



Diferenciación productiva de tambos lecheros según estrategias de alimentación en la Cuenca Central de Santa Fe, Argentina

Villegas-Peña, A.^{1*} ; Pagliettini, L.¹ ; Mozeris, G.² ; Domínguez, J.¹ ; Cipriotti, P.A.³ 

¹Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Cátedra de Economía Agraria, Av. San Martín 4453 (CP 1417), CABA, Argentina. ²Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Cátedra de Sistemas Agroalimentarios, Av. San Martín 4453 (CP 1417), CABA, Argentina. ³Universidad de Buenos Aires, Facultad de Agronomía, Departamento de Métodos Cuantitativos y Sistemas de Información, Av. San Martín 4453 (CP 1417), CABA, Argentina. ✉ avillegas@agro.uba.ar

Resumen

La intensificación de la lechería pampeana ha promovido una creciente diversificación de las estrategias de alimentación. En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar si dichas estrategias permiten discriminar con consistencia tambos de la Cuenca Central de Santa Fe clasificados según su producción diaria de leche. Se aplicó un Análisis Discriminante Lineal utilizando datos de 71 establecimientos relevados en la Encuesta Sectorial Lechera del INTA. Los tambos se agruparon en tres estratos productivos definidos a priori: Chico (≤ 2.500 L día⁻¹), Mediano (2.501–4.000 L día⁻¹) y Grande (> 4.000 L día⁻¹). Los resultados evidenciaron la obtención de dos funciones discriminantes, de las cuales la primera explicó el 87% de la varianza y se asoció principalmente al consumo de balanceado, grano de maíz, silo y heno, y a la participación del pastoreo. La exactitud de clasificación fue del 67,6%, reduciéndose al 54,9% bajo validación cruzada. El desempeño por estrato, evaluado mediante F1-score, fue mayor en los estratos Chico y Grande (0,81 y 0,60, respectivamente) y menor en el Mediano (0,48). A partir de la estructura discriminante obtenida, se identificó un establecimiento representativo de cada estrato mediante la distancia de Mahalanobis. Se concluye que las estrategias de alimentación permiten discriminar de manera moderada los tambos lecheros y generar perfiles de alimentación que constituyen referencias empíricas útiles para aplicaciones posteriores, particularmente en la modelización productiva, económica y ambiental.

Palabras clave: Producción de leche, alimentación animal, análisis discriminante, escala productiva, región pampeana

Productive differentiation of dairy farms according to feeding strategies in the Central Santa Fe Basin, Argentina

Abstract. The intensification of dairy farming in the Pampas region has led to increasing diversification of feeding strategies. In this context, this study aimed to evaluate whether these strategies allow consistent discrimination of dairy farms in the Central Santa Fe Basin according to their daily milk production. Linear Discriminant Analysis was applied using data from 71 farms surveyed in the INTA Dairy Sector Survey. Farms were grouped into three production strata defined a priori: small ($\leq 2,500$ L day⁻¹), medium (2,501–4,000 L day⁻¹) and large ($> 4,000$ L day⁻¹). Two discriminant functions were obtained, of which the first explained 87% of the variance and was mainly associated with the intake of concentrate feed, maize grain, silage, and hay, as well as the contribution of grazing. Overall classification accuracy was 67.6%, decreasing to 54.9% under cross-validation. Performance by stratum, assessed using the F1-score, was higher for small and large farms (0.81 and 0.60, respectively) and lower for medium farms (0.48). Based on the discriminant structure, one representative farm per stratum was identified using Mahalanobis distance. It is concluded that feeding strategies allow moderate discrimination among dairy farms and enable the identification of feeding profiles that provide useful empirical references for subsequent applications, particularly in productive, economic, and environmental modelling.

Key words: dairy production, animal feeding, discriminant analysis, farm scale, Pampas region.

INTRODUCCIÓN

La producción lechera argentina, concentrada principalmente en la región pampeana, ha experimentado un proceso sostenido de intensificación que ha modificado la estructura productiva y la base alimentaria de los tambos. La transición desde sistemas predominantemente pastoriles hacia esquemas con mayor suplementación, así como un mayor uso de forrajes conservados y concentrados, responde a la necesidad de enfrentar la variabilidad forrajera estacional, incrementar la carga animal y estabilizar la producción (Lazzarini et al. 2015). No obstante, este proceso ha dado lugar a una marcada heterogeneidad en las estrategias de alimentación adoptadas por los tambos, cuya relación con los distintos niveles de producción no siempre resulta evidente (Comerón et al. 2016).

En la provincia de Santa Fe, diversos estudios han registrado incrementos significativos en los niveles de suplementación, cambios en la composición de la dieta y mejoras en la productividad, reflejando la consolidación de estrategias de alimentación del rodeo más complejas y heterogéneas (Pece et al. 2013, Lazzarini et al. 2015). En paralelo, informes sectoriales recientes destacan una creciente diversidad entre establecimientos, asociada a diferencias estructurales, tecnológicas y de manejo (Engler y Cuatrin 2024), lo que refuerza la necesidad de abordajes analíticos capaces de capturar dicha heterogeneidad.

