
ADOPCIÓN DE
**INNOVACIONES
GANADERAS
SOSTENIBLES**
EVIDENCIA DE
AMÉRICA LATINA

Editado por:

Allen Blackman
Gonzalo Muñoz
Lina Salazar
Paul Winters

ADOPCIÓN DE INNOVACIONES GANADERAS SOSTENIBLES: EVIDENCIA DE AMÉRICA LATINA

Editado por:

Allen Blackman, Gonzalo Muñoz,
Lina Salazar y Paul Winters



Códigos JEL: D22, D24, D81, L21, O33, Q1, Q2, Q5, Q12, Q15, Q16, Q18, Q40, Q55, Q56, Q57 y Z13.

Palabras clave: barreras para la adopción, decisiones de adopción, políticas agrícolas, ganadería bovina, experimento de elección, cambio climático, Orinoquía colombiana, sostenibilidad ambiental, extensión con enfoque de género, evaluación de impacto, apoyo institucional, tenencia de la tierra, ganadería, manejo ganadero, manejo de pasturas, sistemas ganaderos basados en pasturas, aversión al riesgo, carga ganadera, sostenibilidad, pastoreo sostenible, ganadería sostenible, adopción de tecnología, desarrollo rural.

Banco Interamericano de Desarrollo
1300 New York Avenue, N.W.
Washington, D.C. 20577

Copyright © **2026** Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una Licencia Internacional Pública de Atribución/Reconocimiento 4.0 de Creative Commons CC BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/legalcode.es>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

Todas las disputas que surjan en relación con esta licencia y que no puedan resolverse de manera amistosa se resolverán de acuerdo con el siguiente procedimiento. Mediante una notificación de mediación comunicada por medios razonables por usted o el licenciante a la otra parte, la disputa será sometida a mediación no vinculante de conformidad con el Reglamento de Mediación de la Organización Mundial de la Propiedad Intelectual (OMPI). Cualquier disputa que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil Internacional (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo, y el uso del logotipo del BID no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, su Directorio Ejecutivo ni de los países que representan.



CONTENIDOS

LISTA DE AUTORES	6
------------------	---



RESUMEN	8
1.1 Motivación	9
1.2 Preguntas de investigación	10
1.3 Artículos	11
1.4 Hallazgos	12
Referencias	14



PREFERENCIAS POR PRÁCTICAS DE PRODUCCIÓN SOSTENIBLES EN SISTEMAS GANADEROS EXTENSIVOS: EVIDENCIA DE URUGUAY	17
Resumen	18
Introducción	19
2.1 Contexto geográfico e institucional	22
2.2 Experimento de elección	24
2.3 Factores de comportamiento	28
2.4 Enfoque de modelización para elecciones discretas	31
2.5 Construcción de variables y descripción de la muestra	33
2.6 Resultados	37
2.7 Conclusiones	45
Agradecimientos	46
Referencias	47
Apéndice	57



RESULTADOS DE LA TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA GANADERA SOSTENIBLE: EVIDENCIA DE URUGUAY	64
Resumen	65
Introducción	66
3.1 Contexto y descripción del programa	69
3.2 Materiales y métodos	74
3.3 Resultados	84
3.4 Conclusiones y discusión	87
Agradecimientos	89
Referencias	90
Apéndice	95



LIMITACIONES A LA SOSTENIBILIDAD EN LA GANADERÍA: EVIDENCIA PARA MÉXICO	106
Resumen	107
Introducción	108
4.1 Revisión de la literatura	110
4.2 Datos y metodología	114
4.3 Resultados	119
4.4 Discusión	122
4.5 Conclusión	129
Agradecimientos	131
Referencias	132
Apéndice	137



DECISIONES EN MATERIA DE GANADERÍA EN UNA FRONTERA POSCONFLICTO: EVIDENCIA DE LA ORINOQUÍA COLOMBIANA	143
Resumen	144
Introducción	145
5.1 Antecedentes	147
5.2 Materiales y métodos	149
5.3 Datos	155
5.4 Resultados	162
5.5 Discusión y limitaciones	166
5.6 Conclusiones	167
Agradecimientos	169
Referencias	170
Apéndice	177



¿QUÉ CONFIGURA LAS ADOPCIÓN DE SISTEMAS SILVOPASTORILES Y GANADERÍA REGENERATIVA? EVIDENCIA DE CHILE	201
Resumen	202
Introducción	203
6.1 Revisión de la literatura	205
6.2 Marco analítico	207
6.3 Datos	208
6.4 Marco empírico	213
6.5 Resultados	214
6.6 Discusión	219
6.7 Conclusiones	221
Agradecimientos	223
Referencias	224
Apéndice	232

LISTA DE AUTORES

Emilio Aguirre, Facultad de Ciencias Sociales de la Universidad de la República y Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Uruguay.

Juan Baraldo, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Uruguay.

Saúl Basurto-Hernández, Facultad de Economía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.

Allan Beltrán, Departamento de Economía, Universidad de Birmingham, Reino Unido.

Allen Blackman, Sector de Cambio Climático y Desarrollo Sostenible, Banco Interamericano de Desarrollo.

Felipe Bravo-Peña, Escuela O'Neill de Asuntos Públicos y Ambientales, Indiana University Bloomington, Estados Unidos.

Marcelo Caffera, Departamento de Economía, Universidad de Montevideo, Uruguay.

Miguel Carriquiry, Universidad de la República, Uruguay.

Patricia Correa, Universidad Católica del Uruguay, Uruguay.

Diana Elisa Correa-Pinilla, Red de Innovación en Ganadería y Especies Menores, Centro de Investigación La Libertad, AGROSAVIA, Colombia.

Carlos Fontanilla-Díaz, investigador independiente.

Hernando Flórez-Díaz, Red de Innovación en Ganadería y Especies Menores, Centro de Investigación La Libertad, AGROSAVIA, Colombia.

Santiago Guerrero, Universidad Católica del Uruguay, Uruguay.

Claus Köbrich, Departamento de Ciencias Animales, Universidad de Chile, Chile.

Laure Kuhfuss, Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement, Francia.

Hugo Laguna, Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca, Uruguay.

Emiliano López Barrera, Departamento de Economía Agrícola, Universidad Texas A&M - College Station, Estados Unidos.

Adriana María Molina-Romero, Red de Innovación en Cultivos de Transición y Agroindustriales, Centro de Investigación La Libertad, AGROSAVIA, Colombia.

Gonzalo Muñoz, División de Agricultura y Desarrollo Rural, Banco Interamericano de Desarrollo.

Luis Peña-Lévano, Escuela de Medicina Veterinaria, University of California - Davis, Estados Unidos.

José Ignacio Rivero-Wildemaue, Universidad Católica del Uruguay, Uruguay.

Francisco Rosas, Universidad ORT Uruguay y Centro de Investigaciones Económicas, Uruguay.

Lina Salazar, División de Agricultura y Desarrollo Rural, Banco Interamericano de Desarrollo.

Homa Taheri, Departamento de Economía, Indiana University Bloomington, Estados Unidos.

José Velazco, Universidad Católica del Uruguay, Uruguay.

Paul Winters, Universidad de Notre Dame, Estados Unidos.

1

RESUMEN

Allen Blackman, Gonzalo Muñoz,
Lina Salazar y Paul Winters



1.1 Motivación

En América Latina, el sector ganadero genera beneficios económicos fundamentales. Contribuye con algo menos de la mitad del PIB agrícola y ayuda a mitigar la pobreza y la inseguridad alimentaria (Williams y Anderson, 2019; Otte et al., 2012). Dado que la demanda mundial de productos ganaderos está creciendo rápidamente –se prevé que la demanda de carne aumente un 80% en los próximos 25 años–, es probable que estos beneficios económicos cobren aún más importancia con el tiempo (Nadathur et al., 2017).

Sin embargo, la ganadería también conlleva importantes costos ambientales. Representa el 14% de las emisiones de gases de efecto invernadero de América Latina, es la causa inmediata de la gran mayoría de la deforestación en la región y constituye una de las principales fuentes de contaminación del agua (Arango et al., 2020; Pendril et al., 2022; Li et al., 2022).

Para mantener los beneficios económicos fundamentales del sector ganadero de América Latina y, al mismo tiempo, reducir al mínimo su huella ambiental, los productores deben adoptar tecnologías sostenibles, limpias y respetuosas con el clima. Entre ellas se incluyen sistemas mejorados de alimentación y pastoreo, sistemas silvopastoriles y prácticas mejoradas de gestión reproductiva y de los hatos.

La evidencia más reciente sugiere que estas tecnologías resultan especialmente prometedoras para las iniciativas de mitigación del cambio climático. Por ejemplo, a partir de datos mundiales, Chang et al. (2021) concluyen que, entre 2000 y 2018, los aumentos en la eficiencia de la producción de proteínas impulsados por la tecnología redujeron la intensidad de las emisiones de metano –un potente gas de efecto invernadero– en la mayoría de las categorías ganaderas. Además, concluyen que este fenómeno, que se genera desde la oferta, tiene efectos de mitigación mucho mayores que los esfuerzos que se dan desde la demanda para reducir los productos de origen animal en las dietas de los consumidores. Por su parte, Herrero et al. (2016) concluyen que, a nivel mundial, la ganadería representa hasta la mitad del potencial técnico de mitigación del sector de la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU).

Por lo tanto, es importante comprender los obstáculos y las oportunidades que plantea la adopción de tecnologías ganaderas sostenibles en América Latina y, a partir de ese conocimiento, extraer lecciones para la formulación de políticas. Sin embargo, disponemos de datos limitados sobre la adopción de tecnologías ganaderas sostenibles, y aún menos sobre este tema en América Latina y otras regiones en desarrollo, donde las condiciones

socioeconómicas y geofísicas suelen diferir de las de los países desarrollados. Fruto de más de medio siglo de investigación, existe una amplia bibliografía que analiza la adopción de tecnologías agrícolas (véanse Rosário *et al.*, 2022, para una revisión reciente, y Ruzzante *et al.*, 2021, para un metaanálisis reciente). Una bibliografía mucho más reducida se centra en las tecnologías agrícolas sostenibles (véanse Lu *et al.*, 2022, y Foguesatto *et al.*, 2020, para revisiones recientes). Sin embargo, casi toda esta literatura examina las innovaciones agronómicas, no las ganaderas (Prokopy *et al.*, 2008). Por ejemplo, una revisión sistemática reciente de la evidencia sobre la adopción de prácticas agrícolas sostenibles en África reveló que solo el 2,5% examinaba las innovaciones ganaderas (Arslan *et al.*, 2022).

1.2 Preguntas de investigación

El objetivo general de esta monografía es ampliar la base empírica sobre los obstáculos y las oportunidades para la adopción de tecnologías ganaderas sostenibles en América Latina. En concreto, los cinco artículos abordan una o varias de las siguientes cuestiones de investigación, relacionadas entre sí:



¿Cuáles son los factores determinantes de la adopción de tecnologías ganaderas sostenibles en América Latina?



¿Cuáles son las preferencias de los productores al respecto?



¿Qué políticas y programas pueden acelerar la adopción?



1.3 Artículos

Los cinco artículos que componen la monografía (Tabla 1.1) son el resultado de una convocatoria abierta y competitiva organizada por el Banco Interamericano de Desarrollo (BID), dirigida a instituciones de investigación latinoamericanas. El proyecto incluyó un proceso de presentación de propuestas y selección en dos fases, llevado a cabo a finales de 2023 y principios de 2024; comentarios continuos por parte de un comité científico, y dos talleres celebrados en abril de 2024 y abril de 2025.

Tabla 1 Artículos de la monografía: resumen					
Autores	País	Tecnologías	Objetivo	Métodos	Datos
Aguirre et al.	Uruguay	Prácticas de gestión de hatos reproductivos	Evaluar el impacto del Programa de Producción Familiar Integral y Sustentable (PFIS) en producción de carne vacuna, adopción de tecnologías e intensidad de emisiones	Regresión discontinua	Registros de postulación del programa PFIS y microdatos del Sistema Nacional de Información Ganadera a nivel del productor
Basurto et al.	México	Seis prácticas de pastoreo agregadas en un índice de sostenibilidad ambiental	Caracterizar los factores determinantes de la adopción de prácticas ganaderas sostenibles	Regresión de paneles fraccionados	Datos de panel a nivel municipal del Censo Agrícola
Bravo-Peña et al.	Chile	Sistemas silvopastoriles y enfoques regenerativos de ganadería	Caracterizar los factores determinantes de la adopción de prácticas ganaderas sostenibles	Regresión logística y probit bivariada	Datos originales de una encuesta a nivel de productores
Guerrero et al.	Uruguay	Sistemas de pastoreo mejorados; intensificación sostenible; enfoques silvopastoriles	Caracterizar y analizar las preferencias de los ganaderos respecto de la adopción de prácticas ganaderas sostenibles	Experimento de elección discreta	Datos originales de una encuesta a nivel de productores
Flórez-Díaz et al.	Colombia	Prácticas mejoradas de manejo de pastos	Caracterizar los factores determinantes de la adopción de prácticas ganaderas sostenibles	Regresión logística	Datos originales de encuestas a nivel de productores combinados con datos de sistemas de información geográfica (SIG)

De los artículos de la monografía, tres tienen como objetivo identificar los factores determinantes de la adopción de prácticas ganaderas sostenibles:

- ➔ **Basurto et al.** utilizan datos de panel a nivel municipal extraídos de dos rondas del Censo Agrícola, junto con una regresión de panel fraccional, para evaluar los factores determinantes de la adopción de tecnologías de pastoreo sostenible en México.
- ➔ **Bravo-Peña et al.** utilizan datos originales de una encuesta transversal a nivel de productores, junto con regresión logística y regresión probit bivariada, para caracterizar los factores determinantes de la adopción de sistemas silvopastoriles y tecnologías ganaderas regenerativas en Chile.
- ➔ **Flórez-Díaz et al.** utilizan regresión logística, junto con datos originales de una encuesta transversal a nivel de productores y datos de sistemas de información geográfica, para analizar los factores determinantes de la adopción de tecnologías mejoradas de manejo de pastos en Colombia.

En cuanto a los otros dos artículos, el desarrollo es el siguiente:

- ➔ **Aguirre et al.** presentan una evaluación de impacto cuasiexperimental. Utilizan un diseño de regresión discontinua con registros administrativos de panel a nivel de productores y el formulario de postulación al programa, para identificar el efecto causal de un programa destinado a promover prácticas de gestión reproductiva hatos en Uruguay sobre producción de carne vacuna, adopción de tecnologías e intensidad de emisiones de gases de efecto invernadero.
- ➔ **Guerrero et al.** utilizan un experimento de encuesta de elección discreta, junto con medidas conductuales de riesgo y preferencias temporales, para caracterizar las preferencias de los productores por sistemas de pastoreo mejorados, la intensificación sostenible y los enfoques silvopastoriles en Uruguay.

1.4 Hallazgos

Del conjunto de cinco artículos se desprenden varias conclusiones generales. En primer lugar, no es recomendable generalizar sobre los factores que impulsan la adopción de tecnologías ganaderas sostenibles en América Latina: estos factores son específicos tanto de la tecnología como del lugar. Por ejemplo, Bravo-Peña et al. observan que, en Chile, el tamaño de la explotación está correlacionado positivamente con la adopción de sistemas silvopastoriles, en igualdad de condiciones, pero correlacionado negativamente con la adopción de tecnologías ganaderas re-

generativas. De manera similar, Guerrero *et al.* observan que se necesitan incentivos financieros para promover la adopción de sistemas silvopastoriles, pero no de prácticas de intensificación sostenible.

En este sentido, la tenencia de la tierra es un factor relevante. Por ejemplo, Flórez-Díaz *et al.* observan que, en Colombia, la propiedad de la tierra está correlacionada con la adopción de prácticas mejoradas de manejo de pastos y de carga animal sostenible, y Basurto *et al.* constatan que, en México, la tenencia privada de la tierra, frente a la comunal, está correlacionada con la adopción de prácticas de pastoreo sostenibles.

En tercer lugar, no todos los resultados positivos están alineados: la adopción de una tecnología ganadera sostenible no siempre aumenta las posibilidades de adoptar otras. Por ejemplo, Bravo-Peña *et al.* concluyen que, en Chile, la adopción de sistemas silvopastoriles no está correlacionada con la adopción de tecnologías ganaderas regenerativas, y Flórez-Díaz *et al.* concluyen que, en Colombia, la adopción de un manejo sostenible de pastos no está correlacionado con decisiones sostenibles en materia de carga animal.

En cuarto lugar, la adopción de innovaciones ganaderas sostenibles no garantiza un impacto significativo en los resultados esperados en la producción. Aguirre *et al.* encontraron que, en Uruguay, aunque un programa destinado a acelerar la adopción de tecnologías ganaderas sostenibles impulsó la adopción de prácticas de gestión reproductiva en sistemas de producción ganadera, no tuvo un efecto estadísticamente significativo en la producción de carne vacuna por hectárea ni en la intensidad de emisiones de gases de efecto invernadero.

Por último, los cuatro estudios que pretenden explicar desde una perspectiva econométrica la adopción de tecnologías ganaderas sostenibles (es decir, todos excepto el de Guerrero *et al.*, que se centra en las preferencias de los productores) concluyen que dos de las intervenciones de política más habituales —mejorar el acceso al crédito o proporcionar extensión técnica— están correlacionadas con la adopción, al menos en el caso de algunas tecnologías y subgrupos.

Tal como se detalla en los artículos, estos hallazgos tienen diversas implicaciones para las políticas. Quizás lo más importante, como señalan todos y cada uno de los artículos, es que es poco probable que las políticas de enfoque único destinadas a promover la adopción resulten eficaces o eficientes. Por el contrario, las políticas deben estar cuidadosamente orientadas y adaptadas a tecnologías y ubicaciones específicas, o deben ofrecer un abanico de opciones tecnológicas y de apoyo para diversos grupos de productores.

Referencias



- Aguirre, E. J., M. Baraldo, M. Caffera y H. Laguna. 2026. "Resultados de la transferencia de tecnología ganadera sostenible: evidencia de Uruguay." En *Adopción de innovaciones ganaderas sostenibles: evidencia de América Latina*, editado por A. Blackman, G. Muñoz, L. Salazar y P. Winters. Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Arango, J. et al. 2020. "Ambition Meets Reality: Achieving GHG Emission Reduction Targets in the Livestock Sector of Latin America." *Frontiers in Sustainable Food Systems* 4 (65).
- Arslan, A., K. Floress, C. Lamanna, L. Lipper y T. Rosenstock. 2022. "A Meta-Analysis of the Adoption of Agricultural Technology in Sub-Saharan Africa." *PLOS Sustainability and Transformation* 1 (7): e0000018.
- Basurto-Hernández, S., A. Beltrán y L. Peña-Lévano. 2026. "Limitaciones en sostenibilidad en la ganadería: datos procedentes de México." En *Adopción de innovaciones ganaderas sostenibles: evidencia de América Latina*, editado por A. Blackman, G. Muñoz, L. Salazar y P. Winters. Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Bravo-Peña, F., H. Taheri y C. Köbrich. 2026. "¿Qué configura la adopción de sistemas silvopastoriles y ganadería regenerativa? Evidencia de Chile." En *Adopción de innovaciones ganaderas sostenibles: evidencia de América Latina*, editado por A. Blackman, G. Muñoz, L. Salazar y P. Winters. Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Chang, J., S. Peng, Y. Yin, P. Ciais, P. Havlík y M. Herrero. 2021. "The Key Role of Production Efficiency Changes in Livestock Methane Emission Mitigation." *AGU Advances* 2 (2): e2021AV000391.
- Flórez-Díaz, H., E. López Barrera, A. M. Molina-Romero, D. Elisa Correa-Pinilla y C. Fontanilla-Díaz. 2026. "Decisiones en materia de ganadería en una frontera posconflicto: evidencia de la Orinoquía colombiana." En *Adopción de innovaciones ganaderas sostenibles: evidencia de América Latina*, editado por A. Blackman, G. Muñoz, L. Salazar y P. Winters. Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Fougestatto, C., J. Borges y J. Machado. 2020. "A Review and Some Reflections on Farmers' Adoption of Sustainable Agricultural Practices Worldwide." *Science of the Total Environment* 729: 138831.
- Guerrero, S., L. Kuhfuss, J. Ignacio Rivero-Milwaukee, P. Correa, M. Carriquiry, F. Rosas y J. Velazco. 2026. "Preferencias por prácticas de producción sostenibles en sistemas ganaderos extensivos: evidencia de Uruguay." En *Adopción de innovaciones ganaderas sostenibles: evidencia de América Latina*, editado por A. Blackman, G. Muñoz, L. Salazar y P. Winters. Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo.
- Herrero, M., B. Henderson, P. Havlík, et al. 2016. "Greenhouse Gas Mitigation Potentials in the Livestock Sector." *Nature Climate Change* 6: 452–61.

- Li, Y. et al. 2022. "Multi-Pollutant Assessment of River Pollution from Livestock Production Worldwide." *Water Research* 209.
- Lu, J. et al. 2022. "A Meta-Analysis of Agricultural Conservation Intentions, Behaviors, and Practices: Insights from 35 Years of Quantitative Literature in the United States." *Journal of Environmental Management* 323: 116240.
- Nadathur, S., J. Wanasundara y L. Scanlin. 2017. "Proteins in the Diet: Challenges in Feeding the Global Population." En *Sustainable Protein Sources*, editado por S. Nadathur, J. Wanasundara y L. Scanlin. Cambridge, MA: Academic Press.
- Otte, J. et al. 2012. *Livestock Sector Development for Poverty Reduction: An Economic and Policy Perspective—Livestock's Many Virtues*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Pendrill, F. et al. 2022. "Disentangling the Numbers behind Agriculture-Driven Tropical Deforestation." *Science* 1168.
- Prokopy, L. et al. 2008. "Determinants of Agricultural Best Management Practice Adoption: Evidence from the Literature." *Journal of Soil and Water Conservation* 63 (5): 300–311.
- Rosário, J., L. Madureira, C. Marques y R. Silva. 2022. "Understanding Farmers' Adoption of Sustainable Agriculture Innovations: A Systematic Literature Review." *Agronomy* 12: 2879.
- Ruzzante, S., R. Labarta y A. Bilton. 2021. "Adoption of Agricultural Technology in the Developing World: A Meta-Analysis of the Empirical Literature." *World Development* 146: 105599.
- Williams, G. y D. Anderson. 2019. "The Latin American Livestock Industry: Growth and Challenges." *Choices*. Cuarto trimestre.

2

PREFERENCIAS POR PRÁCTICAS DE PRODUCCIÓN SOSTENIBLES EN SISTEMAS GANADEROS EXTENSIVOS: EVIDENCIA DE URUGUAY

Santiago Guerrero, Laure Kuhfuss, José Ignacio
Rivero-Wildemaue, Patricia Correa, Miguel
Carriquiry, Francisco Rosas y José Velazco

The background of the entire page is a photograph of the Uruguayan flag (three horizontal stripes of blue and white, with a golden sun in the upper left canton) flying on a black pole. The flag is set against a sunset sky with orange and yellow hues. Below the horizon, a vast, flat landscape is visible, with some distant hills and a few small structures. The overall scene is serene and patriotic.

