en un sistema de ordeño voluntario basado en pasturas. Comunicación. 43° Congreso de Asociación Argentina de Producción Animal. Revista Argentina de Producción Animal, Volumen: 41. Suplemento: 1.

ÍNDICE GENERAL

<u>AGRADECIMIENTOS</u>	3
<u>DEDICATORIAS</u>	3
<u>PUBLICACIONES Y PRESENTACIONES A CONGRESOS</u>	4
<u>ÍNDICE GENERAL</u>	5
<u>ÍNDICE DE TABLAS</u>	8
<u>ÍNDICE DE FIGURAS</u>	9
<u>ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS</u>	11
<u>RESUMEN</u>	14
<u>ABSTRACT</u>	16
<u>CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL</u>	17
MÉTODOS DE MEDICIÓN DEL CONSUMO EN BOVINOS, EN EL CORTO Y LARGO PLAZO	17
MÉTODOS DE LARGO PLAZO	18
MÉTODOS DE CORTO PLAZO.	20
MÉTODOS INTEGRADOS (DE CORTO Y LARGO PLAZO).	21
INTEGRACIÓN DEL CONSUMO Y LA CONDUCTA EN PASTOREO.	23
EL MODELO CONCEPTUAL.	23
MÉTODOS PARA MEDIR EL COMPORTAMIENTO INGESTIVO.	27
EL MÉTODO ACÚSTICO Y LA GANADERÍA DE PRECISIÓN.	29
<u>CAPÍTULO 2: CAPÍTULO 2: PREDICCIÓN DEL CONSUMO DE MATERIA SECA MEDIANTE EL REGISTRO ACÚSTICO DE VACAS LECHERAS DURANTE UN TURNO DE PASTOREO</u>	33
I. INTRODUCCIÓN.	33
II. MATERIALES Y MÉTODOS.	34
LUGAR	34

PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	34
CONSUMO DE MATERIA SECA	36
REGISTROS ACÚSTICOS	38
III. RESULTADOS	44
CARACTERÍSTICAS DEL FORRAJE UTILIZADO EN LOS EXPERIMENTOS	44
EFFECTO DE LA ESPECIE FORRAJERA SOBRE EL COMPORTAMIENTO INGESTIVO.	46
EFFECTO DE LA ESPECIE FORRAJERA EN LA ASIGNACIÓN DE LOS MOVIMIENTOS MANDIBULARES.	47
DESCRIPCIÓN DE LOS SONIDOS	48
ESTIMACIÓN DEL CONSUMO	50
IV. DISCUSIÓN	52
CONSUMO Y COMPORTAMIENTO INGESTIVO	52
ESTIMACIÓN DEL CONSUMO.	56
V. CONCLUSIONES	61
AGRADECIMIENTOS	61

CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DEL MÉTODO ACÚSTICO EN UN SISTEMA DE ORDEÑO VOLUNTARIO BASADO EN PASTURAS **62**

I. INTRODUCCIÓN	62
II. MATERIALES Y MÉTODOS	63
LUGAR	63
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	63
Animales	63
Manejo de las vacas y del pastoreo	64
Calidad de las pasturas	65
Calidad de los suplementos	66
Tratamientos	66
REGISTROS A CAMPO	66
ESTIMACIÓN DE LAS VARIABLES	68
COMPORTAMIENTO INGESTIVO Y CONSUMO DE MATERIA SECA	68
MODELOS BASADOS EN EL REGISTRO ACÚSTICO	69
MODELO BASADO EN LOS DE REQUERIMIENTOS ENERGÉTICOS	70
MODELOS Y ANÁLISIS ESTADÍSTICOS	71
III. RESULTADOS	72
IV. DISCUSIÓN	78
DESEMPEÑO DE LOS MODELOS ACÚSTICOS.	78
COMPORTAMIENTO INGESTIVO Y CONSUMO DIARIO	80
V. CONCLUSIONES	83
AGRADECIMIENTOS	84

DISCUSIÓN GENERAL	85
CONSUMO Y COMPORTAMIENTO INGESTIVO EN EL CORTO PLAZO	85
ESTIMACIÓN DEL CONSUMO.	86
DESEMPEÑO DE LOS MODELOS ACÚSTICOS.	87
COMPORTAMIENTO INGESTIVO Y CONSUMO DIARIO	87
CONCLUSIÓN FINAL	88
BIBLIOGRAFÍA	91
ANEXOS	100
ANEXO I	100
USO Y CALIBRACIÓN DEL PASTURÓMETRO	100
ANEXO II.	101
VALIDACIÓN CRUZADA	101

ÍNDICE DE TABLAS

Capítulo 2

Tabla 1. Características del forraje utilizado en las sesiones de pastoreo.....	45
Tabla 2. Efecto de la especie forrajera sobre el comportamiento ingestivo.....	47
Tabla 3. Efecto de la especie forrajera en la asignación de los movimientos mandibulares.....	48
Tabla 4. Efecto de la especie forrajera las variables acústicas.....	50
Tabla 5: Modelos para estimar consumo de materia seca basados en variables acústicas y de comportamiento.....	51
Tabla 6: Comparación de valores observados y simulados con el modelo ConPast 2.0.....	53

Capítulo 3

Tabla 7. Comparación de la estimación del consumo de materia seca de los modelos acústicos con la predicción por requerimientos de las vacas con distinto nivel de suplementación.....	72
Tabla 8. Comparación de las características productivas de las vacas, predicción del consumo de materia seca (CMS) y eficiencia de conversión del alimento (EFc) según suplementación, días y vaca.....	75
Tabla 9. Variables del comportamiento ingestivo a partir de la predicción del MOD...	76
Tabla 10. Variables acústicas. Efecto de los tratamientos, variabilidad entre días y vacas.....	77

ÍNDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1. Modelo de análisis de las relaciones entre las variables que determinan la Energía de las masticaciones por gramo de materia seca consumida.....	22
Figura 2. Comportamiento ingestivo y escala de pastoreo en el espacio y tiempo.....	24
Figura 3. Los componentes del comportamiento ingestivo que relacionan la estructura de la pastura con la tasa de consumo que en un tiempo de pastoreo determina el consumo de pastura.....	26

Capítulo 2

Figura 4: Vacas en las parcelas experimentales durante las sesiones individuales y simultáneas de pastoreo.....	35
Figura 5: Parcelas experimentales para las sesiones individuales simultáneas en alfalfa y subdivisión transitoria de las parcelas en sitios para estimar biomasa ofrecida y remanente en raigrás anual.....	37
Figura 6. Sitios identificados como “pastoreados” y “no pastoreados” de alfalfa, cada sitio se identificaba con una marca individual; sitio de raigrás anual pre-pastoreo; Corte total del sitio de muestreo de raigrás anual post-pastoreo.....	37
Figura 7. Parcela experimental luego de finalizado del corte total de la biomasa remanente de los sitios pastoreados para la determinación del remanente.....	38
Figura 8. Vaca con el dispositivo experimental.....	39
Figura 9: Fracción de una banda de sonido de una sesión de pastoreo de alfalfa editada y procesada mediante el programa Audacity.....	40
Figura 10. Señal digitalizada antes y después del procesamiento para la estimación de la energía total contenida en las masticaciones a partir de la amplitud y la duración del sonido de cada masticación.....	42
Figura 11: Contenido de materia seca y Fibra detergente neutro del forraje ofrecido e ingerido en las diferentes situaciones de pastoreo.....	46
Figura 12: Fracción de una señal acústica mostrando una serie de cinco eventos masticatorios diferentes.....	49

Figura 13. Relación entre el consumo la Energía Total de la masticaciones y el Consumo de Materia Seca.....	49
Figura 14. Modelo para el análisis de las relaciones entre las variables que explican la tasa de consumo en las distintas situaciones de pastoreo.....	55
Figura 15. Relación entre el consumo de materia seca observado y el estimado mediante las variables acústicas.....	59

Capítulo 3

Figura 16: Vaca experimental con el equipo de grabación en una pastura con predominio de raigrás perenne y trébol blanco.....	65
Figura 17: Equipo de grabación sobre el animal sujeto a un bozal.....	67
Figura 18: Equipo de grabación sobre el animal sujeto a un bozal y suministro de PMR.....	67
Figura 19: Vacas experimentales durante el pastoreo.....	68
Figura 20: Clasificación de eventos masticatorios. MA: masticaciones MC: movimientos compuestos A: arranques	69
Figura 21: Estimación del consumo diario de materia seca (CMS) promedio de los 6 días para cada vaca.....	73
Figura 22: Variación diaria del CMS de cada vaca según los diferentes modelos de predicción.....	74

Anexo

Figura 23: Rectas de regresión entre la altura (cm) medida por el pasturómetro y el peso (g) de la biomasa de forraje para la estimación de biomasa aérea inicial y final en raigrás anual inicial y alfalfa por doble muestreo.....	100
Figura 24: Validación cruzada entre los CMS observados y estimados por los diferentes modelos de predicción (MOD _n).....	102

ABREVIATURAS Y SÍMBOLOS

A= número de arranques

Act.: actividad voluntaria

AIC= criterio de Akaike

B= número de bocados

B_T = tasa de bocados (B/min)

CMS= consumo de materia seca (kg o g)

CMS_B = peso de bocado (gMS)

CMS_n = consumo de materia seca con n variables (gMS)

CMS_{Req} = consumo de materia seca con requerimientos energéticos (kgMS)

CMS_T = tasa de consumo de materia seca (kgMS/h ó gMS/min)

Conc.: alimento balanceado consumido (kg)

CV= coeficiente de variación (%)

DIVMS= digestibilidad in vitro de la materia seca (%)

EE= error estándar

Efc.: eficiencia de conversión

EM_B = energía de las masticaciones por bocado

EM_{CMS} = energía por unidad de consumo de materia seca

EM_{MC} = energía de las masticaciones de movimientos compuestos

EM_P = energía de las masticaciones puras

EM_T = energía total de las masticaciones

EM_{TMC} = energía total de las masticaciones de los movimientos compuestos

EM_{TP} = energía total de las masticaciones puras

FDA= fibra insoluble en detergente ácido

FDN= fibra insoluble en detergente neutro

HSD= Honestly-significant-difference

LDA= lignina insoluble en detergente ácido

MA= número de masticaciones puras

MA_B=: número de masticaciones puras por bocado

Mant.: requerimientos diarios de mantenimiento (Mcal EM)

MB: requerimiento basal (Mcal EM)

MC= número de movimientos compuestos

Mcal EM: megacalorías de Energía Metabolizable

MC_B= número movimientos compuestos por bocado

MM= número de movimientos mandibulares

MM_B= movimientos mandibulares por bocado

MM_T= tasa de movimientos mandibulares (MM/min)

MOD_n= modelo de predicción de CMS con n variables

MOD_{Req}= modelo de predicción de CMS según requerimientos energéticos

MS= materia seca

MT= número de masticaciones totales

MT_B= número de masticaciones totales por bocado

MT_T= tasa de masticaciones totales (MT/min)

PB= proteína bruta (%)

PMR= ración parcialmente mezclada

Prod.: producción de leche (kg)

Pv= valor de p

PV^{0.75}: peso metabólico

R²= coeficiente de determinación (%)

R²_{aj}= coeficiente de determinación ajustado por el número de predictores (%)

R²_{kfold}= coeficiente de determinación para validación cruzada con k iteraciones

RCME= raíz media de los cuadrados del error

Req. past.: requerimiento cubierto por el consumo de pastura (Mcal)

Req. Tot.: requerimiento total de energía metabolizable diaria requerida por vaca (Mcal)

T= tiempo de pastoreo (min)

VMS= sistema de ordeño voluntario (por sus siglas en inglés, Voluntary Milk System).

RESUMEN

Se realizaron dos experimentos para demostrar que el comportamiento ingestivo y el consumo de materia seca (CMS) en vacas lecheras puede ser analizado y cuantificado con precisión a través del registro acústico de los sonidos producidos durante la ingestión. En el primer experimento se realizó un trabajo con vacas lecheras en el corto plazo (un turno de pastoreo) con las siguientes hipótesis: que existe una relación lineal entre el CMS y la energía total del sonido de las masticaciones y que el CMS puede ser estimado con precisión a través de modelos basados en mediciones acústicas del comportamiento ingestivo. Se realizaron registros del comportamiento ingestivo y del CMS en 4 situaciones de pastoreo, generadas con dos especies forrajeras contrastante (alfalfa y raigrás anual), en dos condiciones de pastoreo (“inicial” y “rebrote”), con 4 niveles de CMS y 3 repeticiones (3 vacas). La biomasa aérea promedio ofrecida de las pasturas de alfalfa y raigrás anual fueron diferentes ($P < 0.05$) en cantidad (kgMS/ha), contenido de materia seca (gMS/kg) y fibra insoluble en detergente neutro (gFDN/kg). La biomasa aérea promedio anual fue 12% mayor ($P < 0.05$) en raigrás que en alfalfa (1661 kgMS/ha vs. 1456 kgMS/ha). En alfalfa, contenido de MS fue 59% superior que en raigrás anual, 247 g/kg vs. 155 g/kg respectivamente. El contenido de FDN (g/kg) promedio fue significativamente diferente entre especies y condiciones ($P < 0.05$), el raigrás anual tuvo una concentración de FDN 32% mayor respecto a la alfalfa, a su vez el raigrás tuvo mayor concentración de FDN en la condición de rebrote ($P < 0.05$). El contenido de MS de la biomasa ofrecida e ingerida fue similar ($P > 0.05$) en alfalfa y raigrás anual, y en las diferentes condiciones de pastoreo. La tasa de consumo promedio general (CMS_T) fue de 2.94 ± 0.33 kgMS/h en raigrás y alfalfa, con un peso de bocado (CMS_B) de 1.50 ± 0.22 gMS y una tasa de bocados de 31.8 ± 1.23 bocados/min (B_T). CMS_T y B_T no fueron diferentes ($P < 0.05$) entre las dos especies en las distintas situaciones de pastoreo. En promedio CMS_T fue similar en alfalfa y raigrás (2.59 ± 0.23 vs. 2.78 ± 0.21 kgMS/h, respectivamente). La energía total de las masticaciones (EM_T) presentó una relación lineal y positiva ($P < 0.0001$) con CMS, 84% de la variación del CMS puede explicarse a través de la energía total de las masticaciones. La energía de las masticaciones puras (EM_P) y las masticaciones de los movimientos compuestos (EM_{MC}) fueron diferentes ($P < 0.05$) entre las diferentes situaciones de pastoreo. El CMS fue estimado por regresión múltiple mediante la selección del mejor conjunto de variables de acústicas y comportamiento ingestivo. La energía total de las masticaciones (EM_T) fue la mejor variable cuando se utilizó una sola variable para predecir CMS ($R^2 = 0.84$, $CV = 16\%$) El número máximo de variables que mejora la predicción CMS fue con el modelo (MOD_4) de 4 variables ($R^2 = 0.90$, $CV = 13\%$), compuesto por la energía total de las masticaciones (EM_T), la tasa de movimientos mandibulares (MM_T), el número de

movimientos compuestos (MC) y la energía de las masticaciones de los movimientos compuestos (EM_{MC}). Los resultados demuestran que se pueden desarrollar modelos de predicción del CMS aplicando predicciones generalizadas basadas en el sonido de las masticaciones, usando la EM_T como principal predictor en turnos completos de pastoreo. En el segundo experimento, se utilizó un estudio de caso para determinar si los modelos de predicción del consumo de materia seca desarrollados en el primer experimento, son escalables en espacio y tiempo, y por lo tanto pueden ser integrados a la predicción y monitoreo del comportamiento y CMS de pasturas a escala diaria en un sistema real de producción. Los objetivos específicos fueron: mostrar la factibilidad de uso del método acústico en un sistema real de producción para medir CMS diario de pasturas y comparar el desempeño predictivo del método acústico con respecto a técnicas basadas en los requerimientos energéticos para mantenimiento y producción de leche de las vacas (MOD_{Req}). Al comparar el MOD_4 con el MOD_{Req} no difieren significativamente ($P= 0.67$) prediciendo valores de CMS diarios promedios de 18.7 y 19 kgMS, respectivamente. En promedio las vacas tomaron bocados de 0.79 ± 0.02 gMS, a una tasa de 53 ± 1.42 bocados por minuto, obteniendo una tasa de consumo de 2.48 ± 0.04 kgMS por hora durante 448 ± 15.7 min ($7\text{ h} \pm 28\text{ min}$) por día. Los modelos acústicos predicen mayor variabilidad en CMS que el MOD_{Req} , que es relevante cuando se analiza la respuesta productiva individual de los animales ante variaciones en el manejo de la alimentación. El MOD_4 basado en la energía total de las masticaciones (EM_T) y el número de movimientos compuestos (MC), permiten predecir el CMS durante el día, habilitando así un monitoreo en tiempo real del comportamiento animal, situación imposible de cuantificar con los sistemas de registros actuales de pastoreo. Este método permitiría conocer e identificar posibles mecanismos compensatorios de consumo en las vacas, que explicarían variaciones en producción dentro de un mismo rodeo.

Palabras clave: comportamiento ingestivo, consumo en pastoreo, bioacústica

ABSTRACT

Acoustic telemetry to predict daily intake in dairy cows

Two experiments were conducted to demonstrate that ingestive behavior and DMI can be accurately analyzed and quantified through acoustic grazing recording sounds. The first experiment's hypothesis was that there is a linear relationship between DMI and chewing's total energy and that models based on acoustic measurements can accurately estimate DMI. Wireless microphones and recorders were attached to halters fitted to dairy cows. Ingestive behavior and DMI were recorded in 4 grazing different situations, in two forage species, two grazing conditions, 4 DMI levels and 3 replicates. The biomass offered were different ($P < 0.05$) in quantity (kgDM/ha), dry matter content (gDM/kg) and neutral detergent insoluble fiber (gNDF/kg). Annual ryegrass biomass was 12 % higher (1661 kgDM/ha vs. 1456 kgDM/ha) than alfalfa. Alfalfa DM content was 59% higher than annual ryegrass, 247 g/kg vs. 155 g/kg. NDF content (g/kg) was significantly different between species and conditions ($P < 0.05$), annual ryegrass had 32% higher NDF concentration than alfalfa, and ryegrass had higher NDF concentration in regrowth condition ($P < 0.05$). The DM of offered and ingested were similar ($P > 0.05$) between species and in different grazing conditions. DMI rate was 2.94 ± 0.33 kgDM/h in ryegrass and alfalfa, bite mass 1.50 ± 0.22 gDM and bite rate 31.8 ± 1.23 bites / min and DMI rate was similar in alfalfa and ryegrass (2.59 ± 0.23 vs. 2.78 ± 0.21 kgMS/h). Chewing Total energy showed a linear and positive relationship ($P < 0.0001$) with DMI, ($R^2 = 0.84$, $CV = 16\%$). The best model was MOD₄ with 4 variables: chewing total energy, jaw movement's rate, compound movement's number, and chewing of compound movements energy ($R^2 = 0.90$, $CV = 13\%$). In the second experiment, a case study was used to determine whether the DMI predictions models, developed in the first experiment are scalable in space and time, and therefore can be integrated on a daily scale in a real production system. Comparing MOD₄ with MOD_{Req} they did not differ ($P = 0.67$) predicting DMI values, 18.7 and 19 kgMS/d. Grazing time was 9 % longer in not PMR treatment (428 vs 467 min) with a 2.5 % lower DMI rate (2.50 and 2.46 kgDM/h). Bite mass was 0.79 ± 0.02 gDM, bite rate: 53 ± 1.42 bites per minute, and intake rate was 2.48 ± 0.04 kgMS/h. Acoustic models predict greater variability in DMI than MOD_{Req}, it is important to analyze the individual productive response to variations in feeding management. This method allows identifying compensatory intake mechanisms that can explain variations in individual cow's production in the same herd. Predicting DMI it's important to understand the grazing ecology in a very wide range of situations.

Keywords: ingestive behavior, grazing, bioacoustics.

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL

El pastoreo es un factor importante en los sistemas de producción animal de bovinos para carne y leche, afectando positivamente la producción, el bienestar y la salud animal. Además, el pastoreo bien manejado es relevante para la sustentabilidad productiva y ambiental de los sistemas integrados agrícola-ganaderos (Franzluebbers et al., 2012).

El manejo del pastoreo en estos sistemas de producción es muy variable. Los ajustes necesarios para un manejo adecuado varían con las características particulares de la oferta forrajera, de la demanda ganadera, y de los objetivos específicos en cada sistema, por lo tanto se requiere de información precisa para monitorear, controlar y evaluar el funcionamiento integral del proceso de pastoreo. El modelo de comportamiento ingestivo en pastoreo se presenta como una excelente herramienta para el diagnóstico y planificación del manejo de la alimentación de los rodeos. El monitoreo del comportamiento ingestivo es clave para conocer y explicar el proceso dentro de la compleja interacción planta-animal, que determina el consumo de forraje en un tiempo determinado de pastoreo (en minutos, horas o días) y que permite además, evaluar cambios en la conducta relacionados con el bienestar y la salud animal. También es imprescindible, cuantificar el consumo de forraje durante el pastoreo para definir la ración de los animales; y conocer y medir las variables que lo explican. Es importante conocer la tasa de consumo en el largo plazo (kg de materia seca por día), pero también en el corto plazo (g de materia seca por minuto o por turno de pastoreo). La tasa en el largo plazo (consumo diario) está asociada a la productividad del animal y al aprovechamiento de los sitios de alimentación (potreros), mientras que la tasa de consumo a corto plazo se relaciona con el análisis del consumo a nivel de manchones y sitios de pastoreo, permitiendo analizar y explicar el comportamiento del animal durante el período de pastoreo. (Laca, y Walliesdevries, 2000)

Métodos de medición del consumo en bovinos, en el corto y largo plazo

Los métodos empleados para medir el consumo de materia seca (CMS) de los bovinos en pastoreo, deben tener una precisión adecuada al objetivo de las mediciones y brindar resultados no sesgados; pero además deben ser fáciles de usar, causar las mínimas molestias a los animales, no afectar su salud y no contaminar el medio ambiente (Gordon, 1995). Existen métodos para medir consumo en el largo plazo (uno o varios días) y en el corto plazo (desde minutos a horas).

Métodos de largo plazo

Existen numerosos métodos para medir el CMS en pastoreo en el largo plazo. Hay métodos basados en las pasturas, que comparan la cantidad de forraje previo y posterior al pastoreo, otros basados en el animal: que tienen en cuenta la digestibilidad de la dieta y la cantidad de heces, marcadores externos e internos y otros estiman los requerimientos del animal y la valoración de los alimentos. También existen métodos que integran modelos de comportamiento ingestivo (peso de los bocados, tasas de bocado y tiempo de pastoreo). La mayor o menor adecuación de cada uno de los métodos depende de la situación y el objetivo para los que se realiza la estimación del consumo.

Entre las técnicas basadas en las pasturas, se encuentran las que estiman la cantidad de forraje consumido, considerando la biomasa al inicio (previo) y al final (posterior) del período de pastoreo y el crecimiento de la pastura durante ese período (cortes, doble muestreo, jaulas de exclusión). Estos métodos se pueden adaptar para situaciones tanto de pastoreo continuo, como rotativo (Latinga et al., 2004). Las principales limitaciones de estos métodos son el crecimiento y senescencia de la pastura, la heterogeneidad de la vegetación y las dificultades que se presentan para obtener estimaciones individuales de consumo (Meijs, 1981).

Entre las técnicas más frecuentes basadas en mediciones en el animal, se encuentran aquellas que utilizan marcadores externos o internos (Mayes y Dove, 2000). Son técnicas indirectas de estimación del consumo de forrajes que se realizan recolectando la materia fecal producida; y a través de la digestibilidad de la dieta se deduce la cantidad de forraje consumido. La cantidad de materia fecal se puede estimar a partir de la concentración de marcadores en las heces y de la dosis de ese marcador externo que es suministrado diariamente. Las complicaciones en la dosificación de los marcadores, los errores de estimación de la digestibilidad y la dificultad de obtener una muestra representativa del forraje ingerido durante el pastoreo, limitan la precisión de estos métodos (Meijs, 1981; Penning, 2004).

Para medir la calidad y cantidad de forraje ingerido también se pueden utilizar animales fistulados en el esófago, la desventaja de este método es que se asume que los animales consumen una dieta similar a aquella de la cual se extrajo la muestra de heces, por otro lado debe considerarse que los métodos invasivos pueden modificar la conducta animal.

Otro grupo de métodos utilizan marcadores internos para determinar la cantidad y calidad de forraje consumido. La determinación de los índices fecales (concentración de N o reflectancia del infrarrojo cercano NIRS) es una técnica directa que puede correlacionarse con la digestibilidad del forraje. Los marcadores internos indigestibles son técnicas no invasiva (sílice, fibra indigestible, lignina, cenizas insolubles) para estimar la digestibilidad in vivo de la dieta y heces. Estos métodos requieren calibración para diferentes tipos de pasturas, categorías y estado fisiológico de los animales generando un problema adicional respecto al uso de marcadores externos (Penning, 2004).

Los alcanos de cadena larga (marcadores internos) son ceras naturales de las cutículas de las plantas y que pueden ser utilizadas para estimar tanto la digestibilidad como el consumo diario (Mayes et al., 1986; Dove y Mayes, 1991), los alcanos con número impar en su cadena de carbonos, aparecen en relativamente alta concentración en las plantas y pueden ser utilizados como marcadores internos. Esta técnica resuelve el problema de la estimación de la digestibilidad, pero es un método muy costoso que no resuelve la dificultad de obtener una muestra representativa del forraje consumido a lo largo del año. Wright et al. (2019) observaron que las estimaciones de consumo de materia seca son más precisas con n-alcanos C_{33} - C_{32} que con C_{31} - C_{32} cuando se consumen exclusivamente pasturas, y además esta determinación no es afectada por la estación del año ni la cantidad de biomasa (kgMS/ha). Todos los métodos basados en la estimación de materia fecal y digestibilidad de la dieta son muy laboriosos y costosos, y es muy importante que el método de estimación de consumo sea práctico y preciso para que pueda ser adoptado en un sistema real de producción.

Una forma práctica de calcular el consumo diario es través de los requerimientos nutricionales de los animales (Baker, 2004). Se calcula la energía metabolizable (EM) requerida para mantenimiento, producción, gestación y aumento de peso vivo, y a partir de la concentración de EM de la dieta se calcula el consumo de pastura. La precisión de este método depende de la capacidad predictiva de los estándares utilizados para el cálculo de los requerimientos y de las mediciones precisas de la producción individual. Las principales fuentes de variación son: la eficiencia de utilización de la EM, el nivel de alimentación, el valor energético de los forrajes y las condiciones climáticas (Gordon, 1995).

Métodos de corto plazo.

La mayoría de los estudios de consumo a corto plazo consisten en ofrecer el forraje al animal hospedado en un corral o en un galpón. Se utilizan micro-pasturas que se ofrecen en cajas o bandejas, en panes extraídos de pasturas o armando pasturas artificiales en grupos de macetas sujetas a una plataforma (Mursan et al., 1989; Black y Kenney, 1984; Laca et. al., 1992; Galli, 2008). Los animales pastorean a tiempo fijo o según un número determinado de bocados, el CMS se calcula por diferencia de peso tal cual de las micro-pasturas antes y después del pastoreo, sumando la pérdida por evapotranspiración estimada en pasturas no consumidas. También pueden realizarse a través de la estimación de la biomasa inicial por un método no destructivo (ej. doble muestreo) y del remanente mediante cortes luego del pastoreo.