En este contexto, la Cuenca Central de Santa Fe constituye un ámbito de relevancia para el análisis de los modelos productivos lecheros. La región se inscribe dentro del principal núcleo lechero de Argentina, caracterizado por una alta concentración de tambos comerciales y un peso significativo en la producción nacional de leche (Bolsa de Comercio de Rosario 2023). Asimismo, la disponibilidad de información sistemática y estandarizada proveniente de relevamientos sectoriales recientes refuerza su idoneidad como espacio de análisis (Engler et al. 2022, 2024). Estas características la convierten en un ámbito adecuado para evaluar la capacidad de las prácticas alimentarias para discriminar establecimientos según distintos niveles de producción.

El uso de técnicas multivariadas, como el análisis de componentes principales, el clustering y el análisis discriminante, han demostrado ser útiles para caracterizar sistemas productivos heterogéneos y construir tipologías robustas (Modernel et al. 2018, Apez et al. 2025). En particular, el análisis discriminante permite evaluar en qué medida un conjunto de variables explicativas contribuye a diferenciar grupos definidos a priori, lo que resulta pertinente cuando el interés se centra en contrastar perfiles productivos previamente establecidos. Sin embargo, en la revisión de la literatura no se identificaron estudios que apliquen el Análisis Discriminante Lineal de manera directa para clasificar tambos según su estrato productivo utilizando exclusivamente variables de alimentación como predictores. En este marco, se plantea como hipótesis que las estrategias de alimentación contienen una estructura multivariada capaz de reflejar diferencias entre estratos productivos definidos a priori, en un contexto de marcada variabilidad entre establecimientos.

El objetivo del estudio fue evaluar si las estrategias de alimentación permiten discriminar con consistencia tambos de la Cuenca Central de Santa Fe clasificados según su producción diaria de leche, mediante la aplicación de un Análisis Discriminante Lineal (LDA, por sus siglas en inglés). Específicamente, se buscó identificar los predictores alimentarios con mayor capacidad discriminante, cuantificar el grado de separación entre estratos productivos definidos a priori y seleccionar un establecimiento representativo de cada grupo, a partir de las variables relevadas por la Encuesta Sectorial Lechera.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se basó en información proveniente de la Encuesta Sectorial Lechera (ESL) del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), correspondiente al ciclo productivo 2020–2021, relevamiento que comprende dimensiones técnico-productivas y económicas de tambos comerciales de la Cuenca Central de Santa Fe, ubicada en la región pampeana de Argentina. La muestra analizada estuvo compuesta por 71 establecimientos relevados por la ESL, para los cuales se dispuso de información sobre las variables de alimentación del rodeo. El diseño del estudio fue observacional y transversal, orientado a evaluar si las prácticas alimentarias permiten discriminar tambos según su nivel de producción diaria de leche.

La variable dependiente utilizada para la clasificación fue la producción total diaria de leche (L día⁻¹), a partir de la cual se consideró un factor categórico con tres estratos de escala productiva: tambos Chicos (≤ 2.500 L día⁻¹), Medianos (2.501–4.000 L día⁻¹) y Grandes (> 4.000 L día⁻¹). Esta estratificación respondió a criterios productivos establecidos por el equipo técnico de la ESL (INTA, comunicación personal) y permitió disponer de grupos diferenciados para evaluar el poder discriminante de las variables alimentarias.

El conjunto inicial de predictores estuvo integrado por variables cuantitativas relacionadas con la estrategia alimentaria. Los datos incluyeron el suministro de suplementos en kg por vaca en ordeño por día (kg/VO/día) (alimento balanceado, grano de maíz, grano de soja, pellet de soja y de girasol, grano de sorgo y semilla de algodón, expresado en kg totales utilizados y el concentrado como la sumatoria de los anteriores expresado en kg de materia seca), el forraje conservado en kg/VO/día (silaje y heno, expresado en materia seca), la superficie destinada a recursos forrajeros en ha (alfalfa, verdeos de invierno y verdeos de verano) y la participación relativa de los componentes de la dieta en % (concentrados, forrajes conservados y pastoreo). Estas variables reflejan la estructura de alimentación de los tambos y constituyen los elementos centrales para evaluar diferencias entre sistemas productivos. Cabe señalar que en la ESL no se relevó la superficie de pastizales naturales (campo natural), por lo que dicho recurso no se incorporó como variable explicativa.

Todos los análisis se realizaron utilizando el software R versión 4.3.1 (R Core Team 2023). Se emplearon los siguientes paquetes: dplyr (Wickham et al. 2023) y janitor (Firke 2024) para manipulación y limpieza de datos;

corrplot (Wei y Simko 2024) para analizar y visualizar correlaciones; car (Fox y Weisberg 2019) para cálculo del VIF (detecta multicolinealidad); MASS (Venables y Ripley 2002) para el análisis discriminante; y biotools (Da Silva 2025) para la prueba de Box's M (detecta homocedasticidad multivariante).

Antes del ajuste del modelo, se acondicionó la base de datos para estimar y analizar una matriz de correlación de Pearson (Figura 1), con el fin de identificar posibles redundancias entre predictores.