Resumen

Este estudio utiliza un experimento de elección discreta, junto con medidas conductuales de las preferencias de riesgo y temporales, para analizar las preferencias de los ganaderos uruguayos respecto de tres tipos de prácticas ganaderas sostenibles: sistemas de pastoreo mejorados, intensificación sostenible y enfoques silvopastoriles. Los resultados indican que, en promedio, los productores prefieren la intensificación sostenible, se muestran indiferentes ante las prácticas de pastoreo mejoradas y requieren una compensación económica para adoptar sistemas silvopastoriles. Un modelo de clases latentes revela una heterogeneidad significativa en las preferencias e identifica dos perfiles distintos de productores: uno inclinado a adoptar las prácticas propuestas y otro que requiere incentivos más fuertes. Estos hallazgos subrayan la importancia de diseñar instrumentos de política diferenciados y adaptados a las características y motivaciones de los diversos tipos de productores.



Introducción

El sector ganadero es una importante fuente de ingresos y medios de subsistencia, y proporciona alimentos a más de 1.300 millones de personas en todo el mundo, lo que representa el 17% del consumo energético mundial total (Nin-Prat et al., 2019). Este sector también ejerce una presión considerable sobre el medio ambiente. Genera el 12% de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero, y solo el ganado vacuno es responsable de más del 60% de ese total (FAO, 2023). Además, contribuye a la deforestación, la contaminación del agua y la degradación del suelo (Steinfeld et al., 2006; Herrero et al., 2015; Thornton y Herrero, 2010). Estos efectos son especialmente pronunciados en los sistemas de pastoreo extensivo, que combinan una baja productividad por hectárea con una alta intensidad de emisiones (Petermann y Buzhdygan, 2021; Arndt et al., 2022).

Aunque muchas prácticas ganaderas sostenibles ofrecen claros beneficios ambientales y económicos, las tasas de adopción de dichas prácticas siguen siendo bajas en gran parte del Sur Global (Knowler y Bradshaw, 2007; Kassie et al., 2015; Dessart et al., 2019). Se sabe que las barreras estructurales e institucionales —como el tamaño de las explotaciones, las restricciones crediticias, la inseguridad de la tenencia, los bajos rendimientos económicos y los limitados servicios de extensión— limitan su adopción (Delaroche, 2020; Jara-Rojas et al., 2020; Xin et al., 2025).

En este artículo se analizan las preferencias de los productores respecto de un conjunto de prácticas ganaderas sostenibles relevantes para las regiones con sistemas ganaderos extensivos —pastoreo mejorado, intensificación sostenible y sistemas silvopastoriles— mediante un experimento de elección discreta (DCE) realizado en Uruguay. Los DCE se han convertido en una herramienta útil para estudiar las preferencias de los productores y el diseño de políticas, pero son relativamente pocos los que se centran en los sistemas ganaderos extensivos, y aún menos los que evalúan las preferencias por un conjun-

to de prácticas climáticamente inteligentes (Ruto y Garrod, 2009; Glenk y Colombo, 2011; Villanueva *et al.*, 2015; Bougherara *et al.*, 2021).

Más allá de los determinantes clásicos, como el tamaño de la explotación y las características sociodemográficas de los productores, también analizamos si los rasgos de comportamiento —concretamente, las preferencias de riesgo y temporales— ayudan a explicar la disposición a adoptar nuevas tecnologías. Aunque los métodos de “laboratorio de campo” han generado medidas fiables de estos rasgos (Naranjo *et al.*, 2019; Bonjean, 2023), pocos estudios los han integrado en la estructura de preferencias de los experimentos de elección discreta (DCE) o los han utilizado para explicar la heterogeneidad de clases latentes (Fischer y Wollni, 2018; Ali *et al.*, 2021; Hannus *et al.*, 2020; Bougherara *et al.*, 2021; Angioloni y Cerroni, 2025). Este es el primer estudio que identifica estos rasgos de comportamiento en los ganaderos uruguayos. Trabajos anteriores se centraron en la población general (Gandelman y Hernández-Murillo, 2015), y otros estudios en América Latina se centraron en los agricultores (González-Rodríguez *et al.*, 2018).

Uruguay ofrece un contexto de gran relevancia estratégica para este estudio. La ganadería extensiva domina tanto el uso del suelo como las exportaciones agrícolas, y el sector ganadero es la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero del país. Al mismo tiempo, Uruguay se ha erigido como un país innovador en materia de política climática, sobre todo al emitir un bono soberano vinculado a la sostenibilidad y a los objetivos de emisiones de gases de efecto invernadero. Esta doble condición —un país con una alta intensidad de emisiones en la ganadería que, al mismo tiempo, es pionero en el financiamiento climático basado en resultados— convierte a Uruguay en un caso instructivo para comprender

cómo responden los productores a los incentivos de mitigación combinados y orientados al desempeño.

Nuestros resultados contradicen las creencias comunes en dos aspectos. En primer lugar, los productores se muestran dispuestos a pagar por la intensificación sostenible (entre US\$22 y US\$28/ha/año), un resultado sorprendente si se tiene en cuenta que los participantes en los programas de mitigación suelen exigir una compensación. En segundo lugar, aunque a menudo se considera que rasgos de comportamiento como la aversión al riesgo y la impaciencia influyen en la adopción, observamos que la mayor parte de la heterogeneidad en las preferencias se explica por las características de las explotaciones y las características demográficas. Los productores se muestran indiferentes ante la mejora del pastoreo y expresan una fuerte aversión hacia las prácticas silvo-pastoriles, especialmente a niveles elevados de adopción (disposición a aceptar, WTA, de US\$12 a US\$21/ha/año). El modelo de clases latentes revela dos tipos de productores: la clase A (81%) refleja, en términos generales, la respuesta media, y la clase B (19%) incluye a productores de pequeña escala y de mayor edad, menos comprometidos con las prácticas sostenibles y menos dispuestos a adoptarlas. La inclusión de variables de comportamiento para explicar la pertenencia a una clase mejora la precisión de las estimaciones de las características de las explotaciones y de los productores y, ayuda a distinguir con mayor claridad las diferencias en las preferencias por las prácticas sostenibles. En el modelo que incluye variables de comportamiento para explicar la pertenencia a una clase, los coeficientes de los productores de la clase B en cuanto a técnicas de pastoreo mejoradas y un nivel medio de prácticas de intensificación sostenible son negativos y estadísticamente significativos, lo que revela que estos productores requieren una compensación

para adoptar dichas prácticas. No obstante, las variables de comportamiento no predicen de manera significativa la pertenencia a una clase, ya que ninguna de ellas es estadísticamente significativa para explicar dicha pertenencia. Sostenemos que esto puede ser coherente con la naturaleza a corto plazo, de bajo riesgo y relativamente familiar de las prácticas propuestas, lo que sugiere que los rasgos de comportamiento solo pueden ser relevantes en decisiones de alto riesgo y a largo plazo.

Este artículo aporta tres contribuciones principales a la literatura. En primer lugar, aporta evidencia

sobre los DCE en los sistemas ganaderos extensivos, un ámbito poco estudiado, especialmente en América Latina. En segundo lugar, ofrece información sobre las preferencias de los productores respecto de las intervenciones combinadas climáticamente inteligentes. En tercer lugar, muestra que la relevancia de los rasgos de comportamiento en los modelos de adopción puede depender del contexto, lo que respalda su uso en algunos entornos de política, pero no en todos.

El resto del artículo se organiza de la siguiente manera.



La **sección 2.1** presenta el contexto geográfico e institucional de la encuesta.



La **sección 2.2** describe el diseño del experimento de elección.



La **sección 2.3** resume las respuestas a las preguntas sobre comportamiento.



En la **sección 2.4** se describe la especificación del modelo.



La **sección 2.5** describe las variables utilizadas en los modelos y la muestra.



La **sección 2.6** presenta los resultados.



La **sección 2.7** presenta las conclusiones.





2.1 Contexto geográfico e institucional

Uruguay es un destacado productor de carne vacuna, situado en la zona de las praderas de La Pampa. La producción ganadera se lleva a cabo mediante sistemas de ganadería extensiva que dependen de los pastizales naturales. La producción de carne vacuna constituye un componente fundamental del sector agrícola uruguayo y el principal uso del suelo, ya que representa más del 80% de la superficie agrícola. Históricamente, la carne vacuna ha sido el principal producto de exportación, aunque los productos forestales han ganado cuota de mercado en los últimos años. También constituye una importante fuente de sustento, con casi 50.000 unidades de producción ganadera y alrededor de 65.000 productores ganaderos.

La ganadería es responsable del 68% de las emisiones de gases de efecto invernadero del país (Ministerio de Ambiente, 2022), procedentes principalmente de la fermentación entérica. Aunque Uruguay ha invertido recientemente en la promoción de prácticas sostenibles para la mitigación de las emisiones del sector, no ofrece subsidios para incentivar su adopción. Las prácticas sostenibles en la producción ganadera están integradas en la contribución determinada a nivel nacional (CDN) de Uruguay en el marco del Acuerdo de París y en un bono vinculado a la sostenibilidad emitido recientemente por el Gobierno, que vincula las tasas de interés a los objetivos de emisiones de GEI.

Las instituciones públicas y privadas cuentan con una larga trayectoria en el país, y las organizaciones que representan a los productores ganaderos se remontan al siglo XIX. El país cuenta además con un sólido sistema de sanidad animal, en el que la cadena de producción de carne

vacuna es supervisada por el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca y las instituciones relacionadas. El ministerio también gestiona un sistema de trazabilidad animal reconocido internacionalmente que rastrea el movimiento y la ubicación de cada bovino desde su nacimiento. Además, otras instituciones públicas, como el Instituto Nacional de Carnes (INAC), la Facultad de Agronomía de la Universidad de la República y el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA), llevan a cabo investigaciones sobre la producción de carne vacuna y la ciencia animal, y brindan asesoramiento técnico a las empresas a lo largo de la cadena de valor. El Instituto Plan Agropecuario es la principal organización pública que ofrece servicios de capacitación y asesoramiento a más de 4.000 productores ganaderos en todo Uruguay.





2.2 Experimento de elección

2.2.1 Encuesta

La encuesta consta de tres secciones principales: (1) preguntas sobre las características de los productores y las explotaciones agrícolas, incluido el grado de adopción de prácticas sostenibles y las percepciones respecto de sus beneficios y costos; (2) el experimento de elección discreta, y (3) preguntas sobre el comportamiento. El experimento de elección discreta se presenta antes de la sección sobre el comportamiento para evitar introducir posibles sesgos en las tareas de elección.

El DCE consistió en una serie de tarjetas de elección, cada una de las cuales presentaba a los productores dos programas agroambientales hipotéticos y la opción de excluirse de los programas ofrecidos. Administrados por el Gobierno, estos programas ofrecían pagos a cambio de la adopción de un conjunto de prácticas sostenibles.

La encuesta se distribuyó a través de un enlace de Qualtrics compartido por WhatsApp por el Instituto Plan Agropecuario a diferentes grupos de productores. Este método de distribución se ajustaba a la práctica habitual de la organización al realizar encuestas entre su red de productores. Cabe destacar que, antes de llevar a cabo la encuesta definitiva, realizamos entrevistas semiestructuradas a nueve productores y llevamos a cabo dos pruebas piloto con 35 productores cada una, con el objetivo de identificar y resolver posibles problemas de diseño y metodología.

2.2.2 Selección de atributos

Los atributos relacionados con las prácticas sostenibles utilizados en el experimento de elección se seleccionaron a partir de una revisión de la bibliografía, consultas a expertos y las nueve entrevistas semiestructuradas realizadas a los productores. El objetivo era identificar prácticas de producción que redujeran las emisiones de gases de efecto invernadero del sector ganadero en Uruguay. En el apéndice 1 se ofrece un resumen de las prácticas sostenibles en sistemas extensivos. Las entrevistas semiestructuradas y las pruebas piloto se utilizaron para determinar los niveles de los atributos y perfeccionar el vocabulario y el lenguaje de la encuesta. La variación de los niveles de los atributos nos permitió evaluar las preferencias de los productores en una amplia gama de diseños de programas.

Los programas agroambientales hipotéticos incluidos en la encuesta presentaban cuatro características: (1) la incorporación de pastos artificiales o cultivos forrajeros en la zona de pastoreo; (2) prácticas de intensificación sostenible; (3) prácticas silvopastoriles, y (4) pagos. La primera característica tiene como objetivo aumentar la producción y la calidad generales de los pastos y reducir la carga ganadera en la zona de pastoreo de los pastizales naturales, especialmente en períodos de escasez de forraje. Incluye mezclas de forraje de gramíneas y leguminosas y cultivos anuales (maíz, sorgo, avena, cebada) que pueden utilizarse para la alimentación animal. Los niveles de este atributo son el aumento porcentual de su proporción en la superficie total de la explotación: aumentos del 0%, el 1%, el 5% y el 10% en relación con el nivel existente.

Para el segundo atributo, se consideraron cuatro prácticas de intensificación sostenible:

- 1.** Ajuste estacional de la densidad ganadera: rotación del ganado en función de la disponibilidad de forraje y las necesidades del hato, seguimiento del peso y el estado físico, y ajuste en consecuencia.
- 2.** Definición de los períodos de cría y clasificación de las hembras: planificación reproductiva, control sanitario y agrupación de las vacas para la gestión nutricional y reproductiva.

3. Revisión de los toros antes de la reproducción y diagnóstico de gestación: controles de la calidad del semen, pruebas hormonales y mantenimiento de registros.

4. Primer embarazo a los dos años y nutrición posparto: seguimiento del peso, evaluación del estado corporal, suministro de dietas suplementarias y uso de la inseminación artificial para las novillas.

Este segundo atributo tiene cuatro niveles: (1) no se ha adoptado ninguna práctica; (2) se ha adoptado la primera práctica; (3) se han adoptado las prácticas 2, 3 y 4, y (4) se han adoptado todas las prácticas.

El tercer atributo es el sistema silvopastoril, que integra árboles, pastizales naturales y ganado en la misma zona, donde los árboles se plantan con una densidad optimizada, de modo que no compitan por los recursos con el pastizal natural. Los niveles del atributo se refieren al aumento de la superficie sometida a gestión silvopastoril como porcentaje de la superficie total de la explotación: aumentos del 0%, el 1%, el 5% y el 10% en relación con los niveles existentes.

El cuarto atributo es el pago. Los niveles se dedujeron a partir de los informes del Instituto Plan Agropecuario (Carpetas Verdes), que incluyen datos sobre los costos y los ingresos de la producción ganadera, con seis valores: US\$10, US\$20, US\$30, US\$40, US\$50 y US\$60 por hectárea de la superficie total, aplicados a toda la superficie de la explotación.

Antes de mostrarles las tarjetas de elección, se informó a los participantes de que el objetivo era conocer sus preferencias respecto de las opciones de programas destinados a promover prácticas sostenibles. Cada tarjeta mostraba dos programas hipotéticos que ofrecían pagos anuales por hectárea de toda la explotación agrícola, siempre que se aplicaran las medidas indicadas. El texto también mencionaba que las prácticas serían objeto de seguimiento y que la notificación de las prácticas implementadas se realizaría mediante una "declaración jurada", un documento ampliamente utilizado y jurídicamente vinculante en Uruguay mediante el cual una persona física o jurídica declara bajo juramento que la información es veraz. La duración del contrato, de cinco años, refleja las prácticas habituales en los programas agroambientales (Bougherara *et al.*, 2021; Guerrero, 2021; OCDE, 2022).

En la figura 2.1 se muestra un ejemplo de tarjeta de elección. A cada participante se le mostraron seis tarjetas de este tipo y se le pidió que eligiera su opción preferida en cada una de ellas.

Figura 2.1 Ejemplo de tarjeta de elección

Prácticas		Programas 1		Programas 2	
Incremento del área de pastoreo con praderas artificiales y/o cultivos forrajeros anuales	+5% respecto al área total 		+10% respecto al área total 		
Prácticas de intensificación sostenible	1. Ajuste estacional de la carga en función del forraje 	1. Delimitar el inicio y final del entore 			
		2. Revisión de toros y diagnóstico actividad ovárica 			
		3. Primera preñez de vaquillonas a los 2 años 			
Incremento del área bajo silvopastoreo: cobertura forestal plantada que da servicios a la producción ganadera	No incremento		+10% respecto al área total 		
Pago que recibirá que aplica para toda el área del establecimiento durante 5 años	\$10 (USD/ha/año) 		\$50 (USD/ha/año) 		
Programa 1 ☐ Programa 2 ☐ No me interesaría participar en ninguno de los programas ☐					

2.2.3 Diseño experimental

El diseño factorial completo del experimento de elección —es decir, el número de tarjetas de elección únicas que pueden construirse a partir de los atributos y niveles seleccionados— consta de 384 perfiles. Para reducir el número de evaluaciones sin perder eficiencia estadística, se generó un diseño eficiente D0 utilizando Ngene. El diseño final se dividió en seis bloques de seis tarjetas de elección cada uno, lo que dio como resultado un total de 36 tarjetas únicas.



2.3 Factores de comportamiento

Aunque la literatura empírica presenta resultados dispares, se han relacionado rasgos de comportamiento como la aversión al riesgo y la impaciencia con la falta de adopción de innovaciones agrícolas en algunos contextos (por ejemplo, Liu, 2013; Yesuf y Bluffstone, 2009), mientras que otros estudios señalan efectos limitados (Ward y Singh, 2015). La mayor parte de la evidencia procede de estudios observacionales o de experimentos de laboratorio y de campo. Solo unos pocos experimentos de elección discreta han incorporado dichos rasgos en el análisis (por ejemplo, Fischer y Wollni, 2018; Bougherara *et al.*, 2021). Incluimos medidas obtenidas de las preferencias de riesgo y temporales para explorar si ayudan a explicar la heterogeneidad de las preferencias en nuestro contexto de elección discreta.

2.3.1 Preferencias temporales

Para reflejar las preferencias temporales de los productores, utilizamos un enfoque de lista de precios múltiples (Coller y Williams, 1999; Harrison *et al.*, 2002). Más concretamente, pedimos a los encuestados que realizaran una serie de ocho elecciones. Cada elección consistía en elegir entre recibir una determinada suma de dinero (US\$10.000) en el plazo de un año o una cantidad mayor en el plazo de dos años. Por lo tanto, cada elección implicaba una tasa de interés anual implícita en dólares,¹ que variaba entre el 1% y el 30%. La tabla 2.1 presenta las elecciones junto con los límites de la tasa de descuento implícita, así como la distribución de las elecciones.

¹ Seguimos el enfoque de retrasar ambos pagos (por ejemplo, un año frente a dos años) para reducir la influencia del sesgo del presente y otros efectos de inmediatez. Esto permite una aproximación más clara al descuento temporal a largo plazo (Harrison *et al.*, 2002; Frederick *et al.*, 2002). Brañas-Garza *et al.* (2023) aportan evidencia de que tanto las listas de precios múltiples hipotéticas como las totalmente incentivadas arrojan estimaciones equivalentes de las preferencias temporales.

Tabla 2.1 Distribución de los puntos de cambio y límites correspondientes de la tasa de descuento anual implícita

Punto de cambio	Encuestados	Límite inferior (%)	Límite superior (%)
1	24 (9,1%)	0,0	1,0
2	1 (0,4%)	1,0	2,5
3	13 (4,9%)	2,5	4,0
4	18 (6,8%)	4,0	5,5
5	23 (8,7%)	5,5	7,0
6	45 (17,1%)	7,0	10,0
7	42 (16,0%)	10,0	20,0
8	20 (7,6%)	20,0	30,0
Nunca cambian	77 (29,3%)	30,0	—
Total	263 (100%)		

La estructura del cuestionario sugiere que cabría esperar que los participantes eligieran la opción 1 en las primeras preguntas antes de pasar a la opción 2 en las siguientes, sin volver atrás. Nuestros datos muestran que, de las 274 personas que completaron el cuestionario, solo 11 (3,8%) realizaron esos cambios inesperados.

Entre los 263 encuestados que proporcionaron respuestas coherentes, la distribución de las preferencias temporales revela una marcada polarización. En un extremo del espectro, el 21% de las personas está dispuesto a esperar un año más a cambio de rendimientos relativamente modestos —del 5,5% o menos—, lo que indica tasas de descuento bajas. En el otro extremo, casi el 70% exige rendimientos superiores al 7% para posponer el pago un año, lo que refleja un grado relativamente alto de impaciencia. Cabe destacar que casi el 30% nunca elige la opción de “más tarde y en mayor cantidad”, lo que sugiere que ni siquiera un rendimiento anual del 30% es suficiente para justificar esperar un año más.

2.3.1 Preferencias de riesgo

Los participantes también completaron una tarea de percepciones de riesgo que consistía en una serie de siete loterías binarias, siguiendo el diseño de lotería ordenada introducido por Eckel y Grossman (2002, 2008). Cada lotería ofrecía una probabilidad del 50% de obtener una ganancia monetaria baja o alta. Las opciones se diseñaron para reflejar niveles crecientes de riesgo y de rendimiento esperado. Concretamente, las cinco primeras loterías ofrecen tanto rendimientos esperados más elevados como desviaciones estándar más altas. Las opciones sexta y séptima ofrecían el mismo rendimiento esperado (US\$20.000), pero un riesgo progresivamente mayor, siendo la última opción la que presentaba la mayor varianza. Se pidió a los participantes que seleccionaran la lotería en la que preferirían participar.

La tabla 2.2 presenta la estructura de cada sorteo, junto con la distribución de las elecciones de los participantes. También se muestran los intervalos de aversión relativa al riesgo constante (CRRA) implícitos, siguiendo los supuestos de calibración estándar. Una parte considerable de los participantes (36%) eligió la opción más segura, sin variación, lo que concuerda con un coeficiente CRRA superior a 3,56, que suele interpretarse como una elevada aversión al riesgo. Otro 20% seleccionó la segunda lotería, lo que concuerda con niveles moderados de aversión al riesgo. A medida que aumenta la relación riesgo-rentabilidad, la proporción de participantes que eligen cada opción posterior disminuye, con solo alrededor del 4% seleccionando las loterías 5 y 6. Curiosamente, el 11% de los participantes seleccionó la opción más arriesgada, lo que implica un comportamiento de búsqueda de riesgo según los supuestos de la CRRA. Estos resultados sugieren que, aunque la mayoría de los productores son reacios al riesgo en diversos grados, una minoría nada desdeñable está dispuesta a aceptar un riesgo sustancial a cambio de la posibilidad de obtener mayores rendimientos.

Tabla 2.2 Resumen de las elecciones de loterías 50-50 en la tarea de preferencias de riesgo

Elección	Pago bajo (USD)	Pago alto (USD)	Retorno esperado	Desv. est.	Encuestados	Intervalo CRRA
1	11	11	11	0	99 (36%)	> 3,56
2	9	17	13	5,6	56 (20%)	[1,20, 3,56]
3	7	23	15	11,3	39 (14%)	[0,74, 1,20]
4	5	29	17	16,9	29 (11%)	[0,52, 0,74]
5	3	35	19	22,6	11 (4%)	[0,40, 0,52]
6	2	38	20	25,4	11 (4%)	[0, 0,40]
7	0	40	20	28,2	29 (11%)	< 0
Total					274 (100%)	



2.4 Enfoque de modelización para elecciones discretas

En este estudio utilizamos enfoques de modelización estándar para datos de experimentos de elección discreta, que se basan en la teoría de la elección del consumidor de Lancaster (1966) y en el marco de utilidad aleatoria de McFadden (1973). Dado que este marco es bien conocido, aquí solo lo esbozamos brevemente. La hipótesis principal es que la utilidad que un productor ganadero obtiene al seleccionar una alternativa determinada consta de dos componentes: una parte observable y determinística, y un término de error estocástico no observable. El componente determinístico refleja el efecto de los atributos de la alternativa sobre la utilidad, y el componente aleatorio capta las influencias no observadas y las preferencias idiosincrásicas.