La diferencia en el peso vivo de los animales antes y después del pastoreo es también una metodología para el cálculo de consumo a corto plazo (Huckle et al., 1994). Consiste en la colocación de arneses a los animales para recolectar la orina y heces. Se los pesa antes, se les permite consumir y se los vuelve a pesar al finalizar el período de pastoreo. Para calcular la pérdida por evapotranspiración se pesa los mismos animales en ayuno durante un mismo período de tiempo que estuvieron pastoreando. El consumo se estima a través de la variación de peso luego del pastoreo más la pérdida de peso durante el ayuno. Esta metodología requiere trabajar con balanzas muy precisas, en ambientes altamente controlados y con un manejo minucioso de los animales experimentales para obtener estimaciones confiables.

Otra forma es estimar la tasa de consumo en forma directa es a través de la observación visual de la tasa de bocados y la recuperación y pesada de los bocados ingeridos (Stobbs, 1973), para esto es necesario recuperar todo el material ingerido vía fístula esofágica y esto afecta el comportamiento normal de los animales y demanda mucho cuidado para mantener a los animales fistulados en buenas condiciones de bienestar y salud.

El consumo a corto plazo, también puede estimarse a través de metodologías que implican la observación directa y seguimiento muy cercano de los animales. La combinación de las técnicas de conteo de bocados y hand plucking se ha utilizado para estimar las tasas de consumo y la composición de la dieta en un amplia gama de ungulados silvestres en pastizales naturales y pasturas sembradas (Bonet et al., 2015). Como desventajas de este método, se destaca la

necesidad de observaciones muy cercanas que pueden afectar el normal comportamiento de los animales, este aspecto no permite las observaciones nocturnas, ya que si se utiliza iluminación para poder observar a los animales se altera el comportamiento, por otro lado este método consume mucho tiempo y mano de obra en el campo porque cada observador puede seguir sólo a un animal a la vez.

Métodos integrados (de corto y largo plazo).

Sería muy valorable disponer de un método que brinde mediciones en el corto y largo plazo en forma simultánea. De esta manera se podría integrar el consumo a distintas escalas y relacionarlo con el comportamiento animal, en respuestas a prácticas de manejo (horario de ordeño, ayunos transitorios, asignación de franjas de pastoreo, etc.).

Existen métodos que pueden adaptarse para medir el CMS en el corto y largo plazo basados en el registro acústico de la ingestión de alimentos. La biotelemedición acústica se ha propuesto como metodología para los estudios de comportamiento animal, ya que es un método no invasivo que contiene importante información en los registros de sonido (Alkon et al., 1989) que permiten identificar el procesamiento del alimento en la boca de los animales (Lee et al., 1988). Este es el método que se propone en esta tesis, por la cantidad y calidad de información que permite integrar distintas escalas (corto y largo plazo), sin afectar el comportamiento, que otros métodos no proporcionan.

A partir del registro acústico de las masticaciones durante la ingestión de forrajes se puede estimar con alta precisión el consumo de MS en el corto plazo en vacunos y ovinos. El sonido puede ser grabado desde un micrófono a un dispositivo de grabación remota, que registra la información sin afectar el comportamiento del animal (Laca et al., 1992, Klein et al., 1994, Galli et al., 2017). La energía contenida en los sonidos masticatorios está relacionada con el consumo de MS y podría ser determinada por las mediciones de los parámetros de los sonidos masticatorios (Laca et al., 2000), en forrajes frescos y secos (Galli et al., 2006a).

Mediante modelos basados en la energía del sonido de las masticaciones y las variables del comportamiento ingestivo, se pudo estimar el consumo de MS en ovejas y en vacas en períodos muy cortos, menores a 10 minutos (Galli, 2008), y también en ovejas pastoreando

gramíneas en condiciones de campo durante períodos más extensos, de 10 a 30 minutos (Galli et al., 2010). Estas variables combinadas (energía del sonido y comportamiento ingestivo) permiten determinar la tasa de consumo y el tiempo de pastoreo (Galli et al., 2017) en forma integrada. Estos antecedentes muestran que el sonido de las masticaciones refleja las diferencias en la cantidad de forraje que es procesado en cada masticación y que con esta metodología se puede estimar con precisión el CMS en pastoreo en vacunos y en ovinos. Galli et al. (2017) utilizó el método acústico para evaluar y explicar el efecto de los cambios en la estructura de la pastura (especie forrajera y altura) sobre la energía de las masticaciones. La energía producida por gramo de CMS se puede descomponer en el producto entre la intensidad y la duración del sonido de las masticaciones (Figura 1). La altura y la especie forrajera afectan los componentes del sonido que explican las variaciones resultantes en la energía de las masticaciones. El tipo de pasturas puede afectar la intensidad, duración y número de masticaciones por gramo de CMS consumida (gCMS), pero las covariancias entre estas variables, determinan que no haya diferencias significativas en la energía por gCMS. La metodología puede aplicarse con precisión en distintas condiciones de pasturas no se requiere una calibración del método para su uso en distintos forrajes frescos, a pesar que difieren marcadamente en su contenido de fibra (Alfalfa vs Festuca, Alto vs Corto).

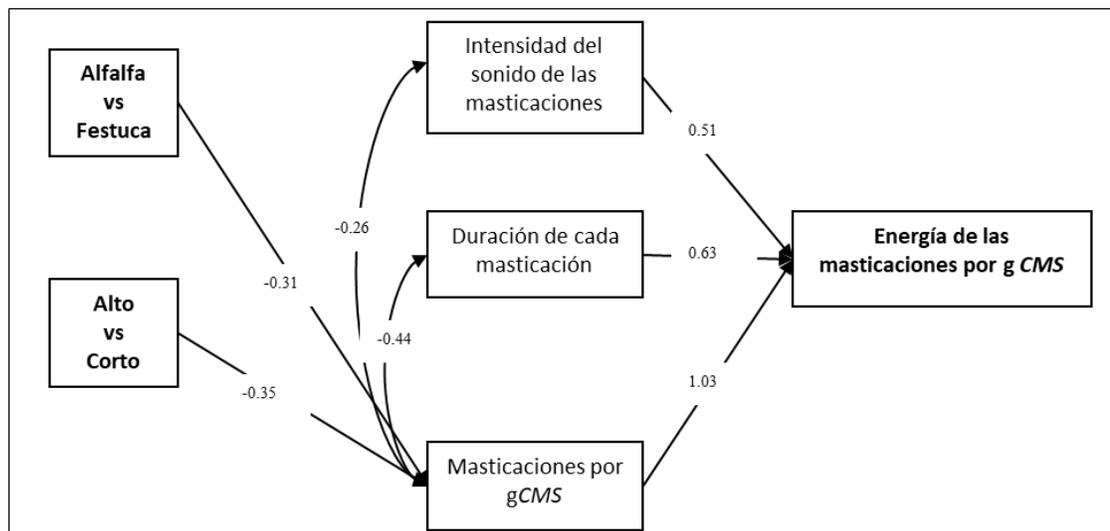


Figura 1. Modelo de análisis de las relaciones entre las variables que determinan la Energía de las masticaciones por gramo de materia seca consumida (adaptado de Galli et al., 2017)

Para que el método acústico pueda utilizarse para determinar el consumo a largo plazo en sistemas extensivos e intensivos de producción, es necesario confirmar que las ecuaciones de predicción el CMS en el corto plazo (minutos) se puedan ajustar a períodos más extensos (horas o días), en una amplia variedad de forrajes (incluyendo gramíneas y leguminosas), condiciones de pastoreo y categoría de animales.

Integración del consumo y la conducta en pastoreo.

Un aspecto importante para el desarrollo de una verdadera ganadería de precisión, es el monitoreo individual de los animales con tecnologías basadas en diferentes tipos de sensores remotos. Estas tecnologías se han difundido para su uso en sistemas intensivos de producción de carne y leche. En rumiantes se ha utilizado para determinar la localización, el traslado y las actividades de los animales (Andriamandrioso et al., 2016). Sin embargo, para que los datos obtenidos se transformen en información que permita realizar diagnósticos y tomar decisiones de manejo en sistemas extensivos de producción, es necesario que esa información pueda ser comprendida con modelos conceptuales que expliquen los procesos que intervienen en la relación entre las variables medidas y el desempeño animal.

El modelo conceptual.

La elección de las variables para monitorear el pastoreo, y generar los diagnósticos que permitan optimizar su manejo, dependerá del modelo de integración temporo-espacial que se tome como referencia. Uno de las descripciones posibles para analizar la conducta en pastoreo de los bovinos es la propuesta por Bailey et al. (1996), donde se identifican 6 niveles crecientes de jerarquía: desde el bocado, la estación de alimentación, el manchón o parche, el sitio de alimentación, el campo o pastura y hasta el hábitat. El enfoque utilizado para esta tesis, es una adaptación de este modelo. Se describe al pastoreo como un proceso en el cual se combinan varios tipos de movimientos y actividades, que se realizan a diferentes escalas de tiempo y espacio (Figura 2). A nivel de los sistemas de producción con cierto grado de intensificación, alcanzaría con integrar las escalas desde bocado hasta el nivel de pastura, integrando los niveles intermedios, para describir adecuadamente el consumo diario durante uno o más días.

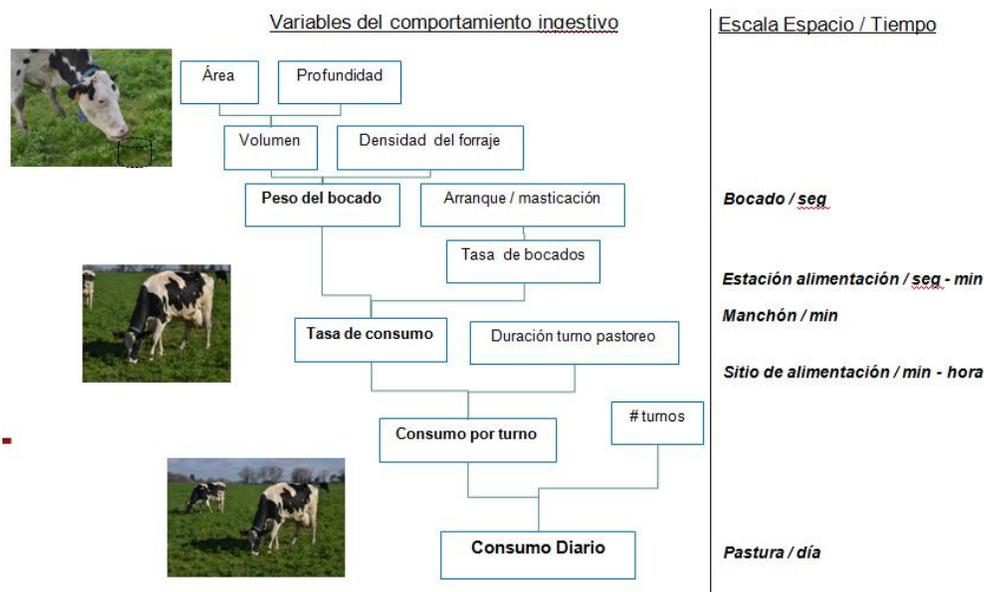


Figura 2. Comportamiento ingestivo y escala de pastoreo en el espacio y tiempo. Adaptado de Bailey et al. 1996

Bailey et al. (1996) definieron escalas de tiempo y espacio en relación al comportamiento característico que ocurre durante el pastoreo desde el nivel de bocado hasta el nivel de pastura o hábitat. Existen relaciones subyacentes entre las plantas y los animales durante el pastoreo en relación con las variaciones en el comportamiento en el tiempo y el espacio. Estos comportamientos actuales son a menudo consecuencias de condiciones pasadas (Bailey y Provenza, 2008), pero son importantes para comprender la conducta actual del animal en pastoreo, lo cual es crítico para el manejo de pastizales naturales y pasturas sembradas.

El componente básico del comportamiento ingestivo en el pastoreo es el bocado, que abarca los movimientos de aprehensión y arranque del pasto (Ungar y Rutter, 2006). La frecuencia de bocados puede variar de 0.75 a 1.2 bocados por segundo, que involucra los movimientos de masticación, y están afectados por diferentes características de la boca del animal y de la pastura, como la estructura, la distribución foliar, la composición química (contenido de agua o fibra) y/o la cantidad de forraje cosechado en cada bocado (Griffiths et al., 2003; Oudshoorn et al., 2013).

El análisis del comportamiento ingestivo de bovinos en pastoreo a nivel del bocado puede dividirse en fases, la primera fase es la aprehensión: cuando el animal se acerca a la pastura, selecciona un bocado, lo rodea con la lengua y lo lleva dentro de su boca. Luego se produce el corte o arrancado: cuando el pasto queda presionado entre los incisivos inferiores y el rodete dentario superior, y lo corta con un movimiento relativamente brusco de la mandíbula inferior que suele acompañar con un movimiento de toda la cabeza para poder cosechar el forraje. Este movimiento abrupto hacia arriba aumenta la distancia de la línea basal de pastoreo y produce el movimiento de arranque. Por cada movimiento de arranque corresponde un bocado (Gibb y Orr, 1997). El forraje contenido en el bocado luego es triturado por los premolares y molares, este proceso se denomina masticación ingestiva. Todas estas fases las realiza el animal mediante movimientos mandibulares de apertura o cierre. A cada cierre de la mandíbula se le puede asignar una determinada acción: aprehensión, masticación o un movimiento mandibular compuesto. En ovinos y bovinos se han encontrado movimientos mandibulares compuestos que incluyen masticación y arranque (aprehensión) en el mismo movimiento de cierre de la mandíbula (Laca y WallisDeVries, 2000, Galli, 2008, Navon, 2013). El proceso de consumo de forraje se completa cuando luego de aprehender uno o varios bocados, el forraje es procesado en la boca hasta conformar un bolo alimenticio que genera un estímulo de deglución y el alimento es tragado.

El peso o cantidad de forraje correspondiente a un bocado está determinado por su volumen y la densidad del forraje comprendido en ese volumen. A su vez, el volumen está definido por el área y profundidad de cada bocado. (Laca et al., 1992, Ungar, 2006). El peso promedio de los bocados (CMS_B) y el número de bocados por unidad de tiempo (tasa de bocado, B_T) determinan la velocidad con que el animal ingiere el forraje o tasa de consumo (CMS_T). Finalmente el CMS diario será el producto de la CMS_T por las horas efectivas que el animal pastorea por día (T , tiempo diario de pastoreo). Si los bocados son livianos o si requieren aumentar el tiempo de masticación por gCMS (por ej. debido a un alto contenido de agua o fibra, disminuirá la CMS_T). Si la CMS_T no puede ser compensada mediante un aumento en el tiempo de pastoreo, el consumo diario disminuirá (Galli et al., 2006b). Estos mecanismos de compensación en respuesta a una disminución en el peso de los bocados en general resultan insuficientes, explicando la alta correlación que existe entre el peso promedio de los bocados y el consumo

diario. A menor CMS_B , menor CMS_T y menor CMS diario. Por lo tanto, la descripción y cuantificación de los componentes del comportamiento ingestivo permiten, no solo estimar la CMS_T , sino también explicar la relación entre ésta y la cantidad forraje y la estructura de las pasturas en bovinos en pastoreo (Figura 3). Se ha demostrado que los movimientos compuestos, cuando los animales superponen la masticación y el arranque de los bocados, tienen un rol importante para mantener una alta tasa de consumo, reduciendo el tiempo de masticación por gramo de materia seca cuando los bocados son más pesados. Por lo tanto, la determinación de estos movimientos es básica para analizar el proceso ingestivo y comprender el efecto de las estructuras de las pasturas en la tasa de consumo. Hasta ahora el método acústico de estimación de CMS, aparece como el único método que permite diferenciar este tipo de movimiento mandibular en vacas y ovejas.

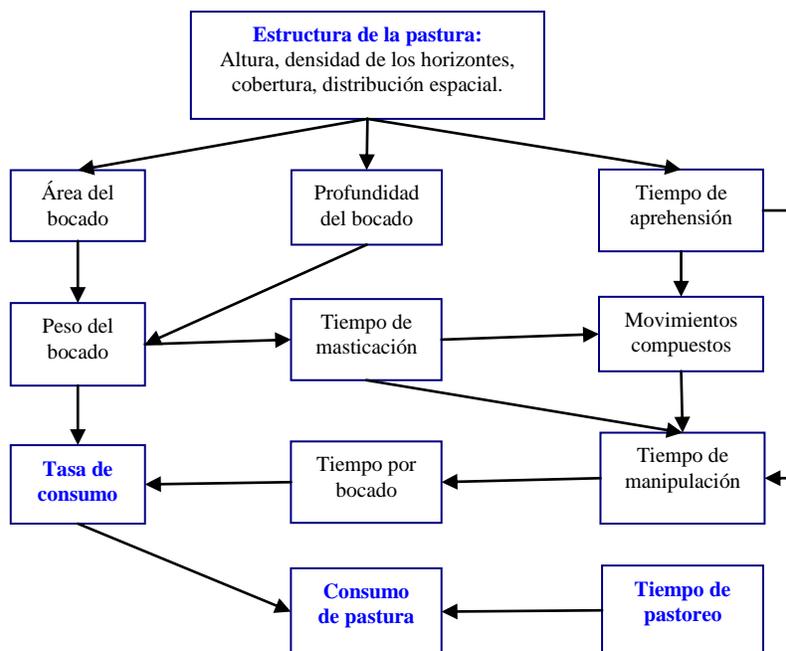


Figura 3. Los componentes del comportamiento ingestivo que relacionan la estructura de la pastura con la tasa de consumo que en un tiempo de pastoreo determina el consumo de pastura (adaptado de Ungar, 1996)

Métodos para medir el comportamiento ingestivo.

Existen diversos métodos para la medición de la conducta y comportamiento ingestivo para caracterizar el comportamiento individual de los animales en pastoreo en producciones comerciales (Greenwood et al., 2014). Algunos están basados en dispositivos mecánicos y electrónicos para registrar el movimiento de los animales y otros para registrar el sonido de masticación. Se han desarrollado sistemas de medición basados en acelerómetros que detectan actividad, cámaras en miniatura que registran todos los movimientos, micrófonos compactos de alta definición que permiten detectar y grabar movimientos complejos y sonidos durante períodos de tiempo prolongados. También existen contadores de movimientos estrictamente mecánicos y sensores de presión, micrófonos, acelerómetros y electromiógrafos que registran e identifican específicamente los movimientos mandibulares (Andriamandrioso et al., 2016). Cada movimiento mandibular activa un interruptor, que produce un registro en el tiempo, a partir de esos registros se determina la detección de pastoreo (pastoreo o no), la duración del pastoreo y el número de bocados (Duckworth y Shirlaw, 1995, Stobbs, 1973, Chambers et al., 1981). Este tipo de dispositivos no se pueden considerar sensores en el estricto uso de la palabra ya que la información recolectada se imprime directamente en papel y no puede ser transformada de manera digital o eléctrica. También existen sensores de presión desarrollados por Penning (1983), que se montan sobre un bozal y consisten en una banda de silicona que se coloca sobre la nariz de la vaca que está conectada a dos electrodos. Cuando el animal mueve la mandíbula se genera una resistencia entre los electrodos que se encuentran al final del dispositivo. Este sistema es eficiente en diferenciar rumia de pastoreo y para medir los tiempos destinados a diferentes conductas (rumia, comida y descanso). Se han realizado numerosas modificaciones del método original, colocando bandas de goma por encima o por debajo de la nariz (Nydegger et al., 2010). En general determinan duración de pastoreo, rumia y descanso, detección, número y tasa de bocados (Penning, 1983, Beauchemin et al., 1989), se pueden obtener registros de corto o largo plazo, y analizarlos en forma digital automática (Rutter et al., 1997, Rutter, 2000). La eficiencia de este sistema para la clasificación de las conductas (rumia, comida, pastoreo, descanso) comparado con la observación visual directa es del 91%, cuando se analizan periodos cortos (5 minutos). La precisión disminuye cuando se utiliza en pasturas tropicales, o en situaciones de mayor heterogeneidad de pasturas (Nadin et al., 2012).

Se han desarrollado otro tipo de sensores que detectan, clasifican y cuentan movimientos mandibulares, en rumia o pastoreo (Nydegger et al., 2010). Este sistema está compuesto por un tubo que contiene aceite que detecta cambios de presión cuando hay movimientos mandibulares. Al abrir la boca aumenta la presión y genera una resistencia eléctrica que se traduce en una señal. Tiene una alta precisión para determinar conducta en pastoreo (100%) pero no para contar el número de movimientos mandibulares, esta herramienta es más precisa para detectar número de movimientos en rumia probablemente por el patrón de movimientos más regulares respecto a pastoreo, permite registros a largo plazo de 24 a 40 horas. Dentro de este grupo también se encuentran los métodos que detectan diferentes vibraciones a través de una banda de siliconas, sobre el hocico incorporada a un bozal, que permiten obtener número, intensidad, tasa y duración del bocado (Lawrence y Becker, 1997). La ventaja de este tipo de sensores es que la banda de silicona, no altera el normal comportamiento de los animales y pueden detectar patrones diferentes de comportamiento, como rumia e ingestión. Este método tiene como desventaja que se registran clasificaciones erróneas de los eventos fundamentalmente por situaciones prácticas como el ajuste del bozal, las variaciones en las presiones del bozal pueden generar diferentes valores de presión alterando la clasificación de los eventos, el análisis de los picos de presión pueden ser afectadas si el bozal se colocó muy ajustado (Nydegger et al., 2010).

Actualmente existe en el mercado el sistema de sensores RumiWatch, que no es invasivo y está compuesto por una banda de presión con un sensor ubicado sobre el hocico del animal (“noseband”), un sistema de almacenamiento de datos (data logger) y un software de evaluación. Permite mediciones automáticas de los movimientos de rumia, ingestión de sólidos y bebida, además de la posición de la cabeza. Es un sistema interesante para las clasificaciones de los movimientos en las actividades de rumia e ingestión (Zehner et al., 2017) pero no para identificar los movimientos mandibulares individuales (arranque, masticación, movimientos compuestos).

Otro grupo de sensores son los sistemas que utilizan acelerómetros o péndulos que detectan los movimientos típicos que se generan cuando los animales mueven la mandíbula. Existen sensores que registran movimientos en una dimensión (x) y otros 2 (x,y) ó 3 dimensiones (x,y,z), definiendo mayor o menor sensibilidad. También permiten diferenciar los movimientos durante la aprehensión, determinar el número de bocados y diferenciar actividades de rumia y

pastoreo (Oudshoorn et al., 2013, Unemura et al., 2009). Se han desarrollado sistemas basados en el análisis de la posición de la cabeza mediante el uso de acelerómetros (hacia arriba o abajo), la combinación de estos acelerómetros con el Sistema de Posicionamiento Global (GPS) ha sido utilizado para definir la actividad de pastoreo, caminata o descanso (Anderson et al., 2012).

La electromiografía ha sido utilizada para el registro de actividades de rumia y masticación, el movimiento de los músculos mandibulares se transforma en una señal eléctrica registrable y los sensores electro miográficos cuantifican el potencial eléctrico de los músculos masticatorios durante la contracción. El sistema está compuesto por dos electrodos que se fijan a un bozal y miden las señales eléctricas que ocurren durante un movimiento masticatorio con la contracción del músculo masetero, se determina la actividad de masticación y rumia sobre la base de la regularidad o irregularidad del patrón de las señales de cada uno (Rus et al., 2013).

La biotelemedicina acústica también ha sido utilizada para la identificación de actividades (rumia y pastoreo), los diferentes patrones de sonido permiten identificar los diferentes eventos masticatorios (aprehensión, masticación y movimientos compuestos), tasa y duración del bocado. Se han logrado muchos avances en el uso del método acústico para que pueda integrarse como una herramienta para la ganadería de precisión. El uso de sensores portátiles colocados en los animales junto con técnicas de observación directa, pueden permitir a futuro monitorear el pastoreo de una manera más precisa, pudiendo corregir o suplementar las dietas de los animales mejorando la producción, salud y bienestar (Yayota et al., 2017).

El método acústico y la ganadería de precisión.

Los animales en pastoreo generalmente seleccionan los forrajes que pueden comer más rápidamente (Black y Kenney, 1984). La tasa de consumo de materia seca puede variar ampliamente dependiendo de la altura y la densidad de las pasturas, así como de su composición química (contenido de materia seca, tipo y calidad de la fibra, etc.). Las características del animal, el nivel de suplementación, el método de pastoreo, períodos de ayuno previo, hora del día y otros factores también afectan la tasa de consumo de las pasturas. Esta complejidad dificulta disponer de modelos generales de predicción del consumo en pastoreo, que sean precisos y que se

adapten a un amplio rango de situaciones y condiciones de las pasturas. Por lo tanto, para controlar y manejar el pastoreo, es relevante desarrollar herramientas adecuadas que permitan predecir el consumo y el comportamiento ingestivo a través de las variables que los determinan (peso de bocados, tasa de bocados, tasa de consumo, tiempo de pastoreo), e integrando distintas escalas y en forma precisa.

La mayoría de las tecnologías pueden diferenciar con mucha precisión los movimientos de rumia y pastoreo, pero no existen muchos sistemas que diferencien movimientos masticatorios (Yayota et al., 2017). El poder identificar y diferenciar los movimientos masticatorios permitiría entender como los rumiantes cubren sus requerimientos en los diferentes tipos de pasturas y así poder alcanzar el máximo potencial de producción de pasturas, consumo y performance animal. (Carvalho, 2013).

El análisis acústico se ha utilizado para identificar sonidos de masticación y rumia y ha demostrado ser un método preciso para estimar el CMS (en el corto plazo gMS/min) (Laca y WallisDeVries, 2000, Galli, 2008, 2017). Este método tiene el potencial para medir el comportamiento en el pastoreo y el consumo diario, pero requiere más investigación para extender su uso en el largo plazo (kgMS/día o más días). El registro de las intensidades de los sonidos producidos por el pastoreo, la rumia y la bebida presentan diferencias que permiten identificar y clasificar las tres actividades con mucha precisión (Galli, 2008). Estas determinaciones se llevan a cabo por medio de algoritmos de inteligencia artificial y procesamiento de señales, los cuales reconocen y cuantifican automáticamente los eventos masticatorios (arranque, masticación o movimientos compuestos de arranque y masticación) en grabaciones de corto plazo y en un número limitado de animales (Galli et al., 2006b, Milone et al., 2008, 2009 y 2012). A partir de estos trabajos se ha desarrollado un sistema que permite clasificar los eventos ingestivos de manera automática en tiempo real y con precisión, pero que aún necesita mayores ajustes y adaptaciones para que pueda ser utilizado como una herramienta de medición en sistemas reales de producción más ruidosos y menos controlados (Chelotti, et al., 2016). El método acústico se define como una herramienta válida poder registrar el comportamiento en pastoreo, inclusive durante sesiones nocturnas en las cuales resulta complejo utilizar el sistema observacional directo (Veit et al., 2018).