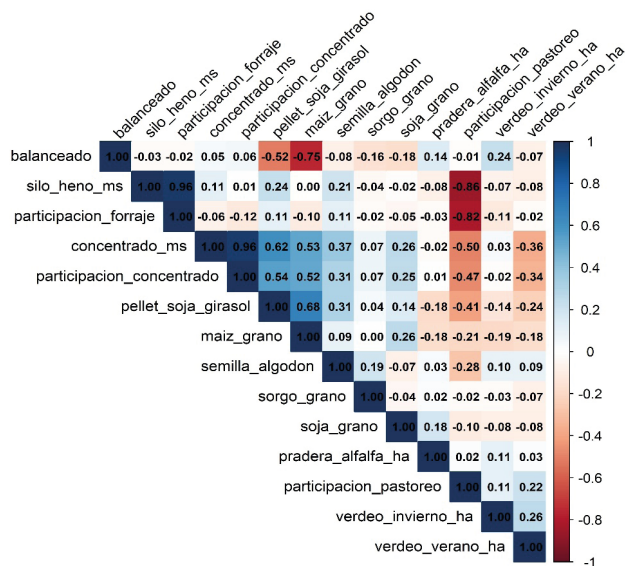


Figura 1. Matriz de correlaciones de Pearson entre variables de alimentación.

El análisis evidenció la presencia de asociaciones lineales de alta magnitud ($r > 0,8$), organizadas en dos grupos

conceptualmente coherentes. Por un lado, el consumo de concentrado expresado en materia seca (kg/VO/día) mostró una correlación positiva elevada con la participación del consumo de concentrado en la dieta (%), indicando que ambas variables reflejan una misma dimensión de uso de suplementos. Por otro lado, la participación del pastoreo (%) mostró correlación negativa elevada con la participación del consumo de forraje conservado (%) y con el consumo de silaje y heno en materia seca (kg/VO/día), con alta relación positiva entre estas dos últimas. En función de estos resultados, y como estrategia para evitar redundancias y mejorar la estabilidad de los análisis multivariados, se eliminó la participación del consumo de concentrado y la participación del consumo de forraje conservado en la dieta, ambos expresados en porcentaje, manteniéndose la participación del pastoreo (%) por su carácter estructural dentro de los sistemas productivos.

Complementariamente, la multicolinealidad se evaluó mediante el Factor de Inflación de la Varianza (VIF), identificándose valores elevados para el consumo de alimento balanceado (kg/VO/día), el consumo de maíz grano (kg/VO/día), el consumo de concentrado en materia seca (kg/VO/día) y la participación del pastoreo (%) (VIF > 10). Para corregir esta situación se eliminó el consumo de concentrado expresado en materia seca, dado que esta variable se construye como la sumatoria de los suplementos individuales (balanceado, maíz, soja, pellets, sorgo y algodón), generando redundancia con sus componentes, a excepción de la participación del pastoreo (%) que se decidió mantener por tratarse de un atributo estructural de los sistemas lecheros pampeanos (Lazzarini et al. 2015). Con el conjunto depurado, todas las variables predictoras fueron estandarizadas (z-score) con el fin de otorgarles un peso comparable en la construcción de las funciones discriminantes (Tabla 1).

Tabla 1. Factor de Inflación de la Varianza (VIF) para las variables predictoras.

Variable	VIF	Variable	VIF
Alimento balanceado (kg/VO/día)	6,04	Alfalfa (ha)	1,20
Maíz grano (kg/VO/día)	6,74	Verdeo de invierno (ha)	1,25
Semilla de algodón (kg/VO/día)	1,31	Verdeo de verano (ha)	1,42
Pellets de soja y girasol(kg/VO/día)	2,53	Participación del pastoreo (%)	10,63
Sorgo grano (kg/VO/día)	1,32	Silo y heno (kg/VO/día)	8,79
Soja grano (kg/VO/día)	1,19	–	–

Nota: Valores de VIF inferiores a 10 se consideran aceptables; valores superiores a este umbral no necesariamente invalidan el modelo y deben interpretarse en función del contexto analítico (O'Brien 2007).

Previo al análisis del LDA, con el objetivo de hacer comparables las variables predictoras y evitar la influencia de sus diferentes magnitudes, las mismas fueron estandarizadas mediante centrado y escalado (media = 0, desvío estándar = 1) utilizando la función scale() del software R.

El LDA se implementó utilizando la función lda() del paquete MASS del software R. Este enfoque permite construir funciones canónicas capaces de maximizar la separación entre los estratos definidos a priori a partir de combinaciones lineales de los predictores. La evaluación del desempeño clasificatorio se realizó mediante dos

criterios complementarios: la tasa de clasificación aparente (resubstitution accuracy, como medida global) y su estimación bajo validación cruzada exhaustiva Leave-One-Out (LOOCV). A nivel de cada estrato se calcularon métricas de precisión, sensibilidad, especificidad y F1-score (medida que combina precisión y sensibilidad, utilizada para evaluar el desempeño por categoría), lo que permitió caracterizar con mayor detalle las diferencias en la capacidad de clasificación.

La verificación de los supuestos estadísticos del análisis discriminante lineal se realizó mediante el test de Mardia para evaluar la normalidad multivariada y la prueba

de Box's M para examinar la homogeneidad de las matrices de covarianza entre estratos. Complementariamente, se evaluó la presencia de observaciones atípicas mediante la distancia de Mahalanobis, definiendo el umbral de identificación a partir del cuantil 0,975 de la distribución χ^2 en función del número de variables consideradas. Las observaciones identificadas no fueron excluidas, en tanto se consideró que reflejan la variabilidad inherente a los sistemas productivos analizados. Ambos procedimientos indicaron desvíos respecto de los supuestos teóricos del LDA ($p < 0,05$). Pese al no cumplimiento de estos supuestos, se procedió con el LDA estándar con base en: a) su conocida robustez empírica frente a desviaciones de estos supuestos cuando el objetivo es exploratorio y descriptivo (Huberty y Olejnik 2006); b) la estandarización (z-score) y depuración (VIF) previa de los predictores, que mitigan problemas de escala y multicolinealidad; y c) el uso de la validación cruzada LOOCV, que proporciona una estimación más realista del error de clasificación. No obstante, el empleo de análisis discriminante robusto podría ser una alternativa a explorar para futuras réplicas o con muestras más grandes (Yahaya et al. 2016, Alrawashdeh et al. 2018).