La probabilidad de que el productor i seleccione la alternativa j entre las J opciones disponibles depende de las utilidades relativas de todas las alternativas. Formalmente, siguiendo a Lancsar y Louviere (2008):

$$Pr(Y_i=j)=Pr(U_{ij}>U_{ik}) \quad \forall k \neq j,$$

donde la utilidad se especifica como:

$$U_{ij}=\beta X_{ij}+\varepsilon_{ij}$$

donde X_{ij} representa un vector de niveles de atributos para la alternativa j y el productor i , β denota el vector de parámetros de preferencia para estos atributos, y ε_{ij} , el término de error.

Aplicada al experimento de elección llevado a cabo en este artículo, definimos esta función de utilidad como:

$$U_{ij} = \beta_0 + \beta_1 \text{grazing}_1 + \beta_2 \text{grazing}_2 + \beta_3 \text{grazing}_3 + \beta_4 \text{intens}_1 + \beta_5 \text{intens}_2 + \beta_6 \text{intens}_3 + \beta_7 \text{silvopast}_1 + \beta_8 \text{silvopast}_2 + \beta_9 \text{silvopast}_3 + \beta_{10} \text{payment} + \varepsilon_{ij}$$

Estimamos un modelo logit multinomial y un modelo logit mixto, en los que los parámetros β se tratan como variables aleatorias, y la probabilidad de que el productor i seleccione la alternativa j es

$$Pr(Y_i = j | \beta_i) = \frac{e^{\mu \beta_i X_{ij}}}{\sum_{k=1}^J e^{\mu \beta_i X_{ik}}}$$

donde μ es un parámetro de escala, normalmente normalizado a 1 en la estimación. El vector de parámetros de interés β se estima mediante máxima verosimilitud simulada, utilizando el paquete Apollo R (Hess y Palma, 2019, 2022). Las variables *grazing*, *intens*, *silvopast* y *payment* se refieren a las prácticas analizadas y sus niveles, descritos en la siguiente sección.

Por último, estimamos un modelo de clases latentes para identificar diferentes tipos de productores con preferencias similares respecto de los programas y las características individuales y de las explotaciones. Este enfoque ayuda a caracterizar la heterogeneidad de las preferencias identificadas mediante el modelo logit mixto de una manera que facilita la formulación de recomendaciones de política. De hecho, un modelo de clases latentes permite identificar segmentos de la población agrícola que requerirían diferentes intervenciones de política para la adopción de prácticas ganaderas sostenibles. Condicionada a la pertenencia a la clase c , la probabilidad de que el individuo i elija la alternativa j se define como:

$$Pr(Y_i = j | \beta_c) = \frac{e^{\mu \beta_c X_{ij}}}{\sum_{k=1}^J e^{\mu \beta_c X_{ik}}}, c: \{1, \dots, S\}$$

La probabilidad de elegir la alternativa j en una tarjeta de elección, entre S clases, se define, por lo tanto, como:

$$Pr(Y_i = j | \beta_S) = \sum_{s=1}^S M_{i,s} \frac{e^{\mu \beta_s X_{ij}}}{\sum_{k=1}^J e^{\mu \beta_s X_{ik}}}$$

donde $M_{i,s}$ denota la probabilidad de que el individuo i pertenezca a la clase s , la cual depende de las características del individuo (vector Z_i) y de un término de error $\mu_{i,s}$:

$$M_{i,s} = \alpha_s Z_i + \mu_{i,s}$$

donde α_s son los parámetros vectoriales que representan las ponderaciones de las características individuales Z_i en la probabilidad de pertenencia a una clase. Esta probabilidad se estima utilizando un modelo logit multinomial de la siguiente manera:

$$M_{i,c} = Pr(c | Z_i) = \frac{e^{\alpha_c Z_i}}{\sum_{s=1}^S e^{\alpha_s Z_i}}$$



2.5 Construcción de variables y descripción de la muestra

En esta sección se describen la muestra y las variables utilizadas en los modelos econométricos. La tabla 2.3 presenta la descripción y las estadísticas resumidas de todas las variables utilizadas en los modelos. De los productores que completaron la encuesta, el 78% eran hombres, con una edad media de 50 años. Sus unidades de producción variaban considerablemente, con una media de 898 hectáreas, pero abarcaban desde explotaciones muy pequeñas hasta explotaciones que superaban las 15.000 hectáreas. El apéndice 2 ofrece un resumen más detallado de las variables socioeconómicas y de uso de la tierra.

Además de los datos sociodemográficos y sobre la estructura de las explotaciones, recopilamos información sobre las prácticas de gestión y elaboramos un conjunto de variables de comportamiento y actitud (véase la sección 2.3 en lo que respecta a la impaciencia y la aversión al riesgo) para incluirlas en los modelos que reflejan la heterogeneidad de los productores. La variable del índice de sostenibilidad toma el valor 1 si el productor aplica la práctica de ajuste estacional de la carga ganadera y el valor 2 si el productor aplica además al menos otra práctica de intensificación (sección 2.2).

Para sintetizar las preferencias ambientales en un único indicador, elaboramos un índice de conciencia ambiental asignando valores numéricos a las respuestas a cinco afirmaciones que reflejaban las percepciones sobre las cuestiones ambientales y el papel de los productores. Los participantes indicaron su grado de acuerdo con las siguientes afirmaciones: (1) “El calentamiento global es una amenaza grave”; (2) “Las prácticas ganaderas afectan negativamente al medio ambiente”; (3) “Las prácticas ganaderas respetuosas con el medio ambiente pueden mejorar el estado del medio ambiente”; (4) “Creo que mis actividades de producción contribuyen a los problemas ambientales locales”, y (5) “Creo que mis actividades productivas contribuyen a los problemas ambientales internacionales o globales (por ejemplo, el calentamiento global)”. Las respuestas se puntuaron con un 3 para “de acuerdo”, un 2 para “ni de acuerdo ni en desacuerdo” y un 1 para “en desacuerdo”. El índice se calculó como la suma de estas puntuaciones. En promedio, los encuestados no se mostraron ni muy de acuerdo ni muy en desacuerdo con las afirmaciones, lo que sugiere un nivel moderado de conciencia ambiental.

Para estimar la percepción que tienen los productores de las normas sociales, definimos una variable binaria igual a 1 si el encuestado estaba de acuerdo con la afirmación “Los productores de mi comunidad están dispuestos a adoptar (o ya han adoptado) prácticas sostenibles”, y 0 en caso contrario. Solo el 30% de los encuestados percibe que sus pares están avanzando hacia la adopción de prácticas sostenibles. También medimos el comportamiento altruista con esta pregunta: “¿En qué medida está dispuesto a hacer sacrificios materiales para contribuir a buenas causas sin esperar nada a cambio?”. Las posibles respuestas iban de 0 (no estoy dispuesto) a 10 (muy dispuesto). En promedio, los productores manifestaron un nivel moderado de altruismo (6).

La aversión al riesgo se evaluó mediante una serie de tareas de lotería y se codificó de forma inversa, desde 1 (“búsqueda del riesgo”) hasta 7 (“extremadamente reacio al riesgo”), según la tabla 2.2. La tasa de descuento se obtuvo a partir de las tareas de elección intertemporal, calculándose como el punto medio entre los puntos de cambio superior e inferior de la tabla 2.3, y asignándose un 50% a los encuestados que nunca cambiaron de opción.

Por último, la parte inferior de la tabla 2.3 ofrece una descripción de los atributos incluidos en los modelos: pastoreo (grazing1, grazing2, grazing3), intensificación (intens1, intens2, intens3), manejo silvopastoril (silvopast1, silvopast2, silvopast3) y pago.

Tabla 2.3 Variables que reflejan prácticas sostenibles

Variable	Descripción	n	Media	DE	Mín.	Máx.
Género	Variable dicotómica (1=hombre)	274	0,78	0,41	0	1
Edad	Edad del encuestado	274	50	14	20	83
Superficie	Superficie de la finca (ha)	274	898	1.439	0,0	15.821
Índice de sostenibilidad	Variable categórica (1 = implementó ajuste estacional de las tasas de carga; 2 = ajuste estacional de las tasas de carga + una práctica adicional de intensificación sostenible)	274	1	0,79	0	2
Conciencia ambiental	Índice de percepciones ambientales (escala de 1 a 3 por ítem; suma de 5 ítems)	274	2	0,39	1	3
Norma social	Variable dicotómica = 1 si está de acuerdo en que la comunidad adopta prácticas sostenibles	274	0,30	0,46	0	1
Altruismo	Disposición a sacrificarse por buenas causas (escala de 0 a 10)	274	6	3	0	10
Tasa de descuento	Tasa de descuento implícita (%)	274	21	19	0,5	50
Aversión al riesgo	Preferencia de riesgo (1 = proclive al riesgo; 7 = extremadamente adverso al riesgo)	274	5	2	1	7
grazing1	Aumento de la superficie de pastos artificiales y/o cultivos forrajeros en un 1%	—	—	—	—	—
grazing2	Aumento de la superficie de pastos artificiales y/o cultivos forrajeros en un 5%	—	—	—	—	—
grazing3	Aumento de la superficie de pastos artificiales y/o cultivos forrajeros en un 10%	—	—	—	—	—
intens1	Implementación del ajuste estacional de la tasa de carga	—	—	—	—	—
intens2	Implementación de (1) la definición de períodos de reproducción y la categorización de hembras, (2) la revisión de toros antes de la reproducción y el diagnóstico de preñez, y (3) la primera preñez a los dos años y la nutrición posparto	—	—	—	—	—
intens3	Implementación de (1) el ajuste estacional de la tasa de carga, (2) la definición de períodos de reproducción y la categorización de hembras, (3) la revisión de toros antes de la reproducción y el diagnóstico de preñez, y (4) la primera preñez a los dos años y la nutrición posparto	—	—	—	—	—
silvopast1	Aumento de la superficie bajo manejo silvopastoril en un 1%	—	—	—	—	—

Una crítica habitual a los estudios con datos de campo (DCE) es su limitada validez externa, a menudo debido a muestras no representativas. Este problema surge porque acceder a los microdatos para construir muestras representativas —y contactar con los ganaderos en particular— puede resultar complicado. Para comprobar la representatividad de nuestra muestra con respecto a la población, la tabla 2.4 compara la distribución de determinadas características de los encuestados con los datos de la Encuesta Ganadera Representativa a Nivel Nacional de 2016, que proporciona la información más actualizada sobre los productores ganaderos.

A pesar de algunas discrepancias, la muestra se ajusta razonablemente bien a la población en la mayoría de los aspectos. Se observan discrepancias en la proporción de pequeños productores y en la proporción de encuestados cuyos ingresos no agrícolas del hogar superan el 50% de los ingresos totales. No obstante, abordamos esta cuestión aplicando nuestra especificación preferida a datos remuestreados que reproducen la distribución del tamaño de los hatos recogida en la Encuesta Ganadera Representativa a Nivel Nacional de 2016. Los resultados siguen siendo sólidos con esta muestra (véase la sección 2.7).

Tabla 2.4 Comparación entre los encuestados de la encuesta propia y de la Encuesta Nacional Ganadera de 2016

Variable	Encuesta propia (%)	Encuesta Nacional Ganadera de 2016 (%)
Propietarios	0,72	0,64
Ingreso familiar no agrícola superior al 50%	0,32	0,11
≤ 299 cabezas de ganado	0,45	0,66
300 a ≤ 999 cabezas de ganado	0,32	0,24
≥ 1.000 cabezas de ganado	0,21	0,10



2.6 Resultados

2.6.1 Modelo logit mixto

La tabla 2.5 recoge los resultados del modelo logit mixto (MXL), que tiene en cuenta la heterogeneidad de preferencias entre los encuestados, ejecutado con Apollo (Hess y Palma, 2019). La especificación principal se seleccionó tras probar especificaciones alternativas (véase el apéndice 3). La columna 1 presenta las estimaciones de nuestra especificación preferida, basadas en la muestra completa de 274 encuestados y 1.644 observaciones. Siguiendo a Bougherara et al. (2021), las columnas 2, 3 y 4 presentan comprobaciones de robustez. En la segunda columna, excluimos a los encuestados que indicaron que el ejercicio les resultaba demasiado complejo, basándonos en sus respuestas a las preguntas de seguimiento. En la tercera columna, eliminamos a los encuestados cuyos tiempos de respuesta fueron inusualmente cortos o largos; concretamente, aquellos que se situaban por debajo del primer cuartil o por encima del tercer cuartil de la distribución del tiempo de respuesta. Por último, la cuarta columna muestra los resultados de un conjunto de datos remuestreado y ajustado para que coincida con la composición de productores de la Encuesta Ganadera Representativa a Nivel Nacional de 2016, utilizando técnicas de **bootstrapping**.

Si nos centramos en los resultados de la columna 1, la constante específica de la alternativa (ASC) es positiva y estadísticamente significativa, lo que implica que los ganaderos tienden a preferir las alternativas del programa propuestas frente al *statu quo*, es decir, las condiciones sin el programa.

Los coeficientes relativos a las mejoras en la superficie de pastoreo mediante pastos artificiales o cultivos forrajeros son positivos, pero no estadísticamente significativos, lo que indica que, en

promedio, los productores se muestran indiferentes ante este atributo. Por el contrario, los coeficientes relativos a las prácticas de intensificación sostenible son positivos y estadísticamente significativos al nivel del 1% para todos los niveles, lo que sugiere que los productores están dispuestos a recibir una compensación menor cuando estas prácticas se incluyen en el conjunto de opciones. Además, las preferencias por este atributo aumentan con el número de prácticas de intensificación incluidas en un programa, lo que refleja la percepción de los productores de que la intensificación sostenible puede mejorar la rentabilidad.

Los coeficientes asociados a las prácticas silvopastoriles son negativos y estadísticamente significativos al nivel del 1% para el nivel más alto de adopción y solo al nivel del 10% para el nivel medio, pero no son estadísticamente significativos para el nivel más bajo de esta práctica. Estos resultados sugieren que los productores perciben, en general, los sistemas silvopastoriles como restrictivos y que necesitarían una compensación para adoptar tales prácticas. El coeficiente del logaritmo del atributo de pago es negativo y estadísticamente significativo al nivel del 1%, lo que indica una clara preferencia por los programas que ofrecen pagos más elevados por hectárea.²

Estas estimaciones también ponen de manifiesto una heterogeneidad considerable en las preferencias, especialmente en lo que respecta a las prácticas silvopastoriles y de intensificación sostenible. Esto se refleja en las desviaciones estándar estadísticamente significativas de los coeficientes aleatorios (σ 's) en el modelo MXL (los 11 coeficientes inferiores de la tabla) para los atributos de intensificación sostenible, silvopastoril y pagos. En general, los resultados de estas submuestras son coherentes con los obtenidos utilizando la muestra completa. Los productores suelen preferir participar en los programas propuestos antes que mantener el *statu quo*. Parecen indiferentes ante la mejora de las zonas de pastoreo, valoran positivamente las prácticas de intensificación sostenible y tienden a rechazar las prácticas silvopastoriles, especialmente en los niveles más altos de adopción. La heterogeneidad de las preferencias también es evidente, como lo demuestran las estimaciones estadísticamente significativas de los parámetros de desviación estándar (σ 's)) para los atributos ASC, intensificación sostenible, silvopastoril y pagos. Además, cuando se excluye a los encuestados con tiempos de respuesta extremos, también surge una heterogeneidad significativa en los parámetros de pastoreo.

Para comprobar la solidez de nuestros resultados frente a la composición de la muestra y mejorar la validez externa, la última columna de la tabla 2.5 presenta estimaciones del modelo MXL utilizando un conjunto de datos remuestreado. Este remuestreo se llevó a cabo mediante técnicas de *bootstrapping* para aproximarse a la distribución del tamaño de los hatos de ganado observada en la encuesta nacional de 2016 (tabla 2.4). Las estimaciones de preferencia resultantes son en gran medida coherentes con las obtenidas a partir de la muestra completa, lo que ofrece evidencia de la validez externa de nuestras estimaciones. Además, la heterogeneidad de las preferencias sigue siendo significativa en la mayoría de los atributos, incluidas las prácticas de pastoreo.

² Suponemos que el atributo de pago se distribuye según una distribución lognormal para garantizar respuestas puramente positivas a este atributo. Por lo tanto, un coeficiente negativo en el logaritmo del pago indica un efecto positivo sobre la utilidad.

Tabla 2.5 Estimaciones del modelo logit mixto en distintas submuestras

Variable	Todas	Excl. complejidad	Excl. duració extrema	Remuestreada
ASC	1,360*** (3,36)	1,363*** (3,23)	1,046* (1,91)	1,407*** (0,4220)
Grazing1	0,077 (0,50)	0,028 (0,17)	0,121 (0,49)	0,075 (0,149)
Grazing2	0,251 (1,49)	0,212 (1,23)	0,483 (1,60)	0,244 (0,159)
Grazing3	0,065 (0,39)	0,050 (0,31)	0,132 (0,47)	0,066 (0,152)
Intens1	0,604*** (3,64)	0,541*** (3,37)	0,741*** (2,72)	0,593*** (0,163)
Intens2	0,654*** (3,50)	0,787*** (3,89)	0,575* (1,72)	0,666*** (0,174)
Intens3	0,843*** (4,33)	0,919*** (4,26)	0,969*** (2,98)	0,837*** (0,175)
Silvopast1	-0,080 (-0,45)	-0,065 (-0,35)	-0,109 (-0,41)	-0,075 (0,169)
Silvopast2	-0,298* (-1,66)	-0,257 (-1,37)	-0,480 (-1,52)	-0,301* (0,156)
Silvopast3	-0,649*** (-2,85)	-0,586** (-2,52)	-0,853** (-2,05)	-0,651*** (0,189)
Log(payment)	-1,600*** (7,86)	-1,520*** (-7,29)	-1,299*** (-4,79)	-1,608*** (0,206)
σASC	3,545*** (8,55)	2,959*** (6,88)	3,774*** (5,25)	3,584*** (0,401)
σGrazing1	-0,318 (-0,69)	-0,346 (-1,04)	0,170 (0,60)	0,298 (0,515)
σGrazing2	-0,113 (-0,35)	0,125 (1,04)	-0,927** (-2,01)	0,101 (0,537)
σGrazing3	0,715* (1,79)	0,237 (0,35)	1,407*** (2,67)	0,662* (0,356)
σIntens1	-0,013 (-0,15)	0,013 (0,22)	0,261 (0,87)	-0,029 (0,371)
σIntens2	-1,162*** (-3,05)	-0,955** (-2,11)	1,891*** (2,99)	-1,168*** (0,313)
σIntens3	-1,204*** (-4,08)	1,141*** (3,54)	-1,683*** (-3,57)	-1,206*** (0,259)
σSilvopast1	-1,155*** (-4,46)	1,155*** (4,07)	-1,270*** (-2,73)	-1,143*** (0,266)
σSilvopast2	-0,827** (-2,25)	-0,880** (-2,13)	-1,091* (-1,75)	-0,791** (0,317)
σSilvopast3	-1,356*** (-3,35)	1,320*** (2,91)	-2,236*** (-3,35)	-1,319*** (0,310)
σPayment	-1,153*** (-5,24)	1,144*** (3,76)	1,129*** (4,61)	-1,170*** (0,191)
Encuestados	274	237	148	274
Observaciones	1.644	1.422	888	1.644

Notas: estadísticos t robustos entre paréntesis. Niveles de significancia: *p < 0,10, **p < 0,05, ***p < 0,01. La columna 1 presenta la especificación principal. La columna 2 excluye a los encuestados que informaron que las tareas de elección eran demasiado complejas. La columna 3 excluye a los encuestados cuyos tiempos de finalización fueron inusualmente cortos o largos. La columna 4 presenta estimaciones a partir de un conjunto de datos remuestreado, ajustado para coincidir con la distribución de tamaños de las unidades productivas en la población.

2.6.2 Modelo de clases latentes

Aunque el modelo MXL proporciona evidencia de la heterogeneidad de las preferencias, no identifica las fuentes subyacentes de dicha heterogeneidad. Para explorar estas fuentes, estimamos un modelo de clases latentes. El modelo de clases latentes asume que la muestra está compuesta por un número finito de grupos no observados (latentes) de productores, cada uno con estructuras de preferencias distintas. Dentro de cada clase, se supone que las preferencias son homogéneas, pero pueden diferir sustancialmente entre clases.

El modelo es, en esencia, un marco logit condicional en el que la pertenencia a una clase es probabilística y se determina junto con el modelo de elección. El número de clases lo especifica el investigador, guiándose por criterios de ajuste estadístico y de interpretabilidad (Greene y Hensher, 2003). Las probabilidades de pertenencia a una clase pueden modelarse como una función de las características de los productores —tales como el tamaño de la explotación, las prácticas de gestión o los atributos de comportamiento—, lo que nos permite relacionar la heterogeneidad en las preferencias con las diferencias observables entre los productores.

Estimamos dos modelos de clases latentes con dos clases cada uno. Los datos no permitieron estimar una especificación de tres clases debido a la falta de convergencia del modelo. El primer modelo incluye características de las explotaciones y de los productores como variables explicativas en la función de pertenencia a la clase. En concreto, incluimos la superficie total de la unidad de producción, la edad del productor y el índice de sostenibilidad.

El segundo modelo amplía la función de pertenencia al incorporar variables de comportamiento: una medida continua de impaciencia, aproximada por la tasa de descuento implícita (véase la tabla 2.1); la variable de aversión al riesgo (véase la tabla 2.2); el indicador de altruismo, y la variable binaria de norma social.

El modelo de clases latentes que utiliza las características de las explotaciones y de los productores para definir los tipos de productores se presenta en las dos primeras columnas de la tabla 2.6 (modelo 1). La parte superior de la tabla incluye las estimaciones de los coeficientes de los atributos de elección y sus niveles. La parte inferior muestra cómo las características de las explotaciones y de los productores influyen en la probabilidad de pertenecer a la clase B. La probabilidad media de pertenencia a la clase A en este modelo es del 81%, y a la clase B, del 19%. Los productores de pequeña escala de mayor edad y con bajos niveles de adopción de prácticas de intensificación sostenible tienen más probabilidades de pertenecer a la clase B que a la clase A.

Todas las variables explicativas de la pertenencia a una clase son estadísticamente significativas a niveles convencionales. Los productores de la clase A predominan en la muestra y, por lo tanto, sus preferencias hacia los atributos analizados coinciden con las de la muestra completa: muestran una predisposición a participar en los programas (la ASC es positiva y estadísticamente significativa), no muestran preferencias marcadas por determinadas prácticas de pastoreo, tienden a elegir programas que incluyen prácticas de intensificación sostenible y se muestran reacios a los niveles elevados de prácticas silvopastoriles. Por el contrario, los productores de la clase B tienden a mostrarse reacios a participar en los programas ofrecidos (la ASC es negativa y estadísticamente significativa), lo que implica un costo fijo asociado al cambio del *statu quo* al programa. Estos productores necesitarían recibir una compensación por adoptar las prácticas de pastoreo y parecen preferir niveles bajos de prácticas de intensificación sostenible. En esta clase, los coeficientes silvopastoriles son negativos para los niveles altos de este atributo, pero no son estadísticamente significativos.

