



Evolución productiva y reproductiva en vacas Holstein primíparas: análisis longitudinal y multivariado en un sistema a pastoreo argentino (1994-2023)

Castro, R.¹ ; Frana Bisang, E.² ; Molina, M.G.³ ; Marini, P.R.^{2,4}

¹Cátedra de Zootecnia General. ²Cátedra de Producción de Bovinos para Leche. Facultad de Ciencias Veterinarias, Universidad Nacional de Rosario. Ruta 33 y Ov. Lagos, Casilda, Santa Fe, Argentina. S2170.

³Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. Ing. Agr. Felix Aldo Marrone 746, Córdoba. S5000 ⁴Carrera del Investigador Científico de la Universidad Nacional de Rosario (CIC-UNR). ✉ pmarini@unr.edu.ar

Resumen

La raza Holstein constituye la base genética predominante en los sistemas lecheros intensivos y pastoriles a nivel mundial. El objetivo del estudio fue caracterizar la evolución productiva y del intervalo parto-parto en vacas Holstein primíparas manejadas en un sistema pastoril argentino durante 1994-2023; evaluar la estructura conjunta de estos rasgos mediante análisis multivariado; y detectar posibles cambios estructurales asociados a transformaciones del sistema, interpretando los resultados dentro del marco conceptual de la interacción genotipo $\times$ ambiente. Se utilizaron datos retrospectivos correspondientes a 93 vacas Holstein primíparas del biotipo americano-canadiense, paridas en otoño entre 1994 y 2023. Los animales pertenecían al tambo-cabaña Holstein ubicado en Casilda, provincia de Santa Fe, Argentina. Las producciones de leche (PL305) y grasa butirosa (PG305) ajustadas a 305 días evidenciaron un incremento sostenido a lo largo del período 1994-2023, acompañado por una ampliación moderada en la variabilidad interindividual. Los días en lactancia (DL) mostraron un aumento progresivo de menor magnitud, mientras que el intervalo parto-parto (IPP) no mostró cambios significativos en los modelos lineales. El análisis de correlaciones mostró una asociación muy fuerte entre PL305 y PG305 ($r = 0,881$; $p < 0,001$). DL presentó correlaciones moderadas con ambos rasgos productivos y se asoció fuertemente con IPP ($p < 0,001$). El análisis de componentes principales explicó el 89,8% de la variación total: CP1 (58,8%) representó un eje productivo integrado por PL305, PG305 y DL, mientras que CP2 (31,0%) reflejó una dimensión reproductiva dominada por el IPP. Se concluye que los resultados sugieren que la optimización del ambiente a pastoreo constituye el principal determinante para mejorar el rendimiento de vacas Holstein primíparas, y que el análisis multivariado y longitudinal ofrece una herramienta valiosa para identificar los mecanismos mediante los cuales el sistema productivo modula la expresión fenotípica.

Palabras clave: ambiente, genotipo, indicadores, alimentación, días de lactancia.

Productive and reproductive trends in primiparous Holstein cows: longitudinal and multivariate analysis in an Argentine grazing system (1994–2023)

Abstract. The Holstein breed constitutes the predominant genetic base in intensive and pasture-based dairy systems worldwide. The objective of this study was to characterize productive trends and calving interval in primiparous Holstein cows managed in an Argentine grazing system from 1994 to 2023; to evaluate the joint structure of these traits through multivariate analysis; and to detect potential structural changes associated with modifications on the production system, interpreting the results within the conceptual framework of genotype $\times$ environment interaction. Retrospective data from 93 primiparous Holstein cows

of the American–Canadian biotype, calved in autumn between 1994 and 2023, were analyzed. The animals belonged to a Holstein dairy farm located in Casilda, Santa Fe province, Argentina. Milk production (MP305) and butterfat production (BP305) adjusted to 305 days showed a sustained increase over the study period, accompanied by a moderate increase in interindividual variability. Days in milk (DIM) increased progressively, although to a lesser extent, whereas calving interval (CI) did not show significant changes in linear models. Correlation analysis revealed a strong association between MP305 and BP305 ($r = 0.881$; $p < 0.001$). DIM was moderately correlated with productive traits and strongly associated with CI ($p < 0.001$). Principal component analysis explained 89.8% of the total variance: PC1 (58.8%) was primarily associated with productive variables (MP305, BP305, DIM), whereas PC2 (31.0%) was mainly associated with CI. The findings indicate that optimization of the grazing environment may represent a key factor for improving performance in primiparous Holstein cows. Furthermore, longitudinal and multivariate approaches provide useful tools for identifying system-level factors influencing phenotypic expression.

Key words: genotype $\times$ environment interaction, milk yield, calving interval, grazing systems, multivariate analysis.

INTRODUCCIÓN

La raza Holstein constituye la base genética predominante en los sistemas lecheros intensivos y pastoriles a nivel mundial (Brito et al. 2021, Gao et al. 2025) y representa aproximadamente el 95% del rodeo lechero en Argentina (Fischman y Torres 2021, Engler et al. 2022). En las últimas décadas, diversos estudios genómicos han evidenciado una creciente homogeneidad genética y un aumento sostenido de la consanguinidad dentro de la población Holstein, consecuencia del uso global de un número reducido de líneas paternas de alto mérito (Dechow et al. 2020, Makanjuola et al. 2020, Gutiérrez-Reinoso et al. 2022). Como resultado, la variación fenotípica observable depende en mayor medida de las condiciones ambientales locales que de diferencias genéticas entre animales (Ablondi et al. 2021, Mugambe et al. 2024).