Una vez estimadas las funciones discriminantes y caracterizada la separación entre estratos, se identificaron establecimientos representativos de cada grupo en función de su proximidad multivariada al centroide discriminante correspondiente. Para ello, se calculó la distancia de Mahalanobis de cada tambo respecto del centroide de su estrato en el espacio definido por las funciones canónicas, seleccionándose aquellos con menor distancia como casos representativos. Este procedimiento permite sintetizar los perfiles alimentarios característicos de cada estrato y generar insumos empíricos para evaluaciones posteriores.

RESULTADOS

El análisis discriminante lineal permitió identificar patrones de alimentación asociados a los distintos niveles de producción diaria de leche. La estructura de diferenciación entre los estratos se describió a partir de dos funciones discriminantes, siendo la primera (LD1) el eje dominante, al concentrar aproximadamente el 87% de la variabilidad explicada, mientras que la segunda función (LD2) aportó un 13%.

Si bien los tests de Mardia y de Box's M detectaron desviaciones respecto de los supuestos de normalidad multivariante y homogeneidad de covarianzas, que podrían incidir en la estabilidad de las funciones discriminantes y en la precisión de la clasificación, la literatura indica que el análisis discriminante mantiene utilidad interpretativa bajo condiciones de heterogeneidad cuando se aplican procedimientos adecuados de estandarización, depuración y validación cruzada, como se realizó en este estudio (Yahaya et al. 2016; Alrawashdeh et al. 2018).

La primera función discriminante (LD1) estuvo dominada por el consumo de alimento balanceado, grano de maíz, forraje conservado (silaje y heno) y la participación del pastoreo. Los coeficientes estandarizados (Tabla 2) indican que estas variables constituyen los principales componentes del gradiente discriminante asociado a las diferencias observadas entre los niveles de producción diaria de leche. Este eje no debe interpretarse como una progresión estrictamente lineal entre los estratos, sino como la manifestación de distintas combinaciones entre suplementación, forraje conservado y base pastoril que caracterizan a cada grupo.

Tabla 2. Cargas estandarizadas de los componentes LD1 y LD2.

Variable	LD1	LD2
Balanceado (kg/VO/día)	2,126	-0,817
Maíz grano (kg/VO/día)	2,146	-0,764
Semilla de algodón (kg/VO/día)	0,304	0,255
Pellets de soja y girasol (kg/VO/día)	0,572	-0,513
Sorgo grano (kg/VO/día)	0,330	-0,269
Soja grano (kg/VO/día)	-0,145	-0,242
Silaje y heno (kg/VO/día)	2,065	-0,978
Alfalfa (ha)	0,422	0,371
Verdeo de invierno (ha)	0,533	0,194
Verdeo de verano (ha)	0,200	-0,857
Participación del pastoreo (%)	2,033	-1,444

Nota: Los coeficientes estandarizados son comparables entre sí. Mayor valor absoluto indica una mayor contribución relativa a la función discriminante. Signos opuestos indican relaciones en direcciones contrarias respecto del mismo eje discriminante.

La capacidad clasificatoria del modelo mostró un desempeño moderado, con una precisión global del 54,9% en la validación cruzada (LOOCV), lo que evidencia una reducción respecto de la clasificación aparente (67,6%) y sugiere la presencia de solapamiento entre tambos de escala intermedia (Tabla 3). Al analizar las métricas por estrato, el

modelo presentó su mejor desempeño en el estrato Chico (Sensibilidad = 0,90; F1 = 0,81). El estrato Grande mostró un rendimiento intermedio (Sensibilidad = 0,55; F1 = 0,60). En contraste, el estrato Mediano evidenció la mayor dificultad para ser discriminado (Sensibilidad = 0,44; F1 = 0,48).

Tabla 3. Matriz de confusión de la clasificación aparente

Real \ Predicho	Chico	Mediano	Grande	Total
Chico	28	3	0	31
Mediano	4	8	6	18
Grande	6	4	12	22
Total	38	15	18	71

Nota. La tabla muestra el número de casos clasificados correctamente (diagonal principal) y los errores de clasificación (fuera de la diagonal).

Fuente: Elaboración propia.

La representación en el espacio canónico LD1-LD2 permitió visualizar de manera clara la separación entre los estratos productivos (Figura 1). Los centroides de los tambos Chicos y Grandes se ubicaron en posiciones opuestas a lo largo de LD1, mientras que los establecimientos Medianos presentaron una distribución intermedia y mayor dispersión, reflejando su heterogeneidad interna.

La identificación de los tambos representativos de cada estrato se realizó mediante la distancia de Mahalanobis entre cada establecimiento y el centroide discriminante de su grupo, seleccionando aquellos cuya combinación de variables alimentarias se aproximó más al perfil multivariado promedio. Lo que permite visualizar simultáneamente la posición de cada grupo y los casos más representativos (Figura 2).