Las dos últimas columnas de la tabla 2.6 muestran los resultados del modelo de clases latentes que incluye rasgos de comportamiento para explicar la pertenencia a una clase (modelo 2). Este modelo también incluye dos clases, con las mismas probabilidades de pertenencia a una clase que en el modelo 1. La probabilidad de pertenecer a la clase B aumenta con la edad, una superficie más reducida y una baja adopción de prácticas de intensificación sostenible. En este modelo, la pertenencia a la clase B se asocia positivamente con productores impacientes, reacios al riesgo y menos conscientes del medio ambiente, aunque ninguna de estas variables es estadísticamente significativa a niveles convencionales, lo que indica que la pertenencia a la clase se explica principalmente por variables más convencionales. La precisión de las estimaciones de las características de las explotaciones y de los productores aumenta cuando se incluyen características de comportamiento. Además, la inclusión de variables de comportamiento ayuda a distinguir más claramente las diferencias en las preferencias hacia las prácticas sostenibles. En el modelo 2, todos los atributos de pastoreo y el segundo nivel de prácticas de intensificación sostenible son negativos y estadísticamente significativos para los productores de la clase B.

La falta de significación concuerda con la naturaleza de la mayoría de las prácticas de los programas. Las medidas de intensificación sostenible —como los ajustes estacionales de la carga ganadera y la planificación reproductiva— son, en gran medida, cambios de gestión que no implican largos retrasos en los beneficios ni aumentos significativos de la incertidumbre. Estudios previos muestran que este tipo de intervenciones suelen generar aumentos de productividad en un solo ciclo de producción (Thornton y Herrero, 2010; de Haas *et al.*, 2021a; de Haas *et al.*, 2021b) y, por lo general, se clasifican como prácticas de bajo costo y alto rendimiento (FAO, 2014). Del mismo modo, la mejora del pastoreo mediante cultivos forrajeros tiende a percibirse como algo familiar y de bajo riesgo (Fuglie *et al.*, 2021; Modernel *et al.*, 2016). En consecuencia, es razonable que rasgos de comportamiento como las preferencias de riesgo y temporales no expliquen gran parte de la variación en las preferencias por estas opciones.

Por el contrario, las prácticas silvopastoriles —especialmente cuando su adopción alcanza niveles más elevados— se asocian con períodos de amortización más largos, mayores costos iniciales y un mayor riesgo percibido (Jose *et al.*, 2004; Nair, 2011). Sin embargo, estas prácticas suelen ser recha-

zadas por todos los sectores sociales, lo que podría explicar por qué los rasgos de comportamiento tampoco permiten predecir su aceptación: es posible que los productores se muestren uniformemente reacios a ellas, independientemente de sus actitudes individuales hacia el riesgo o el tiempo.

En el apéndice 4 se muestran especificaciones alternativas que dividen la muestra según perfiles de comportamiento (impacientes frente a pacientes, reacios al riesgo frente a tolerantes al riesgo), utilizando la muestra completa, que incluye un conjunto ampliado de variables socioeconómicas para la pertenencia a una clase y únicamente variables de comportamiento. Los resultados coinciden en gran medida con los que se muestran en la tabla 2.6.

Tabla 2.6 Estimaciones del modelo de clases latentes

Variable	Modelo 1		Modelo 2	
	Clase A	Clase B	Clase A	Clase B
ASC	1,315*** (6,09)	-1,567** (-2,25)	1,337*** (6,08)	-1,622** (2,92)
Grazing1	0,120 (1,04)	-0,696* (-1,81)	0,123 (1,1)	-0,72* (1,99)
Grazing2	0,189 (1,52)	-0,718 (-1,50)	0,172 (1,42)	-0,74* (1,98)
Grazing3	0,117 (1,04)	-0,797 (-1,64)	0,133 (1,23)	-0,939** (2,31)
Intens1	0,394*** (4,06)	0,630** (2,19)	0,419*** (3,59)	0,554 (1,9)
Intens2	0,516*** (3,79)	-1,132 (-1,62)	0,563*** (4,94)	-1,221** (2,25)
Intens3	0,592*** (4,26)	0,098 (0,22)	0,642*** (5,85)	-0,002 (0,0)
Silvopast1	-0,066 (-0,55)	0,141 (0,31)	-0,056 (0,49)	0,256 (0,52)
Silvopast2	-0,188 (-1,52)	-0,166 (-0,31)	-0,202* (1,89)	0,161 (0,25)
Silvopast3	-0,400*** (-2,63)	-0,363 (-0,48)	-0,421*** (3,47)	0,051 (0,08)
Payment	0,204*** (8,94)	0,115* (1,84)	0,214*** (10,99)	0,14 (1,82)
Delta (intercepto)		-3,798*** (-4,04)		-3,593** (2,7)
Superficie		-0,00077** (-2,28)		-0,00079** (2,27)
Edad		0,061*** (3,85)		0,058*** (3,15)
Índice de sostenibilidad		-0,648* (-1,79)		-0,843** (2,2)
Tasa de descuento				0,536 (1,37)
Aversión al riesgo				0,307 (0,73)
Altruismo				0,608 (1,32)
Conciencia ambiental				-0,064 (0,11)
Norma social				
Productores	274		263	-0,478 (1,04)
Observaciones	1.644		1.578	
BIC	2.924		2.800	
AIC	2.754		2.633	
Probabilidades de pertenencia a la clase	81%	19%	80%	20%

Notas: Estadísticas t robustas entre paréntesis. Niveles de significación: *p < 0,10, **p < 0,05, ***p < 0,01.

2.6.3 Estimaciones de la disposición a aceptar

La tabla 2.7 presenta las estimaciones de la disposición marginal a aceptar (WTA) obtenidas a partir del modelo MXL para los productores medios (columna 1) y las correspondientes a los productores de clase A y clase B, obtenidas a partir del modelo de clases latentes 1 en la tabla 2.6 (columnas 2 y 3, respectivamente). En promedio, la disposición a aceptar (WTA) de los productores es de aproximadamente –US\$105 por hectárea al año por participar en los programas propuestos, lo que significa que están dispuestos a aceptar una remuneración baja por participar en los programas. La WTA de los productores de la clase A es de –US\$64, lo que también indica que estos productores están dispuestos a recibir una remuneración baja por participar en los programas. Sin embargo, los productores de la clase B muestran una preferencia negativa por la participación y requerirían una compensación: su WTA estimada es de US\$135 por hectárea al año.

Los resultados también sugieren que la WTA media de los productores es negativa y, por lo tanto, están dispuestos a aceptar un pago menor a cambio de adoptar prácticas de pastoreo mejoradas, aunque los coeficientes solo son marginalmente significativos para niveles medios de adopción. Por el contrario, los productores muestran una disposición a aceptar negativa y estadísticamente significativa respecto de las prácticas de intensificación sostenible, probablemente debido a los beneficios de productividad percibidos. La WTA media para estas prácticas oscila entre –US\$22 y –US\$28 por hectárea al año, dependiendo del nivel de adopción, lo que indica una disposición a aceptar una compensación menor cuando se ofrecen estas prácticas. Al tener en cuenta las preferencias heterogéneas, los productores de la clase A muestran preferencias similares a las de los productores medios en cuanto a las prácticas de intensificación sostenible, mientras que los productores de la clase B necesitarían una compensación para adoptar niveles medios de prácticas de intensificación sostenible; sin embargo, ninguno de los coeficientes de este atributo es estadísticamente significativo.

Por otra parte, en promedio, los productores exigen una compensación para adoptar prácticas silvopastoriles. La WTA estimada para los niveles medio y alto de adopción de prácticas silvopastoriles es de US\$12,3 y US\$21,4 por hectárea al año, respectivamente, lo que indica que estas prácticas se perciben como onerosas o menos beneficiosas a corto plazo. En el caso de los productores de clase A, solo los niveles altos de adopción de esta práctica son estadísticamente

significativos e indican una WTA media de US\$19 por hectárea al año. En el caso de los productores de clase B, ninguno de los coeficientes silvopastoriles fue estadísticamente significativo.

Una cuestión fundamental es por qué la adopción de prácticas de intensificación sostenible sigue siendo limitada, a pesar de que los productores las perciben como beneficiosas. Para explorar esto, la encuesta incluyó preguntas sobre las barreras percibidas para la adopción. El 70% de los encuestados identificó los elevados costos iniciales como un obstáculo.

En general, los resultados ponen de relieve la importancia de adaptar los instrumentos de política a las preferencias de los productores. Mientras que las prácticas de intensificación sostenible pueden fomentarse eliminando las barreras a la inversión inicial, la adopción de técnicas silvopastoriles puede requerir incentivos financieros directos.

Tabla 2.7 Estimaciones de la disposición marginal a aceptar (US\$/ha/año)

Atributo	Modelo logit mixto	Clase A	Clase B
ASC	-105,8*** (-6,36)	-64,3*** (-4,57)	135,8** (2,17)
Grazing1	-8,6 (-1,36)	-5,9 (-1,06)	60,3 (1,18)
Grazing2	-10,1* (-1,93)	-9,3 (-1,58)	62,2 (10,1)
Grazing3	-7,1 (-1,64)	-5,7 (-1,05)	69,1 (1,09)
Intens1	-21,9*** (-7,48)	-19,3*** (-3,80)	-54,6 (-1,34)
Intens2	-24,4*** (-5,76)	-25,2*** (3,70)	98,1 (1,11)
Intens3	-28,3*** (-6,63)	-29*** (-4,06)	-8,5 (-0,23)
Silvopast1	2,6 (0,86)	3,2 (0,55)	-12,3 (-0,31)
Silvopast2	12,3*** (3,55)	9,2 (1,54)	14,4 (0,30)
Silvopast3	21,4*** (4,45)	19,6*** (2,69)	31,5 (0,46)

Notas: Estadísticas t robustas entre paréntesis. Niveles de significación: *p < 0,10, **p < 0,05, ***p < 0,01. Todos los valores se expresan como WTA marginal (USD/ha/año). Las estimaciones de WTA para MXL se derivaron de los coeficientes del espacio WTP. Las clases A y B se refieren al modelo de clases latentes de dos clases.



2.7 Conclusiones

Este estudio evalúa las preferencias de los ganaderos uruguayos a la hora de adoptar prácticas ganaderas sostenibles. Mediante una combinación de experimentos de elección discreta y tareas conductuales destinadas a determinar y medir las preferencias de riesgo y temporales, identificamos una heterogeneidad significativa en las preferencias de los productores respecto de las prácticas sostenibles.

Los resultados sugieren que, aunque las prácticas de intensificación sostenible suelen ser bien recibidas y se asocian con beneficios de productividad, las prácticas silvopastoriles siguen resultando menos atractivas, probablemente debido a los riesgos percibidos, los costos, la falta de familiaridad y una relación menos directa con la productividad. Estos hallazgos ponen de relieve la necesidad de estrategias adaptadas para fomentar las prácticas sostenibles en los sistemas ganaderos extensivos. La adopción de prácticas de intensificación sostenible relacionadas con la gestión de los hatos podría no requerir grandes incentivos económicos. Por el contrario, la adopción de prácticas silvopastoriles podría requerir recursos adicionales.

Nuestro análisis de clases latentes revela dos segmentos distintos de productores: un grupo mayoritario inclinado a la adopción y una minoría que requiere incentivos más sólidos para abandonar el *statu quo*. Aunque la evaluación de las preferencias temporales y de riesgo mostró la heterogeneidad esperada entre los productores, estas no resultaron estadísticamente significativas para explicar las diferencias en las actitudes hacia las prácticas sostenibles. Por el contrario, las variables convencionales, como la edad, la superficie de la explotación y el nivel de adopción de prácticas sostenibles, resultaron estadísticamente significativas para explicar la heterogeneidad de las preferencias. No obstante, parecen poner de relieve diferencias en las actitudes hacia las prácticas sostenibles.

El diseño de programas agroambientales que aborden la diversidad conductual y estructural de los productores puede mejorar tanto los resultados ambientales como la eficacia de las políticas. Sin embargo, se necesita investigación adicional para comprender mejor las características conductuales de los ganaderos, sus procesos de toma de decisiones y cómo estos factores influyen en las preferencias por las prácticas sostenibles.

Un aspecto importante que no se pudo incorporar al experimento de elección son las preferencias relativas de los productores respecto de los distintos mecanismos de incentivo, tales como las deducciones fiscales, los subsidios y los acuerdos de reparto de costos. Por ejemplo, debido a las posibles connotaciones negativas, es posible que los productores de carne vacuna prefieran las deducciones fiscales o los copagos gubernamentales a los pagos condicionales. El análisis de estas preferencias representa una línea prometedora para futuras investigaciones.

Agradecimientos

Agradecemos a todos los productores que participaron en este estudio. En particular, a Esteban Carriquiry, cuya ayuda fue fundamental para el éxito de la distribución de la encuesta; a Ignacio Borba, quien programó la encuesta en Qualtrics; y a Allen Blackman, por su apoyo técnico. Asimismo, agradecemos el apoyo financiero y técnico prestado por el Banco Interamericano de Desarrollo.



Referencias



- Ali, W., A. Abdulai, R. Goetz y V. Owusu. 2021. "Risk, Ambiguity and Willingness to Participate in Crop Insurance Programs: Evidence from a Field Experiment." *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics* 65 (3): 679–703.
- Angioloni, S. y S. Cerroni. 2025. "Farmers' Cooperation to Improve Water Quality under Scientific Uncertainty: A Lab-in-the-Field Experiment." *Journal of Agricultural Economics* 76 (1): 45–73.
- Arndt, C., A. N. Hristov, W. J. Price, S. C. McClelland, A. M. Pelaez, S. F. Cueva et al. 2022. "Full Adoption of the Most Effective Strategies to Mitigate Methane Emissions by Ruminants Can Help Meet the 1.5°C Target by 2030 but Not 2050." *Proceedings of the National Academy of Sciences*. <https://doi.org/10.1073/pnas.2111294119>.
- Becoña, G., L. Astigarraga y V. D. Picasso. 2014. "Greenhouse Gas Emissions of Beef Cow-Calf Grazing Systems in Uruguay." *Sustainable Agriculture Research* 2 (3): 89–105.
- Bonjean, I. 2023. "Who Are the Loss-Averse Farmers? Experimental Evidence for Structurally Estimated Risk Preferences." *European Review of Agricultural Economics* 50 (2): 421–456.
- Bougherara, D., M. Lapierre, R. Préget y A. Sauquet. 2021. "Do Farmers Prefer Increasing, Decreasing, or Stable Payments in Agri-Environmental Schemes?" *Ecological Economics* 183: 106946.
- Brañas-Garza, P., D. A. Jorrat, A. M. Espín y A. Sánchez. 2023. "Paid and Hypothetical Time Preferences Are the Same: Lab, Field, and Online Evidence." *Experimental Economics* 26 (2): 412–434.
- Bussoni, A., C. Juan, E. Fernández, M. Boscana, F. Cubbage y O. Bentancur. 2015. "Integrated Beef and Wood Production in Uruguay: Potential and Limitations." *Agroforestry Systems* 89 (6): 1107–1118.
- Caprarulo, V., V. Ventura, A. Amatucci, G. Ferronato y G. Gilioli. 2022. "Innovations for Reducing Methane Emissions in Livestock toward a Sustainable System: Analysis of Feed Additive Patents in Ruminants." *Animals* 12 (20): 2760.
- Claramunt, M., A. Meikle y P. Soca. 2020. "Metabolic Hormones, Grazing Behaviour, Offspring Physical Distance and Productive Response of Beef Cow Grazing at Two Herbage Allowances." *Animal* 14 (7): 1520–1528.
- Coller, M. y M. B. Williams. 1999. "Eliciting Individual Discount Rates." *Experimental Economics* 2 (2): 107–127.
- Cubbage, F., G. Balmelli, A. Bussoni, E. Noellemeyer, A. Pachas, H. Fassola y W. Hubbard. 2012. "Comparing Silvopastoral Systems and Prospects in Eight Regions of the World." *Agroforestry Systems* 86 (3): 303–314.

- De Haas, Y., M. C. Bink, R. Borg, E. P. Koenen, L. M. Verschuren y H. Mollenhorst. 2021. "The Contribution of Animal Breeding to Reducing the Environmental Impact of Livestock Production." *Animal* 15 (1): 100282.
- De Haas, Y., R. F. Veerkamp, G. de Jong y M. N. Aldridge. 2021. "Selective Breeding as a Mitigation Tool for Methane Emissions from Dairy Cattle." *Animal* 15: 100294.
- De Stefano, A. y M. G. Jacobson. 2018. "Soil Carbon Sequestration in Agroforestry Systems: A Meta-Analysis." *Agroforestry Systems* 92 (2): 285–299.
- Delaroche, M. 2020. "Adoption of Conservation Practices: What Have We Learned from Two Decades of Social-Psychological Approaches?" *Current Opinion in Environmental Sustainability* 45: 25–35.
- Dessart, F. J., J. Barreiro-Hurlé, R. Van Bavel et al. 2019. "Behavioural Factors Affecting the Adoption of Sustainable Farming Practices: A Policy-Oriented Review." *European Review of Agricultural Economics* 46 (3): 417–471.
- Do Carmo, M., M. Claramunt, M. Carriquiry y P. Soca. 2016. "Animal Energetics in Extensive Grazing Systems: Rationality and Results of Research Models to Improve Energy Efficiency of Beef Cow-Calf Grazing Campos Systems." *Journal of Animal Science* 94 (6): 84–92.
- Eckel, C. C. y P. J. Grossman. 2002. "Sex Differences and Statistical Stereotyping in Attitudes toward Financial Risk." *Evolution and Human Behavior* 23 (4): 281–295.
- . 2008. "Forecasting Risk Attitudes: An Experimental Study Using Actual and Forecast Gamble Choices." *Journal of Economic Behavior and Organization* 68 (1): 1–17.
- Eugène, M., K. Klumpp y D. Sauvant. 2021. "Methane Mitigation Options with Forages Fed to Ruminants." *Grass and Forage Science* 76 (2): 196–204.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2014. Construyendo una visión común para la agricultura y alimentación sostenibles. Principios y enfoques. Roma: FAO.
- . 2023. Pathways towards Lower Emissions: A Global Assessment of the Greenhouse Gas Emissions and Mitigation Options from Livestock Agrifood Systems. Roma: FAO. <https://doi.org/10.4060/cc9029en>.
- Fischer, S. y M. Wollni. 2018. "The Role of Farmers' Trust, Risk and Time Preferences for Contract Choices: Experimental Evidence from the Ghanaian Pineapple Sector." *Food Policy* 81: 67–81.
- Frederick, S., G. Loewenstein y T. O'Donoghue. 2002. "Time Discounting and Time Preference: A Critical Review." *Journal of Economic Literature* 40 (2): 351–401.

- Fuglie, K., M. Peters y S. Burkart. 2021. "The Extent and Economic Significance of Cultivated Forage Crops in Developing Countries." *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5: 712136.
- Gandelman, N. y R. Hernandez-Murillo. 2015. "Risk Aversion at the Country Level." *Federal Reserve Bank of St. Louis Review* 97 (1): 53–66.
- Glenk, K. y S. Colombo. 2011. "Designing Policies to Mitigate the Agricultural Contribution to Climate Change: An Assessment of Soil Based Carbon Sequestration and Its Ancillary Effects." *Climatic Change* 105 (1): 43–66.
- Gonzalez-Ramirez, J., P. Arora y G. Podesta. 2018. "Using Insights from Prospect Theory to Enhance Sustainable Decision Making by Agribusinesses in Argentina." *Sustainability* 10 (8): 2693.
- Greene, W. H. y D. A. Hensher. 2003. "A Latent Class Model for Discrete Choice Analysis: Contrasts with Mixed Logit." *Transportation Research Part B* 37: 681–698.
- Guerrero, S. 2021. "Characterising Agri-Environmental Policies: Towards Measuring Their Progress." Informe técnico 155. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.
- Hannus, V., T. J. Venus y J. Sauer. 2020. "Acceptance of Sustainability Standards by Farmers: Empirical Evidence from Germany." *Journal of Environmental Management* 267: 110617.
- Harrison, G. W., M. I. Lau y M. B. Williams. 2002. "Estimating Individual Discount Rates in Denmark: A Field Experiment." *American Economic Review* 92 (5): 1606–1617.
- Herrero, M., S. Wiersenius, B. Henderson, C. Rigolot, P. K. Thornton, P. Havlík, I. de Boer y P. Gerber. 2015. "Livestock and the Environment: What Have We Learned in the Past Decade?" *Annual Review of Environment and Resources* 40: 177–202.
- Hess, S. y D. Palma. 2019. "Apollo: A Flexible, Powerful and Customisable Freeware Package for Choice Model Estimation and Application." *Journal of Choice Modelling* 32: 100170.
- INIA (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria). 2024. Guía para el diseño de sistemas ganaderos climáticamente inteligentes. Montevideo: INIA. <https://www.inia.uy/guia-para-el-dise-no-de-sistemas-ganaderos-climaticamente-inteligentes>.
- Jara-Rojas, R., S. Russy, L. Roco, D. Fleming-Muñoz y A. Engler. 2020. "Factors Affecting the Adoption of Agroforestry Practices: Insights from Silvopastoral Systems of Colombia." *Forests* 11 (6): 648.
- Jose, S. 2004. "Agroforestry for Ecosystem Services and Environmental Benefits: An Overview." *Agroforestry Systems* 61–62 (1–3): 1–12.
- Kassie, M., H. Teklewold, M. Jaleta, P. Marennya y O. Erenstein. 2015. "Understanding the Adoption of a Portfolio of Sustainable Intensification Practices in Eastern and Southern Africa." *Land Use Policy* 42: 400–411.

- Kelly, L. 2023. "Recent Advances in Feed Additives with the Potential to Mitigate Enteric Methane Emissions from Ruminant Livestock." *Journal of Soil and Water Conservation* 78 (2): 111–123.
- Knowler, D. y B. Bradshaw. 2007. "Farmers' Adoption of Conservation Agriculture: A Review and Synthesis of Recent Research." *Food Policy* 32 (1): 25–48.
- Lancaster, K. J. 1966. "A New Approach to Consumer Theory." *Journal of Political Economy* 74 (2): 132–157.
- Lancsar, E. y J. Louviere. 2008. "Conducting Discrete Choice Experiments to Inform Healthcare Decision Making." *Pharmacoeconomics* 26: 661–677.
- Lemes, A. P., A. R. Garcia, J. R. M. Pezzopane, F. Z. Brandão, Y. F. Watanabe, R. F. Cooke, M. Sponchiado, C. C. Paro de Paz, A. C. Camplesi, M. Binelli y L. U. Gimenes. 2021. "Silvopastoral System Is an Alternative to Improve Animal Welfare and Productive Performance in Meat Production Systems." *Scientific Reports* 11: 14092.
- Liu, E. M. 2013. "Time to Change What to Sow: Risk Preferences and Technology Adoption Decisions of Cotton Farmers in China." *Review of Economics and Statistics* 95 (4): 1386–1403.
- McFadden, D. 1973. "Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior." *Frontiers in Econometrics* 4: 105–142.
- Ministerio de Ambiente. 2022. Huella ambiental ganadera. Informe 10-2022. Montevideo: Ministerio de Ambiente. https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Huella_Ambiental_Ganadera_Informe%2010-2022.pdf.
- . 2024. Informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, Uruguay. Serie 1990–2022. Uruguay: Ministerio de Ambiente. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/inventarios-nacionales-gases-efecto-invernadero-ingei>.
- Modernel, P., W. A. Rossing, M. Corbeels, S. Dogliotti, V. Picasso y P. Tittonell. 2016. "Land Use Change and Ecosystem Service Provision in Pampas and Campos Grasslands of Southern South America." *Environmental Research Letters* 11 (11): 113002.
- . 2019. "Grazing Management for More Resilient Mixed Livestock Farming Systems on Native Grasslands of Southern South America." *Grass and Forage Science* 74 (4): 636–649.
- Nabinger, C. C. 2011. "Servicios ecosistémicos de las praderas naturales: ¿es posible mejorarlos con más productividad?" *Archivos Latinoamericanos de Producción Animal* 19 (3–4): 27–34.
- Nair, P. K. R. 2011. *Agroforestry Systems and Environmental Quality: Science and Practice*. Advances in Agroforestry 8. Dordrecht: Springer.