La biotelemedría acústica surge como una solución promisoría para el uso en sistemas de producción agropecuaria que permita monitorear actividad en el pastoreo de manera continua (Watt et al., 2015) con potencial para la automatización del análisis de los sonidos en tiempo real (Milone et al., 2012). Los sonidos que se producen durante el arranque y masticación pueden revelar características importantes del comportamiento de búsqueda de alimento de los animales en libertad (WallisDeVries y Laca, 1998) y en confinamiento (Galli et al., 2006b). Se han encontrado en estudios que utilizan el método acústico que tanto bovinos (Laca et al., 1994; Ungar, E. y Rutter, S., 2006), como ovinos (Galli et al., 2011) emplean de manera discrecional el tipo de movimiento mandibular para masticar, arrancar, o para masticar y arrancar simultáneamente en el mismo ciclo de apertura y cierre de la mandíbula (movimiento compuesto). La biotelemedría acústica discriminó con éxito los sonidos de arranque, masticación y movimientos compuestos durante el pastoreo (Laca y WallisDevries, 2000), y se ha aplicado con éxito para medir los tiempos de pastoreo y de rumia en ovejas y en bovinos (Ungar et al., 2006; Galli et al., 2011)

La energía contenida en los sonidos de la masticación ingestiva esta linealmente relacionado con la ingesta, por lo tanto se podría predecir el CMS a partir de modelos basados esos sonidos. El CMS fue predicho con precisión por las variables: energía de la masticación, energía masticación por masticación e intensidad media de los sonidos de masticación ($R^2= 0,90$; $CV= 17\%$, Laca y WallisDeVries, 2000), en novillos que consumieron setaria (*Setaria lutescens*) en pasturas experimentales construidas a mano. Galli, et al. (2011) encontraron que los mejores predictores del CMS en ovejas que pastorean micro parcelas experimentales de pasto ovillo (*Dactylis glomerata*) y alfalfa (*Medicago sativa*), fueron la energía del sonido de la masticación por bocado y la energía de los sonidos de masticación ($R^2= 0,92$; $CV= 18\%$), estas dos variables acústicas permiten obtener información de la tasa de consumo y el tiempo de pastoreo.

Los investigadores y productores requieren de información confiable que les permita proponer un manejo adecuado de sus animales y proponer sistemas de producciones sustentables, amigables con el medioambiente y el bienestar animal, estas necesidades determinan un interés cada vez mayor en el estudio de los rumiantes en pastoreo. Sin embargo, a pesar de la gran diversidad de técnicas disponibles es necesario mejorar aún más la precisión y flexibilidad de los

métodos para obtener información apropiada para el estudio del pastoreo en un amplio rango de condiciones. Un método basado en el registro acústico del comportamiento y consumo en pastoreo, como el que se propone en este trabajo, podría atenuar y resolver varias de las limitaciones que presentan las otras técnicas.

En esta tesis se propone contribuir al desarrollo del método acústico, evaluando su capacidad para la estimación del comportamiento ingestivo y el consumo diario de vacas en pastoreo en el mediano y largo plazo.

La hipótesis general que sustenta este trabajo es: “existe una relación lineal entre el consumo de materia seca y la energía total del sonido de las masticaciones que puede ser la base para desarrollar un modelo preciso de predicción del consumo diario de pasturas”

CAPÍTULO 2: CAPÍTULO 2: PREDICCIÓN DEL CONSUMO DE MATERIA SECA MEDIANTE EL REGISTRO ACÚSTICO DE VACAS LECHERAS DURANTE UN TURNO DE PASTOREO

I. Introducción.

En este capítulo se presenta el trabajo realizado con vacas lecheras para demostrar que el comportamiento ingestivo y el consumo de materia seca puede ser analizado y cuantificado con precisión a través del registro acústico de los sonidos producidos durante la ingestión en un turno de pastoreo.

Un conjunto de trabajos previos, bajo el mismo marco teórico y utilizando una metodología similar, han demostrado que el consumo de materia seca (CMS) de pasturas en rumiantes puede ser estimado con precisión a partir del análisis acústico del comportamiento ingestivo. Se han propuesto modelos predictivos precisos con coeficientes de variación (CV) de 17-18%, basados en la energía del sonido de las masticaciones, para bovinos (Laca y WallisDevries, 2000, Galli et al., 2006b, Galli et al., 2017) y para ovinos (Galli et al., 2011). Estos trabajos en su conjunto, demostraron que el método acústico puede ser utilizado en pasturas en estado vegetativo que varían en su estructura y contenido de agua y fibra, sin embargo todos estos trabajos han sido realizados en plazos de pastoreo muy cortos (hasta 10 min), con pocos bocados (hasta 40 bocados) y bajos CMS (hasta 60 g). Por lo tanto, es importante verificar la utilidad del método acústico en períodos de mayor duración y que sean representativos del comportamiento de los animales durante el pastoreo diario.

En este contexto se sostuvieron las siguientes hipótesis: (1) existe una relación lineal entre CMS y la energía total del sonido de las masticaciones y (2) el CMS en el largo plazo puede ser estimado con precisión a través de mediciones acústicas del comportamiento ingestivo.

Los objetivos específicos fueron: (1) Identificar y parametrizar las variables, que surgen del análisis del sonido durante el pastoreo, que mejor expliquen la variación del consumo de materia seca durante un turno de pastoreo y (2) obtener un modelo basado en mediciones acústicas que permita estimar la tasa de consumo de materia seca en forma exacta y precisa en distintas situaciones de pastoreo.

En este experimento se cubren dos aspectos diferentes, uno relacionado con el análisis de las variables que determinan la tasa de consumo durante un turno de pastoreo, sobre dos especies forrajeras contrastantes (alfalfa y raigrás anual) en dos condiciones diferentes de pastoreo (inicial-rebote). El otro aspecto está relacionado con el uso del método acústico para estimar el consumo de materia seca en un turno de pastoreo para luego integrarlo a nivel diario.

II. Materiales y Métodos.

Lugar

Los experimentos se llevaron a cabo en el Campo Experimental de la Facultad de Ciencias Agrarias de la UNR, ubicado en la localidad de Zavalla, Santa Fe (33°01' 00''S 50° 63'' 00''O), durante los meses de julio y septiembre de 2017 para el muestreo de las situaciones con raigrás anual --*Lolium multiflorum*- y en octubre y noviembre de 2017 con alfalfa -*Medicago sativa*-.

Procedimiento experimental

Se realizaron registros del comportamiento ingestivo y del consumo de materia seca en 4 situaciones de pastoreo, generadas con dos especies forrajeras contrastantes, en dos condiciones de pastoreo cada una (denominadas como “inicial” y “rebrote”), con 4 niveles de consumo de materia seca (sesiones de pastoreo de diferente duración) y 3 repeticiones (3 vacas). Se utilizaron pasturas puras y homogéneas, de alfalfa y raigrás anual en estado vegetativo. En total se realizaron 48 sesiones de pastoreo (N=48), resultante de 4 situaciones de pastoreo, en 4 duraciones de sesión y con 3 repeticiones (3 vacas). En cada una de las 4 situaciones, cada una de las 3 vacas realizó 4 sesiones de pastoreo de distinta duración (10, 20, 30 y 40 minutos cada una).

Las 4 situaciones de pastoreo representan dos especies contrastantes en su estructura y contenido de fibra, y a su vez las sesiones de cada especie se realizaron en 2 condiciones de pastoreo (inicial y rebrote). Las cuatro duraciones de las sesiones de pastoreo (con un incremento de 10 minutos) se establecieron para obtener valores crecientes de CMS acumulados a través del tiempo, permitiendo ajustar un modelo de predicción de CMS con datos independientes que comprenda a las 4 situaciones de pastoreo.

Las 12 sesiones de pastoreo registradas en cada una de las situaciones se distribuyeron durante 2 días (6 sesiones por día) en dos turnos (mañana y tarde). En cada turno se realizaron 3 sesiones de pastoreo en forma simultánea en parcelas individuales, independientes y contiguas de 3 x 6 m² (Figura 4). Las sesiones de la mañana se realizaron entre las 9.00 y las 11.00 hs y las sesiones de la tarde entre las 14.00 y las 16.00 hs. Cada una de las vacas realizó 2 sesiones de pastoreo por día, una a la mañana y otra a la tarde. El orden de la duración de la sesión en cada vaca fue previamente asignada al azar, pero se realizaron los cambios necesarios para asegurar que las 3 vacas realizaran distintas duraciones en cada turno. Al menos desde dos días previos al inicio de las sesiones de pastoreo y hasta finalizar con las sesiones, las vacas permanecieron en pasturas similares a las experimentales. Los días que se efectuaron las sesiones de pastoreo, desde las 6.00 hs hasta el inicio de las sesiones de la mañana y luego desde el final del turno de la mañana y hasta el inicio del turno de la tarde, las vacas quedaban en ayuno en un corral con acceso a bebederos con agua.

Las sesiones con raigrás anual se realizaron durante los días 17 y 18 de julio y los días 4 y 5 de septiembre para la condición “inicial” y “rebrote”, respectivamente, Las sesiones con alfalfa se realizaron los días 24 y 25 de octubre y los días 21 y 22 de noviembre para la situación “inicial” y “rebrote” respectivamente



Figura 4: Las vacas en las parcelas experimentales contiguas de 3x6 m², durante las tres sesiones individuales y simultáneas de pastoreo en un turno de mañana. a- pastura de raigrás anual - b. pastura de alfalfa

Se utilizaron 3 vacas secas adultas, de raza holstein (peso vivo= 595±20.1 kg) pertenecientes al Módulo de Producción Lechera de la Facultad de Ciencias Agrarias, UNR. Las vacas eran mansas, acostumbradas al uso de los dispositivos de registro y adiestradas en la rutina experimental.

Cada una de las sesiones de pastoreo fue cronometrada y supervisada visualmente por un observador, para verificar que los animales se mantuvieran dentro de las parcelas asignadas, no ocurriera ninguna situación que afectara el comportamiento normal de las vacas, e interrumpir la sesión al cumplir con el tiempo de pastoreo asignado. A medida que las vacas iban cumpliendo con el tiempo de pastoreo, se interrumpía la sesión, se las sacaba de la parcela experimental y se las dejaba pastoreando en una parcela auxiliar contigua hasta que el resto de las vacas completaran sus sesiones. Al finalizar las sesiones de pastoreo simultáneas de las tres vacas, se retiraban todas juntas hasta un corral donde se quitaban los dispositivos. Durante el pastoreo experimental se minimizaron las situaciones de manejo u otros aspectos operativos del sistema que pudieran causar distracciones en los animales experimentales.

Consumo de Materia Seca

El CMS en las sesiones de pastoreo se estimó por la diferencia entre la biomasa ofrecida antes del pastoreo y la biomasa remanente después del mismo. La estimación de la biomasa ofrecida se realizó a través de un método indirecto no destructivo (pasturómetro o disco, adaptado de Spada y Cangiano, 1991), y la remanente, por corte directo del total de la biomasa. Se asignaron parcelas experimentales individuales de $3 \times 6 \text{ m}^2$ (18 m^2), delimitadas por doble hilo de boyero no electrificado (Figura 5a). Antes del pastoreo se estimó la cantidad materia seca de forraje ofrecido en cada parcela a través del muestreo de toda la superficie de la parcela con un pasturómetro con base rectangular de $40 \times 60 \text{ cm}^2$ (0.24 m^2). El muestreo se realizó subdividiendo transitoriamente (a través del tendido de hilos de boyero sobre la pastura) la parcela en 18 sitios de $1 \times 1 \text{ m}^2$ cada uno. Se colocaron los hilos y se estimó el forraje ofrecido en cada uno de los sitios con el pasturómetro, luego se calculó el forraje ofrecido total por parcela (sesión de pastoreo) como la sumatoria de las biomásas ofrecidas en cada sitio. Los hilos se retiraron antes de iniciar el pastoreo, al finalizar la sesión los hilos se colocaron nuevamente y de la misma forma, para estimar el remanente en cada sitio (Figura 5b).



Figura 5: Parcelas experimentales (18 m²) para las sesiones individuales simultáneas en alfalfa (a) y subdivisión transitoria de las parcelas en sitios (1 m²) para estimar biomasa ofrecida y remanente en raigrás anual (b).

Una vez retirados los animales, en cada parcela se identificaron visualmente y marcaron los sitios “pastoreados” y los “no pastoreados”, y se estimó la biomasa remanente a través del corte y pesado del total de la biomasa presente en cada uno de los sitios identificados como “pastoreados”. En cada parcela, los sitios no pastoreados por las vacas, fueron descartados para la estimación del consumo. Se consideró como “pastoreado” al sitio donde se encontraban plantas o partes de plantas (hojas y tallos en alfalfa, láminas y pseudotallos en raigrás anual) consumidas por los animales.

La biomasa consumida en cada sitio pastoreado se estimó como la diferencia entre la biomasa ofrecida y la biomasa remanente (Figuras 6 y 7) en cada sitio. Finalmente, el consumo de materia seca de cada sesión (en cada parcela) fue la sumatoria de las biomásas consumidas en cada uno de los sitios pastoreados.



Figura 6. Sitios identificados como “pastoreados” y “no pastoreados” de alfalfa, cada sitio se identificaba con una marca individual (papel blanco) (a); sitio de raigrás anual pre-pastoreo (b); Corte total del sitio de muestreo de raigrás anual post-pastoreo (c),



Figura 7. Parcela experimental luego de finalizado del corte total de la biomasa remanente de los sitios pastoreados para la determinación del remanente. Se muestra un sitio no pastoreado que no fue muestreado luego del pastoreo, junto a un grupo de varillas que fueron utilizadas oportunamente para delimitar las parcelas.

Para la estimación de la biomasa ofrecida de manera no destructiva, se utilizó un método de doble muestreo. Mediante el uso de un pasturómetro se estimó una recta de regresión lineal entre la biomasa ofrecida con la altura de la pastura medida con el pasturómetro. Para estimar la ecuación de la recta de mejor ajuste, se realizaron 18 dobles muestras (altura, cm – biomasa, gMS) en sitios cercanos y representativos de los ubicados dentro de las parcelas. Se obtuvieron pares de datos de altura y biomasa, estimada con cortes con un marco de 40 x 60 cm² que se utilizaron para calcular una regresión lineal representada por la ecuación $y = a + b x$, donde $y =$ biomasa ofrecida (gMS), $a =$ ordenada al origen, $b =$ coeficiente de regresión (pendiente de la recta, gMS/cm) y $x =$ altura de la pastura (cm). La biomasa obtenida en los cortes para la estimación del forraje ofrecido y el remanente, se secaron en estufa a 65 °C y pesaron para obtener los valores correspondiente en materia seca.

Para estimar el contenido de materia seca (MS) y de fibra detergente neutro (FDN) del forraje consumido se tomaron 9 muestras en distintos sitios representativos. El muestreo se realizó a mano e imitando el pastoreo realizado por las vacas (hand-plucking), en una parcela de similares características y contigua a las experimentales. Cada muestra incluyó una cantidad de forraje equivalente a 10 bocados. Las muestras obtenidas se secaron a 65 °C para la determinación del contenido de MS, se pesaron y se enviaron a laboratorio para la determinación de fibra insoluble en detergente neutro (FDN, Van Soest et al. 1991).

Registros Acústicos

Los sonidos de arranque y masticación fueron registrados mediante un equipo de grabación montado sobre cada una de las vacas. Se utilizaron 5 equipos de grabación. Cada equipo consistió en un bozal para sujetar un micrófono conectado a un grabador. El micrófono se

colocó sujeto fuertemente contra la frente de la vaca, y se cubrió con una banda elástica ancha, para evitar que se mueva de su lugar, aislarlo del ruido provocado por el viento y protegerlo de otros rozamientos. El grabador digital (SONY ICDPX312, Figura 8) se colocó dentro de una caja estanca sujeta al bozal por detrás del cuello de las vacas, para su protección y aislamiento.



Figura 8. Vaca con el dispositivo experimental (bozal con micrófono y grabador)

Se obtuvieron 48 registros acústicos en total. Las bandas de sonido registradas se procesaron (filtrado, estandarización de la señal y de los parámetros acústicos, calibración, identificación, cortes, extracción y pegado) con un programa para editar audio (Audacity®, Versión 2.4.2, 2019). Todas las grabaciones se realizaron con una frecuencia de muestreo de 44,1 kHz y una resolución de 32 bits, y se transformaron y archivaron en formato de archivo WAV.

De la misma forma que en estudios anteriores (Galli et al. 2006b, 2011, 2017), se clasificaron con precisión cada uno de los movimientos mandibulares asociándolos a un evento masticatorio determinado. Mediante el procesamiento de las bandas de sonido se identificaron y etiquetaron todos y cada uno de los diferentes eventos masticatorios registrados (Figura 9). Cada movimiento mandibular se clasificó como arranque (A), masticación pura (MA) o movimiento compuesto (MC).

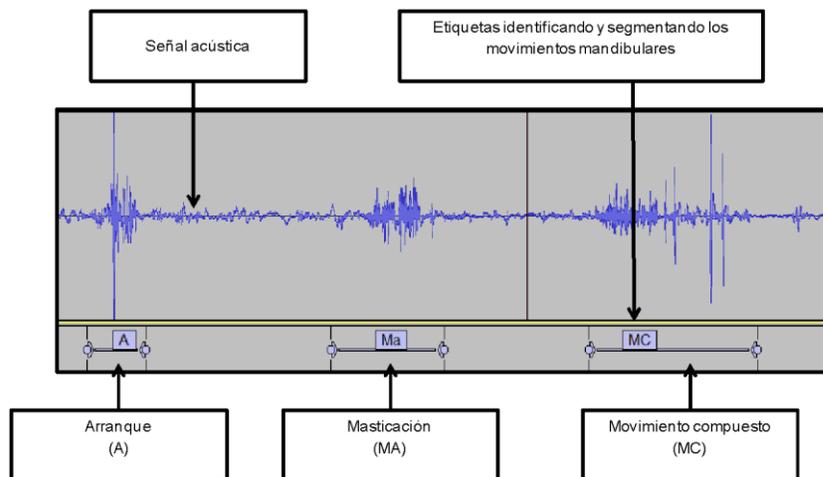


Figura 9: Fracción de una banda de sonido de una sesión de pastoreo de alfalfa editada y procesada mediante el programa Audacity. Se muestra la identificación y segmentación de los movimientos mandibulares en arranque (A), masticación pura (MA) o movimiento compuesto (MC).

Los arranques fueron identificados por el chasquido característico que se produce durante la aprehensión y corte de las plantas entre los dientes incisivos y el rodete dentario; las masticaciones puras por el crujido característico cuando los dientes molares y premolares muelen el alimento antes de tragarlo, y los movimientos compuestos cuando una masticación precede y se superpone parcialmente con un arranque en el mismo movimiento de cierre de la mandíbula. El sonido de los movimientos compuestos es más largo y el forraje arrancado en un bocado anterior es masticado por los molares y premolares a la vez que un nuevo bocado es arrancado por los incisivos y el rodete dentario.

Se analizó el efecto de la especie forrajera y la condición de la pastura sobre el comportamiento ingestivo y la asignación de los movimientos mandibulares. Para ello, se determinaron las siguientes variables:

- número de arranques A
- número de masticaciones puras MA
- números de movimientos compuestos MC
- número de bocados $B = A + MC$
- número de masticaciones totales $MT = MA + MC$
- número de movimientos mandibulares $MM = A + MA + MC$

- tiempo efectivo de pastoreo T [min] comenzaba cuando la vaca realizaba el primer bocado y terminaba cuando era retirada de la parcela
- tasa de consumo $CMS_T = CMS / T$ [kgMS/h] ó [gMS/min]
- tasa de bocados $B_T = B / T$ [B/min]
- peso de bocado $CMS_B = CMS / B$ [gMS]
- tasa de masticaciones totales $MT_T = MT / T$ [MT/min]
- tasa movimientos mandibulares $MM_T = MM / T$ [MM/min]
- masticaciones puras por bocado $MA_B = MA / B$
- movimientos compuestos por bocado $MC_B = MC / B$
- masticaciones totales por bocado $MT_B = MT / B$
- movimientos mandibulares por bocado $MM_B = MM_T / B$
- masticaciones totales por gMS = MT / CMS
- masticaciones totales por gFDN = $MT / CMS \times FDN$

Se analizó el efecto de la especie forrajera y la condición de la pastura sobre el comportamiento ingestivo y la asignación de los movimientos mandibulares.

Desde la identificación y procesamiento de los registros acústicos se estimó la energía acústica de las masticaciones puras y de las masticaciones incluidas en los movimientos compuestos. La energía se estimó a partir de la intensidad (amplitud) promedio y la duración del sonido. La energía está ligada a la cantidad de forraje que ha sido cortado por el animal y es progresivamente triturado mediante la masticación en un movimiento mandibular determinado. De cada señal se extrajeron los sonidos de las masticaciones, descartando todos los segmentos (“pausas o silencios”) de los registros entre el final de una masticación el inicio de la siguiente utilizando el programa Audacity (Figura 10a). La señal resultante, compuesta únicamente por los sonidos de las masticaciones y producidos por la trituración del forraje entre los dientes (Figura 10b), fue usada para estimar la energía de las masticaciones sumando las amplitudes al cuadrado (función “norm(señal)^2”) del programa de cálculos GNU Octave, Version 5.2.0 (Eaton et al., 2019).

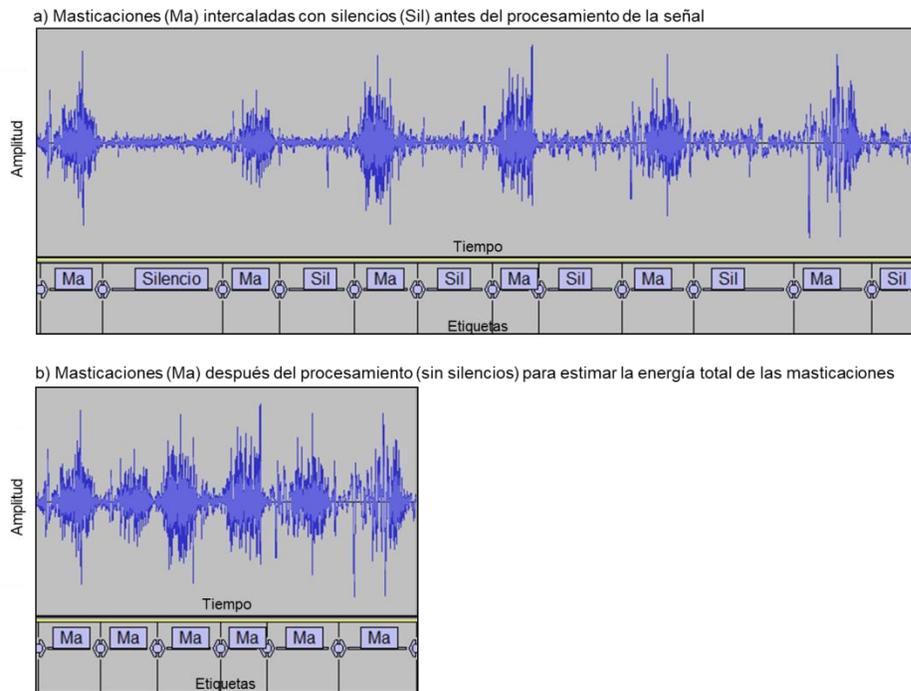


Figura 10. Señal digitalizada antes (a) y después (b) del procesamiento para la estimación de la energía total contenida en las masticaciones a partir de la amplitud y la duración del sonido de cada masticación.

Una vez colocado el dispositivo en el animal y antes del inicio de cada sesión de pastoreo, se grabó el sonido de una señal electrónica compuesta de varios tonos puros que luego fue utilizada como sonido estándar para ecualizar el volumen de los registros. Se corrigieron aquellas señales cuyo sonido estándar midió una energía promedio fuera del 80 percentil superior de todas las señales. Se multiplicó la energía promedio de la señal por la energía promedio del sonido estándar de todos los registros, dividido la energía del sonido estándar de la sesión a corregir. De los 48 registros obtenidos, 8 debieron ser corregidos de esta manera.

Derivado de los procedimientos realizados con las señales de sonido, se calcularon las siguientes variables acústicas para cada una de las sesiones de pastoreo:

- energía total de las masticaciones puras EMT_P
- energía total de las masticaciones de movimientos compuestos EMT_{MC}
- energía total de las masticaciones $EM_T = EMT_P + EMT_{MC}$
- energía de las masticaciones puras $EM_P = EMT_P / MA$

- energía de las masticaciones de movimientos compuestos $EM_{MC} = EMT_{MC} / MC$
- energía de las masticaciones por bocado $EM_B = EM_T / B$
- energía por unidad de consumo de materia seca $EM_{CMS} = EM_T / CMS$.

La estimación del CMS a través de las variables acústicas se realizó por regresión lineal simple y múltiple: se probaron todas las posibles regresiones ente las variables generadas. A partir de estas variables se obtuvieron los modelos de predicción del consumo de materia seca. Se seleccionaron las mejores variables para la estimación del consumo de materia seca por medio de regresión múltiple. También se analizaron todas las posibles regresiones con o sin los efectos de las especies forrajeras (alfalfa vs. raigrás anual) y la condición de la pastura (inicial vs. rebrote). Para reducir el número y seleccionar el mejor modelo, se utilizaron tres criterios: (1) coeficiente de determinación ajustado por el número de predictores (R^2_{aj}), (2) el criterio de Akaike (AIC) y (3) el coeficiente de variación (CV). Se consideró el mejor modelo al que obtuvo el mayor valor de R^2_{aj} y los menores de AIC y CV. El error de predicción de los modelos se estimó a través de la raíz media de los cuadrados del error (RCME).

Para evaluar en forma externa la capacidad predictiva de los modelos se utilizó un procedimiento de validación cruzada de k iteraciones. El total de señales ($N= 48$) se dividió aleatoriamente en grupos de 40 señales para ajustar el modelo y grupos de 8 señales para validación. La aleatorización se restringió de manera tal que siempre quedarán 2 señales de cada una de las 4 situaciones de pastoreo (especie x condición) en el grupo de validación y por lo tanto 10 señales de cada situación formaran parte del grupo de entrenamiento. El proceso se repitió 5 veces (k) utilizando un grupo distinto en cada iteración. Para cada partición se obtuvo un modelo de predicción y luego los resultados de todos los modelos fueron promediados para estimar un único coeficiente de determinación (R^2_{kfold}).

Todos los análisis estadísticos se realizaron con el programa JMP® Versión 12. (SAS Institute Inc. 2015)

III. Resultados

Características del forraje utilizado en los experimentos

Dentro de cada situación de pastoreo, se obtuvieron pasturas uniformes libres de malezas, representando parcelas homogéneas que permitieron un pastoreo continuo sin interrupciones con mínimo tiempo de traslado y búsqueda del forraje.

La biomasa aérea promedio ofrecida de las pasturas de alfalfa y raigrás anual fueron diferentes ($P < 0.05$) en cantidad (kgMS/ha), contenido de materia seca (gMS/kg) y fibra insoluble en detergente neutro (gFDN/kg) (Tabla 1). La biomasa aérea promedio de raigrás anual (kgMS/ha) promedio fue 12 % mayor (1661 kgMS/ha vs. 1456 kgMS/ha) que la de la alfalfa.