Se identificaron los perfiles alimentarios en los tambos seleccionados como casos representativos (Tabla 4). Estas variables no deben interpretarse como cargas discriminantes, sino como una caracterización de la dieta típica en cada estrato. En el estrato Chico, el tambo representativo evidencia un sistema basado en pastoreo complementado con cantidades moderadas de balanceado y maíz grano. El establecimiento correspondiente al estrato Mediano presenta la dieta más intensificada en granos, con un mayor aporte de maíz grano y la inclusión de pellet de soja y girasol. Por su parte, el tambo representativo del

estrato Grande combina un uso intensivo de balanceado con volúmenes elevados de forrajes conservados, manteniendo a la vez una base pastoril significativa.

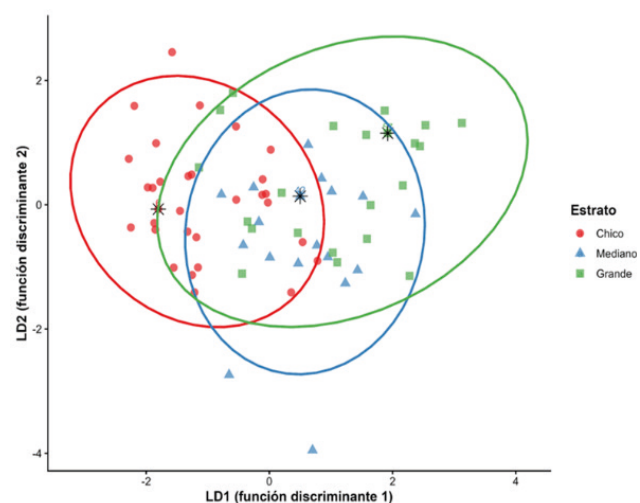


Figura 2. Distribución de los estratos en el espacio canónico (LD1-LD2) y tambos representativos. **Nota.** Elipses de confianza al 95% para los estratos Chico (rojo), Mediano (azul) y Grande (verde). Los asteriscos (*) indican los tambos representativos de cada estrato.

Tabla 4. Tambos representativos por estrato productivo según distancia de Mahalanobis

Variable	Chico	Mediano	Grande
	(900 L día ⁻¹)	(3.250 L día ⁻¹)	(7.852 L día ⁻¹)
Balanceado (kg/VO/día)	2,20	0,00	6,80
Maíz grano (kg/VO/día)	2,03	5,07	0,00
Semilla de algodón (kg/VO/día)	0,00	0,50	0,00
Pellet de soja y girasol (kg/VO/día)	0,00	2,03	0,00
Silo y heno (kg MS/VO/día)	4,22	7,93	4,34
Alfalfa (ha)	33,00	20,00	100,00
Verdeo de invierno (ha)	0,00	7,00	39,00
Verdeo de verano (ha)	6,00	0,00	0,00
Participación del pastoreo (%)	0,52	0,30	0,51

Nota: La ausencia de grano de sorgo y grano de soja en los perfiles responde a que los tambos representativos no registraron su consumo.

La comparación de estos perfiles permite observar que los distintos niveles de producción diaria de leche se asocian con combinaciones diferenciadas de insumos alimentarios, particularmente en la relación entre suplementación, uso

de forrajes conservados y participación del pastoreo. En este sentido, las diferencias en los niveles productivos se corresponden con configuraciones alimentarias distintas entre los estratos.

DISCUSIÓN

Los resultados muestran que la intensificación de la alimentación del rodeo constituye un eje principal (LD1), diferenciando sistemas con mayor aporte de suplementos y forrajes conservados de aquellos en los que el pastoreo mantiene un papel central. La hipótesis planteada postulaba que las estrategias de alimentación contienen una estructura multivariada capaz de reflejar diferencias entre estratos productivos definidos a priori, en un contexto de marcada variabilidad entre establecimientos. En este sentido, los resultados obtenidos son consistentes con dicha hipótesis, aunque de manera moderada, dado que las estrategias de alimentación diferencian adecuadamente los estratos extremos, pero su capacidad se debilita en el estrato Mediano.

Esta diferenciación, a su vez, se alinea con planteos de distintos autores que documentan la trayectoria de intensificación de los sistemas lecheros pampeanos (Pece et al. 2013, Lazzarini et al. 2015). Esta intensificación no adopta un patrón único entre estratos, lo que coincide con la heterogeneidad productiva señalada en informes recientes (Comerón et al. 2016, Engler y Cuatrin 2024) y con la diversidad de estrategias documentadas en estudios multivariados aplicados a sistemas lecheros (Modernel et al. 2018, Apez et al. 2025). En este contexto, el presente estudio incorpora un enfoque supervisado basado en análisis discriminante lineal, que permite evaluar la capacidad de las variables de alimentación para discriminar tambos según niveles de producción definidos a priori, aportando una perspectiva complementaria a los estudios previos.

Con respecto a la dificultad del modelo para clasificar el estrato Mediano, evidenciada por su bajo valor F1-score y el solapamiento observado en el plano canónico, esta situación refleja la heterogeneidad interna del grupo más que la presencia de un “estado transicional”. En efecto, el solapamiento indicaría la coexistencia de estrategias alimentarias diferenciadas dentro de un mismo rango productivo, tal como ha sido señalado en estudios sectoriales recientes (Engler y Cuatrin 2024).