- Naranjo, M., J. Pieters y F. Alpízar. 2019. "Credit, Insurance and Farmers' Liability: Evidence from a Lab in the Field Experiment with Coffee Farmers in Costa Rica." *Journal of Economic Behavior and Organization* 166: 12–27.
- Nin-Pratt, A., H. Freiría y G. Muñoz. 2019. "Productividad y eficiencia en la producción ganadera pastoril en América Latina: los casos de Uruguay y Paraguay." Documento de trabajo del BID. <https://doi.org/10.18235/0001924>.
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). 2022. Making Agri-Environmental Payments More Cost Effective. París: OCDE.
- Petermann, J. S. y O. Y. Buzhdygan. 2021. "Grassland Biodiversity." *Current Biology* 31 (19).
- República Oriental del Uruguay. 2022. Segunda contribución determinada a nivel nacional al Acuerdo de París. Publicado en diciembre de 2022.
- Rivera, J. E., L. Serna, J. Arango, R. Barahona, E. Murgueitio, E. Torres y J. Chará. 2023. "Silvopastoral Systems and Their Role in Climate Change Mitigation and Nationally Determined Contributions in Latin America." En *Silvopastoral Systems of Meso America and Northern South America*, editado por J. Chará y S. Jose, 25–53. Springer.
- Ruto, E. y G. Garrod. 2009. "Investigating Farmers' Preferences for the Design of Agri-Environment Schemes: A Choice Experiment Approach." *Journal of Environmental Planning and Management* 52 (5): 631–647.
- Sancho, L., I. Arocena y L. Ordeig. 2023. Definición, caracterización y cuantificación del área bajo sistemas silvopastoriles, para el seguimiento de las contribuciones establecidas en la contribución determinada a nivel nacional de Uruguay. Informe técnico, Proyecto URU/18/G31. Creación de capacidades institucionales y técnicas para aumentar la transparencia en el marco del Acuerdo de París, Uruguay. Informe final.
- Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales y C. de Haan. 2006. *Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Thornton, P. K. 2010. "Livestock Production: Recent Trends, Future Prospects." *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences* 365 (1554): 2853–2867.
- Thornton, P. y M. Herrero. 2010. *The Inter-Linkages between Rapid Growth in Livestock Production, Climate Change, and the Impacts on Water Resources, Land Use, and Deforestation*. Washington, DC: Banco Mundial. <http://hdl.handle.net/10986/9223>.

- Villanueva, A. J., M. Rodríguez-Entrena, J. A. Gómez-Limón y M. Arriaza. 2015. "Analysing the Design of Agri-Environmental Schemes: Farmers' Preferences in Southern Spain." *Land Use Policy* 46: 142–154.
- Ward, P. S. y V. Singh. 2015. "Using Field Experiments to Elicit Risk and Ambiguity Preferences: Behavioural Factors and the Adoption of New Agricultural Technologies in Rural India." *Journal of Development Studies* 51 (6): 707–724.
- Xin, M., S. Tan, H. Qiu y J. Tang. 2025. "Environmental Regulations and Smallholder Farmers' Technical Efficiency: Empirical Evidence from Pastoral China." *Journal of Agricultural Economics*.
- Yesuf, M. y R. A. Bluffstone. 2009. "Poverty, Risk Aversion, and Path Dependence in Low-Income Countries: Experimental Evidence from Ethiopia." *American Journal of Agricultural Economics* 91 (4): 1022–1037.
- Gonzalez-Ramirez, J., P. Arora y G. Podesta. 2018. Using insights from prospect theory to enhance sustainable decision making by agribusinesses in Argentina. *Sustainability*, 10(8), 2693.
- Greene, W. H. y D. A. Hensher. 2003. A latent class model for discrete choice analysis: Contrasts with mixed logit. *Transportation Research Part B*, 37, 681–698.
- Guerrero, S. 2021. Characterising agri-environmental policies: Towards measuring their progress. Informe técnico 155. Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.
- Hannus, V., T. J. Venus y J. Sauer. 2020. Acceptance of sustainability standards by farmers: Empirical evidence from Germany. *Journal of Environmental Management*, 267, 110617.
- Harrison, G. W., M. I. Lau y M. B. Williams. 2002. Estimating individual discount rates in Denmark: A field experiment. *American Economic Review*, 92(5), 1606–1617.
- Herrero, M., S. Wirsenius, B. Henderson, C. Rigolot, P. K. Thornton, P. Havlík, I. de Boer y P. Gerber. 2015. Livestock and the environment: What have we learned in the past decade? *Annual Review of Environment and Resources*, 40, 177–202.
- Hess, S. y D. Palma. 2019. Apollo: A flexible, powerful and customisable freeware package for choice model estimation and application. *Journal of Choice Modelling*, 32, 100170.
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA). 2024. Guía para el diseño de sistemas ganaderos climáticamente inteligentes. INIA, Montevideo, Uruguay. Disponible en: <https://www.inia.uy/guia-para-el-diseno-de-sistemas-ganaderos-climaticamente-inteligentes>.
- Jara-Rojas, R., S. Russy, L. Roco, D. Fleming-Muñoz y A. Engler. 2020. Factors affecting the adoption of agroforestry practices: Insights from silvopastoral systems of Colombia. *Forests*, 11(6), 648.

- Jose, S. 2004. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. *Agroforestry Systems*, 61–62(1–3), 1–12.
- Kassie, M., H. Teklewold, M. Jaleta, P. Marenja y O. Erenstein. 2015. Understanding the adoption of a portfolio of sustainable intensification practices in eastern and southern Africa. *Land Use Policy*, 42, 400–411.
- Kelly, L. 2023. Recent advances in feed additives with the potential to mitigate enteric methane emissions from ruminant livestock. *Journal of Soil and Water Conservation*, 78(2), 111–123.
- Knowler, D. y B. Bradshaw. 2007. Farmers' adoption of conservation agriculture: A review and synthesis of recent research. *Food Policy*, 32(1), 25–48.
- Lancaster, K. J. 1966. A new approach to consumer theory. *Journal of Political Economy*, 74(2), 132–157.
- Lancsar, E. y J. Louviere. 2008. Conducting discrete choice experiments to inform healthcare decision making. *Pharmacoeconomics*, 26, 661–677.
- Lemes, A. P., A. R. Garcia, J. R. M. Pezzopane, F. Z. Brandão, Y. F. Watanabe, R. F. Cooke, M. Sponchiado, C. C. Paro de Paz, A. C. Camplesi, M. Binelli y L. U. Gimenes. 2021. Silvopastoral system is an alternative to improve animal welfare and productive performance in meat production systems. *Scientific Reports*, 11, 14092.
- Liu, E. M. 2013. Time to change what to sow: Risk preferences and technology adoption decisions of cotton farmers in China. *Review of Economics and Statistics*, 95(4), 1386–1403.
- McFadden, D. 1973. Conditional logit analysis of qualitative choice behavior. *Frontiers in Econometrics*, 4, 105–142.
- Ministerio de Ambiente. 2022. Huella ambiental ganadera. Informe 10-2022. Montevideo, Uruguay. Disponible en: https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/sites/ministerio-ambiente/files/documentos/publicaciones/Huella_Ambiental_Ganadera_Informe%2010-2022.pdf.
- . 2024. Informe del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero, Uruguay. Serie 1990–2022. Uruguay. Disponible en: <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/politicas-y-gestion/inventarios-nacionales-gases-efecto-invernadero-ingei>.
- Modernel, P., W. A. Rossing, M. Corbeels, S. Dogliotti, V. Picasso y P. Tittonell. 2016. Land use change and ecosystem service provision in Pampas and Campos grasslands of southern South America. *Environmental Research Letters*, 11(11), 113002.
- Modernel, P., V. D. Picasso, C. P. Carmona, W. A. H. Rossing, M. Corbeels, P. Soca y P. Tittonell. 2019. Grazing management for more resilient mixed livestock farming systems on native grasslands of southern South America. *Grass and Forage Science*, 74(4), 636–649.

- Nabinger, C. C. 2011. Servicios ecosistémicos de las praderas naturales: ¿es posible mejorarlos con más productividad? Archivos Latinoamericanos de Producción Animal, 19(3-4), 27–34.
- Nair, P. K. R. 2011. Agroforestry systems and environmental quality: Science and practice. Advances in Agroforestry, 8. Springer, Dordrecht.
- Naranjo, M., J. Pieters y F. Alpízar. 2019. Credit, insurance and farmers' liability: Evidence from a lab in the field experiment with coffee farmers in Costa Rica. Journal of Economic Behavior and Organization, 166, 12–27.
- Nin-Pratt, A., H. Freiría y G. Muñoz. 2019. Productividad y eficiencia en la producción ganadera pastoril en América Latina: los casos de Uruguay y Paraguay. Documento de trabajo del BID. <https://doi.org/10.18235/0001924>.
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos). 2022. Making Agri-Environmental Payments More Cost Effective. París.
- Petermann, J. S. y O. Y. Buzhdygan. 2021. Grassland biodiversity. Current Biology, 31(19).
- República Oriental del Uruguay. 2022. Segunda contribución determinada a nivel nacional al Acuerdo de París. Publicado en diciembre de 2022.
- Rivera, J. E., L. Serna, J. Arango, R. Barahona, E. Murgueitio, E. Torres y J. Chará. 2023. Silvopastoral systems and their role in climate change mitigation and nationally determined contributions in Latin America. En J. Chará y S. Jose, editores, Silvopastoral Systems of Meso America and Northern South America. Springer, 25–53.
- Ruto, E. y G. Garrod. 2009. Investigating farmers' preferences for the design of agri-environment schemes: A choice experiment approach. Journal of Environmental Planning and Management, 52(5), 631–647.
- Sancho, L., I. Arocena y L. Ordeig. 2023. Definición, caracterización y cuantificación del área bajo sistemas silvopastoriles, para el seguimiento de las contribuciones establecidas en la contribución determinada a nivel nacional de Uruguay. Informe técnico, Proyecto URU/18/G31. Creación de capacidades institucionales y técnicas para aumentar la transparencia en el marco del Acuerdo de París, Uruguay. Informe final.
- Steinfeld, H., P. Gerber, T. Wassenaar, V. Castel, M. Rosales y C. de Haan. 2006. Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), Roma.
- Thornton, P. K. 2010. Livestock production: Recent trends, future prospects. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, 365(1554), 2853–2867.

- Thornton, P. y M. Herrero. 2010. The Inter-Linkages between Rapid Growth in Livestock Production, Climate Change, and the Impacts on Water Resources, Land Use, and Deforestation. Banco Mundial. <http://hdl.handle.net/10986/9223> Licencia: CC BY 3.0 IGO.
- Villanueva, A. J., M. Rodríguez-Entrena, J. A. Gómez-Limón y M. Arriaza. 2015. Analysing the design of agri-environmental schemes: Farmers' preferences in southern Spain. *Land Use Policy*, 46, 142–154.
- Ward, P. S. y V. Singh. 2015. Using field experiments to elicit risk and ambiguity preferences: Behavioural factors and the adoption of new agricultural technologies in rural India. *Journal of Development Studies*, 51(6), 707–724.
- Xin, M., S. Tan, H. Qiu y J. Tang. 2025. Environmental regulations and smallholder farmers' technical efficiency: Empirical evidence from pastoral China. *Journal of Agricultural Economics*.
- Yesuf, M. y R. A. Bluffstone. 2009. Poverty, risk aversion, and path dependence in low-income countries: Experimental evidence from Ethiopia. *American Journal of Agricultural Economics*, 91(4), 1022–1037.

Apéndice



Apéndice 2.1. Prácticas sostenibles en la producción ganadera

Entre las prácticas sostenibles destinadas a reducir la intensidad de las emisiones y mejorar los servicios ecosistémicos en la producción ganadera se incluyen la mejora de la gestión de los animales y la alimentación, los cambios en la formulación de las raciones y las intervenciones en el rumen (Nabinger, 2011; Cubbage *et al.*, 2012; Bussoni *et al.*, 2015; Do Carmo *et al.*, 2016; Jara-Rojas *et al.*, 2020; Arndt *et al.*, 2022; Caprarulo *et al.*, 2022; Kelly, 2023). Entre los ejemplos de estas técnicas se incluyen el procesamiento de piensos, la selección genética, la mejora de la salud animal, el manejo de pastos, el aumento de los niveles de alimentación y la mejora de la calidad del forraje. Otras prácticas ganaderas, como los sistemas silvopastoriles, también reducen las emisiones netas al aumentar los sumideros de carbono mediante la forestación (Rivera *et al.*, 2023). Nuestro estudio se centra en tres técnicas ganaderas con potencial para reducir la intensidad de las emisiones de GEI (emisiones por unidad de producción) y aumentar la provisión de servicios ecosistémicos, al tiempo que se mantiene y mejora la productividad: la mejora de las zonas de pastoreo, las prácticas de intensificación sostenible para la gestión de los hatos y los sistemas silvopastoriles (Becoña *et al.*, 2014; INIA, 2024; Eugène *et al.*, 2021; Sancho *et al.*, 2023).

En este estudio, la mejora de las zonas de pastoreo pasa por el establecimiento de pastos artificiales para aumentar la disponibilidad y la digestibilidad del forraje y reducir las emisiones de metano (Eugène *et al.*, 2021). Además, estos pastos mejoran la adaptabilidad ante eventos climáticos extremos, lo que reduce las fluctuaciones en la producción de un año a otro (Becoña *et al.*, 2014; Modernel *et al.*, 2019). Las prácticas de intensificación sostenible a través de la gestión del hato abarcan múltiples tecnologías y estrategias. En el pastoreo rotativo, por ejemplo, los ganaderos rotan el hato basándose en la evaluación del forraje en lugar de la condición corporal. Las investigaciones demuestran que esto da lugar a una mejor condición corporal, un mayor peso vivo, tasas de gestación más altas, una mejor producción de leche y terneros más pesados con edades de sacrificio más tempranas (Do Carmo *et al.*, 2016; Claramunt *et al.*, 2020). También reduce la intensidad de las emisiones al mejorar la productividad del suelo, aumentar la captura de carbono, incrementar el peso de los animales y reducir la edad de sacrificio (INIA, 2024). Estas técnicas son coherentes con la contribución determinada a nivel nacional (CDN) de Uruguay y otros objetivos ambientales, como el Plan Nacional de Adaptación (República Oriental del Uruguay, 2022).

Muchas de estas prácticas tienen el potencial de aumentar los beneficios, ya que mejoran la productividad. Un estudio reciente realizado por el Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria (INIA) de Uruguay documenta las ventajas económicas y ambientales que supone la adopción de prácticas mejoradas de pastoreo y de intensificación sostenible en tres unidades de producción de Uruguay (INIA, 2024).

Las técnicas silvopastoriles, que integran plantas forrajeras, arbustos y árboles en los sistemas ganaderos, también tienen el potencial de mejorar la productividad (Lemes et al., 2021; Rivera et al., 2023), al tiempo que proporcionan valiosos servicios ecosistémicos, entre ellos el secuestro de carbono en el suelo (De Stefano y Jacobson, 2018; Rivera et al., 2023) y el hábitat para la biodiversidad. El secuestro de carbono en los sistemas ganaderos está en consonancia con los objetivos de mitigación de la CDN uruguaya. Sin embargo, estas prácticas siguen siendo relativamente desconocidas para muchos productores del país y a menudo requieren competencias adicionales, como: conocimientos de gestión forestal, inversiones, o siembras de pasturas (Sancho et al., 2023).

Apéndice 2.2. Estadísticas detalladas de los productores

Tabla A.2.1. Estadísticas detalladas de los productores

Variable	n	Media	DE	Mín.	Máx.
Uso del suelo (ha)					
Pasturas artificiales	125	202	555	0	5.000
Pasturas naturales	249	680	1.102	0	11.500
Cultivos de cobertura (Pasto natural mejorado)	150	177	237	0	1.269
Cultivos forrajeros anuales	105	81	108	0	831
Horticultura	34	11	30	0	134
Bosque artificial (denso, cortaviento, abrigo, sombra)	99	65	130	0	750
Bosque nativo	94	100	155	0	900
Superficie de la unidad productiva	274	898	1.439	0	15.821
Cabezas de ganado					
Toros	218	15	23	0	220
Vacas de cría y vaquillonas preñadas	228	331	459	0	4.500
Vacas de descarte o vacas de invernada	166	70	78	0	350
Novillos	172	182	390	0	3.400
Vaquillonas	217	124	189	0	1.900
Terneros	222	224	361	0	3.700
Fuerza laboral					
Miembros del hogar	274	2	1	0	10
Empleados	274	2	4	0	50

Apéndice 2.3. Logit condicional y especificación del modelo

La tabla A.2.2 presenta las estimaciones de tres modelos logit condicionales basados en 274 encuestados, lo que suma un total de 1.644 observaciones. La columna 1 recoge los resultados de un modelo que asume efectos lineales para los atributos de pastoreo y silvopastoreo, representados cada uno por una única variable ficticia. La columna 2 introduce una especificación más flexible, que tiene en cuenta los efectos no lineales de las prácticas de pastoreo y silvopastoreo mediante la inclusión de variables ficticias para cada nivel. Los resultados confirman en gran medida los de la columna 1: los coeficientes para el pastoreo siguen siendo positivos, pero estadísticamente no significativos, mientras que los de la intensificación sostenible siguen siendo positivos, estadísticamente significativos y de magnitud creciente. En cuanto a las prácticas silvopastoriles, los niveles 2 y 3 arrojan coeficientes negativos y estadísticamente significativos a los niveles del 10% y del 1%, respectivamente, mientras que el nivel 1 sigue siendo no significativo. Estos hallazgos proporcionan evidencia de efectos no lineales tanto en los atributos silvopastoriles como en los de intensificación sostenible.

Por último, la columna 3 presenta un modelo en el que la alternativa de mantenimiento del *statu quo* incluye el nivel 1 de prácticas de intensificación sostenible, en consonancia con la adopción, según sus propias declaraciones, de la práctica de ajuste estacional de la carga ganadera por parte del 81% de los encuestados. Los resultados coinciden con los de la columna 1: las prácticas de pastoreo siguen sin ser estadísticamente significativas, las prácticas de intensificación sostenible se valoran positivamente y se prefieren los niveles más altos. En cuanto a las prácticas silvopastoriles, los coeficientes de los niveles 1 y 2 son negativos, pero no estadísticamente significativos, mientras que el nivel 3 sigue siendo negativo y estadísticamente significativo al nivel del 1%. Nuestra especificación preferida permite preferencias no lineales entre los niveles de atributos, tal como se indica en la columna 2.

Tabla A.2.2. Estadísticas resumidas detalladas

Variable	(1)	(2)	(3)
asc	-0,057 (0,33)	-0,098 (0,53)	0,083 (0,47)
grazing1	—	0,033 (0,34)	-0,007 (0,07)
grazing2	—	0,061 (0,57)	0,039 (0,37)
grazing3	—	0,069 (0,71)	0,088 (0,93)
grazing	0,023 (0,70)	—	—
intens1	0,400*** (4,58)	0,401*** (4,59)	—
intens2	0,419*** (3,77)	0,423*** (3,77)	0,239** (2,45)
intens3	0,498*** (4,52)	0,513*** (4,51)	0,337*** (3,31)
silvopast1	—	-0,052 (0,48)	-0,047 (0,43)
silvopast2	—	-0,190* (1,76)	-0,176 (1,62)
silvopast3	—	-0,350*** (2,77)	-0,341*** (2,71)
silvopast	-0,118*** (2,91)	—	—
payment	0,196*** (9,74)	0,195*** (9,80)	0,198*** (9,86)

Notas: Estadísticas t robustas entre paréntesis. *p < 0,1, **p < 0,05, ***p < 0,01.