Los contenidos de MS no difirieron significativamente ($P > 0.05$) en los diferentes condiciones dentro de cada especie, pero hubo diferencias significativas entre especies. En alfalfa, contenido de MS fue 59% superior que en raigrás anual, 247 g/kg vs. 155 g/kg respectivamente.

El contenido de FDN (g/kg) promedio fue significativamente diferente entre especies y condiciones ($P < 0.05$). El raigrás anual tuvo 32 % mayor concentración de FDN respecto de la alfalfa, a su vez el raigrás tuvo mayor concentración de FDN en la condición de rebrote ($P < 0.05$), pero no se encontraron diferencias ($P > 0.05$) entre las dos condiciones de alfalfa (Tabla 1).

Tabla 1. Características del forraje utilizado en las sesiones de pastoreo.

Variable		Alfalfa	Raigrás anual	Promedio Total
Biomasa ofrecida (kgMS/ha) N=36	Inicial	1228 ^b (48.4)	1759 ^a (48.4)	
	Rebrote	1693 ^a (48.4)	1580 ^a (48.4)	
	Promedio	1456 ^b (51.4)	1661 ^a (51.4)	1559 (46.1)
Contenido de MS biomasa ofrecida (g/kg) N=36	Inicial	254 ^a (8.0)	156 ^b (8.0)	
	Rebrote	240 ^a (8.0)	155 ^b (8.0)	
	Promedio	247 ^a (5.10)	155 ^b (5.10)	201 (4.30)
Contenido MS biomasa ingerida (g/kg) N=24	Inicial	252 ^a (9.60)	177 ^b (9.60)	
	Rebrote	219 ^a (9.60)	160 ^b (9.60)	
	Promedio	235 ^a (6.80)	169 ^b (6.80)	203 (6.00)
Contenido FDN biomasa ofrecida (g/kg) N=36	Inicial	258 ^c (5.10)	377 ^b (5.10)	
	Rebrote	277 ^c (5.10)	415 ^a (5.10)	
	Promedio	268 ^b (0.51)	396 ^a (5.10)	332 (4.60)
Contenido FDN biomasa ingerida (g/kg) N=24	Inicial	171 ^c (10.9)	324 ^b (1.08)	
	Rebrote	199 ^c (9.40)	395 ^a (9.40)	
	Promedio	185 ^b (7.20)	359 ^a (7.20)	276 (6.00)

Los valores seguidos por letras diferentes difieren significativamente (Tukey-Kramer HSD, $P < 0.05$) entre los promedios de cada uno de los cuatro experimentos o entre promedios de cada especie forrajera.

Fue relevante para el estudio considerar el muestreo a través del hand-plucking para verificar la calidad del forraje ingerido. El contenido de MS de la biomasa ofrecida e ingerida fue similar ($P > 0.05$) en alfalfa y raigrás anual, y en las diferentes condiciones de pastoreo (inicial y rebrote). Sin embargo, las vacas consumieron un forraje con menor contenido de FDN ($P < 0.05$) durante el pastoreo inicial, en alfalfa y raigrás anual, mientras que en rebrote del raigrás anual el contenido de FDN del forraje ofrecido e ingerido fue similar ($P > 0.05$, Figura 11).

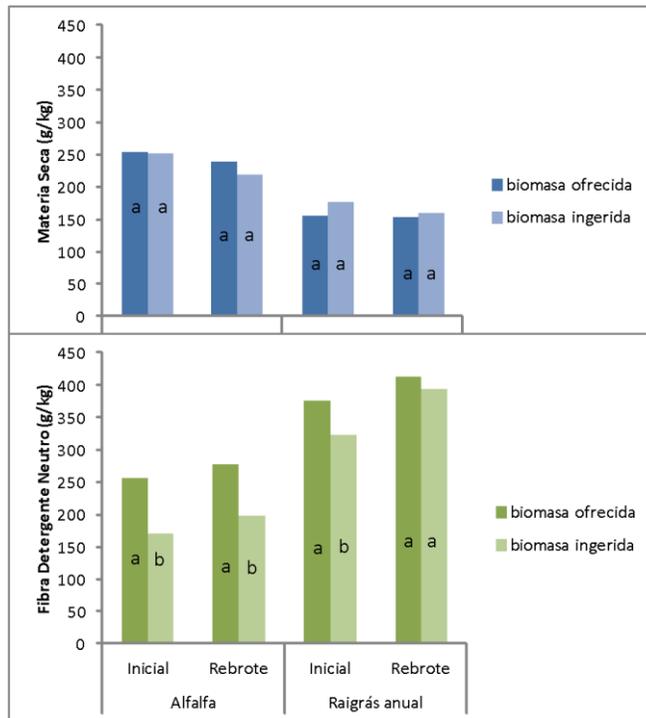


Figura 11: Contenido de materia seca (MS) y Fibra detergente neutro (FDN) del forraje ofrecido e ingerido en las diferentes situaciones de pastoreo. Letras diferentes indican diferencias significativas en la MS y FDN dentro de cada especie forrajera (Tukey-Kramer HSD, $P < 0.05$)

Efecto de la especie forrajera sobre el comportamiento ingestivo.

Las diferentes situaciones de pastoreo mostraron diversos comportamientos ingestivos. La tasa de consumo promedio general (CMS_T) fue de 2.94 ± 0.33 kgMS/h en raigrás y alfalfa, con un peso de bocado (CMS_B) de 1.50 ± 0.22 gMS y una tasa de bocados de 31.8 ± 1.23 bocados / min (B_T). CMS_T y B_T no fueron diferentes ($P < 0.05$) entre las dos especies en las distintas situaciones de pastoreo (Tabla 2). En promedio CMS_T fue similar en alfalfa y raigrás (2.59 ± 0.23 vs. 2.78 ± 0.21 kgMS/h, respectivamente), pero fue menor ($P < 0.05$) en alfalfa inicial y raigrás rebrote respecto a raigrás inicial. Las vacas obtuvieron mayor peso de bocado en raigrás 1.62 ± 0.08 gMS, con menor tasa de bocados ($P < 0.05$), respecto a alfalfa. Si se compara por un lado, la situación de alfalfa inicial vs. raigrás rebrote, y por el otro lado, alfalfa rebrote vs. raigrás rebrote, resalta como ante diferentes calidades, estructuras y/o ofertas de pasturas, las vacas obtienen similares tasas de consumo, compensando los cambios en los pesos de los bocados con la tasa de bocados (Tabla 2).

Tabla 2. Efecto de la especie forrajera sobre el comportamiento ingestivo.

Variables		Alfalfa	Raigrás anual	Promedio Total (N= 46)
Tasa de consumo (CMS _T , kgMS/h)	Inicial	2.71 ^b (0.32)	3.53 ^a (0.34)	
	Rebrote	3.12 ^{ab} (0.32)	2.12 ^b (0.34)	
	Promedio	2.59 (0.23)	2.78 (0.21)	2.94 (0.33)
Peso de bocado (CMS _B , gMS)	Inicial	1.24 ^b (0.13)	1.74 ^a (0.13)	
	Rebrote	1.54 ^{ab} (0.13)	1.56 ^{ab} (0.13)	
	Promedio	1.36 ^b (0.08)	1.62 ^a (0.08)	1.50 (0.22)
Tasa de bocados (B _T , bocados/min ⁻¹)	Inicial	34.6 ^a (2.25)	32.9 ^a (2.43)	
	Rebrote	33.3 ^a (2.25)	21.7 ^b (2.37)	
	Promedio	34.2 ^a (1.65)	27.4 ^b (1.52)	30.8 (1.23)

Los valores seguidos por letras diferentes difieren significativamente (Tukey-Kramer HSD, $P < 0.05$) entre los promedios de cada uno de los cuatro experimentos o entre promedios de cada especie forrajera.

Efecto de la especie forrajera en la asignación de los movimientos mandibulares.

Las variables analizadas en la asignación de los movimientos mandibulares no presentaron diferencias entre las diferentes especies forrajeras ($P < 0.05$) excepto la variable masticaciones totales por gFDN (MT/gFDN) que fue mayor en el raigrás anual 0.41 ± 0.02 vs. 0.29 ± 0.02 alfalfa (Tabla 3).

Si analizamos dentro de cada especie observamos que las vacas tuvieron un comportamiento similar en las diferentes variables analizadas cuando pastorearon alfalfa cualquiera fuera la situación de pastoreo, mientras que en el raigrás asignaron un porcentaje mayor de movimientos mandibulares por bocado (MM_B), masticaciones totales por bocado (MT_B) y masticaciones totales por gFDN (MT/gFDN) en la condición de rebrote.

Tabla 3. Efecto de la especie forrajera en la asignación de los movimientos mandibulares.

Variables		Alfalfa	Raigrás anual	Promedio Total (N= 46)
Tasa de movimientos mandibulares (MM _T , MM/min)	Inicial	53.5 (2.54)	52.5 (2.54)	
	Rebrote	55.1 (2.54)	47.5 (2.54)	
	Promedio	54.3 (1.84)	50.1 (1.84)	52.6 (1.29)
Tasa de masticaciones (MT _T , MT/min)	Inicial	48.2 ^a (2.64)	43.0 ^{ab} (2.84)	
	Rebrote	43.2 ^{ab} (2.64)	35.5 ^b (2.77)	
	Promedio	43.8 (1.85)	39.8 (1.71)	44.9 (1.56)
Movimientos mandibulares por bocado (MM _B)	Inicial	1.71 ^b (0.07)	1.58 ^b (0.08)	
	Rebrote	1.64 ^b (0.07)	2.06 ^a (0.08)	
	Promedio	1.69 (0.06)	1.75 (0.05)	1.72 (0.04)
Masticaciones totales por bocado (MT _B)	Inicial	1.40 ^{ab} (0.06)	1.33 ^b (0.06)	
	Rebrote	1.33 ^b (0.06)	1.60 ^a (0.06)	
	Promedio	1.43 (0.04)	1.48 (0.04)	1.45 (0.02)
Masticaciones totales por gMS (MT/gCMS)	Inicial	1.25 ^a (0.10)	0.89 ^b (0.11)	
	Rebrote	0.92 ^{ab} (0.10)	1.07 ^{ab} (0.10)	
	Promedio	1.10 (0.07)	0.98 (0.07)	1.04 (0.05)
Masticaciones totales por gFDN (MT/gFDN)	Inicial	0.33 ^b (0.03)	0.31 ^b (0.03)	
	Rebrote	0.25 ^b (0.03)	0.50 ^a (0.03)	
	Promedio	0.29 ^b (0.02)	0.41 ^a (0.02)	0.35 (0.02)
Masticaciones puras por bocado (MA _B)	Inicial	0.71 ^b (0.07)	0.58 ^b (0.08)	
	Rebrote	0.69 ^b (0.07)	1.06 ^a (0.08)	
	Promedio	0.70 (0.05)	0.75 (0.05)	0.72 (0.04)
Movimientos compuestos por bocado (MC _B)	Inicial	0.70 (0.04)	0.60 (0.04)	
	Rebrote	0.69 (0.04)	0.65 (0.06)	
	Promedio	0.70 (0.03)	0.63 (0.04)	0.67 (0.03)
Proporción de movimientos compuestos ⁽¹⁾	Inicial	0.44 ^a (0.04)	0.52 ^a (0.02)	
	Rebrote	0.45 ^a (0.04)	0.25 ^b (0.02)	
	Promedio	0.45 (0.03)	0.43 (0.02)	0.44 (0.02)

Los valores seguidos por letras diferentes difieren significativamente (Tukey-Kramer HSD, P< 0.05) entre los promedios de cada uno de los cuatro experimentos o entre promedios de cada especie forrajera.⁽¹⁾ Movimientos compuestos como proporción del total de movimientos mandibulares.

Descripción de los sonidos

Se obtuvieron señales de calidad adecuada para el objetivo del trabajo, en las que se distinguieron y clasificaron claramente los sonidos producidos por los arranques, masticaciones y movimientos mandibulares compuestos (Figura 12). Se pudieron grabar las señales de forma continua en todas las sesiones de pastoreo sin inconvenientes. Se descartaron 2 registros de

raigrás inicial para la determinación la energía de las masticaciones (EM_T) debido a distorsiones e interferencia en la señal.



Figura 12: Fracción de una señal acústica mostrando una serie de cinco eventos masticatorios diferentes

De acuerdo a lo previsto y considerando todas las situaciones en conjunto, la energía total de las masticaciones (EM_T) tuvo una relación lineal y positiva ($P < 0.0001$) con CMS (Figura 13), 84% de la variación del CMS puede explicarse a través de la energía total de las masticaciones.

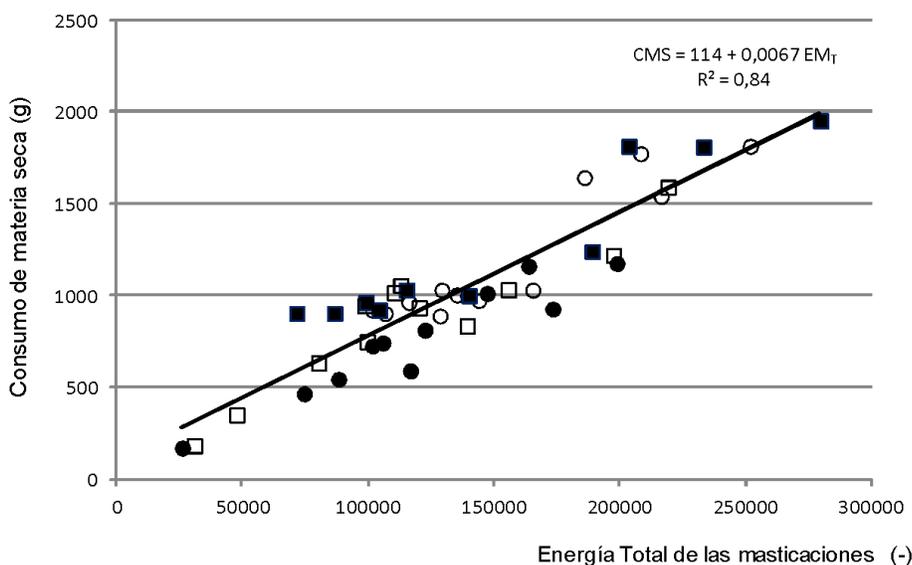


Figura 13. Relación entre el consumo la Energía Total de la masticaciones y el Consumo de Materia Seca ($P < 0.0001$, $R^2 = 0.84$, $N=46$). EM_T (-): adimensional. Línea sólida: regresión lineal general, (●): Alfalfa inicial, (○): Alfalfa rebrote, (■): Raigrás anual inicial, (□): Raigrás anual rebrote.

La energía de las masticaciones puras (EM_P) y las masticaciones de los movimientos compuestos (EM_{MC}) fueron diferentes ($P < 0.05$) entre las diferentes situaciones de pastoreo (Tabla 4). Las masticaciones puras en raigrás inicial produjeron más energía que alfalfa inicial. En raigrás rebrote, las masticaciones de los movimientos compuestos produjeron menos energía

que en el resto de las situaciones. A pesar de estas diferencias en todas las situaciones se generaron similar energía por bocado (EM_B) y por unidad de CMS (EM_{CMS}).

Tabla 4. Efecto de la especie forrajera las variables acústicas.

Variables		Alfalfa	Raigrás anual	Promedio Total (N= 46)
Energía de las masticaciones puras (EM_P)	Inicial	131 ^b (10.8)	174 ^a (11.4)	
	Rebrote	156 ^{ab} (10.9)	147 ^{ab} (2.54)	
	Promedio	143 (7.7)	161 (7.9)	151 (5.3)
Energía de las masticaciones de los movimientos compuestos (EM_{MC})	Inicial	116 ^{ab} (8.5)	138 ^a (8.9)	
	Rebrote	139 ^a (8.9)	99 ^b (9.3)	
	Promedio	127 (6.3)	118 (6.4)	123 (4.9)
Energía por Bocado (EM_B)	Inicial	189 (11.8)	206 (12.3)	
	Rebrote	200 (11.8)	190 (11.8)	
	Promedio	195 (8.3)	198 (8.5)	196 (6.9)
Energía por gramo de MS (EM_{CMS})	Inicial	155 (11.3)	138 (11.8)	
	Rebrote	129 (11.3)	134 (11.3)	
	Promedio	142 (8.0)	136 (8.3)	139 (6.2)

Los valores seguidos por letras diferentes difieren significativamente (Tukey-Kramer HSD, $P < 0.05$) entre los promedios de cada uno de los cuatro experimentos o entre promedios de cada especie forrajera.

Estimación del consumo

El CMS fue estimado por regresión múltiple mediante la selección del mejor conjunto de variables de acústicas y comportamiento ingestivo. Se evaluaron los modelos incluyendo o no el efecto de la especie (alfalfa vs. raigrás) y de las situaciones de pastoreo (inicial vs. rebrote).

Las variables más importantes para predecir el CMS de las pasturas (Tabla 5), seleccionadas en base a cualquiera de los criterios utilizados (R^2_{aj} , AIC y CV), en la mayoría de los modelos fueron las siguientes:

- energía total de las masticaciones EM_T
- número de masticaciones MT
- tasa de movimientos mandibulares MM_T
- tasa de bocados B_T
- número de movimientos compuestos MC
- energía de las masticaciones de los movimientos compuestos EM_{MC}

Tabla 5: Modelos para estimar consumo de materia seca basados en variables acústicas y de comportamiento.

Variables	Modelos generales sin el efecto especie y condición				MOD ₅	MOD ₆
	MOD ₁	MOD ₂	MOD ₃	MOD ₄	Incluye efecto especie	Incluye efecto especie y condición
Predictores	1	2	3	4	6	6
Intercepto	114	162*	570*	101	269*	179
EM _T	0.0067*	0.0076*	0.0062*	0.0043*	0.0052*	0.0059*
MT		-0.346*				
MM _T			-20.2*	-5.56*	-11.9	-18.8
B _T			20.8*		10.1	20.9*
MC				0.51*	0.28*	0.02
EM _{MC}				2.43*	1.38	
Alfalfa vs. raigrás	-	-	-	-	-37.1	-27.1
Inicial vs. rebrote	-	-	-	-	-	0.23*
R ²	0.84	0.86	0.88	0.90	0.91	0.92
R ² _{aj.}	0.83	0.84	0.86	0.89	0.90	0.91
R ² _{kfold}	0.83	0.80	0.86	0.86	0.86	0.87
AIC	605	599	592	591	592	585
RCME (gMS)	165	151	140	135	132	122
CV (%)	16.0	14.7	13.1	13.0	12.8	11.9

MOD_n: modelo de predicción de CMS según modelo de n variables, MOD₅: modelo de 6 variables incluyendo el efecto de la especie, MOD₆: modelo de 6 variables incluyendo el efecto de la especie y la condición de la pastura.

Los valores seguidos por asteriscos (*) son significativos (P< 0.05)

La EM_T fue la mejor variable cuando se utilizó una sola variable para predecir CMS, con un valor de CV= 16% y también fue seleccionada como la más importante en todos los otros modelos. A medida que se sumaron variables a EM_T se obtuvo más información para determinar CMS. El número máximo de variables que mejora la predicción CMS fue con el modelo de 4 variables, con un valor de CV= 13%. El agregado de más variables no mejora significativamente las predicciones de los modelos generales e independientes del efecto propio de la especie (alfalfa vs. raigrás) y la condición de la pastura (inicial vs. rebrote).

Para realizar los cálculos de CMS se seleccionó el MOD₅ que incluye el efecto de la especie forrajera, y no el MOD₆ ya que el efecto de la condición de la pastura si bien mejora los tres criterios de selección (R²_{aj.}, AIC y CV), no justificaría incluir éstas variables. Se puede trabajar con un modelo robusto y más simple independiente de la condición, que puede variar incluso diariamente.

IV. Discusión

Este trabajo fue diseñado para demostrar la utilidad del uso del sonido para el análisis y determinación del comportamiento ingestivo y consumo de vacas en pastoreo. El método acústico permite, no solo identificar y medir el número de los distintos movimientos mandibulares, sino cuantificar el número y duración de las masticaciones permitiendo describir en detalle el proceso que ocurre entre los dientes y el forraje ingerido en cada uno de esos movimientos. Estas mediciones son muy útiles para comparar y explicar el comportamiento ingestivo en diferentes pasturas y derivar modelos para la predicción del consumo de materia seca basados en los sonidos producidos por los animales durante la ingestión del alimento.

En este experimento, a través de las cuatro situaciones de pastoreo, dos en alfalfa y dos en raigrás, se generaron pasturas lo suficientemente diferentes en estructura (especie forrajera), cantidad (oferta de biomasa) y calidad (contenido de materia seca y fibra), como para alcanzar los objetivos previstos para este trabajo. Variaciones en el contenido de agua (forrajes que varían en el contenido de MS) y en el contenido de fibra, podrían representar una dificultad para el uso del método, o la necesidad de realizar calibraciones. Por un lado, el sonido producido por las masticaciones, en parte, se debe a la ruptura de las células y la extrusión del agua. Por el otro, el contenido de fibra (pared celular) puede requerir de mayor esfuerzo para procesar el alimento antes de tragarlo. Los forrajes frescos tienen una alta proporción de contenidos celulares, donde la mayor parte es agua, por lo tanto la extrusión del contenido celular y el contenido de fibra, afectan la cantidad de masticaciones necesarias para alcanzar el tamaño de partícula adecuado, la formación y lubricación del bolo para estimular el reflejo de deglución (Galli et al. 2006b). Los resultados de este trabajo, respaldan un buen desempeño del método acústico, con pasturas de alfalfa y raigrás, que difieren significativamente en el contenido de materia seca (247 vs. 155 g/kg) y fibra (268 vs. 396 g/kg) respectivamente, mostrando que en las situaciones de pastoreo en sistemas reales de producción, es muy probable que la mencionada calibración no sea necesaria.

Consumo y comportamiento ingestivo

En general, los pesos de bocados fueron los esperados en función de las especies y biomasa de las pasturas utilizadas. Cuando se comparan los valores obtenidos con las predicciones del modelo de simulación ConPast 2.0 (Galli et al., 1999, basado en la adaptación de

los trabajos de Laca y Demment, 1991 y Laca et al., 1992) para vacas lecheras de similares características, los pesos de bocado obtenidos resultan cercanos a los simulados para alfalfa y raigrás en función de la biomasa y estructura de las pasturas ofrecidas (Tabla 6). Sin embargo, para la condición de rebrote en raigrás, las tasas de bocados y las tasas de observadas difieren marcadamente de las predichas. Para esa situación, los valores obtenidos fueron notoriamente menores a los esperados. Estas diferencias podrían explicarse por el contenido de fibra del raigrás respecto a los que dieron origen a las ecuaciones del modelo. Un mayor contenido de fibra necesita un mayor número de masticaciones por unidad de materia seca, reduciendo la tasa de bocados y en consecuencia la tasa de consumo. Sin embargo comparando los valores observados en las otras 3 situaciones, los menores pesos de bocado no produjeron un aumento en las tasas de bocados esperadas y por lo tanto las tasas de consumo fueron algo superiores a las previstas. ConPast 2.0 predice que las vacas reducen el efecto negativo de una reducción del peso del bocado aumentando la tasa de bocado por minuto, pero este efecto no se manifestó claramente en este experimento.

Tabla 6: Comparación de valores observados y simulados con el modelo ConPast 2.0

Variable	Alfalfa		Raigrás anual	
	Inicio	Rebrote	Inicio	Rebrote
Peso de bocado (gMS)				
Observado	1,24	1,54	1,74	1,56
Simulado	1,32	1,56	1,85	1,48
Diferencia	-0,08	-0,02	-0,11	0,08
Tasa de bocados (boc/min)				
Observado	34,6	33,3	32,9	21,7
Simulado	33,0	31,9	31,0	32,5
Diferencia	1,60	1,40	1,90	-10,8
Tasa de consumo (kgMS/h)				
Observado	2,71	3,12	3,53	2,12
Simulado	2,61	2,99	3,44	2,89
Diferencia	0,10	0,13	0,09	-0,77

El modelo de comportamiento ingestivo (Ungar, 1996) propone que el consumo de materia seca en un tiempo de pastoreo dado está determinado por la velocidad (tasa) de consumo que los animales pueden expresar en interacción con las características cuanti y cualitativas de la

pastura. Este enfoque define a la tasa de consumo (CMS / tiempo) como el producto entre el peso del bocado (MS) y la tasa de bocados (bocados/tiempo). La tasa de consumo resulta de la relación entre la cantidad de forraje cosechado en cada bocado y el tiempo necesario para arrancar, masticar y tragar el mismo. El peso del bocado tiene un efecto positivo y el tiempo necesario para su ingestión un efecto negativo sobre la tasa de consumo. En consecuencia, el tiempo necesario por bocado y la tasa de bocados están inversamente relacionados. De este análisis se desprende que un aumento en el peso del bocado resulta en un aumento en la tasa de consumo cuando el tiempo necesario aumenta en menor grado, aunque implique una disminución en la tasa de bocados. Esta relación empírica entre el peso y la tasa de bocados no siempre se manifiesta y en muy pocos trabajos se explican funcionalmente los mecanismos que la afectan.

Es válido aclarar que las condiciones experimentales determinaron que el tiempo de búsqueda y selección de los bocados no afectan la tasa de consumo. Durante las sesiones de pastoreo, cuando las vacas arrancaban los nuevos bocados, todavía no habían terminado de masticar y tragar el anterior y por lo tanto no se considera el tiempo de búsqueda para el análisis de la tasa de consumo.

En estas condiciones la tasa de bocados está condicionada por la tasa de movimientos mandibulares, de la asignación de esos movimientos mandibulares a arranque, masticación puro o movimientos compuestos (masticación y arranque), y del número de masticaciones necesarias por unidad de consumo (Laca et al., 1994). Cuando las vacas abren y cierran sus mandíbulas con mayor frecuencia o mastican y arrancan a la vez ahorran tiempo (Ungar et al., 2006) y por lo tanto el tiempo necesario por bocado aumenta sólo cuando la necesidad de masticar por gMS supera la capacidad de compensación de los movimientos compuestos (Galli, 2008).

Los resultados muestran que por un lado, las tasas de consumo fueron similares en las dos condiciones de alfalfa y en la condición de raigrás inicial, a pesar de las diferencias en los pesos de bocado obtenidos. Por otro lado, la tasa de consumo en raigrás rebrote fue significativamente menor que en las otras 3 situaciones (2.12 vs. 3.12 kgMS/h), aunque los bocados obtenidos en la primera situación estuvieron entre los más pesados. Para explicar, en general, las diferencias en las respuestas de los componentes del comportamiento ingestivo (peso de bocado, tasa de bocado

y tasa de consumo), abarcando estas distintas situaciones de pastoreo, se adaptó el modelo conceptual de Ungar (1996) en función de los objetivos y resultados obtenidos en estos experimentos (Figura 14).