Asimismo, la disminución de la precisión bajo validación cruzada Leave-One-Out (54,9%) pone de manifiesto las limitaciones asociadas a un conjunto de datos de tamaño moderado y con distribución desbalanceada entre estratos (Chico = 31, Mediano = 18, Grande = 22), lo que vuelve menos estable la estimación del error de clasificación (Hastie et al. 2009). Si bien las variables ligadas a la alimentación presentan capacidad discriminante, la producción de leche responde a una estructura multicausal que incluye factores no incorporados en el modelo (como la genética, la sanidad animal y el nivel tecnológico), tal como documentan estudios multivariados en sistemas ganaderos heterogéneos (Modernel et al. 2018, Apez et al. 2025). En consecuencia, los resultados de clasificación, especialmente para el estrato Mediano, deben interpretarse con cautela.

Desde el punto de vista metodológico, si bien los tests de Mardia y de Box's M detectaron desviaciones respecto de los supuestos de normalidad multivariante y homogeneidad de covarianzas, la literatura indica que el análisis discriminante mantiene utilidad interpretativa

bajo condiciones de heterogeneidad cuando se aplican procedimientos adecuados de estandarización, depuración y validación cruzada, como se realizó en este estudio (Yahaya et al. 2016, Alrawashdeh et al. 2018), aunque estas desviaciones podrían incidir en la estabilidad de las funciones discriminantes y en la precisión de la clasificación.

En este contexto, el LDA se interpreta aquí principalmente como una herramienta exploratoria y de tipificación, dado que se utilizó no sólo como instrumento predictivo, sino también como herramienta para sintetizar perfiles multivariados con aplicación práctica, para el análisis de sistemas productivos reales, donde la variabilidad es una característica estructural. Sobre esta base, la identificación de tambos representativos mediante la distancia mínima de Mahalanobis al centroide de cada estrato permitió seleccionar un caso-tipo real para cada estrato, empíricamente observado, que resume el perfil alimentario característico del grupo en el espacio multivariado. Este procedimiento fortalece la solidez de la tipificación, al tiempo que evita generalizaciones directas sobre el conjunto del estrato.

Los perfiles de alimentación derivados de estos casos representativos muestran que la intensificación adopta modalidades diferenciadas según el estrato productivo, aun cuando cada perfil corresponde a un único tambo seleccionado como referencia. En el tambo representativo del estrato Chico predomina un sistema pastoril, con niveles moderados de suplementación y uso de forrajes conservados. Esto impacta directamente en su productividad y resultado económico (Engler et al. 2024), aunque les confiere una alta resiliencia frente a cambios en los precios relativos de los insumos alimentarios.

En el caso del estrato Mediano, el tambo seleccionado presenta una dieta más fuertemente orientada al uso de granos y forrajes conservados, mientras que el tambo representativo del estrato Grande combina el pastoreo con un uso intensivo de balanceado y volúmenes moderados de forrajes conservados. Este conjunto de perfiles resulta consistente con la evidencia regional de la cuenca lechera pampeana, donde el pastoreo se mantiene como un componente estructural del sistema productivo tanto en los tambos chicos como en los grandes, registrándose en estos últimos el doble de superficie sembrada con cultivos destinados a reservas para silo y grano (Engler et al. 2022).

Los estudios del INTA confirman esta tendencia para la Región Pampeana (Engler et al. 2022, 2024). Los establecimientos de mayor escala presentan una mayor proporción de concentrados en la dieta, mientras que los más pequeños se basan predominantemente en forrajes verdes. Al comparar los relevamientos de la ESL 2020/21 y 2022/23, la participación de los concentrados se mantiene estable en ambas categorías, pero la del forraje verde aumenta en detrimento del alimento conservado.

Este comportamiento es coherente con el principio económico de que la pradera constituye el alimento de menor costo y, por lo tanto, su participación en la ración tiende a ser elevada. Como la composición nutritiva de la pradera varía por efectos estacionales, siendo el componente más variable de la alimentación, el manejo y la fertilización adquieren un rol clave. En este marco,

la suplementación debe cumplir un rol complementario, permitiendo mejorar la respuesta productiva y económica cuando se logra minimizar la tasa de sustitución del pasto (Anrique 2012). En los perfiles analizados, este enfoque se expresa en la persistencia del pastoreo como base del sistema en los casos representativos de los estratos Chico y Grande, aun cuando en este último se registran mayores niveles de suplementación. La heterogeneidad observada en el estrato Mediano, reflejada tanto en el desempeño del modelo como en el perfil del caso-tipo seleccionado, confirma que este grupo no respondería a un único patrón de alimentación.

Más allá de sus implicancias productivas y económicas, las estrategias alimentarias también tienen efectos sobre los aspectos ambientales. Los principales factores que determinan la huella hídrica en productos animales son la eficiencia de conversión y la composición del alimento consumido. En este sentido, un mayor suministro de alimentos concentrados se asocia con un incremento de la huella hídrica, debido a que estos insumos presentan, en general, una mayor huella que los forrajes. Por otro lado, la mayor proporción de la huella hídrica de la leche corresponde al agua verde, lo que implica menores externalidades ambientales negativas en comparación con el uso de agua azul y resalta su relevancia para la seguridad hídrica y alimentaria (Pérez et al. 2021).