Apéndice 2.4. Especificaciones alternativas

Tabla A.2.3 Estimaciones del modelo logit mixto, por perfil conductual

Variable	Proclive al riesgo	Adverso al riesgo	Impaciente	Paciente
asc	1,033** (2,29)	1,926** (2,19)	0,762 (1,43)	1,713** (2,37)
grazing1	0,012 (0,06)	0,298 (1,03)	0,057 (0,19)	-0,069 (0,32)
grazing2	0,447** (2,14)	-0,228 (0,79)	0,114 (0,37)	0,135 (0,56)
grazing3	0,011 (0,05)	0,198 (0,67)	-0,004 (0,01)	0,007 (0,03)
intens1	0,538*** (2,84)	0,775*** (2,69)	0,768*** (2,79)	0,561** (2,53)
intens2	0,752*** (3,12)	0,517* (1,58)	0,775** (1,98)	0,758*** (3,02)
intens3	1,086*** (4,54)	0,295 (0,76)	0,925*** (2,69)	0,982*** (3,37)
silvopast1	0,093 (0,47)	-0,564 (1,18)	0,169 (0,46)	-0,152 (0,61)
silvopast2	-0,190 (0,91)	-0,621* (1,65)	0,029 (0,08)	-0,584* (1,93)
silvopast3	-0,676** (2,37)	-0,757* (1,71)	-0,462 (1,06)	-0,923** (2,43)
log(payment)	-1,598*** (6,73)	-1,567*** (3,74)	-1,428*** (3,94)	-1,487*** (6,12)
σasc	2,983*** (6,78)	-4,943*** (4,41)	3,446*** (6,38)	3,868*** (5,11)
σgrazing1	-0,219 (0,47)	-0,351 (0,54)	1,021 (1,55)	0,015 (0,33)
σgrazing2	-0,026 (0,25)	0,143 (0,23)	1,057* (1,78)	-0,050 (0,34)
σgrazing3	-0,778** (2,07)	0,048 (0,12)	-1,528** (2,06)	0,155 (0,56)
σintens1	-0,062 (0,65)	-0,008 (0,04)	-0,382 (1,11)	-0,319 (0,56)
σintens2	1,469*** (3,00)	0,700 (0,87)	-2,495*** (2,61)	-0,229 (0,27)
σintens3	-1,148*** (3,19)	-1,628** (2,22)	1,954*** (2,95)	-1,030** (2,91)
σsilvopast1	1,028*** (2,91)	-1,556** (2,00)	-1,816*** (3,09)	-1,019** (2,54)
σsilvopast2	-0,982** (2,29)	-0,400 (0,63)	1,079 (1,45)	1,088** (2,26)
σsilvopast3	1,570*** (3,30)	1,223* (1,78)	1,806** (2,39)	-1,584*** (2,66)
σpayment	-1,196*** (4,92)	-1,275*** (5,10)	-1,535*** (4,61)	-0,950*** (4,04)
Productores	194	80	139	124
Observaciones	1.164	480	834	744
BIC	2.063	868	1.477	1.329
AIC	1.951	776	1.373	1.228

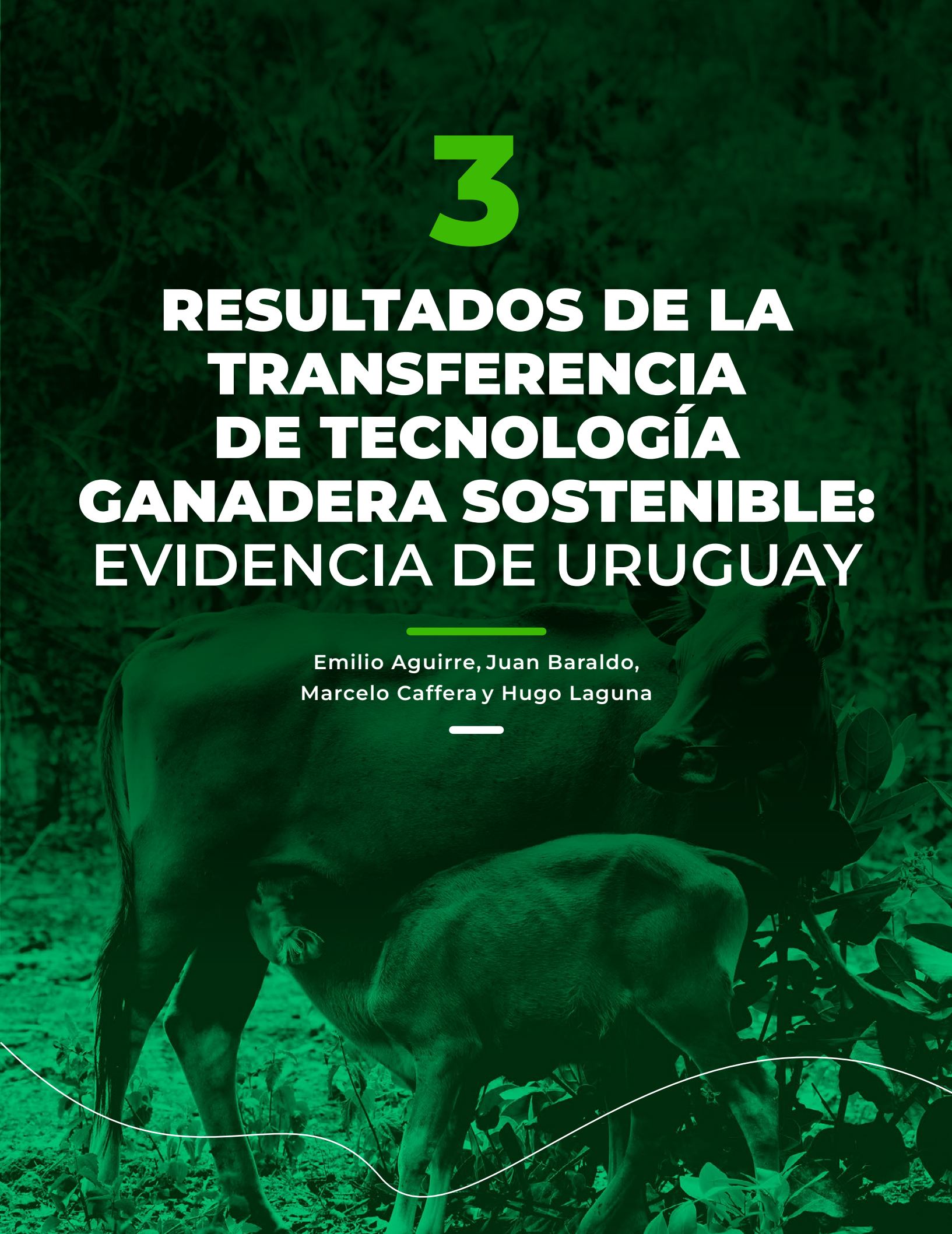
Tabla A.2.3

**Estimaciones del modelo de clases latentes con variables
de características de la finca y de los productores**

Variable	Clase A	Clase B
asc	1,305*** (5,99)	-1,569** (-2,08)
grazing1	0,121 (1,01)	-0,698* (-1,76)
grazing2	0,190 (1,44)	-0,723 (-1,50)
grazing3	0,118 (1,02)	-0,817 (-1,56)
intens1	0,394*** (4,04)	0,630** (2,15)
intens2	0,517*** (3,55)	-1,163 (-1,55)
intens3	0,593*** (4,01)	0,081 (0,17)
silvopast1	-0,066 (-0,54)	0,136 (0,30)
silvopast2	-0,191 (-1,53)	-0,133 (-0,22)
silvopast3	-0,401*** (-2,55)	-0,350 (-0,40)
payment	0,204*** (8,72)	0,116* (1,83)
delta (intercepto)		-3,305*** (-3,31)
superficie		-0,00074** (-2,13)
edad		0,062*** (3,36)
hombre		-0,598 (-1,23)
ingreso >50.000		0,305 (0,71)
índice de sostenibilidad		-0,406* (-1,90)
Productores	274	
Observaciones	1.644	
BIC	2.907,57	
AIC	2.756,23	
Probabilidad de pertenencia a la clase	81%	19%

Tabla A.2.4. Estimaciones del modelo de clases latentes con variables conductuales

Variable	Clase A	Clase B
asc	1,334*** (5,43)	-1,702** (-2,60)
grazing1	0,125 (1,08)	-0,745* (-1,82)
grazing2	0,164 (1,35)	-0,686 (-1,40)
grazing3	0,127 (1,13)	-0,900** (-2,01)
intens1	0,419*** (4,09)	0,557** (2,01)
intens2	0,560*** (4,01)	-1,218** (-2,16)
intens3	0,641*** (4,38)	-0,020 (-0,05)
silvopast1	-0,053 (-0,41)	0,163 (0,32)
silvopast2	-0,215 (-1,63)	0,260 (0,43)
silvopast3	-0,422*** (-2,63)	0,039 (0,06)
payment	0,214*** (8,95)	0,154** (2,18)
delta (intercepto)		-1,474 (-1,35)
impaciencia		0,560 (1,52)
aversión al riesgo		0,431 (1,22)
altruismo		0,550 (1,31)
conciencia ambiental		-0,155 (-0,31)
norma social		-0,485 (-1,15)
Productores	263	
Observaciones	1.578	
BIC	2.809,93	
AIC	2.659,74	
Probabilidad de pertenencia a la clase	80%	20%



3

RESULTADOS DE LA TRANSFERENCIA DE TECNOLOGÍA GANADERA SOSTENIBLE: EVIDENCIA DE URUGUAY

Emilio Aguirre, Juan Baraldo,
Marcelo Caffera y Hugo Laguna

The background of the entire page is a photograph of the Uruguayan flag waving in the wind. The flag features nine horizontal stripes of blue and white, and a golden sun emblem in the upper left corner. The scene is set against a warm, orange-hued sunset sky, with a field of dry, golden grass visible in the foreground and middle ground.

Resumen

A medida que aumenta la demanda mundial de carne vacuna, lograr un equilibrio entre la productividad ganadera y la sostenibilidad ambiental se ha convertido en una prioridad de política. En respuesta a ello, Uruguay puso en marcha el Programa de Producción Familiar Integral y Sustentable (PFIS). Entre 2015 y 2017, esta intervención prestó apoyo a los pequeños y medianos productores ganaderos para que invirtieran en tecnologías y prácticas de gestión destinadas a mejorar tanto la productividad como la adaptación climática. El presente estudio ofrece la primera evaluación causal de un programa nacional diseñado para promover estos dos objetivos en el sector ganadero. Evaluamos el efecto del PFIS en tres dimensiones: (i) la adopción de tecnología; (ii) la productividad, y (iii) la intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero. Para identificar los efectos atribuibles a la intervención utilizamos un diseño de regresión discontinua basado en un umbral estricto de elegibilidad y datos de panel de los productores entre 2015 y 2020. Si bien no se encontraron efectos estadísticamente significativos en la productividad de la carne vacuna por hectárea ni en la intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero durante el período de estudio en el umbral de discontinuidad, el programa presenta mejoras significativas en adopción de buenas prácticas ganaderas hato, incluido destete temprano, el entore (monta, servicio, empadre) controlado y el diagnóstico de la actividad ovárica. Estos resultados muestran el potencial como las limitaciones de los programas integrados de transferencia de tecnología a la hora de promover la intensificación sostenible de los sistemas ganaderos extensivos, y sugieren la necesidad de realizar evaluaciones a más largo plazo para captar los posibles impactos en la productividad y las emisiones que puedan surgir a medida que estas tecnologías, en particular las reproductivas, influyan en los resultados agregados.



Introducción³

Las proyecciones mundiales prevén un aumento del 10% en el consumo de carne vacuna para 2032 (OCDE y FAO, 2023). Satisfacer esta demanda creciente plantea un reto significativo, especialmente dado que el pastoreo ganadero, el uso del suelo predominante en todo el mundo (Nin *et al.*, 2019), es objeto de un creciente escrutinio ambiental (Steinfeld, 2006; Gerber *et al.*, 2013; MacLeod *et al.*, 2018). Las preocupaciones se ven agravadas por los efectos acelerados del cambio climático y el aumento de los precios de los alimentos.

El reto de la transición es, por lo tanto, mejorar la productividad y la resiliencia climática, garantizando al mismo tiempo la sostenibilidad ambiental y social. El aumento de la productividad ganadera puede contribuir al crecimiento económico, reducir las presiones sobre el medio ambiente, reforzar la competitividad de las explotaciones y promover objetivos más amplios relacionados con la seguridad alimentaria y la mitigación del cambio climático (Aguirre *et al.*, 2024). Para alcanzar estos objetivos interrelacionados es necesario identificar y aplicar políticas eficaces, basados en evidencia empírica sólida.

La adopción de tecnologías adecuadas puede impulsar tanto la mejora de la productividad

como la adaptación al cambio climático. Sin embargo, en muchos países en desarrollo, especialmente entre los pequeños productores de las regiones de ingresos bajos y medios, la adopción y el uso efectivo de las nuevas tecnologías siguen siendo limitados (de Janvry *et al.*, 2017; López *et al.*, 2017). En el sector ganadero, entre los obstáculos a la inversión y la adopción se encuentran el acceso restringido de los productores a los mercados financieros y el acceso limitado a información sobre las tecnologías disponibles y sus posibles beneficios económicos. Estos obstáculos a menudo se derivan de problemas estructurales más amplios, tales como fallas de mercado, asimetrías de información y falta de adecuación entre las soluciones tecnológicas y las

³ Las opiniones expresadas en este documento son exclusivamente responsabilidad de los autores y no reflejan ni representan las posiciones oficiales del Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ni del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.

necesidades y limitaciones reales a las que se enfrentan los ganaderos.

En respuesta, los gobiernos y los bancos de desarrollo han promovido programas de transferencia de tecnología que combinan incentivos financieros con asistencia técnica. Aunque estas intervenciones tienen como objetivo principal aumentar la productividad, cada vez se espera más que generen co-beneficios ambientales al mejorar la eficiencia de los recursos y reducir las emisiones por unidad de producción. No obstante, a pesar del papel que desempeña la ganadería en la deforestación y las emisiones de metano, la evidencia rigurosa de su eficacia sigue siendo limitada. Según nuestro conocimiento, ningún estudio sobre sistemas ganaderos ha examinado simultáneamente la adopción de tecnología, la productividad y los resultados ambientales dentro de un marco empírico unificado utilizando estrategias de identificación causal.

En los últimos años se ha observado un creciente interés por los métodos para evaluar el impacto de políticas agrícolas (Winters *et al.*, 2010; de Janvry *et al.*, 2017). Uruguay destaca, de manera pionera, por su rigurosa aplicación de estos métodos en el sector ganadero. Estudios previos sobre intervenciones ganaderas han utilizado técnicas de *matching* con diferencias en diferencias, con resultados mixtos (véase la tabla S.3.1 en Apéndice). Por ejemplo, López y Maffioli (2008) constataron que el Programa Piloto Ganadero uruguayo, que subsidiaba hasta el 50% de los costos de los servicios de extensión para los pequeños y medianos productores, fomentaba la adopción de tecnología, pero no tenía ningún efecto sobre la producción de terneros. Por el contrario, Mullally y Maffioli (2016) informa-

ron que una versión revisada del programa dio lugar a un aumento de la producción y de las ventas netas.

Las evaluaciones más recientes han analizado programas con objetivos explícitos de sostenibilidad. El proyecto Agricultores Familiares y Cambio Climático (2013–2019), destinado a reforzar la resiliencia climática entre los productores expuestos a las sequías, no observó cambios significativos en la mayoría de las prácticas sostenibles (Durán y Laguna, 2021).⁶ Del mismo modo, Durán *et al.* (2018) analizaron cuatro intervenciones del Programa de Desarrollo Productivo Rural (Plan Ovino, Llamado Lechero y Programa Agroforestal, así como el PFIS) y señalaron efectos dispares en la productividad parcial de la producción de carne y leche.

El presente estudio presenta una evaluación de impacto del Programa de Producción Familiar Integral y Sustentable (PFIS), una iniciativa de política del Gobierno uruguayo destinada a mejorar la productividad y la resiliencia climática entre los pequeños y medianos productores ganaderos. El PFIS proporcionó apoyo financiero específico para la adopción de un conjunto de innovaciones tecnológicas y de gestión diseñadas para mejorar tanto la productividad como la adaptación al clima. Para evaluar su efecto, estimamos los efectos causales del programa sobre (i) la productividad de la carne vacuna por hectárea; (ii) la adopción de buenas prácticas de gestión, y (iii) la intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). Este artículo emplea un diseño de regresión discontinua que aprovecha un experimento natural derivado de la segunda fase del PFIS, en el que la asignación al programa siguió una regla discontinua basada en un sistema de puntuación técnica.

Según nuestro conocimiento, este es el primer estudio que evalúa el efecto de un programa de transferencia de tecnología ganadera sobre la intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero dentro de un marco causal, utilizando un diseño de regresión discontinua. Esta investigación resulta oportuna, ya que muchos países tratan de armonizar sus iniciativas de desarrollo agrícola con los compromisos contraídos en el marco de sus contribuciones determinadas a nivel nacional. Los datos obtenidos de programas como el PFIS pueden servir de base para el diseño de políticas integradas y con múltiples objetivos en entornos agroecológicos y socioeconómicos similares.

Nuestros resultados indican que, aunque el PFIS no logró resultados estadísticamente significativos en la productividad de la carne vacuna ni en la intensidad de las emisiones

para 2020, sí aumentó significativamente la adopción de tecnologías reproductivas: el destete precoz aumentó en 8,7 puntos porcentuales, el entore controlado en 22,4 puntos porcentuales y el diagnóstico de la actividad ovárica en 16,3 puntos porcentuales. Estos resultados sugieren que, aunque no se observaron efectos inmediatos sobre la productividad y las emisiones, la adopción de tecnologías de reproducción asistida podría sentar las bases para futuras mejoras. Dado que dichas tecnologías están vinculadas a los ciclos de cría y desempeño reproductivo, sus efectos pueden manifestarse a más largo plazo, lo que subraya la importancia de realizar evaluaciones continuas y a largo plazo para captar los beneficios finales en materia de productividad y sostenibilidad ambiental.

El artículo se estructura de la siguiente manera:



La **sección 3.1** ofrece información general sobre el sector ganadero uruguayo y el PFIS.



La **sección 3.2** describe las fuentes de datos y la estrategia empírica.



La **sección 3.3** presenta las principales conclusiones.



La **sección 3.4** concluye con un análisis de las implicaciones de política.





3.1 Contexto y descripción del programa

3.1.1 El sector ganadero en Uruguay

Uruguay ocupa una cuota significativa en los mercados mundiales de carne vacuna, situándose en el noveno puesto entre los exportadores de carne vacuna en 2023 y aportando el 4% del peso vivo canal equivalente a nivel mundial. A nivel nacional, el sector ganadero, que incluye la carne, los subproductos y los productos lácteos, representó alrededor del 10% del producto interno bruto (PIB) de Uruguay y el 19% de las exportaciones de bienes en 2023 (Uruguay XXI, 2024). El sector también proporciona alrededor del 6,5% del empleo total a nivel nacional. Según el Censo General Agropecuario de 2011, el 74% de las explotaciones agropecuarias comerciales se especializan en la producción de carne y leche, y abarcan 12,6 millones de hectáreas, aproximadamente el 70% de la superficie terrestre del país (DIEA-MGAP, 2014; Aguirre, 2018).

La producción ganadera de Uruguay es predominantemente extensiva, y se sustenta en los pastizales del Río de la Plata. Estos sistemas de producción utilizan un mínimo de insumos sintéticos y de energía externa, lo que se ajusta bien a los principios de sostenibilidad (Álvarez, 2020; Lanfranco *et al.*, 2022; Ruggia *et al.*, 2021). Sin embargo, existen desafíos en materia de sostenibilidad. En 2020, las actividades agrícolas, forestales y de uso del suelo representaron el 57% de las emisiones netas totales de GEI de Uruguay, y la ganadería no lechera contribuyó con el 30% de las emisiones brutas (Ministerio de Ambiente, 2021). Por lo tanto, mejorar la productividad es una estrategia fundamental para alcanzar los objetivos de mitigación incluidos en la contribución determinada a nivel nacional de Uruguay, que se definen en términos de intensidad de emisiones por unidad de producción cárnica.

A pesar del aumento del peso al sacrificio, la reducción de los períodos de engorde y el mayor uso de corrales de engorde, la producción global de carne vacuna por hectárea solo ha experimentado un crecimiento moderado en las últimas dos décadas (Peyrou, 2016; Nin *et al.*, 2019;

Aguirre, 2022c). Existe una enorme variabilidad entre las unidades de producción de carne vacuna: el decil superior puede producir hasta cinco veces más carne vacuna por hectárea que el decil inferior (Aguirre, 2018, 2019, 2022c, 2022b). Esta heterogeneidad se debe a diferencias en la calidad natural de los suelos, los sistemas de producción, la infraestructura y la adopción de tecnología. Sin embargo, aún es posible lograr aumentos sustanciales de la productividad mediante una mejor gestión técnica, incluso dentro de la frontera tecnológica existente (Aguirre *et al.*, 2024a, 2024b).

No obstante, la adopción de prácticas ganaderas mejoradas en Uruguay sigue siendo limitada (Peyrou, 2016; Paparamborda, 2017; Bervejillo *et al.*, 2018; Aguirre, 2022; Jones *et al.*, 2020; Polcaro, 2022) y la evidencia empírica sobre la eficacia de los programas de transferencia de tecnología es escasa (Mullally y Maffioli, 2016).

3.1.2 La intervención y el marco conceptual

El Programa de Producción Familiar Integral y Sustentable (PFIS) tenía dos componentes principales (Aguirre *et al.*, 2018a).⁴ El primero tenía como objetivo mejorar la productividad mediante la promoción de tecnologías relacionadas con la gestión del hato, la salud animal, el mejoramiento genético y la nutrición. El segundo se centró en aumentar la resiliencia de los sistemas de producción ante la variabilidad climática mediante el apoyo a la gestión sostenible de los recursos naturales (mejora del acceso al agua, conservación del suelo y la vegetación, gestión sostenible de pastos y bosques, plantación de árboles para sombra y refugio, y gestión de efluentes). El objetivo final del programa era impulsar los ingresos y la resiliencia entre los pequeños y medianos productores ganaderos, al tiempo que se contribuía a los objetivos nacionales de una agricultura de bajas emisiones.

El PFIS se dirigió a múltiples sectores, entre ellos ganadería vacuna, lechería, horticultura, apicultura, avicultura, porcicultura, fruticultura, viticultura y silvicultura (Gesto *et al.*, 2019). El programa adoptó un enfoque basado en la demanda. En lugar de ofrecer un paquete fijo de tecnologías, proporcionó una lista de innovaciones elegibles entre las que los productores podían elegir, reconociendo la heterogeneidad de las condiciones locales, los sistemas de producción y los tipos de productores. Este enfoque estaba destinado a mejorar tanto los resultados económicos

⁴ The program's guidelines can be accessed at Producción Familiar Integral y Sustentable | MGAP at: <https://www.gub.uy/ministerio-ganaderia-agricultura-pesca/comunicacion/convocatorias/produccion-familiar-integral-sustentable>

como la sostenibilidad ambiental mediante estrategias integradas y adaptadas a las necesidades. Su doble enfoque en la productividad y la sostenibilidad, combinado con un diseño flexible y participativo, distingue al PFIS de muchas iniciativas de desarrollo rural anteriores.

La elegibilidad para el sector ganadero se limitaba a las explotaciones familiares y de pequeña y mediana escala, es decir, a aquellos productores que gestionaban hasta 1.250 hectáreas con una productividad promedio (índice CONEAT = 100).⁵ En 2015, este segmento constituía el 81% del total de productores, abarcaba el 43% de la superficie ganadera total del país y representaba el 49% del total de unidades ganaderas. Los productores podían participar de forma individual o colectiva.⁶ El programa se implementó a nivel nacional y se promovió a través de radio, televisión y por el sitio web del ministerio.

Cada participante podía recibir hasta US\$16.000 en concepto de ayuda financiera, US\$8.000 por componente, lo que cubría hasta el 80% de los costos totales del proyecto. La mitad del financiamiento se desembolsó al inicio del proyecto, y el resto se proporcionó tras la finalización satisfactoria y el cumplimiento de las actividades propuestas. Aunque la participación en cada componente era voluntaria, el programa fomentaba propuestas integradas que abordaran tanto la productividad como la sostenibilidad.⁷ Los proyectos se diseñaron a medida basándose en una evaluación diagnóstica de las necesidades específicas de cada explotación agrícola, con un período de ejecución máximo de 18 meses. El presupuesto total del programa ascendió a US\$13 millones.

La tabla 3.1 ilustra la teoría del cambio del programa y su hipótesis principal, los productores ganaderos beneficiarios reciben asistencia técnica y adoptan las tecnologías promovidas aumentando su productividad y sus ingresos. Se espera que estas mejoras refuercen la sostenibilidad económica, y reduzcan las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de producción. Además de las mejoras en productividad, la adopción de prácticas ganaderas más sostenibles ofrece una vía complementaria para reforzar la resiliencia climática y la sostenibilidad ambiental.

⁵ El índice CONEAT, desarrollado por el Gobierno uruguayo, cuantifica la productividad de la tierra en términos de producción de carne y lana. Asigna valores de 0 (inadecuado para la producción ganadera) a 250, con una media nacional de 100. Este índice desempeña un papel crucial en la política fiscal, ya que determina la productividad del suelo a efectos tributarios y sirve como referencia estándar en las transacciones de tierras.