En este contexto, los sistemas pastoriles argentinos constituyen un escenario idóneo para estudiar cómo factores ambientales, tales como la disponibilidad estacional de forraje, el estrés térmico, el manejo reproductivo y la calidad de los ingredientes utilizados en la dieta, modulan la expresión productiva y reproductiva de vacas Holstein primíparas y multíparas (Pedrera et al. 2008, Hammami et al. 2009, Polsky y von Keyserlingk 2017, Menegazzi et al. 2025). Esta modulación ambiental adquiere particular relevancia dado que la base genética de estos animales se mantiene relativamente constante a lo largo del tiempo, tal como documentan estudios recientes sobre homogeneidad genética global y aumento de consanguinidad en la raza Holstein (Dechow et al. 2020, Makanjuola et al. 2020, Ablondi et al. 2021, Gutiérrez-Reinoso et al. 2022).

La evaluación de las primeras lactancias reviste particular importancia, dado que las vacas primíparas expresan por primera vez su potencial productivo y reproductivo bajo condiciones ambientales específicas, sin la influencia acumulada de lactancias previas ni el sesgo derivado de la selección por permanencia en el rodeo. Diversos estudios han señalado que el desempeño en la primera lactancia constituye un indicador sensible tanto del mérito genético funcional como de la adecuación del ambiente y del manejo, ya que las primíparas presentan una mayor sensibilidad al balance energético posparto y a las

restricciones nutricionales propias de los sistemas pastoriles (Berry et al. 2003, Miglior et al. 2005). Asimismo, el análisis de vacas de primer parto permite evaluar indirectamente la respuesta productiva asociada a la genética utilizada, dado que la estimación del valor genético de los toros se basa fundamentalmente en el desempeño de sus hijas en primeras lactancias (VanRaden 2004), evitando además sesgos asociados a la supervivencia selectiva de animales de mayor desempeño (Ducrocq 1994).

El intervalo parto-parto (IPP) constituye uno de los indicadores más utilizados para evaluar el desempeño reproductivo en rodeos lecheros, ya que refleja la interacción entre la reanudación de la ciclicidad posparto, la detección de estro y la eficiencia del servicio (Lucy 2001, Diskin y Morris 2008). Este rasgo es especialmente sensible a variaciones ambientales propias de sistemas pastoriles, como el balance energético posparto, la oferta forrajera y el estrés térmico, que condicionan la función ovárica y la expresión del estro (Pedrera et al. 2008, Polsky y von Keyserlingk 2017).

Caracterizar la dinámica productiva y reproductiva de un sistema pastoril que ha atravesado sucesivas transformaciones en el manejo, la nutrición y la infraestructura permite comprender cómo estas modificaciones ambientales influyen sobre la expresión fenotípica de los caracteres productivos y reproductivos en una población genéticamente homogénea (Hodgson 1990, Falconer y Mackay 1996, Lynch y Walsh 1998). En este sentido, la respuesta observada en los animales no depende exclusivamente de su constitución genética, sino del efecto conjunto de las condiciones ambientales y de manejo, en el marco de la interacción genotipo $\times$ ambiente. Asimismo, un enfoque longitudinal combinado con herramientas multivariadas ofrece una perspectiva integradora para identificar dimensiones biológicas comunes y cambios estructurales en la trayectoria del sistema (Dillon y Hardaker 1993, Hair et al. 2014).

En función de la elevada homogeneidad genética de la raza Holstein y de la marcada variabilidad ambiental característica de los sistemas a pastoreo, se plantea como hipótesis que la evolución temporal de los rasgos productivos en vacas primíparas responde principalmente a modificaciones en el ambiente y el manejo, mientras que

los rasgos reproductivos muestran una mayor estabilidad y una independencia relativa respecto del desempeño productivo. Asimismo, se postula que esta dinámica se expresa en una estructura multivariada diferenciada entre dimensiones productivas y reproductivas, consistente con el marco conceptual de la interacción genotipo $\times$ ambiente.

En este marco, el presente trabajo se propone caracterizar la evolución productiva y del intervalo parto-parto en vacas Holstein primíparas manejadas en un sistema pastoril argentino durante 1994-2023; evaluar la estructura conjunta de estos rasgos mediante análisis multivariado; y, detectar posibles cambios estructurales asociados a transformaciones del sistema, interpretando los resultados dentro del marco conceptual de la interacción genotipo $\times$ ambiente.

MATERIALES Y MÉTODOS

Población de estudio y sistema productivo. Se utilizaron datos retrospectivos correspondientes a 93 vacas Holstein primíparas del biotipo americano-canadiense, paridas en otoño entre 1994 y 2023 (hubo años que no se produjeron partos en otoño de vacas primíparas en el establecimiento).

Vacas de primer parto utilizadas por año: 1994 (6), 1995 (5), 1996 (5), 1997 (5), 1998 (3), 1999 (0), 2000 (0), 2001 (1), 2002 (0), 2003 (0), 2004 (5), 2005 (0), 2006 (1), 2007 (2), 2008 (7), 2009 (0), 2010 (0), 2011 (0), 2012 (1), 2013 (0), 2014 (4), 2015 (5), 2016 (5), 2017 (1), 2018 (3), 2019 (8), 2020 (5), 2021 (4), 2022 (0) y 2023 (11). Se incluyeron todas las vacas que hubiesen parido entre el 21 de marzo y el 20 de junio de cada año, atendiendo a que sean hijas de inseminación artificial con padres Holstein Americano, y días de lactancia no menor a 150 días. Hay años sin vacas, ya que no todos los años ingresaban vaquillonas de primer parto en otoño.

Los animales pertenecían al tambo-cabaña Holstein de la Asociación Cooperadora de la Escuela Agrotécnica Gral. José de San Martín y la Facultad de Ciencias Veterinarias (Universidad Nacional de Rosario), ubicado en Casilda, provincia de Santa Fe, Argentina (33°02'39" S, 61°10'05" O).