CONCLUSIONES

El estudio sugiere que la relación entre producción de leche e intensificación alimentaria no es directa, ya que, dentro de un mismo rango productivo, especialmente en el estrato Mediano, podrían coexistir múltiples estrategias de alimentación. No obstante, las estrategias de alimentación permiten diferenciar, con un grado moderado (54,9%), los tambos de la Cuenca Central de Santa Fe estratificados según su producción diaria de leche. La separación entre estratos estuvo dominada por un eje de intensificación, aunque esta se expresó mediante combinaciones diferenciadas de suplementos, forrajes conservados y pastoreo. Entre estos, los predictores con mayor capacidad discriminante fueron el consumo de balanceado, grano de maíz, silo y heno, y la participación del pastoreo.

En términos de desempeño clasificatorio, los estratos extremos (Chico y Grande) mostraron una aceptable capacidad de discriminación, mientras que el estrato Mediano presentó el menor poder de separación, lo que refuerza la interpretación de una mayor heterogeneidad interna en este segmento. Este resultado sugiere la conveniencia de profundizar el análisis de este último mediante enfoques multivariados complementarios o subestratificaciones.

La identificación de tambos representativos mediante la distancia de Mahalanobis constituye el principal aporte operativo del estudio, al permitir definir casos-tipo empíricamente fundamentados que sintetizan los perfiles de alimentación característicos de cada estrato productivo. En términos prácticos, los perfiles de los estratos Chico y Grande ofrecen referencias empíricas para el manejo, mientras que la heterogeneidad del estrato Mediano desaconseja seguir un patrón único de suplementación sin evaluación específica. Estos casos pueden utilizarse como

escenarios de referencia para la modelización productiva, económica y ambiental, al representar configuraciones alimentarias observadas en distintos niveles de producción, y permiten focalizar el análisis en la composición de la dieta, aspecto que incide en la productividad, la rentabilidad y la sostenibilidad hídrica de los tambos lecheros.

Asimismo, la metodología aplicada, basada en el Análisis Discriminante Lineal y la distancia de Mahalanobis, constituye una herramienta aplicable para orientar investigaciones futuras, ya sea para profundizar en el estudio del estrato Mediano (el de mayor heterogeneidad interna) o para extender el análisis a otras cuencas lecheras de la región pampeana. De este modo, el estudio provee un marco metodológico y casos de referencia concretos que pueden contribuir a la toma de decisiones tanto en el ámbito público como en el privado en la Cuenca Central de Santa Fe.

Agradecimientos. La presente investigación fue financiada por el Programa de Investigación Científica y Tecnológica de la Universidad de Buenos Aires, en el marco del Proyecto UBACyT código 20020220200011BA, correspondiente a la Programación Científica 2023–2025.

Contribución de los autores. VPA: contribuyó con la conceptualización, metodología, investigación, análisis formal, interpretación de resultados, redacción del borrador original, y revisión y edición del manuscrito. PL: participó en la conceptualización, metodología, supervisión científica, interpretación de resultados, y revisión crítica del manuscrito. MG: colaboró en la investigación, análisis formal, interpretación de resultados, y revisión crítica del manuscrito. DJ y CP: realizaron investigación, análisis formal, interpretación de resultados, y revisión crítica del manuscrito.

Declaración de conflictos de intereses. Los autores declaran no tener conflictos de intereses financieros ni relaciones personales conocidas que pudieran haber influido en el trabajo presentado en este artículo.

Declaración de disponibilidad de datos. Los datos que respaldan los resultados de este estudio fueron provistos por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), mediante comunicación personal y no se encuentran publicados. El acceso a los datos está sujeto a la autorización del organismo responsable.

ORCID

Villegas-Peña, A. ✉ avillegas@agro.uba.ar,  <https://orcid.org/0000-0001-6145-8179>