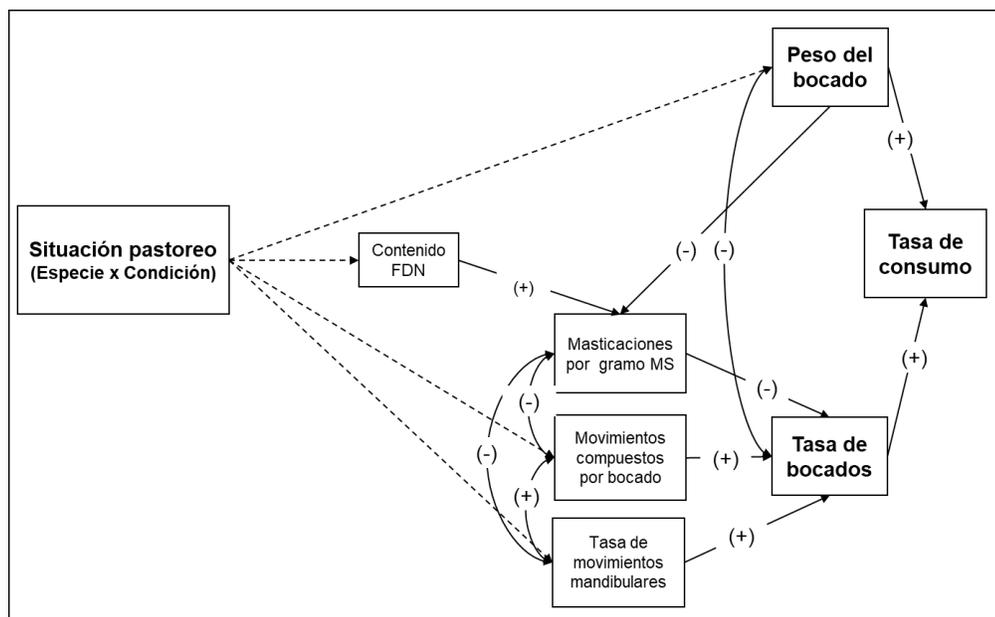


Figura 14. Modelo para el análisis de las relaciones entre las variables que explican la tasa de consumo en las distintas situaciones de pastoreo.

El aumento en contenido de agua (menor contenido de MS) y de fibra de los forrajes aumentan el número de masticaciones por gMS ingerida (Galli et al., 2006a). En algunos casos el contenido de agua relativiza los efectos de la fibra en los requerimientos de masticación. El menor contenido de fibra en alfalfa resulta en menor cantidad de masticaciones por gMS que en raigrás. El alto contenido de fibra del raigrás en la condición de rebrote justificaría la mayor cantidad de masticaciones y la menor tasa de consumo resultante. En otras palabras, en la condición de raigrás rebrote el aumento de las masticaciones por gMS justificadas por el alto contenido de fibra es mayor que la disminución esperada por bocados de ese peso.

Además, las vacas tuvieron mayor tasa de bocados en la pasturas de alfalfa, asignando movimientos mandibulares a movimientos compuestos y menor cantidad de masticaciones exclusivas por bocado. En algunas situaciones, cuando arrancan bocados más pesados y a través de la asignación de una mayor proporción de movimientos compuestos, las vacas son más

eficientes y procesan el forraje ingerido con mayor velocidad. A través de este mecanismo pueden obtener mayores pesos de los bocados, pero sin reducir la tasa de bocados. De esta manera, se explican las altas tasas de consumo obtenidas. Varios trabajos previos también han obtenido evidencias claras de este proceso, tanto en vacunos (Laca et al., 1994, Ungar y Rutter, 2006, Galli et al., 2017) como en ovinos (Galli et al., 2011), demostrando que los cambios en la tasas de bocados se deben, en mayor medida, a la asignación del tipo de evento a cada movimiento mandibular (ej. proporción de movimientos compuestos) que a variaciones en la tasa de movimientos mandibulares. Las tasas de bocados varían en forma importante, mientras que las tasas de movimientos mandibulares se mantienen muy similares.

Cuando los pesos de bocado son menores, una menor cantidad de forraje es retenida en la boca y triturada en cada masticación. A medida que aumenta la cantidad retenida en la boca aumenta la eficiencia de la masticación, seguramente debe haber un requerimiento mínimo de masticaciones, específico para cada tipo de forraje (Laca y WallisDeVries, 2000).

Estimación del consumo.

El diseño experimental en su conjunto ofreció un marco robusto para probar la estimación del consumo de materia seca en condiciones de pastoreo. Mediante las cuatro situaciones diferentes de pastoreo se generó un rango amplio de consumos, pesos de bocados y de relaciones entre el consumo de materia seca y el comportamiento ingestivo.

De acuerdo a lo esperado y en línea con trabajos previos en novillos pesados (Laca y WallisDeVries, 2000), novillitos Galli et al., 2006a), vacas (Galli et al., 2017) y ovejas (Galli et al., 2010, 2011), la energía de los sonidos de las masticaciones resultó altamente relacionada con la cantidad de forraje ingerido por las vacas. Esta relación se mantiene en las diferentes situaciones de pastoreo, no obstante los cambios en la calidad y pesos de bocado y tasas de consumo resultantes.

Los resultados confirman la hipótesis que es posible predecir el CMS con precisión en un turno de pastoreo a través del análisis de las masticaciones. Se agregan nuevas evidencias sobre la importancia de la información que contiene el sonido de las masticaciones para estimar el CMS.

Con la excepción de evaluaciones realizadas con ovejas pastoreando gramíneas en condiciones de campo, durante períodos de hasta 30 minutos (Galli et al., 2010), hasta ahora los antecedentes de la metodología estaban restringidos a tiempo muy cortos de pocos minutos de pastoreo en pasturas construidas manualmente (Laca et al., 1992 y 2000, Galli et al., 2006b, 2008, 2011 y 2017). Este trabajo aporta pruebas para avalar su uso en períodos más prolongados (turno de pastoreo) en pasturas convencionales. Los resultados amplían el rango de situaciones citadas en la bibliografía. Galli et al. (2017) con vacas lecheras con características raciales y productivas similares a las utilizadas en este trabajo, también encontraron que la EM_T de las masticaciones es una variable básica para todos los modelos de estimación del CMS. Estos autores trabajaron en micropasturas artificiales de alfalfa y festuca alta (*Lolium arundinacea*) en estado vegetativo, pero que rindieron pesos de bocados promedios más livianos (0.5–1.04 gMS en alfalfa y 0.82–1.07 gMS en festuca) y tasas de consumo más bajas (1.05–1.89 kgMS/h en alfalfa y 1.16–1.30 kgMS/h en festuca), en consumos totales muy bajos de 4–52 gMS durante periodos de tiempo cortos de 0.5 a 8.5 minutos de pastoreo. Los resultados del presente experimento constatan que el método acústico no pierde precisión en condiciones de pastoreo, donde los pesos de los bocados varían a lo largo de un turno (minutos). Estos resultados permiten pensar que si el método funciona en sesiones de pocos minutos y a nivel de un turno de pastoreo, también puede ser utilizado a escala diaria.

De acuerdo a la hipótesis, la relación entre EM_T y CMS fue lineal, a pesar de las diferencias en el contenido de MS y FDN de los forrajes. El raigrás tenía mayor concentración de FDN que la alfalfa y por eso requirió más masticaciones, pero la EM_T por unidad de CMS (EM_{CMS}) fue similar.

En este trabajo en coincidencia con Laca y WallisDeVries (2000), se demuestra que el sonido de las masticaciones es un buen predictor porque refleja las diferencias en la cantidad de forraje procesado en cada masticación. La relación negativa entre el peso de los bocados y las necesidades por gCMS está relacionada por la eficiencia de la masticación. Ese mayor número de masticaciones no implica un aumento significativo en la EM_{CMS} aun cuando las diferencias de peso de los bocados fueron muy variables.

Resulta evidente que estimar el CMS a través del sonido de las masticaciones no es solo una medición indirecta del tiempo efectivo que los animales dedican al pastoreo. Se demuestra que la EM_T contiene información adicional de las características del forraje ingerido y del comportamiento ingestivo que es relevante para una estimación precisa de CMS.

La EM_T siempre fue seleccionada en primer lugar en todos los modelos y es la variable que mejor explica las variaciones en CMS, porque integra información acerca del tiempo real de pastoreo y la tasa de consumo (CMS_T). Los antecedentes demuestran que cuando se requiere más masticaciones por gMS los sonidos producidos se acortan y son menos intensos (Laca y WallisDeVries, 2000, Galli et al. 2006b y 2017), en relación con la menor cantidad de material procesado en cada masticación y por lo tanto no implica un aumento significativo en EM_{CMS} .

El mejor modelo (MOD_6) presenta un RCME= 122 gMS que implica un CV= 11.9%, mejorando los antecedentes obtenidos en pasturas artificiales en consumos de pocos minutos. Galli et al. (2006b) registraron un CV= 16% en novillitos consumiendo forrajes frescos y secos, Galli et al. (2017) obtuvieron CVs= 17% con vacas lecheras (similares a las de este ensayo) pastoreando alfalfa y festuca alta, y Galli et al. (2011) en ovejas pastoreando alfalfa y pasto ovillo (*Dactylis glomerata*).

Se puede establecer que el método acústico proporciona buenas estimaciones de CMS en pasturas que incluyan distintas especies de gramíneas y leguminosas. Los modelos que incluyeron los efectos de las especies ($R^2= 0.90$, CV= 12.8%, Figura 15), o la condición ($R^2= 0.92$, CV= 11.9%) muestran que el método puede ser preciso si se conoce cuál es el tipo de forraje que las vacas están pastoreando (alfalfa o raigrás, inicial o rebrote). Por otro lado si no se incluye la especie y condición el modelo también es buen predictor de CMS con una mínima pérdida de precisión ($R^2= 0.90$, CV= 13%).

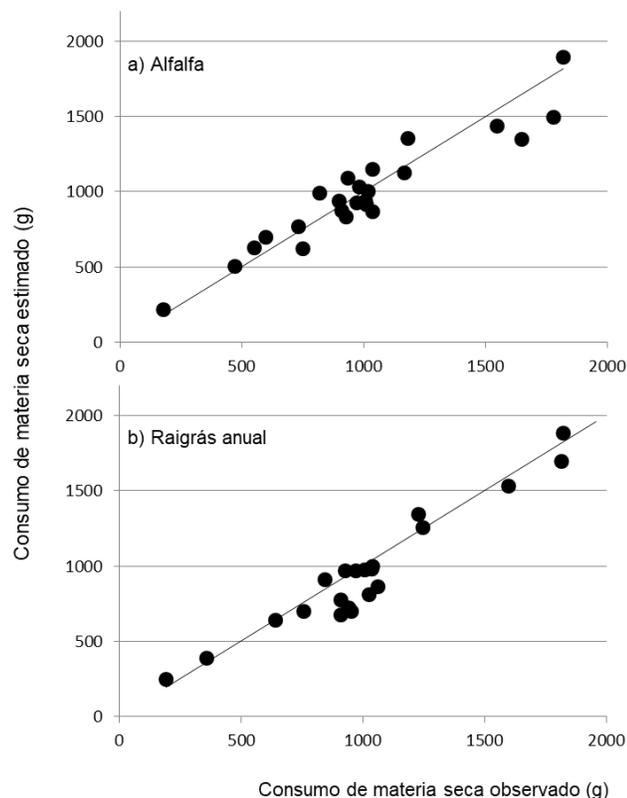


Figura 15. Relación entre el consumo de materia seca observado y el estimado mediante las variables acústicas (MOD_5 , $R^2_{aj}=0.90$, $CV=12.8\%$). Línea sólida: $Y=X$.

El grado de variabilidad entre individuos es importante porque determina la generalidad de las predicciones del CMS basadas en los sonidos de las masticaciones. El tamaño y estructura de la dentadura, así como la forma y tamaño de las cabezas, podrían representar una fuente importante de variación. Las vacas lecheras utilizadas en este experimento estaban secas y preñadas, con pesos vivos, edades y tamaños similares. Por lo tanto, la variación entre las distintas vacas en este experimento no debería representar un problema para la aplicación del método, pero en principio debería extrapolarse solo a vacas que sean similares en raza, tamaño y edad. La actividad masticatoria puede presentar marcadas diferencias debido al estado fisiológico y nivel de producción de los animales (De Boever et al., 1990), pero este aspecto no debería resultar en diferencias en número o el sonido producidos durante la ingestión. Un trabajo interesante para realizar en el futuro sería validar los resultados para animales de otras categorías (ej. vaquillonas holstein de recría).

Esta investigación aporta nuevos conocimientos sobre el proceso de ingestión durante el pastoreo de rumiantes. La combinación de las distintas situaciones de pastoreo, junto con la metodología de estimación del consumo individual y la grabación acústica de los sonidos ingestivos de las vacas lecheras, permitió probar las predicciones del CMS basados en los sonidos de las masticaciones, y al mismo tiempo aporta información muy valiosa sobre la regulación de las tasas de consumo. Sería necesaria una investigación futura para extender estas mediciones acústicas a períodos de tiempo más largos (consumo diario) para evaluar la viabilidad de la escalabilidad de las predicciones del CMS basadas en el sonido. Los sonidos ingestivos integran información muy valiosa para estimar el CMS, pero al mismo tiempo ofrece una posibilidad para monitorear en forma continua y remota las diferencias de comportamiento alimentario en animales que pastorean libremente. También es necesario seguir trabajando para fortalecer el progreso en la automatización del análisis de las señales de sonido para la estimación directa del comportamiento en pastoreo de animales en sistemas reales de producción.

Se torna indudable la relevancia que tienen los MC para estimar y explicar variaciones en las tasas de bocado y de consumo en condiciones de pastoreo, y se debe remarcar que los MC solo pueden ser identificados y cuantificados mediante la metodología acústica (Ungar y Rutter, 2006).

Se demuestra la utilidad del registro acústico para el desarrollo de modelos lineales relativamente simples para predecir el consumo de vacas en pastoreo. Sería muy interesante evaluar la utilidad del uso de algoritmos de procesamiento inteligente de las señales de sonido para extraer la información relevante, como otra opción válida para predecir el consumo en condiciones de pastoreo. En ese sentido, Uhrig et al. (2018) aplicó técnicas propias del aprendizaje maquina, tales como el perceptrón multicapa y las máquinas de aprendizaje extremo, actuando como modelos de regresión no lineales multivariada, que mostraron que es posible mejorar las técnicas lineales para la estimación del consumo de materia seca a partir de registros acústico de comportamiento ingestivo en ovejas en pastoreo.

V. Conclusiones

Los resultados demuestran que mediante el método acústico es factible obtener información precisa para analizar el comportamiento ingestivo y estimar el CMS en vacas en pastoreo a largo plazo (por día).

Los hallazgos de este estudio refuerzan la idea que se pueden desarrollar modelos de predicción del CMS aplicando predicciones generalizadas basadas en el sonido de las masticaciones, usando la EM como principal predictor en turnos completos de pastoreo.

En coincidencia con trabajos previos se encontró que las diferencias entre forrajes frescos no afectan la energía del sonido de las masticaciones por gMS y se obtuvieron buenas estimaciones de CMS a partir de modelos acústicos generales. La energía del sonido de las masticaciones por gramo de materia seca consumida parece variar muy poco en respuesta al tipo de forraje y el nivel de CMS, a pesar que las masticaciones por gMS fueron muy dependientes de la situación de pastoreo. Por lo tanto el método se podría utilizar en condiciones diferentes de pasturas sin necesidad de calibración, incluso cuando varias especies estén presentes.

En la misma línea que los trabajos anteriores con pasturas artificiales y tiempo de pastoreo muy cortos, se demuestra que la utilidad del método puede extenderse a períodos más prolongados (turno de pastoreo) efectuados en pasturas naturales. Todavía debe comprobarse si los modelos pueden extenderse para estimar el CMS diario (Ver capítulo 3).

Agradecimientos

Se agradece a Alejandra Planisich, Marcelo Larripa y Marcelo Sallovitz por la ayuda en las sesiones de pastoreo. A Mariela Uhrig; José Chelotti y Sebastian Vanrell del Instituto de Investigación en Señales e Inteligencia Artificial (sinc(i)), UNL/CONICET, por su asistencia y asesoramiento en la metodología del análisis acústico. También se agradece a la importante ayuda del personal del Campo Experimental J. Villarino (Facultad de Cs. Agrarias, UNR). Este trabajo fue financiado por los proyectos 2016-AGR266 y 80020180300053UR (UNR).

CAPÍTULO 3. APLICACIÓN DEL MÉTODO ACÚSTICO EN UN SISTEMA DE ORDEÑO VOLUNTARIO BASADO EN PASTURAS

I. Introducción

En este capítulo se presenta el trabajo realizado con vacas lecheras en un sistema de producción con ordeño voluntario y con dietas que incluyen pasturas en pastoreo directo. Es un estudio de caso para determinar si los modelos de predicción del comportamiento ingestivo y el consumo de materia basados registros acústicos de corto plazo (durante un turno de pastoreo), descritos en el Capítulo 2 de esta tesis, son escalables y pueden ser integrados a la predicción y monitoreo del comportamiento y CMS mediante pastoreo, a escala diaria (24 horas) en un sistema real de producción.

Uno de los problemas que se presentan para evaluar el método acústico a escala diaria es la elección de la metodología de estimación del consumo de materia seca (CMS) adecuada para utilizar como referencia para su valoración. Los métodos disponibles tienen alguna limitante importante para la determinación precisa del CMS de pasturas de las vacas lecheras en un sistema real de producción, de manera individual y para un día en particular. Para este trabajo se decidió comparar la estimación del CMS de tres modelos basados en variables acústicas desarrollados en el Capítulo 2 (MOD_1 , MOD_4 y MOD_5) con el método basado en los requerimientos energéticos de las vacas (MOD_{Req}), asumiendo que ofrece estimaciones diarias individuales con una precisión suficiente para los objetivos planteados, basados en información necesaria que está disponible en un sistema real de producción.

En este contexto se mantuvieron las siguientes hipótesis: (1) los modelos basados en la energía total del sonido de las masticaciones (EM_T) que predicen CMS en un turno de pastoreo pueden aplicarse para estimar CMS diario y (2) el CMS puede ser estimado con precisión a través de mediciones acústicas de variables del comportamiento ingestivo a nivel diario.

Los objetivos específicos fueron: (1) mostrar la factibilidad de uso del método acústico en un sistema real de producción para medir consumo diario de pasturas (durante 24 horas) y (2) comparar el desempeño predictivo del método acústico con respecto a técnicas indirectas de estimación del CMS basados en los requerimientos energéticos para mantenimiento y producción de leche de las vacas.

En este experimento se cubren dos aspectos diferentes, uno relacionado con el uso de los modelos acústicos para estimar CMS de vacas lecheras a nivel diario y otro la potencialidad de uso el método para comparar el comportamiento ingestivo y CMS de pasturas de dos grupos de vacas con o sin el suministro de una ración parcialmente mezclada (PMR) en un sistema de ordeño voluntario (VMS por sus siglas en inglés, Voluntary Milk System).

El VMS se refiere a un sistema que tiene automatizadas todas las funciones de ordeño y manejo de los animales. La automatización del ordeño reduce el trabajo físico del tambero y aumenta el potencial productivo de los tambos, permite aumentar la frecuencia de ordeño, permitiendo mayor flexibilidad y calidad de vida. Así el VMS aplicado a sistemas pastoriles ha sido probado y adoptado por productores lecheros en varios países del mundo. Existen importantes diferencias entre el VMS y el sistema convencional, algunas de las más relevantes son: 1) las vacas son ordeñadas en un solo brete individual; 2) las vacas tienen acceso a un sistema de ordeño robotizado durante las 24 horas, el ordeño nunca se detiene; 3) las vacas se ordeñan voluntariamente, solo deben caminar desde la cama/corral/potrero donde se alojan hasta el robot de ordeño; 4) las producciones de leche son registradas y almacenadas automáticamente. Con el VMS, mejora la calidad de vida tanto del productor como de los operarios, que ganan en horarios de trabajo más flexibles, con mayor cantidad de registros diarios para la toma de decisiones

II. Materiales y métodos

Lugar

La base de datos que se utilizó para este trabajo fue obtenida desde el 31 de julio al 18 de agosto de 2014 en las instalaciones del Michigan State University, en la estación experimental W.K. Kellogg Biological Station, ubicada en Hickory Corners, Michigan, EE.UU.

Procedimiento experimental

Animales

Se utilizaron vacas lecheras de alta producción pertenecientes a un tambo robótico (VMS) basado en pasturas con tráfico voluntario, descrito detalladamente en Watt et al. (2015).

Se seleccionaron 4 vacas experimentales multíparas de 652 ± 5.41 kg de peso vivo, 2.3 ± 0.5 pariciones, con 102 ± 14.6 días en lactancia, una producción diaria de 41.2 ± 3.88 kg de leche (con 3.7% de grasa butirosa y 3.5% de proteína bruta) en 3.0 ± 1.0 ordeños diarios.

Los datos productivos de las vacas se obtuvieron de los registros automáticos que el sistema VMS (Lely Industries NV, Maassluis, Países Bajos) realiza durante el ordeño. Algunos de los registros que se utilizaron para este trabajo son individuales (peso vivo, condición corporal, número de pariciones, día en lactancia, producción de leche, ordeños diarios) y otros registros son grupales de todo el rodeo (contenido de grasa y proteína de la leche).

Manejo de las vacas y del pastoreo

El manejo de los animales se realizó como parte de un rodeo de 146 vacas raza holstein, dividido en dos grupos independientes (Con y Sin ración mezclada, PMR) y cada uno asignado a un módulo de ordeño robótico con ordeñadoras Lely A3-Robotic (Lely Industries NV, Maassluis, Países Bajos). Se seleccionaron dos vacas de cada grupo de alimentación.

Las vacas, nacidas y criadas, en el mismo sistema de producción estaban acostumbradas y muy adaptadas al sistema de ordeño, al manejo del pastoreo, y la dieta utilizada durante el experimento. Durante el ordeño, las vacas de los dos grupos fueron suplementadas con un concentrado energético peleteado (Conc) a razón de 1 kg por cada 6 kg de producción de leche (límite superior de 12 kg / vaca por día).

Las vacas tenían acceso durante 24 horas a pasturas con predominio de raigrás perenne (*Lolium perenne*) y aporte de trébol blanco (*Trifolium repens*), o con predominio de pasto ovillo (*Dactylis glomerata*), festuca alta (*Lolium arundinacea*) y el mismo trébol blanco (Figura 16).



Figura 16: Vaca experimental con el equipo de grabación en una pastura con predominio de raigrás perenne y trébol blanco.

La asignación diaria fue de 30 kgMS/vaca en ambos tratamientos (Sin PMR o Con PMR). En ambos grupos, la asignación estuvo dividida en dos veces del día, de 10.00 a 22.00 h (AM) y de 22.00 a 10.00 h (PM), cada vez las vacas accedieron libremente a una parcela nueva de pastura con el mismo nivel de asignación diaria (15 kgMS/vaca). La asignación de pasto se ajustó de acuerdo con los cambios en las tasas de crecimiento de los pasturas y las mediciones de biomasa en pre-pastoreo (Y ; medida a nivel del suelo), a través de 30 lecturas de altura de la pastura (x) tomadas por un medidor laser, que estima la biomasa aérea mediante regresión lineal simple ($Y = 125x$; $R^2 = 0.96$).

Durante el período experimental la biomasa promedio ofrecida antes del pastoreo y la remanente luego del pastoreo ($n = 16$ potreros) fue de 2387 ± 302 kgMS/ha (19.2 ± 2.5 cm) y 1396 ± 281 kgMS/ha (11.2 ± 2.2 cm), respectivamente.

Calidad de las pasturas

La calidad de las pasturas se estimó a través del contenido promedio de proteína bruta (PB, Sistema de combustión 4010 CN, Costech Analytical Technologies Inc., Valencia, CA), fibra insoluble en detergente neutro (FDN) y fibra insoluble en detergente ácido (FDA, 200 Fiber Analyzer, Ankom Technology Corp., Fairport, NY), y lignina insoluble detergente ácida (LDA) y 48 h de digestibilidad in vitro de la MS (DIVMS, Daisy II, Ankom Technology Corp.) de muestras de pasturas obtenidas por recolección manual. Los valores estimados para PB, FDN,

FDA, LDA y DIVMS fueron: (% promedio \pm desvío estándar) 18.7 \pm 2.5, 49.3 \pm 4.5, 25.7 \pm 2.0, 3.3 \pm 0.8 y 78.1 \pm 3.0, respectivamente.

Calidad de los suplementos

Se utilizaron dos suplementos diferentes. Un alimento balanceado comercial (Conc, de Cargill Inc, Big Lake, MN) con PB = 19.30%, FDN = 9.94% y EM = 2.70 Mcal/kgMS (Información de la empresa). Una ración mezclada (PMR) con 65% de henolaje y 35% de silaje planta de maíz entero, con PB = 14.5 \pm 1.8%, FDN = 51.1 \pm 5.2%, LDA = 27.1 \pm 2.0%, DIVMS = 73.4 \pm 3.0%. Las variables de composición química que caracterizan a los suplementos, fueron determinadas con los mismos métodos descriptos para caracterizar las pasturas. (Van Soest et al. 1991)

Tratamientos

Dentro del manejo general detallado, se comparó el desempeño productivo, el comportamiento ingestivo y el consumo diario de las vacas a las que se les suministraron 2 niveles de suplemento :

Grupo 1: Con PMR (Dieta base pasturas + Conc + 4 kgMS PMR)

Vacas 2948 y 21036

Grupo 2: Sin PMR (Dieta base pasturas + Conc)

Vacas 2976 y 2936.

Registros a campo

En este experimento, se utilizaron registros acústicos individuales continuos de 24 horas obtenidos en 6 días no consecutivos en un período de 21 días, entre el 30 de julio al 19 de agosto (verano en el hemisferio Norte). Se registró el comportamiento ingestivo de las 4 vacas cada uno de los días. Se utilizaron 5 equipos (bozal, micrófono y grabador) que fueron rotando en las 4 vacas a través de los 6 días experimentales.

Cada equipo de grabación consistió en un bozal para sujetar un micrófono y un grabador descriptos en el Capítulo 2 (Figura 8). Los grabadores se transportaron dentro de una caja estanca sujeta al bozal por detrás del cuello. Los micrófonos se colocaron contra la frente de las vacas (Figura 17), sujetos y protegidos por una banda elástica, para evitar que el micrófono se mueva de su lugar, aislar del ruido provocado por el viento y proteger de otros rozamientos (Figuras 18 y

19). Todas las grabaciones se realizaron con una frecuencia de muestreo de 44,1 kHz y una resolución de 16 bits, proporcionando un ancho de banda de grabación nominal de 22 kHz y un rango dinámico de 96 dB, y se almacenaron en formato de archivo WAV.

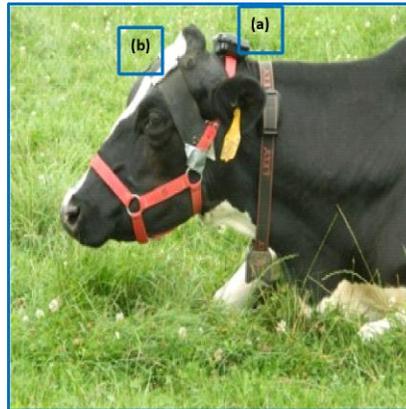


Figura 17: Equipo de grabación sobre el animal sujeto a un bozal. (a) Ubicación de la caja estanca conteniendo el grabador en la parte trasera del cuello y (b) ubicación del micrófono contra la frente de la vaca y protegido por una banda elástica.