Durante todo el período analizado, los animales fueron manejados bajo un sistema a pastoreo con suplementación estratégica. En 1996, el tambo contaba con 51 vacas en ordeño y en el último año de registros contó con 36 vacas en ordeño (VO), manejadas en una misma unidad de ordeño.

La alimentación se basó en pasturas polifíticas y verdeos anuales, que aportaron entre el 40 y el 50% de la materia seca de la dieta, complementados con silos de planta entera de maíz y sorgo, heno de alfalfa, grano de maíz, expeller de soja y premezclas minerales, dependiendo de los valores de los mismos y el precio de la leche en los diferentes años analizados. La oferta diaria promedio fue de 20 ± 1 kg de MS por vaca día⁻¹.

El ordeño se realizó dos veces al día, en una sala de ordeño del tipo espina de pescado, con una sala de espera techada y con sistema de enfriamiento contra el estrés calórico.

Las vacas fueron manejadas en las mismas instalaciones durante todo el período y estuvieron sujetas a control lechero oficial de la Sociedad Rural de Totoras (Entidad Oficial N.º 13) que se realiza en el establecimiento desde el año 1992. El establecimiento implementó un control ginecológico periódico (palpación rectal, cada 30 días) y utilizó inseminación artificial con semen convencional importado de origen estadounidense y canadiense, manteniendo así la uniformidad genética del rodeo a lo largo de las tres décadas evaluadas.

Durante el período analizado (1994-2023), el sistema productivo estuvo expuesto a una marcada variabilidad ambiental, característica del centro-sur de la región pampeana argentina. En el área de Casilda (Santa Fe), los registros climatológicos regionales indican que la temperatura diaria típica varía estacionalmente desde valores cercanos a 5 °C durante el invierno hasta aproximadamente 30 °C en los meses estivales, mientras que las precipitaciones presentan una distribución estacional, con mayores aportes durante primavera-verano y períodos relativamente más secos en invierno. Esta variabilidad interanual en temperatura y régimen de lluvias constituye una fuente relevante de heterogeneidad ambiental que puede influir sobre la expresión productiva y reproductiva de vacas lecheras manejadas en sistemas a pastoreo (<https://www.tutiempo.net/clima/ws-874800.html>).

Variables analizadas. Para cada vaca se registraron las siguientes variables productivas y reproductivas:

PL305: producción de leche ajustada a 305 días (litros).

PG305: producción de grasa butirosa ajustada a 305 días (kg).

DL: días en lactancia terminada.

IPP: intervalo parto-parto (días).

Estas variables constituyen los rasgos centrales para evaluar la expresión productiva y la eficiencia reproductiva de vacas primíparas en sistemas pastoriles.

Análisis estadístico.

Análisis descriptivo y tendencias temporales. Se exploró la evolución anual de cada variable mediante medias anuales con intervalos de confianza del 95%, gráficos de dispersión por año, modelos lineales de tendencia (regresiones de cada rasgo contra año calendario), prueba de tendencia de Kendall para evaluar cambios monótonos sin asumir linealidad.

Los modelos se ajustaron utilizando errores estándar robustos cuando correspondía. La significancia estadística se estableció en $p < 0,05$.

La distribución de las variables se evaluó de forma exploratoria mediante inspección gráfica (histogramas y gráficos Q-Q) y pruebas de normalidad de Shapiro-Wilk, con el fin de verificar los supuestos generales de los análisis aplicados.

Análisis multivariado. Con el fin de evaluar la estructura conjunta entre rasgos productivos y reproductivos, se aplicaron matriz de correlaciones de Pearson, análisis de componentes principales (ACP) sobre casos completos, interpretación de cargas, contribuciones y agrupamientos biológicos. Las cargas factoriales se interpretaron considerando valores absolutos $\geq 0,50$ como indicativos de una contribución relevante de la variable al componente correspondiente. El número de componentes principales retenidos se determinó combinando el criterio de Kaiser (autovalores >1) y la proporción acumulada de varianza explicada, priorizando aquellos componentes que resultaron interpretables desde el punto de vista biológico. Estos criterios permitieron retener dos componentes principales, que explicaron conjuntamente el 89,8% de la variación total.

El ACP permitió identificar dimensiones latentes asociadas a producción (PL305, PG305, DL) y reproducción (IPP), y visualizar perfiles individuales mediante biplots. Se calcularon distancias de Mahalanobis sobre el espacio multivariado del ACP. Se consideraron posibles outliers aquellos individuos con valores superiores al percentil 97.5 de la distribución chi-cuadrado teórica, evaluando su coherencia biológica y su impacto en la estructura general.

Modelos segmentados y detección de quiebres.

Para identificar cambios estructurales en la trayectoria productiva a lo largo del tiempo, se aplicaron modelos lineales segmentados. En primer lugar, se empleó la prueba de Davies para evaluar la existencia de cambios significativos en la pendiente. Posteriormente, se estimaron los puntos de quiebre mediante ajuste iterativo y se compararon modelos lineales simples con modelos piecewise para PL305 y PG305. Los segmentos resultantes se interpretaron en relación con posibles transformaciones del sistema productivo (manejo, nutrición, infraestructura).

Todos los análisis se realizaron en R (v. 4.4.3), utilizando los paquetes: tidyverse (gestión y visualización de datos), ggplot2 (gráficos), FactoMineR y factoextra (ACP), segmented (modelos piecewise), Kendall (tendencias no paramétricas), car y performance (diagnósticos estadísticos).

RESULTADOS

Análisis descriptivo y evolución temporal.