⁶ Las postulaciones al programa fueron presentadas en línea por un técnico agrónomo o veterinario acreditado por el MGAP, que había completado previamente una formación en formulación de proyectos. Los técnicos recibieron US\$409 por cada propuesta aprobada, y el programa financió hasta 10 visitas de seguimiento técnico por proyecto, a US\$130 cada una.

⁷ Aunque el componente tecnológico tenía como objetivo principal mejorar la productividad, muchas de las acciones que apoyaba estaban estrechamente vinculadas con la sostenibilidad ambiental, en particular a través de su efecto sobre la intensidad de las emisiones. En la práctica, la clasificación de las acciones por componente no siempre era clara: algunas intervenciones clasificadas dentro del componente tecnológico podrían haberse considerado también como acciones de manejo de pastos o del suelo, y viceversa.

Tabla 3.1 Teoría de cambio del PFIS

Actividades	Productos	Resultados	Beneficios
• Diseño de los lineamientos de la convocatoria • Registro y acreditación de técnicos • Evaluación de propuestas • Firma de contratos por parte de los productores • Monitoreo del proyecto	Beneficiarios • Realizan inversiones • Reciben asistencia técnica • Fortalecen redes y grupos de productores	• ↑ Adopción de tecnologías • ↑ Prácticas sostenibles • ↑ Participación en redes	• ↑ Productividad ganadera • ↓ Intensidad de GEI por kg de carne vacuna • ↑ Capacidad de adaptación al cambio climático

Fuente: Adaptado de Durán y Hernández (2017).

El PFIS realizó dos convocatorias competitivas, en agosto y octubre de 2014 (Durán y Hernández, 2017), y recibió 3.611 propuestas de diversos sectores. Este estudio se centra en su efecto sobre los productores de ganado vacuno de carne, quienes presentaron 1.846 propuestas, lo que representa el 51,1% del total.

Las solicitudes se evaluaron mediante un sistema de evaluación en línea y se puntuaron de 0 a 100, en función de la solidez de la justificación, la coherencia interna, la exhaustividad, la viabilidad técnica y financiera, y la calidad de los indicadores de desempeño propuestos en las dimensiones económica, ambiental y social (para más detalles, véase el anexo 3.1 en el Apéndice). En la primera convocatoria, se financiaron todos los proyectos que obtuvieron una puntuación de 60 puntos o más. En la segunda convocatoria, debido a restricciones financieras, el umbral de corte se elevó a 66 puntos. Un total de 1.026 propuestas de productores de ganado vacuno de carne recibió financiamiento, lo que representa el 69,4% del total de solicitudes presentadas.

El PFIS fue ejecutado entre 2015 y 2017 por la División de Desarrollo Rural del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca (MGAP). La ejecución comenzó a principios de 2015, y los últimos beneficiarios se incorporaron a finales de 2016 (en la tabla 3.2 se resumen las actividades del programa). Los datos de línea base corresponden a 2015, antes de la implementación, y los datos de resultados para la evaluación de impacto se recopilaban en 2020, tres años después de la conclusión del programa.

Tabla 3.2 Diagrama de Gantt del PFIS

Actividad	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Inicio del programa	✓	✓				
Finalización del programa		✓	✓			
Línea de base	✓					
Línea de resultados						✓

Fuente: Autores.

Entre los productores ganaderos, la mayor parte de las inversiones del PFIS se destinó a la compra de ganado reproductor o semen para el mejoramiento genético, la mejora de infraestructura (por ejemplo, caminos, corrales, mangas de inmovilización), la nutrición, la salud animal, el asesoramiento técnico y la subdivisión de pastos (Durán *et al.*, 2018). Más del 90% de los productores recibió asistencia técnica relacionada con los recursos naturales y la gestión productiva (véanse los detalles en el anexo 3.2). Una parte significativa de la inversión total (42%) se destinó a mejoras tecnológicas y productivas, seguida de la gestión del agua (20%) y el manejo de pastos (16%).



3.2 Materiales y métodos

3.2.1 Fuentes de datos

Nuestra evaluación del PFIS utiliza múltiples fuentes de datos del Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca de Uruguay, que implementó el programa. Entre ellas se incluyen registros administrativos, encuestas representativas a nivel nacional y datos de trazabilidad ganadera. Estas bases de datos se resumen en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Base de datos principal para la evaluación del PFIS

Base de datos	Cobertura	Año	Notas
Formulario de postulación al PFIS	Postulantes	2014	Datos técnicos y administrativos del proyecto
Censo General Agropecuario (CGA)	Todos los productores agropecuarios	2011	Marco muestral para encuestas posteriores
Encuesta Ganadera Nacional (EGN)	Postulantes cercanos al umbral	2016	Datos de línea de base sobre fincas ganaderas (>7 UG), excluido el sector lechero
Encuesta de Buenas Prácticas de Manejo de Pastizales Naturales (EBPMCEN)	Postulantes cercanos al umbral	2020	Datos sobre uso del suelo y manejo de pastizales
Sistema Nacional de Información Ganadera (SNIG)	Todos los productores ganaderos	2011–2020	Datos sobre transacciones, movimientos y trazabilidad ganadera

Fuente: Autores. Nota: UG = unidad ganadera.

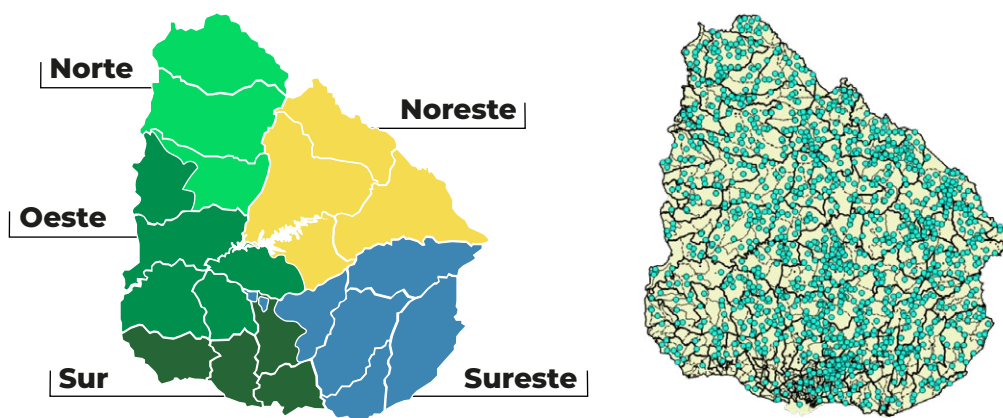
El formulario de solicitud del PFIS recopiló datos técnicos y administrativos sobre los proyectos propuestos, lo que permitió caracterizar a los solicitantes y construir variables de control para la evaluación de impacto en la línea de base.

Los censos agropecuarios forman parte del sistema estadístico de Uruguay y sirvieron de base de muestreo para encuestas posteriores. El último censo disponible es el CGA de 2011.

La Encuesta Ganadera Nacional (EGN) de 2016 recopiló datos económicos sobre los sectores bovino y ovino de Uruguay. Se diseñó específicamente para establecer una línea de base para la evaluación del PFIS.⁸ La encuesta, que abarca la campaña agrícola 2015–2016, incluye información detallada sobre sistemas de producción, adopción de tecnología, servicios, mano de obra, costos y prácticas de innovación (Bervejillo *et al.*, 2018). La muestra excluyó las explotaciones lecheras e incluyó 1.428 explotaciones ganaderas comerciales con al menos siete unidades ganaderas (UG), seleccionadas a partir del CGA 2011.

Se aplicó una estrategia de muestreo aleatorio estratificado basada en el tamaño de la explotación, la región y el estado de participación en el PFIS. El territorio nacional se dividió en cinco regiones (figura 3.1) y las explotaciones se clasificaron a su vez en ocho categorías según su tamaño, medido en unidades ganaderas (UG) (tabla 3.4). Dentro de cada categoría, las explotaciones se seleccionaron sistemáticamente en función del tamaño en UG. Las explotaciones con más de 3.500 UG o aquellas incluidas en la línea de base de la evaluación del PFIS se seleccionaron automáticamente para formar parte de la muestra.

Figura 3.1 Zonas agroecológicas y ubicación de las explotaciones ganaderas de carne vacuna incluidas en la muestra en la Encuesta Ganadera Nacional 2016



Fuente: Bervejillo *et al.* (2018).

⁸ El estudio de campo fue realizado por el MGAP entre la primavera de 2016 y el invierno de 2017, y recopiló datos sobre la campaña agrícola 2015/2016. Se recopiló información adicional necesaria para la evaluación correspondiente a las dos campañas anteriores.

Según Bervejillo *et al.* (2018), Uruguay contaba con 25.615 explotaciones dedicadas principalmente a la producción de carne vacuna, con al menos siete unidades ganaderas y sin actividad lechera, que abarcaban 12,4 millones de hectáreas. El tamaño medio era de 487 hectáreas, con una amplia variación, de 61 a 6.332 ha.

Tabla 3.4 Distribución de las unidades de producción de carne bovina, por tamaño, en unidades ganaderas

Unidades ganaderas	UPCB	Superficie (miles de ha)	% de UPCB	% de superficie	FDA de UPCB	FDA de superficie
<100	10.761	651	42,0%	5,2%	42,0%	5,2%
[100, 150)	2.325	345	9,1%	2,8%	51,1%	8,0%
[150, 300)	3.855	1.061	15,0%	8,5%	66,1%	16,5%
[300, 600)	4.232	2.220	16,5%	17,8%	82,7%	34,4%
[600, 1000)	1.949	1.934	7,6%	15,5%	90,3%	49,9%
[1000, 2000)	1.539	2.519	6,0%	20,2%	96,3%	70,2%
[2000, 3500)	709	2.160	2,8%	17,4%	99,0%	87,5%
>3500	245	1.551	1,0%	12,5%	100,0%	100,0%
Total	25.615	12.441	100%	100%		

Fuente: Adaptado de Bervejillo *et al.* (2018).

Nota: UPCB = unidad de producción de carne bovina; FDA = función de distribución acumulada.

La Encuesta sobre Buenas Prácticas en la Gestión de Campo Natural (EBPGCN), realizada por el Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca en 2020, se centró en explotaciones cuya actividad principal fuera la ganadería, excluida la ganadería lechera, con un mínimo de siete unidades ganaderas (UG), una superficie total de al menos 100 hectáreas y más del 50% de la superficie cubierta por pastizales naturales.⁹ La participación era obligatoria para los productores seleccionados que formaban parte de la muestra de evaluación del PFIS. Cuantificó las tierras y el ganado gestionados según buenas prácticas (Jones *et al.*, 2020; Polcaro, 2022), y sirvió como indicador de resultados para evaluar el PFIS.

En un principio, el diseño de la evaluación tenía como objetivo incluir a todos los solicitantes que se encontraran a menos de dos puntos del umbral de selección, así como una muestra aleatoria de beneficiarios del grupo de intervención que hubieran sido entrevistados, a fin de

⁹ El marco de la muestra se basó en el EGN de 2016, actualizado con datos del SNIG de 2020. La estratificación se realizó por tamaño de la explotación (más y menos de 500 ha) y región (centro, norte, noreste, este), lo que dio lugar a ocho estratos. Se entrevistó por teléfono a un total de 500 explotaciones, lo que representa a 11 362 productores que gestionan 9,26 millones de hectáreas de pastizales nativos, aproximadamente el 83% de la superficie total dedicada a la producción ganadera en Uruguay.

constituir un grupo de comparación emparejado (Durán *et al.*, 2018; Durán y Hernández, 2017). Se recopilaban los datos de referencia, pero las restricciones presupuestarias impidieron recopilar datos de seguimiento para toda la muestra. Como resultado, nuestra evaluación de la adopción de tecnología se limita a un diseño de regresión por discontinuidad en torno al umbral de la segunda convocatoria del PFIS, comparando a los solicitantes que obtuvieron 66 puntos (grupo tratado) con aquellos que obtuvieron 65 puntos (grupo de control).

El Sistema Nacional de Información Ganadera (SNIG) es un registro administrativo exhaustivo que garantiza la trazabilidad de todas las principales especies ganaderas en Uruguay. Registra el ciclo de vida de cada animal, incluidos los traslados y los cambios de propiedad. Al integrar los datos de pesos de faena y de remates con el SNIG, es posible estimar la producción de carne vacuna a nivel de explotación (BPU) (Aguirre, 2022b).

3.2.2 Construcción de variables

Construimos las variables basándonos en la bibliografía existente y en la disponibilidad de datos. Las definiciones y las fuentes de datos de las principales variables se resumen en la tabla 3.5.

Contamos con dos variables de resultado. La primera es $BEEF_i$, que se define como la producción anual de carne vacuna por hectárea en la explotación i .¹⁰ Esta variable se deriva de las transacciones netas de ganado (ventas menos compras), ajustadas en función de las variaciones de inventario derivadas de nacimientos, muertes y reclasificaciones. Incluye tanto el ganado faenado (“gordo”) como el comercializado entre productores (“flaco”). Expresar la producción por hectárea facilita comparaciones significativas entre productores de diferentes escalas operativas (véase el anexo 3.3 para más detalles). Nuestra segunda variable de resultado es $GHGIntensity_i$, que mide las emisiones de GEI por kilogramo de carne vacuna (kg CO₂e/kg) producidas a nivel de explotación. Estas emisiones, calculadas utilizando datos del SNIG y métodos del IPCC, abarcan las emisiones de metano procedentes de la fermentación entérica y el estiércol, así como el óxido nítrico procedente de los excrementos. Las emisiones se expresan en equivalentes de CO₂ utilizando los factores GWP100 del IPCC AR5 y se agregan anualmente (anexo 3.4).

¹⁰ Hemos omitido la producción de carne ovina y de lana de nuestro estudio por tres motivos. En primer lugar, el 40,1% de las explotaciones ganaderas que incluyen ovejas no se dedican a la producción con fines comerciales (Bervejillo *et al.*, 2018). En segundo lugar, la contribución de la carne ovina a la producción total combinada de carne bovina y ovina es inferior al 7%. En tercer lugar, realizar una estimación precisa de la producción de carne ovina supone un reto considerable (Aguirre, 2018).

Tabla 3.5 Definiciones y construcción de variables

Variable	Definición
BEEF	Producción anual de carne vacuna (kg de peso vivo por hectárea)
GHGIntensity	Emisiones de GEI por kg de carne vacuna producida (kg CO ₂ e/kg)
Tecnologías para vaca-ternero (de EBPGCN 2020)	
ControlledMating	1 si se practica el entore controlado; 0 en caso contrario
RevisedBulls	1 si se evalúan los toros antes del apareamiento; 0 en caso contrario
ArtifInsemination	1 si se utiliza inseminación artificial; 0 en caso contrario
OvActivityDiagnosis	1 si se realiza diagnóstico de actividad ovárica; 0 en caso contrario
EarlyWeaning	1 si se practica el destete precoz; 0 en caso contrario
TemporaryWeaning	1 si se practica el destete temporario; 0 en caso contrario
Otros resultados (de EBPGCN 2020)	
Cattle Health Problems	1 si se informaron problemas de salud del ganado; 0 en caso contrario
Producer Organization	1 si forma parte de una organización de productores; 0 en caso contrario
AgronTA	1 si recibió asistencia técnica de un agrónomo; 0 en caso contrario
Controles de referencia (de EGN 2016)	
BLU	Unidades ganaderas bovinas equivalentes
Land	Hectáreas dedicadas a la producción ganadera
Labor	Insumo laboral equivalente a tiempo completo
CONEAT	Índice de productividad del suelo para la producción ganadera
GrazeAreaImprove	Proporción de la superficie de pastoreo mejorada
GrazeAreaImprove0	1 si no hubo mejoras en la superficie de pastoreo; 0 en caso contrario
RegionGroup	Variable indicadora regional [categorías: 1 = Norte, Noreste y Sudeste; 0 = Sur y Oeste]. Véase la figura 1.
ProductiveOrientation	1 si es un sistema exclusivamente de carne vacuna (OBR≤1); 0 si es mixto de carne vacuna y ovina (4>OBR>1).
BeefProductionSystem	1 si es de cría (novillos/vacas-ternero<0,5); 0 si es de ciclo completo o engorde (RSC>=0,5).

Fuente: Autores.

Para evaluar los efectos del PFIS, nos centramos en la adopción de prácticas y tecnologías específicas de gestión del ciclo vaca-ternero, entre las que se incluyen la cubrición controlada, la evaluación de los toros, la inseminación artificial, el diagnóstico ovárico y diversas prácticas de destete.

Por último, también evaluamos el efecto del programa en otros resultados: la salud del ganado, la participación en grupos de productores y el acceso a asistencia técnica.

3.2.3 Mecanismo de selección de tratamientos

El PFIS brindó apoyo a un total de 1.026 ganaderos a través de dos convocatorias de propuestas. En ambas convocatorias, las solicitudes se evaluaron y puntuaron en una escala de 0 a 100. Sin embargo, las tasas de aprobación variaron considerablemente entre ambas convocatorias: en la primera, se financió a 620 de los 662 solicitantes (93,7%), pero en la segunda solo 406 de las 1.076 propuestas recibieron apoyo (37,7%) debido a restricciones presupuestarias.

En la primera convocatoria, el MGAP aplicó una norma de elegibilidad estricta: todas las propuestas que obtuvieran 60 puntos o más se aprobaban automáticamente. Esta norma se comunicó explícitamente a los evaluadores. Como se muestra en la tabla 3.6, esta política generó una marcada discontinuidad en la probabilidad de recibir el tratamiento en el umbral de los 60 puntos.

Para evaluar la validez del uso de un diseño de regresión por discontinuidad (RDD), comprobamos el supuesto de ausencia de manipulación en torno al umbral: según la hipótesis nula, el número de observaciones situadas justo por encima y justo por debajo del umbral debería seguir una distribución uniforme. Para ello, realizamos pruebas binomiales en intervalos de ± 1 y ± 2 puntos alrededor del umbral, es decir, puntuaciones de 59 a 61 y de 58 a 62, utilizando el comando *bittest* de Stata. En ambos casos, se rechazó la hipótesis de asignación aleatoria (valor $p < 0,0001$) en la primera convocatoria. Cabe destacar que, en la primera convocatoria, no hubo propuestas puntuadas exactamente con 59 puntos, lo que sugiere una manipulación al alza de las puntuaciones una vez que se conoció el umbral de 60 puntos. Dada esta clara indicación de comportamiento estratégico, los datos de la primera convocatoria se excluyeron de la evaluación de impacto.

Por el contrario, en la segunda convocatoria, la elevada demanda y las limitaciones presupuestarias llevaron a un aumento *a posteriori* del umbral de aprobación a 66 puntos. Es fundamental señalar que el ajuste se produjo después de que se hubieran puntuado todas las solicitudes y no se comunicó a los evaluadores durante el proceso de puntuación. Esto minimiza el riesgo de manipulación estratégica de las puntuaciones y proporciona una base más creíble para un experimento natural de aleatorización local.

Comprobamos si existía una posible manipulación en el umbral de 66 puntos utilizando las mismas pruebas binomiales en el intervalo de ± 1 punto (puntuaciones de 65 a 66). Como se puede observar en la tabla 3.7, 78 de los 174 solicitantes obtuvieron una puntuación de 66, lo que concuerda con la asignación aleatoria (valor $p = 0,197$). Sin embargo, en el intervalo de ± 2 puntos (puntuaciones de 64 a 67), se rechazó la hipótesis nula de asignación aleatoria (valor $p < 0,001$), lo que indica una posible selección en este intervalo. Los resultados en intervalos más amplios (± 3 y ± 4) fueron mixtos (valor $p = 0,085$ y valor $p < 0,001$, respectivamente), lo que sugiere que la aleatorización local solo es creíble dentro de un rango estrecho en torno al umbral.

Tabla 3.6 Frecuencia de propuestas del PFIS, por puntaje, primera convocatoria

Puntaje	No tratado	Tratado	Total	
[0, 30]	1	0	1	
[31, 50]	10	0	10	
[51, 56]	16	0	16	No tratados: 42 (6,3%)
57	0	0	0	
58	15	0	15	
59	0	0	0	
60	0	64	64	
61	0	43	43	Tratados: 620 (93,7%)
62	0	26	26	
63	0	33	33	
64	0	51	51	
65	0	33	33	
66	0	25	25	
67	0	28	28	
[68, 100]	0	317	317	
Total	42	620	662	

Tabla 3.7 Frecuencia de propuestas del PFIS, por puntaje, segunda convocatoria

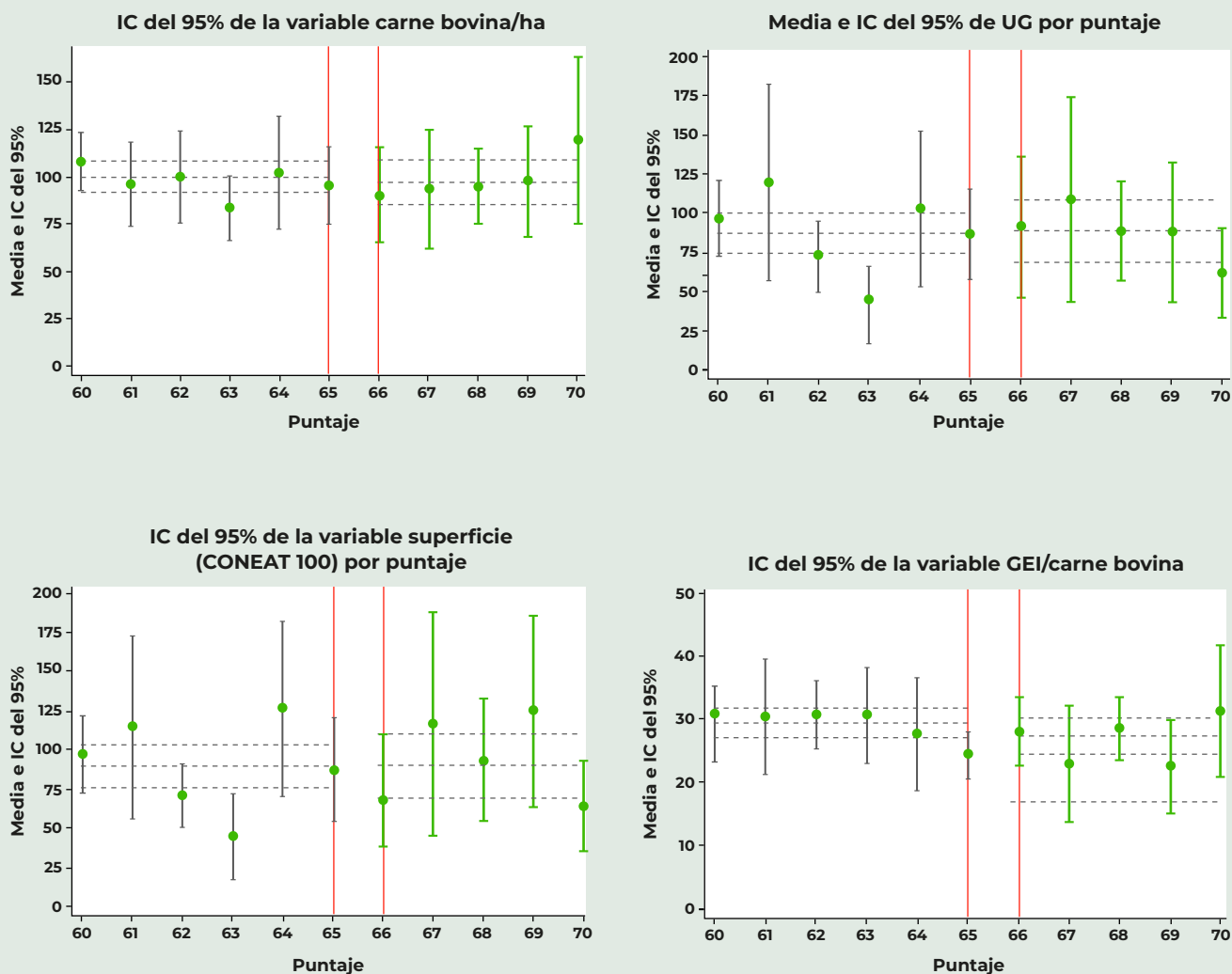
Puntaje	No tratado	Tratado	Total	
[0, 30]	61	0	61	
[31, 58]	96	0	96	
59	4	0	4	No tratados: 670 (62,3%)
60	171	0	171	
61	50	0	50	
62	83	0	83	
63	49	0	49	
64	60	0	60	Tratados: 406 (37,7%)
65	96	0	96	
66	0	78	78	
67	0	22	22	
68	0	77	77	
69	0	31	31	
70	0	49	49	
[71, 100]	0	149	149	
Total	670	406	1.076	

Fuente: Autores

Para evaluar más a fondo la validez del diseño, examinamos el balance de las características previas al tratamiento de los solicitantes dentro de intervalos simétricos, de ± 1 a ± 5 puntos alrededor del umbral de 66 puntos. Como se muestra en la figura 3.2, no encontramos diferencias estadísticamente significativas entre las unidades tratadas y las de control en las variables analizadas (unidades ganaderas, superficie de tierra, producción de carne vacuna por hectárea e intensidad de las emisiones de GEI). Este balance en variables observables se mantiene de forma consistente en todos los intervalos analizados (véanse los detalles en la tabla S.3.8 del anexo 3.5).