Figura 18: Equipo de grabación sobre el animal sujeto a un bozal y suministro de PMR.



Figura 19: Vacas experimentales durante el pastoreo y portando el equipo de grabación sujeto a un bozal.

Estimación de las variables

Se clasificaron las actividades a través del registro de sonido de grabaciones llevadas a cabo con el programa. Dos expertos con experiencia previa en la detección de comportamiento ingestivo y análisis digital de señales acústicas, clasificaron las actividades a través del registro del sonido. Mediante la observación visual y auditiva de los registros con el programa Audacity (Audacity® 2.4.2. 2019) se identificaron, clasificaron y etiquetaron los bloques de actividad, como pastoreo, rumia o ninguna de estas actividades. La actividad de pastoreo se diferenció de las otras actividades por el conjunto característico de sonidos de arranques, masticaciones puras y movimientos compuestos, por más de 5 minutos seguidos.

Comportamiento ingestivo y consumo de materia seca

Para medir el comportamiento ingestivo y el CMS individual, se utilizaron todas las señales acústicas obtenidas en las 4 vacas (2 vacas por cada nivel de suplemento) en los 6 días experimentales (N= 24).

Al momento de colocar los equipos en los animales se sincronizó el reloj interno del grabador con los registros del sistema VMS. A partir de ese dato en la señal se identificaron y delimitaron los tiempos de los diferentes turnos de pastoreo. En cada señal, para la determinación de las variables de comportamiento ingestivo promedio de cada turno y promedio diaria, se dividió el tiempo completo de cada turno de pastoreo mayor a 15 minutos, en tres segmentos de igual duración (inicio, medio y final de cada turno de pastoreo), y a su vez en cada segmento se seleccionaron al azar 3 minutos de la señal. Dentro de cada uno de esos segmentos de 3 minutos

de pastoreo se identificaron y contaron “manualmente” los arranques (A), masticaciones (M) y los movimientos compuestos (MC); para poder clasificar correctamente cada evento se realizaba un doble chequeo auditivo y visual de la señal. A partir de los valores promedio de cada variable en cada segmento se estimaron los valores promedios y totales de cada turno y del total de la señal de 24 horas. Las variables analizadas fueron: número de arranques, número de masticaciones puras y número de movimientos compuestos promedios y totales para cada señal (Figura 20). A partir de estas variables se calculó el número y la tasa de bocados, de movimientos masticatorios y de movimientos compuestos para evaluar el comportamiento ingestivo y la energía total de las masticaciones necesaria para estimar el CMS de pasturas.

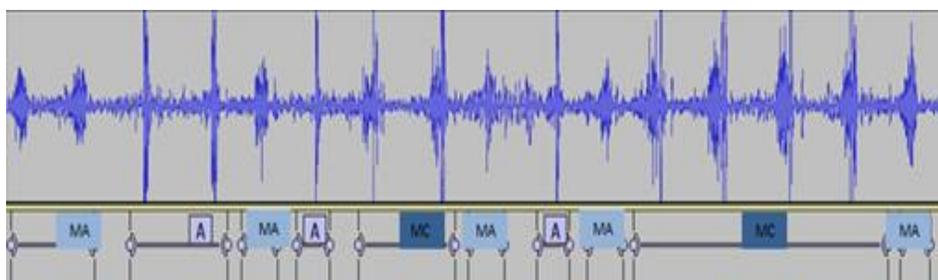


Figura 20: Clasificación de eventos masticatorios .MA: masticaciones MC: movimientos compuestos A: arranques

El CMS se estimó a través de 3 modelos acústicos y también mediante un modelo basado en los requerimientos energéticos de las vacas (MOD_{Req}) que se utilizó como referencia. De los modelos acústicos evaluados en el Capítulo 2, se seleccionó uno basado solo en la regresión lineal entre CMS y EM_T (MOD_1), otro basado exclusivamente en variables estimadas a partir del registro acústico, que mejoran significativamente la regresión con EM_T (MOD_4) y otro que incluye la especie forrajera además de variables antes mencionadas (MOD_5).

Modelos basados en el registro acústico

De los modelos para estimar el CMS de pasturas a partir de las variables acústicas seleccionados en el Capítulo 2, se utilizaron los siguientes:

Modelo 1 (MOD_1): Utiliza la energía total de las masticaciones (EM_T) como único predictor.

$$CMS_1 \text{ (kg/día)} = 114 + 0.0067 EM_T$$

Modelo 4 (MOD₄): Utiliza la energía total de las masticaciones (EM_T), la tasa de movimientos mandibulares (MM_T), el número de movimientos compuestos (MC) y la energía de las masticaciones de los movimientos compuestos (EM_{MC}).

$$\text{CMS}_4 \text{ (kg/día)} = 101 + 0.0043 \text{ EM}_T - 5.56 \text{ MM}_T + 0.51 \text{ MC} + 2.43 \text{ EM}_{MC}$$

Modelo 5 (MOD₅): Utiliza la energía total de las masticaciones (EM_T), la tasa de movimientos mandibulares (MM_T), la tasa de bocados (B_T), el número de movimientos compuestos (MC), la energía de las masticaciones de los movimientos compuestos (EM_{MC}) e incluye el efecto del a especie (Alfalfa vs. raigrás)

$$\text{CMS}_5 \text{ (kg/día)} = 269 + 0.0052 \text{ EM}_T - 11.9 \text{ MM}_T + 10.1 \text{ B}_T + 0.28 \text{ MC} + 1.38 \text{ EM}_{MC} - 37.1$$

(Alfalfa vs Raigrás)

Debido a la características de las pasturas con predominio de gramíneas se parametrizó el modelo como raigrás anual.

Las variables acústicas se estimaron mediante el mismo procedimiento descrito en detalle en el Capítulo 2 (Modelos de estimación de CMS).

Modelo basado en los de requerimientos energéticos

Para el modelo basado en los requerimientos energéticos diarios (mantenimiento + producción de leche) de las vacas (MOD_{Req}), se estimó el CMS diario individual de cada vaca lechera a partir de la siguiente secuencia de cálculos (adaptado de AFRC, 1980):

1. El requerimiento total (Req. Tot), es la energía metabolizable diaria (Mcal EM) requerida por vaca es la suma de los requerimientos diarios de mantenimiento (Mant) y producción de leche (Prod)

$$\text{Req tot} = \text{Mant} + \text{Prod}$$

2. El requerimiento de mantenimiento (Mant), es el producto del requerimiento basal (MB) más la energía necesaria para la actividad voluntaria ajustada mediante un factor (Act) debido al pastoreo directo (se asumió un valor de 1.25)

$$\text{Mant.} = \text{MB} \times \text{Act.}$$

3. El metabolismo basal (MB) se calcula como una función del peso metabólico (PV^{0.75})

$$\text{MB} = 0.134 \text{ PV}^{0.75}$$

4. El requerimiento de producción (Prod) se calcula según la producción diaria de leche (Leche, kg) y el valor calórico de la leche (EM), según contenido (%) de grasa y de proteína. Se utilizó un valor promedio de 1.33 Mcal/ kg de leche producida en base al contenido de grasa y proteína.

$$\text{Prod} = \text{Leche} \times \text{EM leche}$$

5. El requerimiento cubierto por el consumo de pastura (Req past) se calculó como el requerimiento total menos el requerimiento cubierto por la suplementación (Req. sup)

$$\text{Req. past} = \text{Req. tot} - \text{Req. sup}$$

6. El Req sup. se estimó como la cantidad de alimento balanceado consumido (Conc, kgMS) por la concentración de EM del alimento balanceado (EM Conc, Mcal/kgMS), más la cantidad de ración mezcla consumida (PMR, kgMS) por la concentración de EM de la PMR (EM PMR, Mcal/kgMS).

$$\text{Req sup} = \text{Conc} \times \text{EM Conc} + \text{PMR} \times \text{EM PMR}$$

7. Finalmente de Consumo de materia seca de pastura (CMS_{Req} , kg/día) se calculó como el requerimiento de EM cubierto por la pastura (Req. past) dividido por la concentración de EM de la pastura (EM past, Mcal/kgMS).

$$\text{CMS}_{\text{Req}} = \text{Req. past} / \text{EM past}$$

Modelos y análisis estadísticos

Los efectos de los tratamientos (diferencias entre suplemento, días y vacas) sobre las distintas variables respuesta fueron analizados como:

$$Y_{jk} = \mu + T_i + e_{jk}$$

donde Y_{jk} es el valor observado, μ la media general de Y_{jk} , T_i es el efecto tratamiento y e_{jk} es el error residual del modelo.

Las diferencias entre las medias fueron probadas por Tukey-Kramer HSD, cuando los efectos fueron significativos para la prueba de F ($P < 0.05$).

Se realizaron contrastes ortogonales para comparar los resultados promedios cada uno de los modelos basados en variables acústicas vs. los obtenidos con el modelo basado en los requerimientos energéticos (CMS_1 vs. CMS_{Req} , CMS_2 vs. CMS_{Req} y CMS_5 vs. CMS_{Req}).

Todos los análisis estadísticos fueron realizados con el programa JMP® Versión 12 (SAS Institute Inc., 2015). Se examinaron los gráficos de los residuales para detectar posibles desviaciones a la linealidad y supuestos de distribución.

III. Resultados

En la Tabla 7 se presentan los resultados de los consumos de materia seca (CMS) promedio obtenidos con los distintos modelos, en los tratamientos con y sin suplemento, en total y por cada vaca lechera durante los 6 días de mediciones. Se encontraron diferencias significativas ($P < 0.001$) entre los modelos. El modelo basado solamente en EM_T (MOD_1) predijo consumos significativamente menores ($\sim -15\%$) que el resto de los modelos. Cuando se compara los modelos basados en los registros acústicos MOD_1 , MOD_4 y MOD_5 en contraste con el basado en requerimientos (CMS_{Req}), se encuentra que MOD_4 no difiere ($P= 0.67$) de CMS_{Req} , prediciendo valores promedios muy cercanos a los 19 kgMS por vaca por día. En cambio, MOD_1 y MOD_5 estiman valores inferiores, menos 4.3 kgMS ($P < 0.001$) y menos 1.6 kgMS ($P < 0.08$), respectivamente. Los resultados mantuvieron esta tendencia en los valores promedios obtenidos los tratamientos con y sin PMR (Figura 21), pero no siempre cuando se analiza a nivel de cada una de las vacas, hallándose mayor variación entre las predicciones de CMS entre animales que entre los modelos (Figura 22). Así mismo, los modelos acústicos predicen mayor variabilidad en los CMS que MOD_{Req} , este aspecto permitiría apreciar con mayor precisión el comportamiento individual, que resulta relevante cuando se analiza la respuesta en producción de un grupo de animales ante variaciones de consumo (ej. suplementación).

Tabla 7. Comparación de la estimación del consumo de materia seca de los modelos acústicos con la predicción por requerimientos de las vacas con distinto nivel de suplementación.

Tratamiento	MOD_1	MOD_4	MOD_5	MOD_{Req}	P_v
Con PMR	14.0±0.92b	18.3±1.12a	16.9±0.95ab	18.8±0.39a	<0.001
Vaca 2948	13.3±1.29	15.7±1.44	15.2±1.27	19.9±0.44	
Vaca 21036	14.6±1.29	20.9±1.44	18.6±1.27	17.5±0.44	
Sin PMR	15.6±0.92b	19.0±1.41a	18.0±0.95ab	19.3±0.39a	<0.001
Vaca 2976	17.0±1.29	19.5±1.44	18.8±1.27	19.4±0.44	
Vaca 2936	14.2±1.29	18.5±1.44	17.1±1.27	19.3±0.44	
Total	14.7±0.95b	18.7±1.40a	17.4±0.91ab	19.0±0.45a	<0.001
Contraste vs. CMS_{Req} (P_v)	<0.001	0.67	<0.08	---	

Los valores seguidos por letras diferentes difieren significativamente (Tukey-Kramer HSD) entre los promedios de cada uno de los cuatro modelos de predicción.

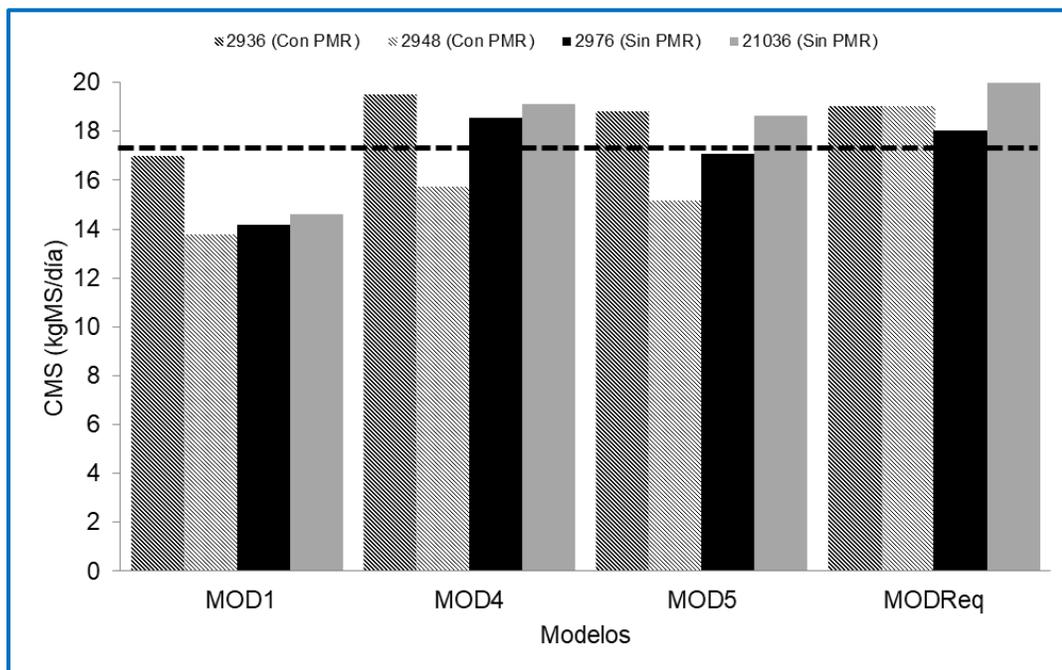


Figura 21: Estimación del consumo diario de materia seca (CMS) promedio de los 6 días para cada vaca (Con o Sin PMR)] según los diferentes modelos de predicción basados en variables acústicas (MOD_n) y requerimientos (MOD_{Req}). (---) CMS promedio general.

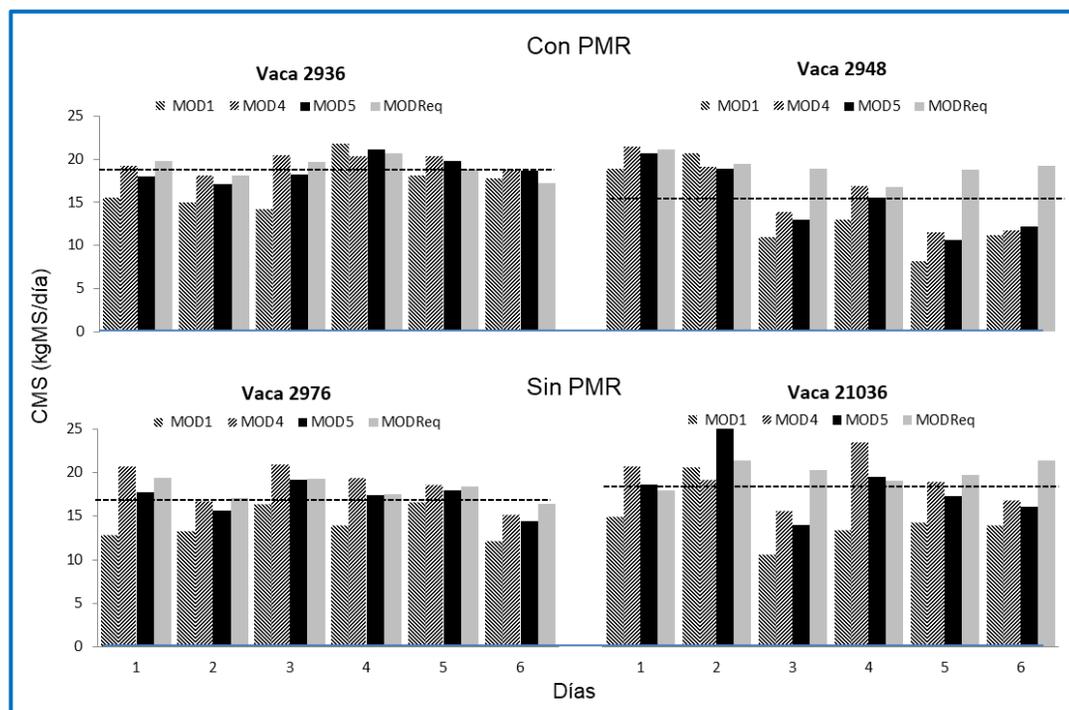


Figura 22: Variación diaria del CMS de cada vaca según los diferentes modelos de predicción.

(- - -) CMS promedio estimado para cada vaca.

El peso vivo promedio de las vacas fue 652 ± 3.48 kg de peso vivo, los días en lactancia promedio fue de 102 ± 7.6 con 41.2 ± 1.0 kg de leche promedio diaria y un consumo de concentrado promedio de 6.8 ± 0.7 kgMS/vaca por día. Durante el período de observaciones todas las vacas mantuvieron una condición corporal entre 3-3.5 (escala 1-5) y no se observaron variaciones de peso vivo significativas.

Se calculó el CMS según los métodos de requerimientos MOD_{Req} y el modelo de 4 variables MOD_4 . Se seleccionó el MOD_4 porque incluye el número máximo de variables que mejoran la predicción del CMS (ver Capítulo 2). Al comparar el MOD_4 con el MOD_{Req} no difieren ($P=0.67$) prediciendo valores de CMS promedios 18.7 y 19 kgMS/d respectivamente (Tabla 8).

Cuando la eficiencia se estimó a partir de CMS_4 , la Efc_4 fue igual para las vacas con y sin PMR, en cambio cuando el cálculo se basó en CMS_{Req} , la Efc_{Req} fue superior en las vacas que no fueron suplementadas ($P < 0.01$).

Tabla 8. Comparación de las características productivas de las vacas, predicción del consumo de materia seca (CMS) y eficiencia de conversión del alimento (Efc) según suplementación, días y vaca.

	Peso vivo (kg)	Prod. Leche (kg)	Días en lactancia	CMS (kg/d) MOD ₄	CMS (kg/d) MOD _{Req}	Efc ₄	Efc _{Req}
Suplemento							
Con PMR	660	44.7a	101	18.3	18.8	0.69	0.67
Sin PMR	648	37.8b	102	19.0	19.3	0.69	0.70
EE	5.23	1.02	11.5	1.12	0.133	0.03	0.005
Pv	0.105	<0.01	0.970	0.548	0.39	0.99	<0.01
Días							
1	646	41.5	93.3	20.5	19.7	0.71	0.68
2	655	41.5	97.3	21.0	19.8	0.72	0.69
3	648	40.6	99.3	17.7	19.1	0.66	0.69
4	653	40.3	104.3	20.0	19.1	0.71	0.69
5	652	39.7	106.3	17.4	18.6	0.67	0.69
6	655	37.9	111.3	15.6	18.1	0.65	0.70
EE	9.42	2.67	20.8	0.85	0.69	0.06	0.014
Pv	0.967	0.933	0.991	0.300	0.531	0.908	0.811
Vacas							
2948 (PMR)	667	47.0a	63c	14.1b	19.6a	0.57b	0.66c
21036 (PMR)	656	41.0b	142a	20.9a	17.6b	0.77a	0.69b
2936	655	35.1c	132b	19.5a	19.4a	0.72a	0.72a
2976	628	37.4c	70c	18.6a	19.3ab	0.68ab	0.70b
EE	5.42	3.88	14.6	1.17	0.44	0.03	0.005
Pv	<0.01	<0.01	<0.01	0.048	0.013	<0.01	<0.01
Promedio	652	41.2	102	18.6	19.0	0.69	0.69

Los valores seguidos por letras diferentes difieren significativamente (Tukey-Kramer HSD, P<0.05) entre filas para cada variable.

Se estimaron variables del comportamiento ingestivo para comparar y analizar la respuesta a los tratamientos Con y Sin suplementación. Estas variables permiten mostrar la capacidad del método acústico para estimar el consumo diario de pasturas y sus variaciones, (Tabla 9).

El tiempo pastoreo promedio diario fue 9 % mayor cuando no se suplementó (428 vs 467 min) con una tasa CMS 2.5 % menor (2.50 y 2.46 kgMS/h). No hubo diferencias significativas (P> 0.05) entre los promedios de todas estas variables de comportamiento ingestivo para los 2 niveles de suplemento y entre los 6 días no consecutivos de pastoreo. En promedio las vacas tomaron bocados de 0.79±0.02 gMS, a una tasa de 53±1.42 bocados por minuto, obteniendo una tasa de consumo de 2.48±0.04 kgMS por hora durante 448±15.7 min (7 h y 28 min) por día. Durante el proceso de ingestión de las pasturas, en promedio, las 6 vacas masticaron 1,44±0.04 veces cada gramo de MS..

Cuando se analiza y compara el comportamiento individual entre las vacas en general, no hubo diferencias en las tasas de consumo y sus componentes (peso y tasa de bocado). Se registraron diferencias ($P= 0.02$) entre dos vacas, de distinto nivel de suplementación, en el tiempo diario que dedicaron al pastoreo. En promedio de los 6 días la vaca 2936 (Sin PMR) pastoreó 72 minutos más (+20%) que la vaca 2948 (Con PMR).

Tabla 9. Variables del comportamiento ingestivo a partir de la predicción del MOD₄. Efecto de los tratamientos, variabilidad entre días y vacas

	Tiempo pastoreo(min)	Tasa CMS (kg/h)	Peso del bocado (gMS)	Tasa de bocados (boc/min)	Masticaciones totales/gMS
Suplemento					
Con PMR	428	2.50	0.78	54.1	1.44
Sin PMR	467	2.46	0.80	51.9	1.45
EE	22.2	0.07	0.03	2.08	0.06
Pv	0.231	0.743	0.599	0.486	0.926
Días					
1	508	2.39	0.71	56.2	1.45
2	465	2.67	0.86	51.9	1.37
3	433	2.43	0.80	50.7	1.53
4	495	2.43	0.77	52.5	1.55
5	436	2.38	0.81	49.5	1.54
6	367	2.55	0.75	57.3	1.25
EE	34.6	0.567	0.04	3.68	0.09
Pv	0.123	0.240	0.226	0.627	0.167
Vacas					
2948 (PMR)	368b	2.38	0.77	52.4	1.37
21036 (PMR)	478ab	2.61	0.78	55.4	1.60
2936	494a	2.39	0.78	51.8	1.47
2976	440ab	2.54	0.82	52.0	1.34
EE	26.2	0.109	0.04	3.05	0.07
Pv	0.02	0.359	0.772	0.827	0.08

Los valores seguidos por letras diferentes difieren significativamente (Tukey-Kramer HSD, $P < 0.05$) entre filas para cada variable.

Se determinaron las variables acústicas Energía de las masticaciones de los movimientos compuestos (EM_{MC}), Energía de las masticaciones puras (EM_P) Energía de las masticaciones totales (EM_T) Energía de las masticaciones por gramo de MS (EM_{CMS}) y Energía de las masticaciones por bocado (E_B) para analizar el efecto de los tratamientos en los diferentes días y animales (Tabla 10). La energía total por bocado fue similar entre vacas con y sin suplemento y en los diferentes días de muestreo. Los resultados de las variables acústica muestran que el promedio general la energía por bocado 93.5 ± 3.83 y de 117.0 ± 3.64 por unidad de materia seca de

pastura ingerida. En general las masticaciones totales produjeron una energía de 81.2 ± 4.31 , con valores de 82.0 ± 4.60 para las masticaciones puras y 84.9 ± 4.51 para las masticaciones contenidas en los movimientos compuestos.

Tabla 10. Variables acústicas. Efecto de los tratamientos, variabilidad entre días y vacas.

	EM _{CMS}	EM _B	EM _P	EM _{MC}
Suplemento				
Con PMR	113.3	90.5	75.9	80.4
Sin PMR	119.0	95.1	85.0	87.1
EE	5.6	5.7	7.0	6.5
Pv	0.460	0.595	0.365	0.490
Días				
1	112.2	80.7	68.3b	83.1
2	119.9	104.2	83.6ab	89.2
3	109.0	87.7	79.5ab	68.0
4	116.1	90.3	67.0b	83.1
5	120.1	97.5	79.6ab	80.8
6	127.4	103.1	114.0a	105.0
EE	9.08	9.7	9.05	10.7
Pv	0.806	0.528	0.021	0.321
Vacas				
2948 (PMR)	121.0	98.0	83.7ab	94.5
21036 (PMR)	104.6	81.9	61.4b	67.0
2936	129.4	100.7	83.5ab	94.8
2976	113.7	94.4	89.8a	83.2
EE	6.19	7.73	6.72	8.25
Pv	0.063	0.362	0.039	0.088
Promedio general	117.0	93.5	82.0	84.9

Los valores seguidos por letras diferentes difieren significativamente (Tukey-Kramer HSD, $P < 0.05$) en cada variable.

IV. Discusión

El sistema de predicción de consumo a través del modelo acústico funciona porque predice similares CMS al sistema de referencia de AFRC a nivel diario y es coherente con otros antecedentes citados por la bibliografía. Se muestra la utilidad del método acústico para evaluar y explicar la respuesta productiva de las vacas en sistemas de base pastoril. El CMS de pasturas fue similar en las vacas Con y Sin PMR, evidenciando un efecto de adición de la PMR, sin una sustitución evidente de la materia seca de pasturas consumidas en las vacas suplementadas con PMR.

Desempeño de los modelos acústicos.

Los resultados muestran que el método acústico tiene la ventaja de detectar con precisión y en forma simultánea variaciones individuales entre animales y entre días de variables del comportamiento, relevantes para el manejo del rodeo. El tiempo de pastoreo, la tasa de consumo y la tasa de bocados no mostraron diferencias entre las vacas con o sin PMR, pero si entre animales y entre distintos días, brindando información muy valiosa para el diagnóstico de problemas en el manejo de la alimentación de los rodeos lecheros. Permite mostrar la variabilidad diaria de CMS de pasturas entre vacas y días, que no es posible con el uso de otros métodos de medición. El CMS_4 y CMS_{Req} no presenta diferencias entre los tratamientos con o sin PMR, pero se pueden observar importantes variaciones individuales entre las vacas

Un aspecto importante para destacar es que el método funciona adecuadamente sin necesidad de calibrar los modelos de predicción aunque las variables de comportamiento ingestivo sean marcadamente diferentes a las que le dieron origen en base a las pasturas de alfalfa y raigrás anual (Tabla 2, Capítulo 2). Por un lado, la tasa de consumo promedio fue 2.4 kgMS/hora, menores a los 2.9 kgMS/hora de los ensayos originales, lo mismo que los pesos de bocado (0.79 gMS vs. 1.50 gMS) que fueron cercanos a la mitad del peso del promedio obtenido en la parametrización de los modelos. En sentido inverso, las tasas de bocados (53.0 vs. 30.8 bocados/minuto) y el número de masticaciones por gCMS (1.44 vs. 1.04 masticaciones totales/gMS) fueron mayores que a las registradas en la generación de los modelos.