La Figura 1 muestra las tendencias anuales de DL, IPP, PG305 y PL305 mediante ajustes GAM. Las producciones de leche (PL305) y grasa butirosa (PG305) ajustadas a 305 días evidenciaron un incremento sostenido a lo largo del período 1994-2023, acompañado por una ampliación moderada en la variabilidad interindividual. Los días en lactancia (DL) mostraron un aumento progresivo de menor magnitud, mientras que el intervalo parto-parto (IPP) no mostró cambios significativos en los modelos lineales, aunque los suavizados GAM sugieren un incremento leve y gradual a lo largo del período, manteniéndose en valores elevados (Lucy 2001, Esslemont y Kossaibati 2002). Los modelos lineales de tendencia confirmaron incrementos

significativos en PL305 ($+ 68,3$ L año⁻¹; EE = 10,6; $p < 0,001$), PG305 ($+ 2,96$ kg año⁻¹; EE = 0,389; $p < 0,001$) y DL ($+ 2,63$ días/año; EE = 0,905; $p = 0,0046$). No se detectaron cambios significativos en IPP ($+1,79$ días/año; EE = 1,30; $p = 0,172$). La prueba de Kendall corroboró estos patrones, mostrando tendencias positivas para PL305, PG305 y DL, y ausencia de tendencia para IPP.

Estructura multivariada de los rasgos. El análisis de correlaciones de Pearson mostró una asociación muy fuerte entre PL305 y PG305 ($r = 0,881$; $p < 0,001$). DL presentó correlaciones moderadas con PL305 ($r = 0,46$; $p < 0,001$) y PG305 ($r = 0,42$; $p < 0,001$), y una asociación fuerte con IPP ($r = 0,68$; $p < 0,001$). En contraste, las correlaciones entre IPP y los rasgos productivos fueron débiles, lo que indica una independencia relativa entre las dimensiones productiva y reproductiva.

El análisis de componentes principales (Figura 2) explicó el 89,8% de la variación total: CP1 (58,8%) representó un eje productivo integrado por PL305, PG305 y DL, mientras que CP2 (31,0%) reflejó una dimensión reproductiva dominada por el IPP. El biplot evidenció la separación entre ambas dimensiones y una tendencia general de incremento del componente productivo a lo largo del tiempo. El análisis de distancia de Mahalanobis identificó un único individuo con valores elevados de DL e IPP, considerado atípico desde el punto de vista estadístico. Sin embargo, su exclusión no modificó la orientación ni la interpretación de los componentes principales, por lo que fue retenido en el análisis.

Tendencias multivariadas y cambios estructurales.

El índice productivo derivado del ACP (PC1) mostró una trayectoria ascendente consistente con los resultados univariados. La prueba de Davies detectó cambios significativos en la pendiente de PL305 y PG305. Los modelos segmentados (Figuras 3 y 4) situaron los puntos de quiebre alrededor de 2017 para ambos rasgos, indicando una modificación estructural en el sistema que alteró la tasa de mejora productiva. Para DL e IPP no se detectaron quiebres estables, aunque los suavizados GAM mostraron un patrón creciente suave en DL y en IPP, sin evidenciar quiebres estructurales comparables a los observados en los rasgos productivos.

Las variables productivas (PG305 y PL305) muestran incrementos sostenidos a lo largo del período, mientras que DL evidencia un aumento moderado y el IPP se mantiene relativamente estable en el tiempo con valores altos ($478,5 \pm 124$) días. La Figura 2 resume la evolución conjunta de los principales rasgos productivos y reproductivos en un mismo formato.

El test de Davies indicó un cambio significativo en la pendiente. El modelo segmentado ubicó el quiebre alrededor de 2017, sugiriendo una modificación estructural del sistema que impactó la trayectoria productiva.

Al igual que PL305, PG305 presentó un punto de quiebre cercano a 2017, consistente con un cambio en el sistema pastoril que alteró la tasa de incremento productivo.

Tendencias temporales de los rasgos productivos y reproductivos (1994–2023)

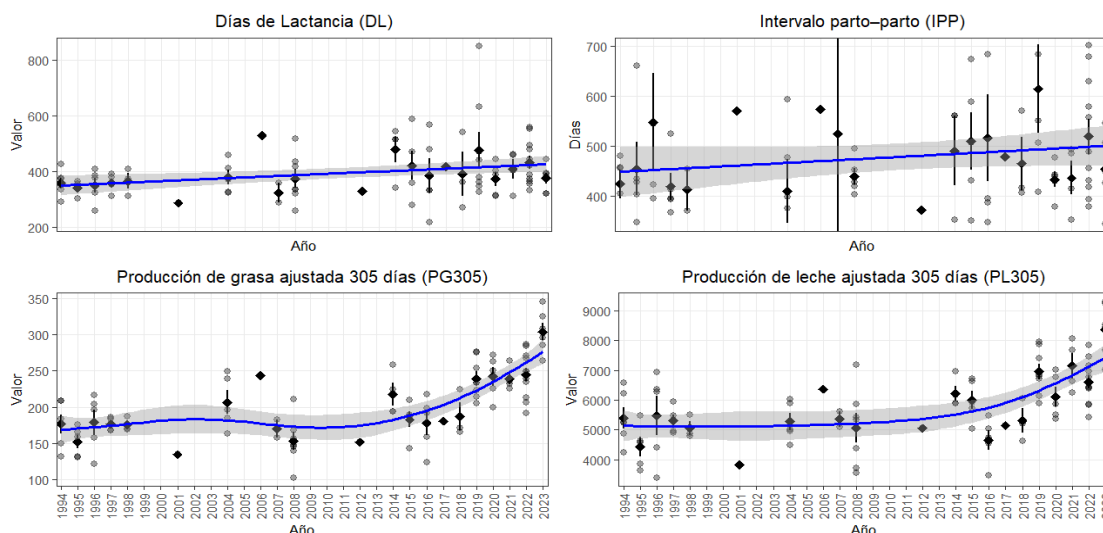


Figura 1. Tendencias temporales de los rasgos productivos y reproductivos en vacas Holstein primíparas bajo un sistema pastoril argentino (1994-2023). Referencia. Puntos: registros individuales por vaca y año. Línea azul: ajuste suavizado mediante GAM con intervalo de confianza del 95%.