Pagliettini, L. ✉ pagliett@agro.uba.ar,  <https://orcid.org/0000-0001-7598-8090>

Mozeris, G. ✉ gusmoz@agro.uba.ar,  <https://orcid.org/0009-0007-2319-6893>

Domínguez, J. ✉ domingue@agro.uba.ar,  <https://orcid.org/0000-0002-4712-3417>

Cipriotti, P.A. ✉ cipriott@agro.uba.ar,  <https://orcid.org/0000-0002-1228-9724>

REFERENCIAS

1. Alrawashdeh MJ, Radwan TR, Abunawas KA. Performance of linear discriminant analysis using different robust methods. *Eur J Pure Appl Math.* 2018; 11(1): 284-298. <https://doi.org/10.29020/nybg.ejpm.v11i1.3176>
2. Anrique R. Nutrición y alimentación de vacas lecheras en pastoreo. Publicación N.º 2, Plan Lechero Watt's. Chile; 2012. Disponible en: <https://consorciolechero.cl/wp-content/uploads/2021/04/nutricion-y-alimentacion-de-vacas-lecheras-en-pastoreo.pdf>
3. Apez ME, Engler PL, García Arancibia R. Caracterización de una tipología de tambos en la región pampeana de Argentina. *FAVE Sección Ciencias Agrarias.* 2025; 24: e0037. <https://doi.org/10.14409/fa.2025.24.e0037>
4. Bolsa de Comercio de Rosario. Radiografía del sector lácteo en Argentina. Rosario (AR): Bolsa de Comercio de Rosario; 2023. Disponible en: <https://www.bcr.com.ar/es/mercados/investigacion-y-desarrollo/informativo-semanal/noticias-informativo-semanal/radiografia-7>
5. Comerón E, Romero L, Vera M, Villar J, Maciel M, Charlón V, Tieri MP, Salado E. Algunas consideraciones sobre la evolución del proceso de intensificación de la lechería argentina y los aportes del INTA. Información Técnica de Producción Animal. INTA – Estación Experimental Agropecuaria Rafaela; 2016. Disponible en: https://repositorio.inta.gob.ar/bitstream/handle/20.500.12123/8201/INTA_CRSantaFe_EEARafaela_Informacion_tecnica_produccion_animal_2020.pdf?sequence=1&isAllowed=y
6. Da Silva AR. biotools: Tools for biometry and applied statistics in agricultural science. Version 4.2 [software]. 2025. Disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=biotools>
7. Engler PL, Cuatrin A. Brechas productivas y económicas de los tambos de la región Pampeana Argentina. 47º Congreso Argentino de Producción Animal: Ciencia y Tecnología para escenarios desafiantes. Asociación Argentina de Producción Animal (AAPA), Santa Fe, Argentina; 2024. Disponible en: <https://www.aapa.org.ar/47capa/resumenes/06-ResSP2024.pdf>
8. Engler PL, Cuatrin A, Apez ME, Maekawa M, Litwin GM, Centeno AR, Marino MR, Moretto ML. Encuesta Sectorial Lechera del INTA: Resultados y análisis del ejercicio productivo 2020–2021. Informe técnico. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*; 2022. Disponible en: https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/INTADig_a42dd07cd3273752fdce2f94b83c8bc
9. Engler PL, Cuatrin A, Apez ME, Maekawa M, Litwin GM, Centeno AR, Marino MR, Moretto ML, Almada G. Encuesta Sectorial Lechera del INTA: Resultados y análisis del ejercicio productivo 2022–2023. Informe técnico. *Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria*; 2024. Disponible en: <https://caproler.org/wp-content/uploads/2024/07/30582552-encuesta-sectorial-lechera-inta-2022-23-documento-completo.pdf>
10. Firke S. janitor: Simple tools for examining and cleaning dirty data. Version 2.2.1 [software]. 2024. Disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=janitor>
11. Fox J, Weisberg S. An R companion to applied regression. 3rd ed. Thousand Oaks (CA): Sage Publications; 2019.
12. Hastie T, Tibshirani R, Friedman J. The elements of statistical learning: Data mining, inference, and prediction. 2nd ed. New York: Springer; 2009. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-84858-7>
13. Huberty CJ, Olejnik S. Applied MANOVA and discriminant analysis. 2nd ed. Hoboken (NJ): Wiley; 2006. <https://doi.org/10.1002/047178947X>
14. Lazzarini MB, Demarchi E, Lovino D, Baudracco J, Jáuregui JM. Evolución de la suplementación, el consumo de pastura y la producción de leche en sistemas lecheros de Argentina. *FAVE Sección Ciencias Agrarias.* 2015; 13(1-2): 73-78. <https://doi.org/10.14409/fa.v13i1/2.4964>
15. Modernel P, Dogliotti S, Álvarez S, Corbeels M, Picasso V, Tiftonell P, Rossing WAH. Identification of beef production farms in the Pampas and Campos area that stand out in economic and environmental performance. *Ecol Indic.* 2018; 89: 755-770. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.01.038>
16. O'Brien RM. A caution regarding rules of thumb for variance inflation factors. *Qual Quant.* 2007; 41(5): 673-690. <https://doi.org/10.1007/s11335-006-9018-6>
17. Pece MA, Álvarez HJ, Larripa MJ, Galil JR. Cambios en la productividad de los tambos del sur de Santa Fe = Changes in dairy farm productivity in the southern Santa Fe. *Rev Argent Prod Anim.* 2013; 33(2): 91-98. Disponible en: https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/INTADig_09781b87a543c84b7761e2e875e7c91f
18. Pérez J, Arrien MC, Cisneros Basualdo NE, Vuksinic E, Rodríguez CI. Huella hídrica de la leche y el queso: un caso de estudio en Tandil, Argentina. *Revista Estudios Ambientales.* 2021; 9(2): 28-48. <https://doi.org/10.47069/estudios-ambientales.v9i2.1273>
19. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. Version 4.3.1 [software]. Vienna (Austria): R Foundation for Statistical Computing; 2023. Disponible en: <https://www.R-project.org/>
20. Venables WN, Ripley BD. Modern applied statistics with S. 4th ed. New York: Springer; 2002. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-21706-2>
21. Wei T, Simko V. R package 'corrplot': Visualization of a correlation matrix. Version 0.95 [software]. 2024. Disponible en: <https://github.com/taiyun/corrplot>
22. Wickham H, François R, Henry L, Müller K, Vaughan D. dplyr: A grammar of data manipulation. Version 1.1.4 [software]. 2023. Disponible en: <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>
23. Yahaya SSS, Lim YF, Ali H, Omar Z. Robust linear discriminant analysis. *J Math Stat.* 2016; 12(4): 312-316. <https://doi.org/10.3844/jmssp.2016.312.316>