El método acústico en la variante MOD_4 aparece como el modelo que mejor se acerca a las predicciones basadas en los requerimientos (MOD_{Req}) con valores similares ($P < 0.05$) de

CMS y eficiencia de conversión. El MOD₁ basado exclusivamente en la EM_T predijo un menor CMS, esa posible subestimación puede atribuirse a las altas tasas de consumo que expresaron las vacas y que pueden explicarse por una alta proporción de movimientos compuestos, los MC suman kgMS sin mayores cambios en la EM_{CMS}. Probablemente la adición en el MOD₄ del número de movimientos compuestos, se refleja en resultados más próximos a los calculados con el MOD_{Req}. Es importante analizar estas respuestas ya que demuestra lo robusto que es el modelo al adaptarse a situaciones distintas en términos de tasas de consumo respecto a los experimentos que se utilizaron para generar estos consumos.

El MOD₅, que incluye el efecto de la especie (alfalfa vs. raigrás), no fue el modelo que más se acercó a MOD_{Req}, aunque en las pasturas había un predominio importante de gramíneas en estado vegetativo. Seguramente hubo alguna o varias características particulares que diferenciaron a las pasturas de alfalfa y raigrás, y que no estuvieron comprendidas dentro de todas las variables utilizadas oportunamente para desarrollar el modelo, que no tuvieron un efecto relevante en el CMS de este estudio de caso. Este resultado también apoya concluir que se pueden desarrollar modelos generales que realicen predicciones precisas del CMS en pasturas que incluyen a más de una especie o familia de plantas forrajeras, sin necesidad de calibraciones particulares.

El MOD₄ predice el CMS a través de la integración de variables del comportamiento ingestivo obtenidas a través del registro de los sonidos con una probada alta precisión (ej. tiempo de pastoreo, tasa de bocados, tasa de movimientos mandibulares, etc). Esta característica le brinda mucha confiabilidad al método, ya que permite detectar con relativa facilidad valores atípicos (outliers) de CMS. Por ejemplo, vacas con tiempos de pastoreo muy cortos no deberían rendir CMS diarios muy altos, o también se puede verificar si los pesos de bocados o tasas de consumo estimadas resultan en valores “factibles”, como criterio de aceptación o rechazo de los resultados de CMS estimados.

Comportamiento ingestivo y consumo diario

El principal objetivo de este trabajo fue evaluar el desempeño del método acústico en situaciones reales de producción. El bajo número de vacas utilizadas (repeticiones) no permite una discusión sólida de los resultados obtenidos en respuesta a los distintos tratamientos. Sin embargo, recupera valor al considerarse en un contexto metodológico de estudio de caso.

Para este caso, se esperaba que el CMS de pasturas y el tiempo de pastoreo se redujeran por el efecto de la suplementación con PMR, pero el trabajo no presenta evidencia de este proceso.

Generalmente, el CMS de pasturas las vacas en pastoreo disminuye cuando reciben suplemento respecto a cuándo no son suplementadas. Los animales sustituyen el consumo de una determinada cantidad de pastura por el suplemento. Esa disminución es proporcional (tasa de sustitución) a la cantidad de suplemento y es uno de los principales factores que explican la variación observada en la respuesta en producción de leche (Kellaway y Porta, 1993; Stockdale, 2000). Por otro lado, en situaciones donde los animales no disminuyen el consumo de pasturas o lo hacen en menor grado (tasa de sustitución < 1) aumenta el CMS total de forrajes.

Los CMS de pasturas estimados fueron mayores a los esperados, aunque se encuentran dentro del rango esperado según los antecedentes, ajustados a los niveles diarios de producción de leche (41,2 kg/vaca), suplementación (PMR + concentrados= 6.8 kgMS) y asignación de pasturas (30 o 40 kgMS/vaca) utilizados. Por ejemplo, Watt et al. (2015) en el mismo VMS y en condiciones muy similares a este caso en estudio, reportaron consumos promedio de pasturas de 15.3 y 17.1 kgMS diarios, para las asignaciones diarias de 30 y 40 kgMS de pasturas, pero con vacas de menor producción diaria en cada grupo (22.8 y 36.7 kg de leche), en comparación a este caso.

En pasturas de alta calidad sin suplementación, en vacas lecheras de 29.6 kg diarios de producción, se han registrado CMS diarios de 19.0 kg (Kolver y Muller, 1998) similares a los obtenidos en este trabajo con vacas de mayor producción y suplementación. Vibart et al.,(2008) con vacas de 33.2 kg diarios de producción de leche recibiendo una suplementación de 4.6 kgMS registraron consumos de pasturas de 17.3 kgMS. Otros autores, con mayor nivel de

suplementación (7.1 kgMS) y vacas de 30.6 kg de leche/día, obtuvieron CMS diarios de pasturas de 14.5 kg (Quillaguy et al., 2010). También, se ha registrado que el CMS de vacas lecheras no suplementadas aumentaba de 17.7 kg/d a 20.5 kg/d cuando la asignación diaria de pastura se incrementaba de 25 a 40 kgMS / vaca (Bargo et al., 2002). Cuando las vacas en pastoreo son suplementadas con forrajes groseros (silaje, henos, PMR) se espera una mayor sustitución de la pastura y menor aumento del CMS total, que cuando son suplementadas con concentrados (Kolver y Muller, 1998, Vibart et al., 2008, Bargo et al., 2002, Quillaguy et al., 2010). En este estudio no se registró esta sustitución. Las vacas alcanzaron niveles de CMS esperados para animales sin suplementación y no se hubo diferencias en las vacas que recibieron PMR y las que no. Los resultados sugieren que las vacas suplementadas, básicamente adicionaron los kgMS de PMR al consumo de pastura y concentrados, justificando de esta manera la diferencia en producción de leche diaria obtenida.

El alto consumo de pasturas podría explicarse por el mayor tiempo que disponen las vacas para el pastoreo en los VMS respecto a los sistemas de ordeño convencionales, pero este supuesto no estaría respaldado por los registros de comportamiento ingestivo. En sistemas con dos horarios fijos de ordeño, Bargo et al. (2002) observaron tiempos de pastoreo promedios cercanos a 9.5 horas con niveles de concentrados de 8.7 kgMS. En este estudio el tiempo promedio de pastoreo estimado por el método acústico fue de 7.45 hs (448 min) para vacas que recibieron 6.8 kgMS de concentrado y no hubo un efecto de la suplementación diferencial con 4 kgMS de PMR en el tiempo de pastoreo. Los tiempos de pastoreo resultaron muy próximos a las 7.8 hs registradas por Sayers (1999) con vacas lecheras pastoreando raigrás perenne y suplementadas con 6 kgMS promedio de concentrado, pero estos autores encontraron, diferencias significativas en los tiempos de pastoreo en respuesta a distintos niveles de suplementación con concentrados, 7.0 y 6.6 hs de pastoreo para 5 y 10 kgMS, de suplemento, respectivamente.

Respecto a las diferencias en asignación diaria de pasturas, algunos estudios previos (Hodgson y Brookes, 1999; Wales et al., 2001) muestran cómo puede aumentar el tiempo de pastoreo en respuesta a un aumento en la asignación diaria de pasturas. En este experimento ese efecto tampoco se manifestó, el tiempo de pastoreo no se vio afectado significativamente por las diferencias en la asignación diaria de forrajes entre las vacas con y sin PMR.

Si los tiempos de pastoreo no explican el alto consumo de pasturas, entonces se podría explicar por una alta tasa de consumo, como resultado de mayores tasas de bocados y/o peso de bocados. Se obtuvieron tasas de bocados (51.9 – 54.1 bocados/minuto) próximos a los promedios (58 bocados/minuto) informados por varios autores (Bargo et al., 2002; Delagarde et al., 1997; Gibb et al., 1997; Sayers, 1999) pero los pesos de bocado (0.78-0.80 vs. 0.46 gMS, rango= 0.35-0.64 gMS) y las resultantes tasa de consumo (2.45-2.5 vs. 1.5 kgMS/h, rango= 1.2–1.72 kgMS/h) fueron marcadamente mayores comparadas con aquellos trabajos.

Por otro lado, McCarthy et al. (2007) en sistemas de base pastoril de bajo nivel de suplementación (1-3 kg concentrado/día) informan consumos de pasturas cercanos a los 19-20 kgMS/día con altas de consumo de pasturas (1.8-2.4 kgMS/hora), pero explicadas por las altas tasas de bocados (superiores a 60 bocados/min) más que por los pesos de bocados cercanos a los 0.6 gMS. Similares tasas de consumo que en este estudio, pero menores pesos de bocados podrían estar explicadas por la diferencia en el nivel de producción diaria individual de las vacas utilizadas (41.2 vs. 20.2 kg). Los mayores pesos de bocado pueden ser una respuesta a una mayor motivación del animal por consumir. Las vacas de mayor producción modifican su comportamiento ingestivo con el objetivo de aumentar su tasa de consumo de energía, aumentando las dimensiones del bocado, y no la tasa de bocados (Gregorini et al., 2007).

Actualmente, el tiempo y el costo de medir las variables de comportamiento ingestivo en un gran número de vacas resultan excesivos. Los resultados de este estudio sugieren que el método acústico podría ayudar a resolver estas limitantes. Para ello deberían dirigirse más esfuerzos a la detección y clasificación automática de características del comportamiento ingestivo que resultan fácilmente medibles a través del registro del sonido.

La telemetría acústica presenta un futuro promisorio para su uso en ganadería de precisión, pero un cuello de botella importante es la necesidad de procedimientos automáticos que sean apropiados y sólidos para identificar y segmentar las actividades (turnos de pastoreo) y eventos masticatorios (bocados, masticaciones puras y movimientos compuestos) en situaciones reales de pastoreo. Chelotti et al. (2016) destacan que para el desarrollo de un este tipo de sistemas es necesario que en el registro y análisis de las señales acústicas se ponga especial

atención a distintas situaciones. Se debe considerar el ruido ambiental que puede degradar la calidad de la señal y disminuir el desempeño del sistema (ej. instalaciones, maquinaria, otros animales). También se debe tener presente que el reconocimiento de eventos ingestivos es una combinación de detección y clasificación, y es necesario que ambos sean realizados con éxito y alta precisión. Finalmente, la ganadería de precisión requiere que esos algoritmos (detección y clasificación) sean de bajo costo y alto rendimiento para poder incorporarlos y ejecutarlos en tiempo real en dispositivos portátiles, de forma de que permitan ser escalados para su aplicación en grandes rodeos.

V. Conclusiones

En general, se considera muy importante poder cuantificar con precisión y rapidez el comportamiento alimenticio y consumo de forrajes de los rumiantes, para la desarrollar herramientas de gestión para el manejo eficiente de los rodeos y los recursos forrajeros, así como también para la salud y bienestar animal. En particular, y en base a los resultados obtenidos, se espera que la posibilidad de identificar y cuantificar el comportamiento ingestivo y el CMS de las vacas en pastoreo mejore la eficiencia productiva de los sistemas de producción de leche y carne. Este trabajo presenta evidencias muy robustas de la utilidad del método acústico para el análisis del comportamiento ingestivo y la predicción del CMS en vacas lecheras. El método acústico resultó ser una herramienta eficaz para el cálculo de CMS en pastoreo, permitiendo obtener valores de consumos precisos y comparables con los obtenidos con el sistema AFRC (MOD_{Req}).

Además, los modelos acústicos predicen mayor variabilidad en los CMS que el MOD_{Req} , y la capacidad para detectar este comportamiento es relevante cuando se analiza la respuesta productiva individual de los animales ante variaciones en el manejo de la alimentación (ej, nivel de suplementación).

El MOD_4 a través de la energía total de las masticaciones (EM_T), la tasa de movimientos mandibulares (MM_T), el número de movimientos compuestos (MC) y la energía de las masticaciones de los movimientos compuestos (EM_{MC}), permiten predecir el CMS durante el día, habilitando así un monitoreo en tiempo real del comportamiento animal, situación imposible de cuantificar con los sistemas de registros actuales de pastoreo.

El método acústico permite determinar exactamente el tiempo que los animales dedicaron al pastoreo, en el caso de este ensayo se registraron altas tasas de CMS, éstos datos permitirían explicar la alta producción de leche de 44.7 y 37.8 kg para los tratamientos con y sin PMR en vacas de 102 días promedio en lactancia (Tabla 7)

A partir del registro acústico se puede determinar el tiempo pastoreo (min) real de los animales, la tasa de CMS (kg/h), el peso del bocado (gMS) y la tasa de bocados (bocados/min). Esta información sería de gran relevancia para modificar asignaciones de pasturas o identificar problemas en tiempo real. Este método permitiría conocer e identificar posibles mecanismos compensatorios de consumo en las vacas, que explicarían variaciones en producción dentro de un mismo rodeo.

El análisis de las variables acústicas nos permite inferir que las variables EM_P , EM_{CMS} o EM_B no son afectadas por el tipo de dieta, los animales ni el día de muestreo, pudiendo ser utilizada en situaciones de producción diferentes. Esto es importante porque es una de las variables más relevantes del modelo MOD_4 , seleccionado en este trabajo.

Explicar el comportamiento ingestivo de los animales en pastoreo permitiría analizar la relación animal/planta con datos objetivos para poder así empezar a comprender el complejo sistema de pastoreo.

Agradecimientos

Se agradece al Dr. Santiago Utsumi (MSU) por su ayuda en el diseño y elaboración de la base de datos. Al personal del KBS Robotic Dairy Farm por su importante ayuda y dedicación durante el trabajo de campo. A Lucy Watts por las fotografías de las vacas en pastoreo. Este trabajo fue parcialmente financiado por la Universidad Nacional de Rosario, proyectos 2013-AGR216, 2016-AGR266 y 80020180300053UR. También se utilizaron recursos directos de la AgBioResearch-Michigan State University.

DISCUSIÓN GENERAL

La generación de información que permita validar y proponer el uso del método acústico de estimación de consumo en pastoreo en el largo plazo, es inédita. Este método permite no solo identificar y medir el número de los distintos movimientos mandibulares, sino cuantificar el número y duración de las masticaciones y posibilita describir en detalle el proceso que ocurre entre los dientes y el forraje ingerido en cada uno de esos movimientos. Estas mediciones son muy útiles para comparar y explicar el comportamiento ingestivo en diferentes pasturas y derivar modelos para la predicción del consumo de materia seca basados en los sonidos producidos por los animales durante la ingestión del alimento.

Los resultados de este trabajo respaldan un buen desempeño del método acústico para estimar de consumo en pastoreo en pasturas de alfalfa y raigrás anual con diferentes contenido de materia seca (247 vs. 155 g/kg) y fibra (268 vs. 396 g/kg). Los resultados muestran que en las situaciones de pastoreo en sistemas reales de producción, es probable que no sea necesaria la calibración.

Consumo y comportamiento ingestivo en el corto plazo

Los resultados muestran que por un lado, pueden obtenerse tasas de consumo muy similares en distintas situaciones de pastoreo, a pesar de las diferencias en los pesos de bocado y como el contenido de FDN puede tener un efecto significativo sobre el comportamiento ingestivo y las tasas de consumo. Las vacas tuvieron mayor tasa de bocados en la alfalfa, asignando movimientos mandibulares a movimientos compuestos y menor cantidad de masticaciones exclusivas por bocado. En algunas situaciones, cuando arrancan bocados más pesados y a través de la asignación de una mayor proporción de movimientos compuestos, las vacas son más eficientes y procesan el forraje ingerido con mayor velocidad. A través de este mecanismo pueden obtener mayores pesos de los bocados, pero sin reducir la tasa de bocados. De esta manera, se explican las altas tasas de consumo obtenidas. Varios trabajos previos también han obtenido evidencias claras de este proceso, tanto en vacunos (Laca et al., 1994, Ungar y Rutter, 2006, Galli et al., 2017) como en ovinos (Galli et al., 2011), demostrando que los cambios en la tasas de bocados se deben, en mayor medida, a la asignación del tipo de evento a cada movimiento mandibular (ej. proporción de movimientos compuestos) que a variaciones en la tasa

de movimientos mandibulares. Las tasas de bocados varían en forma importante, mientras que las tasas de movimientos mandibulares se mantienen muy similares.

Estimación del consumo.

El diseño experimental en su conjunto ofreció un marco robusto para probar la estimación del consumo de materia seca en condiciones de pastoreo. Mediante las cuatro situaciones diferentes de pastoreo se generó un rango amplio de valores de consumo de materia seca, de peso de bocados y de relaciones entre el consumo de materia seca y comportamiento ingestivo. La relación entre EMT y CMS fue lineal, a pesar de las diferencias en el contenido de MS y FDN de los forrajes. El raigrás tenía mayor concentración de FDN que la alfalfa y por eso requirió más masticaciones, pero la EM_T por unidad de CMS (EM_{CMS}) fue similar.

En este trabajo en coincidencia con Laca y WallisDeVries (2000) se demuestra que el sonido de las masticaciones es un buen predictor porque refleja las diferencias en la cantidad de forraje procesado en cada masticación. La relación negativa entre el peso de los bocados y las masticaciones por gCMS está relacionada con la eficiencia de la masticación. Ese mayor número de masticaciones no implica un aumento significativo en la EM_{CMS} aun cuando las diferencias de peso de los bocados fueron muy variables.

Se puede establecer que el método acústico proporciona buenas estimaciones de CMS en pasturas que incluyan distintas especies de gramíneas y leguminosas. Los modelos que incluyen los efectos de las especies ($R^2= 0.90$, $CV= 12.8\%$), o la condición ($R^2= 0.92$, $CV= 11.9\%$) muestran que tan preciso puede ser el método si se conoce cuál es el tipo de forraje que las vacas están pastoreando (alfalfa o raigrás, inicial o rebrote), aunque los modelos sin las especies y condición de pastoreo también son buenos predictores y la pérdida de precisión es mínima ($R^2= 0.90$, $CV= 13\%$). Esta investigación aporta nuevos conocimientos sobre el proceso de ingestión durante el pastoreo de rumiantes. La combinación de las distintas situaciones de pastoreo, junto con la metodología de estimación del consumo individual y la grabación acústica de los sonidos ingestivos de las vacas lecheras, permitió probar las predicciones del CMS basados en los sonidos de las masticaciones, y al mismo tiempo aporta información muy valiosa sobre la regulación de las tasas de consumo.

Desempeño de los modelos acústicos.

El sistema de predicción de consumo a través del modelo acústico funciona porque predice similares CMS al sistema de referencia de AFRC a nivel diario y es coherente con otros antecedentes de citados por la bibliografía. Los resultados muestran que el método acústico tiene la ventaja de detectar con precisión y en forma simultánea variaciones individuales entre animales y entre días de variables del comportamiento, relevantes para el manejo del rodeo. Permite mostrar la variabilidad diaria de CMS de pasturas entre vacas y días, que no es posible con el uso de otros métodos de medición. El método funciona adecuadamente sin necesidad de calibrar los modelos de predicción aunque las variables de comportamiento ingestivo sean marcadamente diferentes a las que le dieron origen en base a las pasturas de alfalfa y raigrás anual.

El método acústico en la variante MOD₄ aparece como el modelo que mejor se acerca a las predicciones basadas en los requerimientos (MOD_{Req}) con valores similares ($P < 0.05$) de CMS y eficiencia de conversión. El MOD₄ predice el CMS a través de la integración de variables del comportamiento ingestivo obtenidas a través del registro de los sonidos con una probada alta precisión (ej. tiempo de pastoreo, tasa de bocados, tasa de movimientos mandibulares, etc). A partir de los resultados obtenidos se pueden desarrollar modelos generales que realicen predicciones precisas del CMS en pasturas que incluyen a más de una especie o familia de plantas forrajeras, sin necesidad de calibraciones particulares.

Comportamiento ingestivo y consumo diario

El tiempo y el costo de medir las variables de comportamiento ingestivo en un gran número de vacas resultan excesivos. Los resultados de este estudio sugieren que el método acústico podría ayudar a resolver estas limitantes. Para ello deberían dirigirse más esfuerzos a la detección y clasificación automática de características del comportamiento ingestivo que resultan fácilmente medibles a través del registro del sonido. En este experimento los CMS de pasturas estimados fueron mayores a los esperados, aunque se encuentran dentro del rango esperado según los antecedentes, ajustados a los niveles diarios de producción de leche (41.2 kg/vaca), suplementación (PMR + concentrados= 6.8 kgMS) y asignación de pasturas (30 o 40 kgMS/vaca) utilizados. Las vacas alcanzaron niveles de CMS esperados para animales sin suplementación y

no se hubo diferencias en las vacas que recibieron PMR y las que no. Los resultados sugieren que las vacas suplementadas, básicamente adicionaron los kgMS de PMR al consumo de pastura y concentrados, justificando de esta manera la diferencia en producción de leche diaria obtenida.

El tiempo promedio de pastoreo estimado por el método acústico fue de 7.45 hs (448 min) para vacas que recibieron 6.8 kgMS de concentrado y no hubo un efecto de la suplementación diferencial con 4 kgMS de PMR en el tiempo de pastoreo. Los tiempos de pastoreo resultaron muy próximos a las 7.8 hs registradas por Sayers (1999) con vacas lecheras pastoreando raigrás perenne y suplementadas con 6 kgMS promedio de concentrado, pero estos autores encontraron, diferencias significativas en los tiempos de pastoreo en respuesta a distintos niveles de suplementación con concentrados, 7.0 y 6.6 hs de pastoreo para 5 y 10 kgMS, de suplemento, respectivamente. El tiempo de pastoreo no se vio afectado significativamente por las diferencias en la asignación diaria de forrajes entre las vacas con y sin PMR.

Se obtuvieron tasas de bocados (51.9 – 54.1 bocados/minuto) próximos a los promedios (58 bocados/minuto) informados por varios autores (Bargo et al., 2002; Delagarde et al., 1997; Gibb et al., 2002; Sayers, 1999) pero los pesos de bocado (0.78-0.80 vs. 0.46 gMS, rango= 0.35-0.64 gMS) y las resultantes tasa de consumo (2.45-2.5 vs. 1.5 kgMS/h, rango= 1.2–1.72 kgMS/h) fueron marcadamente mayores comparadas con aquellos trabajos. Las vacas de mayor producción modifican su comportamiento ingestivo con el objetivo de aumentar su tasa de consumo de energía, aumentando las dimensiones del bocado, y no la tasa de bocados (Gregorini et. al., 2007).

CONCLUSIÓN FINAL

La predicción del consumo de las vacas en pastoreo sigue siendo un desafío necesario de resolver, no sólo para la toma de decisiones en los sistemas de producción animal, sino también para comprender la ecología del pastoreo en un amplísimo rango de situaciones. La gran cantidad de variables que deberían definirse para alimentar modelos empíricos que permitan estimaciones precisas en situaciones muy diversas, hacen dudar que esa sea la vía probable para alcanzar esos objetivos. Por lo tanto, el desarrollo de nuevos métodos que integren la mayor cantidad de variables de modelos mecanicistas (como el comportamiento ingestivo) parece ser el camino a

seguir para obtener predicciones precisas del consumo de materia seca en distintas escalas espacio-temporales.

Por otro lado, la ganadería de precisión requiere de información precisa, disponible en tiempo real o con una frecuencia muy alta, para que sea su uso sea eficaz. En consecuencia, los avances en la metodología deben acompañarse con la mejora de las tecnologías basadas en sensores remotos y la automatización del procesamiento de la información. Los resultados de esta tesis refuerzan los antecedentes que señalan que mediante el método acústico es posible avanzar en este sentido. Se demuestra que es factible obtener información precisa para analizar el comportamiento ingestivo y estimar el CMS en vacas en pastoreo. Los hallazgos de este estudio refuerzan la idea que se pueden desarrollar modelos de predicción del CMS aplicando predicciones generalizadas basadas en el sonido de las masticaciones y usar la EM como principal predictor en turnos completos de pastoreo.

Las diferencias de especie, %MS, %FDN o condición de pastoreo entre forrajes frescos no afectan la energía del sonido de las masticaciones por gMS y se obtuvieron buenas estimaciones de CMS a partir de modelos acústicos generales. La energía del sonido de las masticaciones por gramo de materia seca consumida parece variar muy poco en respuesta al tipo de forraje y el nivel de CMS, a pesar que las masticaciones por gMS fueron muy dependientes de la situación de pastoreo. Por lo tanto el método se puede utilizar en condiciones diferentes de pasturas sin necesidad de calibración, incluso cuando varias especies estén presentes.

El MOD4 a través de la energía total de las masticaciones (EMT), la tasa de movimientos mandibulares (MMT), el número de movimientos compuestos (MC) y la energía de las masticaciones de los movimientos compuestos (EMMC), permite predecir el CMS durante el día, habilita así un monitoreo en tiempo real del comportamiento animal, situación imposible de cuantificar con los sistemas de registros actuales de pastoreo. El análisis de las variables acústicas permite inferir que las variables EM_P , EM_{CMS} o EM_B no son afectadas por el tipo de dieta, los animales ni el día de muestreo, puede ser utilizado en situaciones de producción diferentes.

Explicar el comportamiento ingestivo de los animales en pastoreo permite analizar la relación animal/planta con datos objetivos para poder así empezar a comprender el complejo sistema de pastoreo.

BIBLIOGRAFÍA

1. AGRICULTURAL RESEARCH COUNCIL. 1980. The nutrient requirements of ruminant livestock. Editorial: Farnham Royal, England: Published on behalf of the Agricultural Research Council by the Commonwealth Agricultural Bureaux. Páginas: 351.
2. ALKON, P.; COHEN, Y.; JORDAN, P. 1989. Towards an acoustic biotelemetry system for animal behaviour studies. *The Journal of Wildlife Management*. Volumen: 53, páginas: 658-662.
3. ANDERSON, D.; WINTERS, C.; ESTELL, R.; FREDRICKSON, E.; DONIEC, M.; DETWEILER, C.; RUS, D.; JAMES, D.; NOLEN, B. 2012. Characterizing the spatial and temporal activities of free-ranging cows from GPS data. *Rangeland Journal*. Volumen: 34, páginas: 149-161.
4. ANDRIAMANDRIOSO, A.; BINDELLE, J.; MERCATORIS, B.; LEBEAU, F. 2016. A review on the use of sensors to monitor cattle jaw movements and behavior when grazing. *Biotechnology Agronomy Society and Environment*. Volumen: 20, páginas: 273-286.
5. AUDACITY® 2.4.2. 2019. Audacity Team. Web site: <https://audacityteam.org/>. It is free software distributed under the terms of the GNU General Public License.
6. BAILEY, D.; GROSS, J.; LACA, E.; RITTENHOUSE, L.; COUGHENOUR, M.; SWIFT, D.; SIMS, P. 1996. Mechanisms that result in large herbivore grazing distribution patterns. *Journal of Range Management*. Volumen: 49, páginas: 386-400. DOI: 102307/4002919
7. BAILEY, D.; PROVENZA, F. 2008. Mechanisms determining large-herbivore distribution. En: *Resource ecology: Spatial and temporal dynamics of foraging*. Editorial: Prins HHT; van Langeveld F. Capítulo: 2, páginas: 7-29.
8. BAKER, R. 2004. Estimating herbage intake from animal performance. En: *Herbage intake handbook*. Editorial: P.D. Penning. British Grassland Society. Páginas: 95-149.
9. BARGO, F.; MULLER, J.; DELAHOY, T.; CASSIDY, W. 2000. Performance of high producing dairy cows with three different feeding systems combining pasture or total mixed rations. *Journal of Dairy Science*. Volumen: 85, páginas: 2948-2963
10. BARGO, F.; MULLER, J.; DELAHOY, T.; CASSIDY, W. 2002. Milk response to concentrate supplementation of high producing dairy cows grazing at two pasture allowances. *Journal of Dairy Science*. Volumen: 85, páginas 1777-1792.