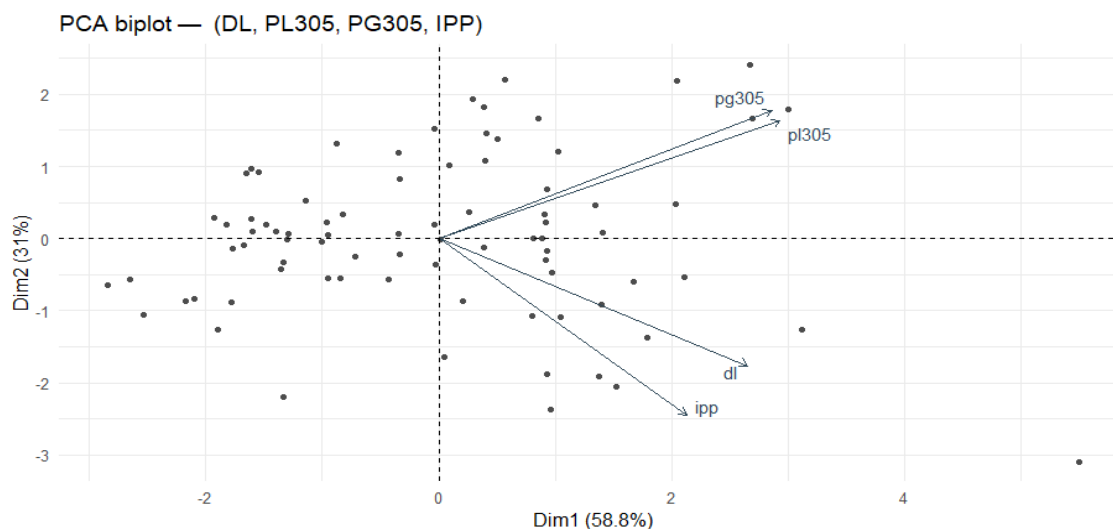


Figura 2. Biplot del análisis de componentes principales (ACP) basado en PL305, PG305, DL e IPP. CP1 (58,8%) representa la dimensión productiva integrada por PL305, PG305 y DL. CP2 (31,0%) refleja la dimensión reproductiva asociada al IPP. El biplot muestra la separación entre los ejes productivo y reproductivo y la variabilidad interindividual.

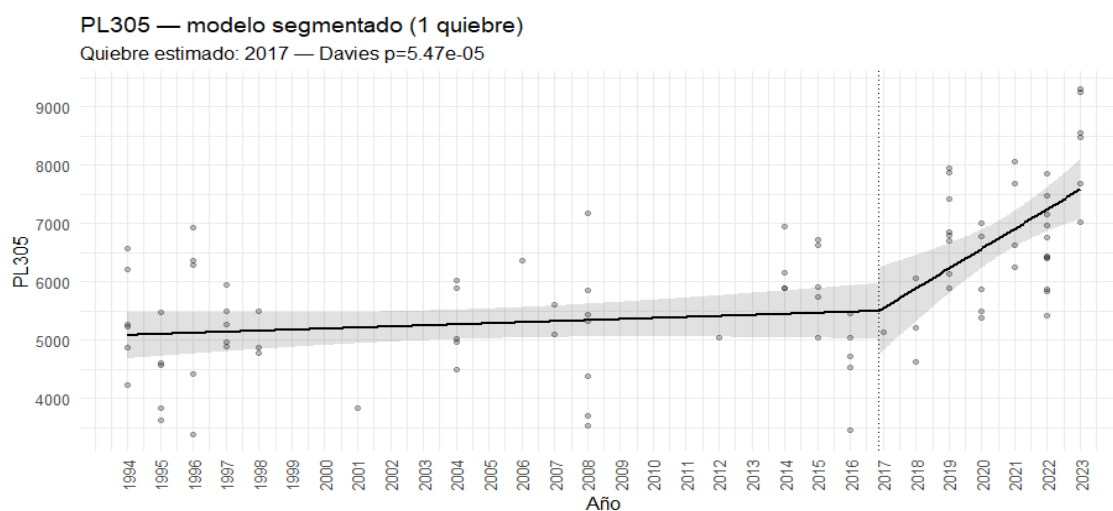


Figura 3. Modelo lineal segmentado para la producción de leche ajustada a 305 días (PL305) con detección de punto de quiebre.

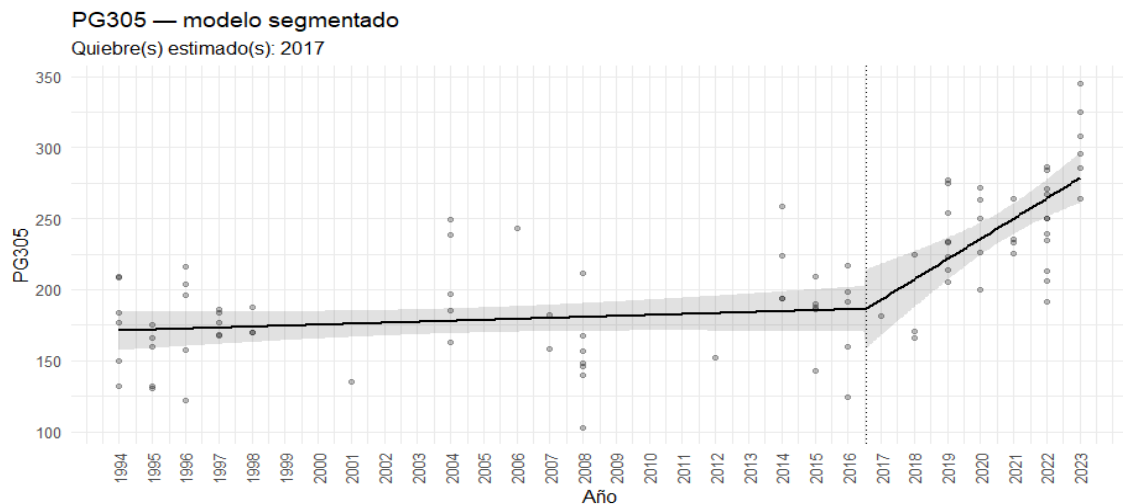


Figura 4. Modelo lineal segmentado para la producción de grasa ajustada a 305 días (PG305) con detección de punto de quiebre.

DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos muestran que, en un período de tres décadas, las vacas Holstein primíparas manejadas bajo un sistema a pastoreo argentino evidenciaron mejoras sostenidas en los rasgos productivos, mientras que los parámetros reproductivos mantuvieron una variabilidad más estable y alta. Esta dinámica temporal refleja la interacción entre una base genética altamente homogénea, propia de la raza Holstein a nivel global, y un ambiente pastoril sometido a variaciones en manejo, nutrición y condiciones climáticas.

Mejoras sostenidas en los rasgos productivos a lo largo del tiempo. Las tendencias positivas observadas en PL305, PG305 y, en menor medida, en DL, indican un proceso acumulativo de optimización del sistema productivo. La magnitud y consistencia de las pendientes, corroboradas tanto por modelos lineales como por pruebas de tendencia no paramétricas, sugieren avances graduales en la disponibilidad y calidad de la dieta, la eficiencia del manejo y la infraestructura del establecimiento. Tal progresión coincide con reportes que documentan cómo ajustes en la suplementación, utilización de reservas y eficiente manejo reproductivo pueden traducirse en incrementos medibles del desempeño productivo en ambientes bajo pastoreo (Marini y Di Masso 2019, Frana Bisang et al. 2025). Adicionalmente, estos avances podrían estar asociados con mejoras genéticas que han incrementado la eficiencia alimenticia, permitiendo que las vacas transformen de manera más eficiente el alimento en leche, un rasgo con variación genética susceptible de selección en programas de cría y mejoramiento genómico en bovinos lecheros (Ruban y Danshyn 2025).

Sin embargo, estas mejoras deben interpretarse dentro del marco de un ambiente más variable y menos controlado que aquellos característicos de sistemas confinados. Factores como la estacionalidad de la oferta forrajera, la carga térmica y el manejo de reservas generan condiciones fluctuantes que limitan la expresión del

potencial productivo individual, incluso en animales con mérito genético elevado.

Estructura multivariada: independencia relativa entre producción y reproducción. El análisis multivariado reveló que los rasgos productivos (PL305, PG305 y DL) conforman un bloque biológico coherente, mientras que el IPP constituye una dimensión independiente. Esta partición indica que, bajo condiciones a pastoreo, el rendimiento lácteo y la duración de lactancia se vinculan estrechamente, pero no necesariamente se asocian con la eficiencia reproductiva.

La literatura coincide en que la reproducción en sistemas a pastoreo está fuertemente determinada por el balance energético posparto y el estrés térmico, más que por el mérito genético de producción (Pedernera et al. 2008, Polsky y von Keyserlingk 2017). Por ello, la independencia del IPP respecto de PL305 y PG305 observada en este estudio se alinea con los mecanismos fisiológicos que modulan la reanudación del ciclo ovárico y la expresión de estros bajo ambientes de mayor exigencia ambiental.

Además, la presencia de un outlier con DL e IPP elevados resalta cómo variaciones puntuales en manejo o registros pueden generar respuestas reproductivas atípicas sin modificar la estructura general del sistema.

Cambios estructurales en la trayectoria productiva. La detección de un quiebre alrededor de 2017 en las curvas de PL305 y PG305 constituye evidencia de un cambio estructural en el sistema. Esta transición puede reflejar modificaciones en la estrategia de suplementación, en la gestión del pastoreo, en la calidad de las reservas o en la infraestructura del tambo.

La ocurrencia de un cambio de pendiente en ambas variables productivas sugiere que las transformaciones del sistema afectaron simultáneamente la disponibilidad energética y la eficiencia de conversión en las vacas primíparas. Este tipo de reconfiguraciones ha sido reportado en estudios que analizan sistemas a pastoreo sometidos a mejoras tecnológicas, variaciones en la intensidad de

suplementación o cambios en las condiciones climáticas regionales (Menegazzi et al. 2025).

Interpretación bajo el marco de la interacción genotipo × ambiente. La homogeneidad genética de la raza Holstein, documentada ampliamente en estudios recientes sobre consanguinidad y pérdida de diversidad (Dechow et al. 2020, Mekanjuola et al. 2020, Gutiérrez-Reinoso et al. 2022), implica que la variación fenotípica entre años dentro de un mismo rodeo es atribuible principalmente al ambiente y no a diferencias genéticas. En este estudio, la estabilidad reproductiva y la mejora gradual de los rasgos productivos refuerzan esta interpretación.