11. BEAUCHEMIN, K.; ZELIN, S.; GENNER, D.; BUCHANAN-SMITH, J. 1989. An automatic system for quantification of eating and ruminating activities of dairy cattle housed in stalls. *Journal of Dairy Science*. Volumen: 72, páginas: 2746-2759.
12. BLACK, J.; KENNEY, P. 1984. Factors affecting diet selection by sheep. II. Height and density of pasture. *Australian Journal of Agricultural Research*. Volumen: 35, páginas: 565–57.
13. BONNET, O.; MEURET, M.; TISCHLER, M.; CEZIMBRA, I.; AZAMBUJA, J.; DE FACCIO CARVALHO, P. 2015. Continuous bite monitoring: A method to assess the foraging dynamics of herbivores in natural grazing conditions. *Animal Production Science*. Volumen: 55, páginas: 339-349.
14. CARVALHO, P. 2013. Harry Stobbs memorial lecture: Can grazing behaviour support innovations in grassland management? *Tropical Grasslands on line Journal*. Volumen; 1, páginas: 137–155.
15. CHAMBERS, A.; HODGSON, J.; MILNE, J. 1981. The development and use of equipment for the automatic recording of ingestive behavior in sheep and cattle. *Grass and Forage Science*. Volumen 36, páginas: 97-105.
16. CHELOTTI, J.; VANRELL, S.; MILONE, D.; UTSUMI, S.; GALLI, J.; RUFINER, L.; GIOVANINI, L. 2016. A real time algorithm for acoustic monitoring of ingestive behavior of grazing cattle. *Computers and Electronics in Agriculture* Volumen: 127, páginas 64-75. DOI:10.1016/j.compag.2016.05.015
17. DE BOEVER, J.; ANDRIES, J.; DE BRABANDER, D.; COTTYN, B.; BUYSSE, F. 1990. Chewing activity of ruminants as a measure of physical structure. A review of factors affecting it. *Animal Feed Science and Technology*. Volumen; 27, páginas: 281-291.
18. DELAGARDE, R.; PEYRAUD, J.; DELABY, L. 1997. The effect of nitrogen fertilization level and protein supplementation on herbage intake, feeding behavior and digestion in grazing dairy cows. *Animal Feed Science and Technology*. Volumen: 66, páginas: 165-180.

19. DOVE, H.; MAYES, R. 1991. The use of plan alkanes as marker substances in studies of the nutrition of herbivores: a review. *Australian Journal of Agricultural Research*. Volumen: 42, páginas: 913-952.
20. DUCKWORTH, J.; SHIRLAW, D. 1995. The development of an apparatus to record the jaw movements of cattle. *The British Journal of Animal Behavior*. Volumen: 3, páginas: 56-60.
21. EATON, J.; BATEMAN, W.; HAUBERG, S.; WEHBRING, R. 2019. GNU Octave version 5.2.0 manual: a high-level interactive language for numerical computations. URL <https://www.gnu.org/software/octave/doc/v5.2.0/>
22. FRANZLUEBBERS, A.; PAINE, L.; WINSTEN, J.; KROME, M.; SANDERSON, M.; OGLES, K.; THOMPSON, D. 2012. Well-managed grazing systems: a forgotten hero of conservation. *Journal of Soil and Water Conservation*. Volumen: 67, páginas: 100-104. <https://doi.org/10.2489/jswc.67.4.100>.
23. GALLI, J.; CANGIANO, C.; FERNÁNDEZ, H. 1999. ConPast 3.0. Software y Manual operativo. En: Conpast 3.0. Programa de computación para la estimación del consumo de bovinos en pastoreo Ed. C. Cangiano. INTA Balcarce.
24. GALLI, J.; CANGIANO, C.; DEMMENT, M.; LACA, E. 2006 a. Acoustic monitoring of chewing and intake of fresh and dry forages in steers. *Animal Feed Science and Technology*. Volumen: 128, páginas: 14-30.
25. GALLI, J.; CANGIANO, C.; PECE, M.; LARRIPA, M.; LACA, E. 2006 b. Uso del sonido en el análisis de la tasa de consumo de bovinos. *Revista Argentina de Producción Animal*. Volumen 26., suplemento 1, páginas: 165-167.
26. GALLI, J. 2008. Medición acústica del comportamiento ingestivo y del consumo de rumiantes en pastoreo. Tesis doctoral. Doctorado en Ciencias Agrarias, Facultad de Ciencias Agrarias – Universidad Nacional de Mar del Plata, Balcarce. Página: 168.
27. GALLI, J.; CANGIANO, C.; LACA, E. 2010. Medición acústica del consumo en ovejas en pastoreo. *Revista Argentina de Producción Animal*. Volumen: 30, suplemento: 1, páginas: 385-386.
28. GALLI, J.; CANGIANO, C.; LACA, E. 2011. Acoustic monitoring of short-term ingestive behavior and intake in grazing sheep. *Livestock Science*. Volumen 140, páginas: 31-41.

29. GALLI, J.; CANGIANO, C.; PECE, M.; LARRIPA, M.; MILONE, D.; UTSUMI, S.; LACA, E. 2017. Monitoring and assessment of ingestive chewing sounds for prediction of herbage intake rate in grazing cattle. *Animal*. Volumen 12, páginas: 973-982. <https://doi.org/10.1017/S1751731117002415>
30. GIBB, M.; ORR, R. 1997. Grazing behavior of ruminants. *IGER innovations*. Volumen: 1, páginas: 54-57
31. GORDON, I. 1995. Animal-based techniques for grazing ecology research. *Small Ruminant Research*. Volumen 16, páginas: 203-214.
32. GREENWOOD P.; VALENCIA P.; OVERS L.; PAULL D.; PURVIS I. 2014 New ways of measuring intake, efficiency and behavior of grazing livestock. *Animal Production Science*. Volumen: 54, páginas: 1796-1804.
33. GREGORINI, P.; GUNTER, S.; MASINO, C.; BECK, P. 2007. Effect of ruminal fill on short term intake rate and grazing dynamics. *Grass and Forage Science*. Volumen: 62, páginas: 346-354.
34. GRIFFITHS, W.; HODGSON, J.; ARNOLD G. 2003. The influence of sward canopy structure on foraging decisions by grazing cattle. *Grass and Forage Science*. Volumen: 58, páginas: 112-124.
35. HODGSON J., BROOKES I. 1999. Nutrition of grazing animals. *New Zealand Pasture and Crop Science*. Editorial: Auckland, New Zealand: Oxford University Press. Página: 117.
36. HUCKLE, C.; NUTHALL R.; GIBB M. 1994. The use of short term weight changes to measure intake rates in grazing dairy cattle. Fourth BGS Research Conference. British Grassland Society. Páginas: 157-158.
37. KELLAWAY, R.; PORTA, S. 1993. Feeding concentrates supplements for dairy cows. Dairy Research and Development Corporation. Glen Iris, Victoria Australia 353 páginas.
38. KLEIN, L.; BAKER, S.; PURSER, D.; ZANICH, A.; BRAY, A.: 1994. Telemetry to monitor sounds and chews during eating and rumination by grazing sheep. *Proceeding Australian Society Animal Production*. Volumen: 20, página: 423.

39. KOLVER, E.; MULLER, L. 1998. Performance and nutrient intake of high producing Holstein cows consuming pasture or a total mixed ration. *Journal of Dairy Science*. Volumen: 81, páginas: 1403-1411.
40. LACA, E.; DEMMENT, M. 1991. Herbivory: the dilemma of foraging in a spatially heterogeneous food environment. En: Palo, R.; Robbins, C. editores. *Plant Defenses Against Mammalian Herbivory*. CRC Press. Boca Ratón, Florida. Páginas: 60.
41. LACA, E.; UNGAR, E.; SELIGMAN, N.; DEMMENT, M. 1992. Effects of sward height and bulk density on bite dimensions of cattle grazing homogeneous swards. *Grass Forage Science*. Volumen: 47, páginas: 91-102.
42. LACA, E.; UNGAR, E.; DEMMENT, M. 1994. Mechanisms of handling time and intake rate of a large mammalian grazer. *Applied Animal Behavior Science*. Volumen: 39, páginas: 3-19.
43. LACA, E.; UNGAR, E.; SELIGMAN, N.; RAMEY, M.; DEMMENT, M. 1994. An integrated methodology for studying short-term grazing behavior of cattle. *Grass and Forage Science*. Volumen: 47, páginas: 81-90.
44. LACA, E.; WALLIESDEVRIES, M. 2000. Acoustic measurement of intake and grazing behavior of cattle. *Grass and Forage Science*. Volumen: 55, páginas: 97-104.
45. LATINGA, E.; NEUTEBOOM, J.; MEIJS, J. 2004. Sward methods. En: *Herbage intake handbook*. Editorial: The British Grassland Society. Reading, 2nd edition. Páginas: 23-52.
46. LEE, W.; DEIBEL, A.; GLEIMBIN, C.; MUNDAY, E. 1988. Analysis of food crushing sounds during mastication: frequency-time studies. *Journal of Texture Studies*. Volumen: 19, páginas: 16-19.
47. MAYES R.; LAMB C.; COLGROVE, P. 1986. The use of dosed and herbage n-alkanes as markers for the determination of herbage intake. *Journal of Agricultural Science*. Volumen: 107, páginas: 161-170
48. MAYES, R.; DOVE, H. 2000. Measurement of dietary nutrient intake in free-ranging mammalian herbivores. *Nutrition Research Reviews*. Volumen: 13, páginas: 107-138.
49. MC CARTHY, S.; HORAN, M.; RATH, M.; LINNANE, P.; O'CONNOR, P. DILLON, P. 2007. The influence of strain of Holstein-Friesian dairy cow and pasture-based feeding

- system on grazing behavior, intake and milk production. *Grass and Forage Science*. Volumen 62, páginas: 13–26.
50. MEIJS, J. 1981. Herbage intake by grazing dairy cows. Pudoc, Wageningen. Agriculture Research Report. N°909. Página: 264.
51. MILONE, D.; GALLI, J.; CANGIANO, C.; RUFINER H.; LACA, E. 2012. Automatic recognition of ingestive sound of cattle based on hidden Markov models. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volumen 87, páginas 51-55.
52. MILONE, D.; PADRÓN, M.; GALLI, J.; CANGIANO, C.; RUFINER H. 2008. Automatic recognition of ingestive sounds of cattle based on hidden Markov models. XXXIV Conferencia Latinoamericana de Informática. Páginas: 1130-1138.
53. MILONE, D.; RUFINER, H.; GALLI, J.; LACA, E.; CANGIANO, C. 2009. Computational method for segmentation and classification of ingestive sounds in sheep. *Computers and Electronic in Agriculture*. Volumen: 65, páginas: 228-237.
54. MURSAN, A.; HUGHES, T.; NICOL, A.; SUGIURA, T. 1989. The influence of sward height on the mechanics of grazing in steers and bulls. *New Zealand Society Animal Production*. Volumen: 49, páginas: 233-236.
55. NADIN, L.; SÁNCHEZ CHOPA, F.; GIBB, M.; KUHN DA TRINDADE, J.; AZEVEDO DO AMARAL, G.; de FACCIO CARVALHO, P.; GONDA, H. 2012. Comparison of methods to quantify the number of bites in calves grazing winter oats with different sward heights. *Applied Animal Behavior Science*. Volumen: 139, páginas: 50-57.
56. NAVON, S.; MIZRACH, A.; HETZRONI, A.; UNGAR, E. 2013. Automatic recognition of jaw movements in free-ranging cattle, goats and sheep, using acoustic monitoring. *Biosystems Engineering*. Volumen: 114, páginas: 474-483.
57. NYDEGGER, F.; GYGAX, L.; ELI, W. 2010. Automatic measurement of rumination and feeding activity using a pressure sensor. *International conference on Agricultural Engineering –AgEng, 2010: Towards environmental technologies*. France. Cemagref.
58. OUDSHOORN, F.; CORNOU, C.; HELLWING, A.; HANSEN, H.; MUNKSGAARD, L.; LUND, P.; KRISTENSEN, T. 2013. Estimation of grass intake on pasture for dairy cows using tightly and loosely mounted di- and tri-axial accelerometers combined with bite count. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volumen: 99, páginas: 227–235.

59. PENNING, P.1983. Techniques for automatic recording of eating and rumination in sheep. *Applied Animal Ethology*. Volumen: 11, páginas: 71-72.
60. PENNING, P. 2004. Animal-based techniques for estimating herbage intake. En: *Herbage intake handbook*. Editorial: P.D. Penning. British Grassland Society. Páginas: 53-93.
61. QUILAGUY-AYURE, A., GAGLIOSTRO, G., GARCIARENA, D., ANTONACCI, L., CANGIANO, C. 2010. Production of dairy cows fed varying levels of total mixed ration and pasture. *Journal of Animal Science*. Volumen: 89, página: 158.
62. LAWRENCE, P.; BECKER, K. 1997. The use of vibration analysis and telemetry to measure bite frequency and intensity in free ranging horned ruminants. En: *Proceeding of XVIII International Grassland Congress*. Canada. Sección 5, páginas: 3-4.
63. RUS, M.; WOBSCHALL, A.; STORM, S.; KAUFFMAN, O. 2013. Daily-Check a sensor system for monitoring and analysis of the chewing activity of dairy cows. *Landtechnik*. Volumen: 68, páginas: 395-398.
64. RUTTER, S. 2000. Graze: a program to analyze recordings of the jaw movements of ruminants. *Behavior Research Methods, Instruments and Computers*. Volumen: 32, páginas: 86-92
65. RUTTER, S.; CAMPION, R.; PENNING, P. 1997. An automatic system to record foraging behavior in free ranging ruminants. *Applied Animal Behavior Science*. Volumen: 24, páginas: 185-195.
66. SAYERS, R. 1999. The effect of sward characteristics and level and type of supplement on grazing behavior, herbage intake and performance of lactating dairy cows. Ph.D. Thesis. Queen's University of Belfast. The Agricultural Research Institute of Northern Ireland. Hillsborough.
67. SPADA, M.; CANGIANO, C. 1991. El uso del disco en la estimación de la fitomasa aérea: una comparación con otros métodos. *Revista Argentina de Producción Animal*. Volumen: 11, páginas: 19-27.
68. STATISTICAL ANALYSIS SYSTEM (SAS), 2015. JMP® version 12. User's guide statistics. SAS Institute Inc., Cary, NC, USA.

69. STOBBS, T. 1973. The effect of plant structure on the intake of tropical pastures. I. Variation in the bite size of grazing cattle. Australian Journal of Agricultural Research. Volumen: 24, páginas: 809-819.
70. STOCKDALE, C. 2000. Levels of pasture substitution when concentrates are fed to grazing dairy cows in northern Victoria. Australian Journal of Experimental Agriculture. Volumen: 40, páginas: 913-921
71. UHRIG, M.; GALLI, J.; RUFINER, D.; MILONE, D. 2018. Intake estimation in grazing ruminants using artificial neural networks. Revista Electrónica Argentina-Brasil de Tecnologías da Informação e da Comunicação (REABTIC).
72. UNEMURA, K.; WANAKA, T.; UENO, T. 2009. Technical note: estimation of feed intake while grazing using wireless system requiring no halter. Journal of Dairy Science. Volumen: 92, páginas: 996-1000.
73. UNGAR, E.; RUTTER, S. 2006. Classifying cattle jaw movements: Comparing IGER behavior recorder and acoustics techniques. Applied Animal Behavior Science. Volumen: 98, páginas: 11-27.
74. UNGAR, E. 1996. Ingestive Behavior. En: Ecology and management of grazing systems. Editorial: CAB International. Wallingford, United Kindom. Páginas. 185-218
75. VAN SOEST, P.; ROBERTSON, J.; LEWIS, B. 1991. Journal of Dairy Science. Volumen 74, páginas. 3583-3597.
76. VEIT, H.; SALMAN, A.; CRUZ, P.; SOUZA, E.; SCHMITT, E. 2018. Bioacústica como método de avaliação do comportamento em pastejo de novilhas Girolanso. Arquivo Brasileiro de Medicina Veterinária e Zootecnia. Volumen: 70, páginas: 873-880.
77. VIBART, R.; FELLNER, V.; BURNS, J.; HUNTINGTON, G.; GREEN, J. 2008. Performance of lactating dairy cows fed varying levels of total mixed ration and pasture. Journal of Dairy Science. Volumen: 75, páginas: 471-80.
78. WALES, W.; WILLIAMS, Y.; DOYLE, P. 2001. Effect of grain supplementation and the provision of chemical or physical fibre on marginal milk production responses of cows grazing perennial ryegrass pasture. Australian Journal of Experimental Agriculture. Volumen: 41, páginas: 465-471.

79. WALLIS DEVRIES, M.; LACA, E. 1998. From feeding station to patch: scaling up food intake measurements in grazing cattle. *Applied Animal Behavior Science*. Volumen: 60, páginas: 301–315.
80. WATT, L.; CLARK, C.; KREBS, G.; PETZEL, C.; NIELSEN, S.; UTSUMI, S. 2015. Differential rumination, intake, and enteric methane production of dairy cows in a pasture-based, automatic milking system. *Journal of Dairy Science*. Volumen: 98, páginas: 7248–7263.
81. WRIGHT, M.; LEWIS, E.; GARRY, B.; GALVIN, N.; DUNSHEA F.; HANNAH, M.; AULDIST, M.; WALES, W.; DILLON, P.; KENNEDY, E .2019. Evaluation of the n-alkane technique for estimating herbage dry matter intake of dairy cows offered herbage harvested at two different stages of growth in summer and autumn. *Animal Feed Science and Technology*, Volume: 247, páginas: 199-209.
82. YAYOTA, M.; DOI, K.; KAWAMURA, K.; OGURA, S. 2017. Monitoring foraging behavior and in a diverse pasture. *Journal of Integrated Field Science*. Volumen: 14, páginas: 39-47.
83. ZEHNER, N.; UMSTÄTTER, C.; NIEDERHAUSER, J.; SCHICK, M. 2017. System specification and validation of a noseband pressure sensor for measurement of ruminating and eating behavior in stable-fed cows. *Computers and Electronics in Agriculture*. Volumen: 136, páginas: 31-41.

ANEXOS

Anexo I

Uso y calibración del pasturómetro

Se utilizó un método de doble muestreo (biomasa aérea / altura del pasturómetro) para determinar la biomasa ofrecida en las parcelas, para obtener una ecuación de regresión lineal entre la altura determinada por el pasturómetro y el peso seco de las muestras. La ecuación resultante permite determinar la biomasa inicial de cada pastura en cada subparcela para cada turno de pastoreo.

Para la calibración del pasturómetro se definieron 9 sitios de muestreo (3 de alta, 3 de media y 3 de baja biomasa) en una parcela contigua a la experimental. En cada uno de esos sitios, se midió la altura con el pasturómetro y la oferta de biomasa (gMS) por cortes dentro de un marco. El pasturómetro y el marco fueron rectangulares (0.6 x 0.4 m²). Las muestras se pesaron, etiquetaron y secaron en estufa a 60 °C hasta peso constante para la determinación de MS.

Se obtuvieron muy buenos ajustes ($R^2 > 82\%$) entre la altura del pasturómetro (cm) y el peso de las muestras (gMS) (Figura 22), lo que permitió obtener estimaciones muy precisas de la biomasa ofrecida en las parcelas experimentales.

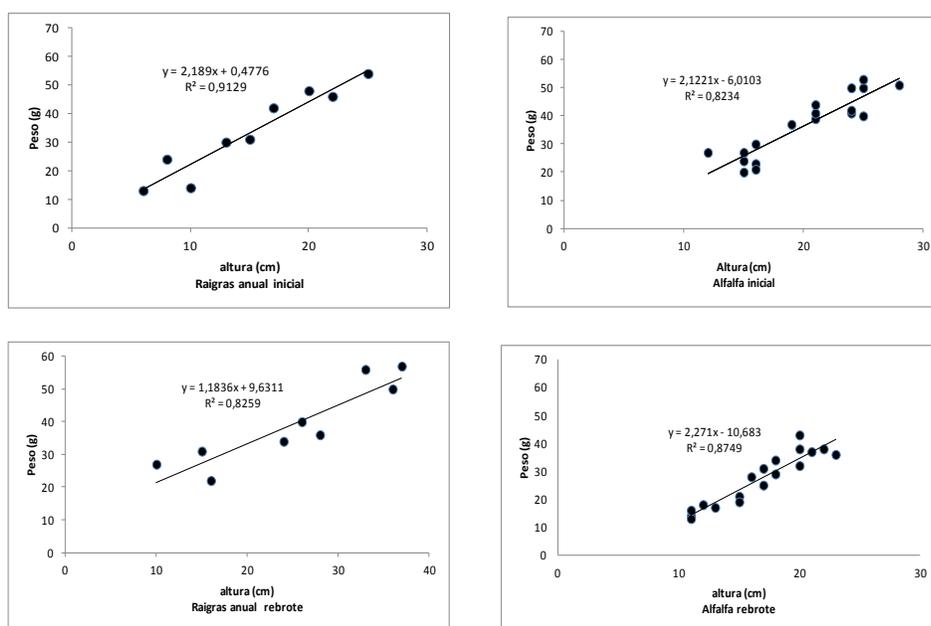
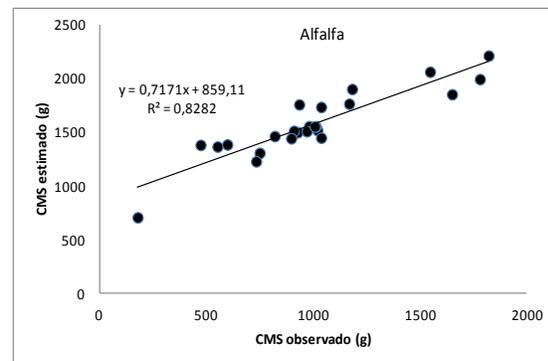
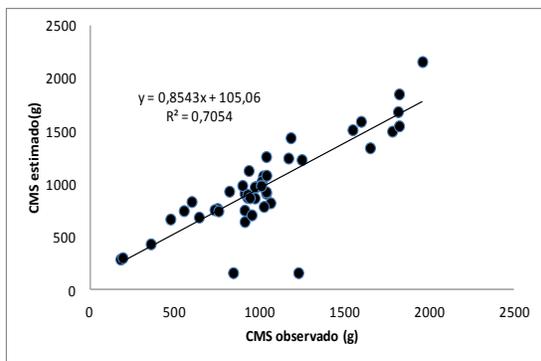
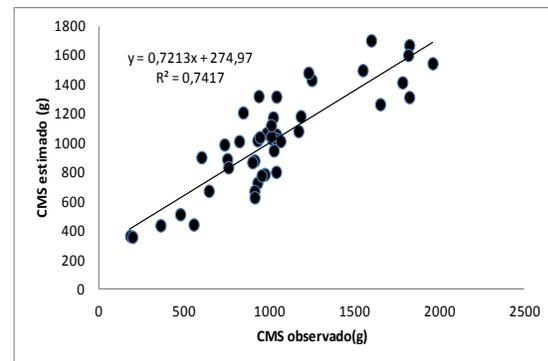
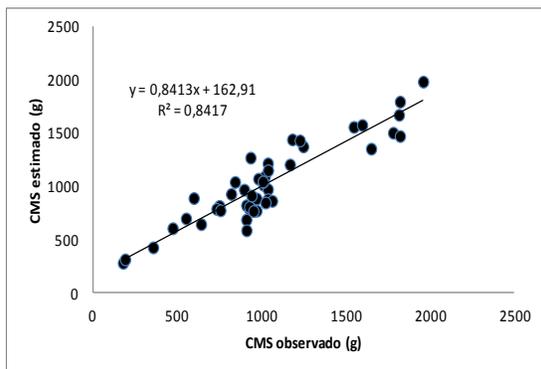


Figura 23: Rectas de regresión entre la altura (cm) medida por el pasturómetro y el peso (g) de la biomasa de forraje (en 0.4 x 0.6 m²) para la estimación de biomasa aérea inicial y rebrote en raigrás anual y alfalfa por doble muestreo

Anexo II.

Validación cruzada

Se realizó la validación cruzada entre los CMS observados y estimados por los diferentes modelos de predicción (MOD_n , Figura 23). Para evaluar en forma externa la capacidad predictiva de los modelos se utilizó un procedimiento de validación cruzada de k iteraciones. El total de señales ($N= 48$) se dividió aleatoriamente en grupos de 40 señales para ajustar el modelo y grupos de 8 señales para validación. La aleatorización se restringió de manera tal que siempre quedaran 2 señales de cada una de las 4 situaciones de pastoreo (especie x condición) en el grupo de validación y por lo tanto 10 señales de cada situación formaran parte del grupo de entrenamiento. El proceso se repitió 5 veces (k) utilizando un grupo distinto en cada iteración. Para cada partición se obtuvo un modelo de predicción y luego los resultados de todos los modelos fueron promediados para estimar un único coeficiente de determinación (R^2_{kfold}). Se puede establecer que el método acústico proporciona buenas estimaciones de CMS en pasturas que incluyan distintas especies de gramíneas y leguminosas.



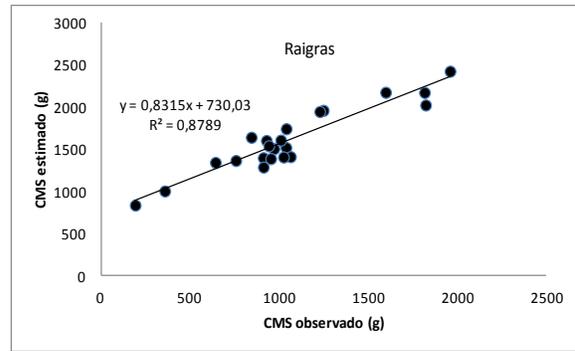
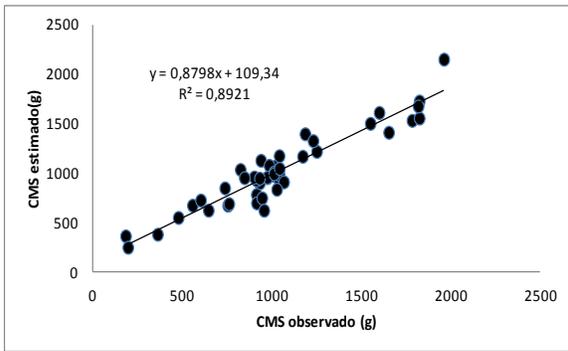


Figura 24: Validación cruzada entre los CMS observados y estimados por los diferentes modelos de predicción (MOD_n), donde n es el número de variables que utiliza el modelo. Para MOD_3 se presentan los resultados de cada especie por separado (Alfalfa y raigrás)