La marcada modulación ambiental del fenotipo concuerda con trabajos que demuestran que la expresión del mérito genético disminuye bajo estrés térmico, dietas de menor densidad energética o ambientes pastoriles con restricciones nutricionales (Pedernera et al. 2008, Hammami et al. 2009, Polsky y von Keyserlingk 2017). Los patrones observados aquí sugieren que el ambiente pastoril actuó como un filtro que limitó la expresión completa del potencial productivo, al tiempo que permitió observar cambios fenotípicos derivados de mejoras de manejo.

Implicancias para sistemas pastoriles con vacas Holstein primíparas. El conjunto de resultados indica que las mejoras productivas responden principalmente a cambios acumulativos en manejo y nutrición, mientras que la reproducción permanece relativamente estable y elevada a lo largo del período analizado. La variabilidad observada en el intervalo parto-parto parece estar influenciada por determinantes fisiológicos y de manejo que no fueron medidos directamente en este estudio, tales como el balance energético posparto, la condición corporal o el estrés térmico, lo que es consistente con lo reportado previamente para sistemas pastoriles (Lucy 2001, Walsh et al. 2011). De igual manera, la estructura multivariada evidencia que producción y reproducción no necesariamente avanzan en paralelo. Los quiebres detectados señalan momentos clave en los que ajustes del sistema impactaron la trayectoria productiva por lo que la G×E constituye un marco apropiado para interpretar la evolución observada en esta población homogénea. Esta primera mirada refuerza que, en sistemas a pastoreo, la mejora del desempeño no depende de modificar la base genética, ya altamente homogénea, sino de optimizar las condiciones ambientales que determinan la expresión fenotípica.

El análisis longitudinal de tres décadas evidenció que las vacas Holstein primíparas manejadas en un sistema a pastoreo argentino experimentaron mejoras sostenidas en los rasgos productivos, mientras que los rasgos reproductivos mostraron una variación más estable y sin mejoras estructurales significativas. La estructura multivariada reveló la existencia de dos dimensiones biológicas principales: un eje productivo que integró producción de leche, producción de grasa y duración de lactancia, y un eje reproductivo independiente representado por el intervalo parto-parto.

La detección de un punto de quiebre alrededor de 2017 indica que transformaciones del sistema, nutricionales, de manejo o infraestructura, modificaron la trayectoria

productiva, evidenciando la sensibilidad del fenotipo a cambios ambientales dentro de un mismo rodeo. Dado el alto grado de homogeneidad genética de la población Holstein, estos patrones confirman que la variación observada responde predominantemente a factores ambientales y a la interacción genotipo × ambiente.

En este sentido, los resultados deben interpretarse considerando que el estudio se basa en registros productivos y reproductivos históricos, sin información individual detallada sobre variables fisiológicas o ambientales, lo que limita inferencias causales directas.

CONCLUSIÓN

En conjunto, se concluye que los resultados sugieren que la optimización del ambiente a pastoreo constituye el principal determinante para mejorar el rendimiento de vacas Holstein primíparas, y que el análisis multivariado y longitudinal ofrece una herramienta valiosa para identificar los mecanismos mediante los cuales el sistema productivo modula la expresión fenotípica.

Declaración de contribución de autoría de CRediT.

CR: Conceptualización, Investigación, Metodología, Escritura – borrador original. FGEA: Investigación, Metodología, Visualización, Redacción – revisión y edición. MMG: Curación de datos, Análisis formal, Redacción – revisión y edición. MPR: Conceptualización, Investigación, Metodología, Visualización, Escritura – borrador original, Curación de datos, Redacción – revisión y edición.

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.

Disponibilidad de datos. Los datos estarán disponibles previa solicitud.

ORCID

Castro, R. ✉ castroricardo@fcv.unr.edu.ar,  <https://orcid.org/0009-0004-4971-2663>

Frana Bisang, E. ✉ emanuelfrana@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-1815-3692>

Molina, M.G. ✉ gabmolin@gmail.com,  <https://orcid.org/0000-0002-6773-0513>

Marini, P.R. ✉ pmarini@unr.edu.ar,  <https://orcid.org/0000-0003-0826-0387>

REFERENCIAS

1. Ablondi M, Malacarne M, Cipolat-Gotet C, van Kaam JT, Sabbioni A, Summer A. Genome-wide scan reveals genetic divergence in Italian Holstein cows bred within PDO cheese production chains. *Scientific Reports*. 2021; 11: 12601. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-92168-1>

2. Berry DP, Buckley F, Dillon P, Evans RD, Rath M, Veerkamp RF. Genetic relationships among body condition score, body weight, milk yield, and fertility in dairy cows. *J Dairy Sci.* 2003; 86: 2193-2204. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(03\)73809-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(03)73809-0)
3. Brito LF, Bedere FN, Douhard F, Oliveira HR, Arnal M, Peñagaricano F, Schinckel AP, Baes CF, Miglior F. Review: Genetic selection of high-yielding dairy cattle toward sustainable farming systems in a rapidly changing world. *Animal.* 2021; 15(S1): 100282. <https://doi.org/10.1016/j.animal.2021.100292>
4. Dechow CD, Liu WS, Specht LW, Blackburn H. Reconstitution and modernization of lost Holstein male lineages using samples from a gene bank. *J Dairy Sci.* 2020; 103: 4510-4516. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-17753>
5. Dillon JL, Hardaker, JB. Farm management research for small farmer development / by John L. Dillon, J. Brian Hardaker. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nation. 1993.; p. 145.
6. Diskin MG, Morris DG. Embryonic and early foetal losses in cattle and other ruminants. *Reprod Domest Anim.* 2008; 43(Suppl. 2): 260-267. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0531.2008.01171.x>
7. Ducrocq V. Statistical analysis of length of productive life for dairy cows of the Normande breed. *J. Dairy Sci.* 1994; 77: 855-866. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(94\)77020-X](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(94)77020-X)
8. Engler P, Cuatrin A, Apez M, Maekawa M, Litwin G, Centeno A, Moretto M. Encuesta sectorial lechera del INTA: Resultados del ejercicio productivo 2020–2021. Informe Técnico INTA. 2022 Disponible en: <https://www.ocla.org.ar/contents/news/details/25641619-encuesta-lechera-inta-2020-2021-documento-completo>
9. Falconer DS, Mackay TFC. Introduction to quantitative genetics (4th ed.). Longman Group Ltd. 1996. pp 480
10. Fischman ML, Torres P Estadísticas del mercado de semen bovino de la argentina 2020 Estadísticas del mercado de semen bovino de la argentina 2020. Cámara Argentina de Biotecnología de la Reproducción e Inseminación Artificial (CABIA). *Taurus* 2021. Disponible en:
11. Frana Bisang E, Pipino D, Quercia E, Picardi M, Marini PR. Producción y reproducción de vacas lecheras Holstein puras y sus cruzamientos con Jersey y Montbéliarde en un sistema a pastoreo de Argentina. *Rev vet.* 2025; 36(2): 1-5. <https://doi.org/10.30972/vet.3628505>
12. Gao J, Gonzalez-Prendes R, Liu Y, Kantanen J, Jinja C, Ghanem N, Kugonza DR, Makgahlela M, Bovenhuis H, Groenen MAM, Crooijmans RPMA. Evidence of early genomic selection in Holstein Friesian across African and European ecosystems. *BMC Genomics* 2025; 26: 615 <https://doi.org/10.1186/s12864-025-11828-y>
13. Gutiérrez-Reinoso MA, Aponte PM, García-Herreros M. A review of inbreeding depression in dairy cattle: Current status, emerging control strategies, and future prospects. *J Dairy Res.* 2022; 89: 3-12. <https://doi.org/10.1017/S0022029922000188>
14. Esslemont RJ, Kossaibati MA. The costs of poor fertility and disease in UK dairy herds DAISY research No 5 University of Reading. 2002. p.16.
15. Hammami H, Rekik B, Gengler N. Genotype by environment interaction in dairy cattle. *Biotechnol. Agron. Soc. Environ.* 2009; 13:155-164.
16. Hair JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE. *Multivariate data analysis* (7th ed.). Pearson Education. 2014. p.739.
17. Hodgson J. Grazing management: Science into practice. Longman Scientific & Technical. 1990. p.203.
18. Lucy MC. Reproductive loss in high-producing dairy cattle: Where will it end? *J. Dairy Sci.* 2001; 84: 1277-1293. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(01\)70158-0](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(01)70158-0)
19. Lynch M, Walsh B. Genetics and analysis of quantitative traits. Sinauer Associates. 1998.
20. Makanjuola BO, Schenkel FS, Miglior F, Abdalla EA, Baes CF. Effect of genomic selection on rate of inbreeding, coancestry, and effective population size in Holstein and Jersey cattle. *J Dairy Sci.* 2020; 103: 5183-5199. <https://doi.org/10.3168/jds.2019-18013>
21. Marini PR, Di Masso RJ. Edad al primer parto e indicadores de eficiencia en vacas lecheras con diferente potencialidad productiva en sistemas a pastoreo. *La Granja.* 2019; 29(1): 84-96. <https://doi.org/10.17163/lgr.n29.2019.07>
22. Menegazzi G, Mendina GR, Grille L, Méndez MN, Pons V, Pedemonte A, Adrien ML, Meikle A, Gerrits WJJ, Dijkstra J, Chilibroste P. Performance of autumn- and spring-calving Holstein dairy cows confined indoors or managed with pasture and supplementation under various housing conditions. *J Dairy Sci.* 2025; 108(7): 7179-7201. <https://doi.org/10.3168/jds.2024-26084>
23. Miglior F, Muir BL, Van Doormaal BJ. Selection indices in Holstein cattle of various countries. *J Dairy Sci.* 2005; 88: 1255-1263. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(05\)72792-2](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(05)72792-2)
24. Mugambe J, Ahmed RH, Thaller G, Schmidtman C. Impact of inbreeding on production, fertility, and health traits in German Holstein dairy cattle utilizing various inbreeding estimators. *J Dairy Sci.* 2024; 107: 4714-4725. <https://doi.org/10.3168/jds.2023-23728>
25. Pedernera M, García SC, Horagadoga A, Barchia I, Fulkerson WJ. Energy balance and reproduction in dairy cows fed to achieve low or high milk production in a pasture-based system. *J Dairy Sci.* 2008; 91: 3896-3907. <https://doi.org/10.3168/jds.2008-1098>
26. Polsky L, von Keyserlingk MAG. Invited review: Effects of heat stress on dairy cattle welfare. *J Dairy Sci.* 2017; 100(11): 8645-8657. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-12651>
27. Ruban SY, Danshyn VO. Methodology of modern selection programs in dairy cattle. *Animal Breeding and Genetics.* 2025; 70: 209-226. <https://doi.org/10.31073/abg.70.20>
28. VanRaden PM. Invited Review: Selection on net merit to improve lifetime profit. *J Dairy Sci.* 2004; 87(10): 3125-3131. [https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302\(04\)73447-5](https://doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(04)73447-5)
29. Walsh SW, Williams EJ, Evans ACO. A review of the causes of poor fertility in high milk producing dairy cows. *Anim Reprod Sci.* 2011; 123(3-4): 127-138. <https://doi.org/10.1016/j.anireprosci.2010.12.001>