En conjunto, estos resultados muestran que no hay evidencia de manipulación en los puntajes ni de desbalances en las variables observables en el entorno del umbral. En consecuencia, adoptamos un marco de aleatorización local y restringimos la muestra de la evaluación de impacto a los solicitantes que obtuvieron 65 y 66 puntos, los cuales se incluyeron en la encuesta de resultados utilizada para la evaluación.

Figura 3.2 Prueba de falsificación sobre variables previas al tratamiento, segunda convocatoria



Nota. Las figuras muestran los valores medios y los intervalos de confianza del 95% de los resultados de línea de base por puntaje. Las líneas horizontales indican las medias de grupo para las unidades tratadas y de control.
Fuente: Cálculos de los autores con base en los formularios de propuestas del PFIS y datos del SNIC.

3.2.4 Método

Nuestra unidad de análisis es la unidad de producción agropecuaria, definida como una explotación comercial de más de una hectárea que comparte mano de obra, capital e insumos. Para estimar el efecto causal del PFIS sobre la adopción de tecnología y los resultados de producción a este nivel, aplicamos un diseño de regresión por discontinuidad (RDD). Este enfoque aprovecha la estricta regla de elegibilidad aplicada durante la segunda convocatoria del PFIS, en virtud de la cual solo se seleccionó a los productores que obtuvieron una puntuación de 66 o más. La hipótesis central del marco RDD es que los solicitantes que obtuvieron una puntuación justo por encima y justo por debajo del umbral son comparables en todos los aspectos, salvo en lo que respecta a su condición de beneficiarios del tratamiento.

El cambio discontinuo en la probabilidad de recibir tratamiento, de cero a uno entre las puntuaciones de 65 y 66, respalda la aplicación de un RDD nítido en un marco de aleatorización local. La regla de asignación era exógena, ya que el umbral se determinó tras la puntuación. Además, la distribución de las puntuaciones está equilibrada en torno al umbral, y las pruebas de manipulación confirman que los solicitantes no podían influir en su posición con respecto al umbral. Las covariables previas al tratamiento también están equilibradas entre quienes obtuvieron puntuaciones de 65 y 66, lo que refuerza la plausibilidad de la hipótesis de aleatorización local.

Incorporamos variables de control de referencia para aumentar la potencia estadística, mejorar la precisión e identificar con mayor exactitud el efecto del tratamiento, al tiempo que tenemos en cuenta las fuentes de heterogeneidad. Nuestras variables de control de referencia son el tamaño del hato (unidades ganaderas bovinas, BLU), la superficie de tierra, la mano de obra, la proporción de pastos mejorados, la orientación productiva (relación entre ovinos y bovinos, OBR), el sistema de producción (relación entre novillos y vacas reproductoras, SBGR) y el índice CONEAT (fertilidad natural del suelo).

Dado que la variable de asignación es discreta, no cumple los supuestos de continuidad requeridos para los enfoques tradicionales de RDD.¹¹ Para abordar esto, seguimos el método de aleatorización local propuesto por Cattaneo et al. (2016), que trata la asignación del tratamiento

¹¹ Cuando la puntuación es discreta en lugar de continua, la hipótesis de continuidad requeridas para la estimación no paramétrica de las esperanzas condicionales cerca del umbral resultan difíciles de sostener. Esto desafía la validez de los enfoques tradicionales de RDD basados en la continuidad.

dentro de una ventana estrecha alrededor del umbral como aleatoria. En este contexto, se supone que los resultados potenciales son independientes de la asignación del tratamiento dentro de la ventana y dependen únicamente de si se ha superado el umbral, no del valor específico de la puntuación (Skovron y Titiunik, 2015).).

Concretamente, definimos una ventana de aleatorización de un punto a cada lado del umbral, comparando a los solicitantes que obtuvieron una puntuación de 66 (grupo de tratamiento) con aquellos que obtuvieron una puntuación de 65 (grupo de control). Dentro de esta ventana, estimamos el efecto medio local del tratamiento ($LATE^*$), definido de la siguiente manera:

$$LATE^* = E(Y|x = 66) - E(Y|x = 65)$$

Para mejorar la precisión y reducir el sesgo en muestras pequeñas, estimamos este efecto utilizando el estimador de Lin (Lin, 2013), que tiene en cuenta las covariables y su interacción con el indicador de tratamiento, y corrige el sesgo de muestra de Freedman del estimador de mínimos cuadrados ordinarios para el tratamiento.¹² Sea Y_i el resultado de interés, T_i el indicador de tratamiento, C_i^{Center} un vector de covariables centrado en el umbral, y ε_i el término de error. El modelo de estimación se especifica de la siguiente manera:

$$Y_i = \alpha T_i + \beta C_i^{Center} + \gamma T_i C_i^{Center} + \varepsilon_i$$

Esta especificación permite pendientes diferenciales según el estado del tratamiento y mejora la eficiencia, al tiempo que mantiene la insesgadez en muestras pequeñas. Centrar las covariables reduce la multicolinealidad y mejora la interpretabilidad.

¹² El sesgo de muestra de Freedman se refiere a un sesgo en las estimaciones de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) que surge en muestras pequeñas en el contexto de la evaluación de impacto. Freedman (2008) demostró que, al estimar los efectos del tratamiento utilizando OLS con ajuste de covariables, en los experimentos aleatorios, el sesgo de muestra finita puede ser considerable. Esto se debe a que las estimaciones por el método de mínimos cuadrados ordinarios (OLS) se basan en propiedades asintóticas que pueden no cumplirse en muestras pequeñas, lo que da lugar a errores estándar e intervalos de confianza sesgados. Aunque el ajuste de covariables puede mejorar la precisión, Freedman advirtió que, en muestras pequeñas, puede introducir sesgos a menos que se apliquen correcciones adecuadas, como errores estándar robustos o inferencia basada en permutaciones.



3.3 Resultados

Comenzamos analizando el efecto del PFIS en la producción de carne vacuna por hectárea. Tal como se muestra en la tabla 3.8, el efecto medio local estimado del tratamiento en el umbral de elegibilidad es positivo, de aproximadamente 5 kg/ha/año, pero no es estadísticamente significativo. El resultado se mantiene estable en todas las especificaciones del modelo, incluidas aquellas que controlan por características y producción previas.

Tabla 3.8 Efecto del PFIS sobre la producción de carne bovina en 2020 (kg/ha/año)

Variables	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
PFIS	5,16 (0,766)	5,29 (0,85)	6,03 (0,81)
N	80	73	67
R ²	0,001	0,252	0,318
Media (y)	103,2	104,6	105,2
Controles	No	Sí	Sí
Carne bovina/ha	No	No	Sí

Nota: valores p entre paréntesis. ***p < 0,01, **p < 0,05, *p < 0,1.

Las variables de control son: BeefProductionSystem, ProductiveOrientation, RegionGroup, Land, BLU, GrazeAreaImprove, GrazeAreaImprove0, Coneat, Labor.

Fuente: Cálculos de los autores con base en datos de la EGN, la EBPMCN y el SNIG.

A continuación, examinamos el efecto del programa sobre la intensidad de las emisiones, medida como emisiones de GEI por kilogramo de carne de vacuno producida. Los resultados se presentan en la tabla 3.9. El efecto estimado tampoco es estadísticamente significativo, y sigue sin serlo en los modelos con y sin covariables o intensidad de GEI pretratamiento.

Table 3.9 Efecto del PFIS sobre la intensidad de GEI

Variables	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3
PFIS	2,93 (0,464)	2,74 (0,465)	1,7 (0,651)
N	96	94	90
R ²	0,006	0,03	0,106
Media de y	25,2	25,4	25,2
Controles	No	Sí	Sí
Intensidad de GEI en 2016	No	No	Sí

Nota: La variable de resultado es kg de CO2 equivalente emitidos por kg de carne producida. Las variables de control son: BeefProductionSystem, ProductiveOrientation, RegionGroup, Land, BLU, GrazeAreaImprove, GrazeAreaImprove0, Coneat, Labor. Valores p entre paréntesis. ***p < 0,01, **p < 0,05, *p < 0,1.
Fuente: Estimación de los autores con base en datos de la EGN, la EBPMCN y el SNIG.

Se realiza un conjunto de análisis complementario para analizar la robustez y la sensibilidad de los resultados, a la ventana elegida y al tamaño de la muestra. En primer lugar, realizamos un análisis de potencia estadística de la prueba t utilizada para estimar el efecto medio del tratamiento sobre la producción de carne vacuna (anexo 3.6). Los resultados indican una potencia estadística del 84,6% con una muestra de 81 observaciones, lo que sugiere que nuestro análisis tiene una alta probabilidad de detectar un efecto real, en caso de que exista. En segundo lugar, aplicamos pruebas de inferencia exacta siguiendo a Imbens y Rubin (2015), un enfoque muy adecuado para muestras pequeñas, ya que no se basa en supuestos paramétricos y proporciona p valores exactos. Estos resultados, presentados en el anexo 3.7, son cualitativamente coherentes con nuestras principales conclusiones, lo que refuerza aún más su solidez. Además, evaluamos la sensibilidad de los efectos estimados sobre la producción de carne vacuna y la intensidad de las emisiones ampliando progresivamente el margen de variación en torno al umbral de elegibilidad de 1 a 5 puntos. Estas especificaciones alternativas se basan en los datos de postulación de los formularios de solicitud del PFIS y en las variables de resultado del SNIG. Los resultados obtenidos con estos anchos de banda alternativos, que se presentan en el anexo 3.8, son cualitativamente similares, lo que refuerza nuestras conclusiones.

Al igual que en el caso de la productividad y la intensidad de las emisiones, no observamos efectos estadísticamente significativos del PFIS en el uso de la inseminación artificial, la incidencia de problemas de salud del ganado, la participación en organizaciones de productores o la colaboración con asesores agrónomos. Sin embargo, el programa sí tuvo un impacto estadísticamente significativo en la adopción de tres buenas prácticas para la gestión reproductiva

y la eficiencia del hato (Tabla 3.10): entore controlado (un aumento de 22,4 puntos porcentuales; valor $p = 0,018$), diagnóstico de la actividad ovárica (16,3 puntos porcentuales; valor $p = 0,015$) y destete temprano (8,7 puntos porcentuales; valor $p = 0,055$).

Tabla 3.10 Efecto del PFIS sobre la adopción de tecnología en la línea de resultados

Variables	Coeficiente	Valores p	R ²	N	Media
Entore controlado	0,2237**	0,018	0,057	98	0,442
Diagnóstico de actividad ovárica	0,163**	0,015	0,082	72	0,185
Destete precoz	0,0869*	0,055	0,035	106	0,104
Con inseminación artificial	0,055	0,548	0,005	75	0,207
Problemas sanitarios del ganado	-0,088	0,345	0,008	119	0,471
En una organización de productores	0,064	0,494	0,004	119	0,490
Con un agrónomo	0,059	0,256	0,011	119	0,118

Nota: valores p entre paréntesis. *** $p < 0,01$, ** $p < 0,05$, * $p < 0,1$.



3.4 Conclusiones y discusión

Los programas de transferencia de tecnología se han promovido para mejorar la productividad ganadera y promover la sostenibilidad. Sin embargo, la evidencia empírica sólida sobre su eficacia sigue siendo limitada. Una evaluación rigurosa es fundamental no sólo para garantizar la transparencia y la rendición de cuentas, sino también para orientar el diseño de políticas costo efectivas.

Este estudio contribuye a aminorar esta brecha de evidencia al evaluar el efecto del PFIS de Uruguay sobre los pequeños y medianos productores de carne vacuna en cuanto a la productividad, la intensidad de las emisiones y la adopción de prácticas tecnológicas y de gestión específicas. Aprovechando un experimento natural derivado de la segunda convocatoria del PFIS, en la que la asignación del tratamiento siguió una regla discontinua, estimamos los efectos causales utilizando un RDD.

Nuestros resultados muestran que el PFIS no produjo efectos estadísticamente significativos en la producción de carne vacuna por hectárea ni en la intensidad de gases de efecto invernadero por unidad de producto, lo que indica que no logró mejoras en la productividad ni en la sostenibilidad durante el período de tres años posterior a la finalización del programa. Sin embargo, es importante destacar que el programa impulsó cambios de comportamiento, con aumentos estadísticamente significativos en la adopción de destete precoz (+8,7 puntos porcentuales), entore controlado (+22,4 pp) y diagnóstico de la actividad ovárica (+16,3 pp).

La ausencia de efectos estadísticamente significativos en la producción de carne vacuna y en la intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero, a pesar de la eficacia del programa a la hora de fomentar la adopción de las tecnologías y prácticas de gestión mencionadas, plantea la cuestión del tiempo que debe transcurrir entre el momento en que un ganadero adopta estas tecnologías y el momento en que se traducen en mejoras de la pro-

ductividad y de la intensidad de las emisiones. Es posible que exista un desfase temporal necesario entre la adopción de estas prácticas y su impacto final en la productividad y la reducción de emisiones. Por otra parte, tres años pueden ser un plazo insuficiente para que estos efectos se materialicen plenamente el cambio de adopción de tecnologías fomentado por el programa puede sentar las bases de futuras mejoras en la productividad.

Nuestros hallazgos refuerzan el valor de las intervenciones públicas cuidadosamente diseñadas y basadas en evidencia empírica, y subrayan la importancia de integrar una evaluación rigurosa de impacto en los ciclos de diseño y aplicación de las políticas.

Futuras evaluaciones de impacto de programas ganaderos podrían adoptar una perspectiva más amplia al incluir indicadores de rentabilidad, biodiversidad, salud animal y otras dimensiones de la sostenibilidad. Además, de evaluar los efectos heterogéneos en los distintos segmentos de productores puede ayudar a identificar qué estrategias de apoyo producen los beneficios más duraderos en los diversos sistemas de producción de carne vacuna. Comprender si los cambios de comportamiento iniciales se traducen en mejoras a largo plazo también requerirá datos longitudinales y estudios de seguimiento.

Agradecimientos

Agradecemos especialmente las sugerencias y comentarios aportados por Paul Winters, Allen Blackman y el resto de colegas del taller sobre tecnología ganadera sostenible organizado por el BID. Asimismo, damos las gracias a Camila Amiassorho y Francisco Grizutti, de la Universidad de Montevideo, por su apoyo en la investigación. También expresamos nuestro agradecimiento por el apoyo financiero y técnico prestado por el Banco Interamericano de Desarrollo.



Referencias



- Aguirre, E. 2018. "Evolución reciente de la productividad ganadera en Uruguay (2010–2017). Metodología y primeros resultados." En Anuario OPYPA, 457–470. Montevideo: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
- . 2019. "Productividad ganadera de los establecimientos de carne bovina del Censo General Agropecuario." En Anuario OPYPA, 497–510. Montevideo: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
- . 2022a. Evolución de la productividad ganadera en Uruguay (2005–2021). https://www.researchgate.net/publication/368839939_Evolucion_de_la_productividad_ganadera_pastoril_en_Uruguay_2005-2021.
- . 2022b. "La asociación entre adopción de tecnologías y productividad en la ganadería de carne vacuna en Uruguay." En Anuario OPYPA, 559–570. Montevideo: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
- . 2022c. "La variabilidad de la producción ganadera pastoril en Uruguay entre 2005 y 2021." En Anuario OPYPA, 549–558. Montevideo: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
- . 2022d. Productividad y adopción de tecnologías en la ganadería de carne vacuna en Uruguay. https://www.researchgate.net/publication/368839950_Productividad_y_adopcion_de_tecnologias_en_la_ganaderia_de_carne_vacuna_en_Uruguay/stats.
- Aguirre, E., F. García Suárez y G. Sicilia. 2024a. "Technical Efficiency in Beef Cattle Farming in Uruguay: Insights from Census Data." *Agrociencia Uruguay* 28: e1237. <https://doi.org/10.31285/AGRO.28.1237>.
- . 2024b. "Technological Frontier in Uruguay's Beef Cattle Production: An Analysis of Technical Efficiency and Its Main Drivers." *Agribusiness*. <https://doi.org/10.1002/agr.21944>.
- Álvarez, J. 2020. "Desempeño relativo de la productividad física de la ganadería de Nueva Zelanda y Uruguay, 1870–2010." *Historia Agraria: Revista de Agricultura e Historia Rural* 80: 107–144.
- Berejillo, J. E., D. Campoy, C. Gonzalez y A. Ortiz. 2018. "Resultados de la Encuesta Ganadera Nacional 2016." *Anuario OPYPA* 2018: 443–455.
- Calvo Buendia, E., K. Tanabe, A. Kranjc, J. Baasansuren, N. Fukuda, S. Ngarize, A. Osako, Y. Pyrozhenko, P. Shermanau y E. Federici. 2019. "2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories." En *Agriculture, Forestry and Other Land Use*, vol. 4. Ginebra: IPCC.
- Cattaneo, M. D., R. Titiunik y G. Vazquez-Bare. 2016. "Inference in Regression Discontinuity Designs under Local Randomization." *The Stata Journal*. <https://doi.org/10.1177/1536867X1601600205>.

- De Janvry, A., E. Sadoulet y T. Suri. 2017. "Chapter 5—Field Experiments in Developing Country Agriculture." En *Handbook of Economic Field Experiments*, vol. 2, editado por A. V. Banerjee y D. Duflo, 427–466. North-Holland. <https://doi.org/10.1016/bs.hefe.2016.08.002>.
- DIEA-MGAP (Oficina de Estadísticas Agropecuarias-Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca). 2014. Censo general agropecuario 2011: resultados definitivos.
- Durán, V., E. Aguirre, J. Baraldo, D. Fuletti y E. Hernández. 2018. "Primera evaluación del Programa de Desarrollo Productivo Rural." En *Anuario OPYPA*, 583–597. Montevideo: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
- Durán, V. y E. Hernández. 2017. "Estrategia de evaluación del Programa Producción Familiar Integral y Sustentable (PFIS)." En *Anuario OPYPA 2017*. Montevideo: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
- Durán, V. y H. Laguna. 2021. "Evaluación de impacto del Proyecto Ganaderos Familiares y Cambio Climático." En *Anuario OPYPA 2021*. Montevideo: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
- Eggleston, H., L. Buendia, K. Miwa, T. Ngara y K. Tanabe. 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories.
- Gerber, P. J., H. Steinfeld, B. Henderson, A. Mottet, C. Opio, J. Dijkman, A. Falcucci y G. Tempio. 2013. *Tackling Climate Change Through Livestock: A Global Assessment of Emissions and Mitigation Opportunities*.
- Gesto, N., A. Lado y H. Laguna. 2019. "Informe de caracterización de la población potencial ganadera del Programa Familiar Integral y Sustentable." En *Anuario OPYPA*. Montevideo: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
- Hainmueller, J. 2012. "Entropy Balancing for Causal Effects: A Multivariate Reweighting Method to Produce Balanced Samples in Observational Studies." *Political Analysis* 20 (1): 25–46.
- Imbens, G. W. y D. B. Rubin. 2015. *Causal Inference in Statistics, Social, and Biomedical Sciences*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Jones, C., N. Costa, C. Gonzalez, S. Risso, J. Baraldo, E. Aguirre, H. Laguna, V. Durán y W. Oyhantcabal. 2020. "Fortalecimiento del sistema de reporte y verificación de la Contribución Determinada Nacional al Acuerdo de París: indicador de ganadería en campo natural." En *Anuario OPYPA 2022*. Montevideo: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
- Lanfranco, B., J. M. Soares de Lima, E. Fernández y B. Ferraro, eds. 2022. *Bioma Pampa: una historia de sinergias entre pastizales, ganado y humanos*. Revista INIA. <https://doi.org/10.22004/ag.econ.336991>.

- Lin, W. 2013. "Agnostic Notes on Regression Adjustments to Experimental Data: Reexamining Freedman's Critique." *The Annals of Applied Statistics* 7 (1): 295–318. <https://doi.org/10.1214/12-AOAS583>.
- López, C. A., L. Salazar y C. P. De Salvo. 2017. *Gasto público, evaluaciones de impacto y productividad agrícola*. Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo. <http://dx.doi.org/10.18235/0000627>.
- Lopez, F. y A. Maffioli. 2008. *Technology Adoption, Productivity and Specialization of Uruguayan Breeders: Evidence from an Impact Evaluation*. <http://dx.doi.org/10.18235/0011179>.
- MacLeod, M., T. Vellinga, C. Opio, A. Falcucci, G. Tempio, B. Henderson, H. Makkar, A. Mottet, T. Robinson y H. Steinfeld. 2018. "Invited Review: A Position on the Global Livestock Environmental Assessment Model (GLEAM)." *Animal* 12 (2): 383–397.
- Ministerio de Ambiente. 2021. "Uruguay presentó su cuarto Informe bienal de actualización y el Reporte nacional de Inventario de GEI 1990–2019." Ministerio de Ambiente. <https://www.gub.uy/ministerio-ambiente/comunicacion/noticias/uruguay-presento-su-cuarto-informe-bienal-actualizacion-reporte-nacional>.
- Mullally, C. y A. Maffioli. 2016. "Extension and Matching Grants for Improved Management: An Evaluation of the Uruguayan Livestock Program." *American Journal of Agricultural Economics* 98 (1): 333–350. <https://doi.org/10.1093/ajae/aav050>.
- Nin, A., H. Freiría y G. Muñoz. 2019. "Productividad y eficiencia en la producción ganadera pastoril en América Latina: los casos de Uruguay y Paraguay." Documento de trabajo del BID IDB-WP-1024. Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo. <https://doi.org/10.18235/0001924>.
- OCDE (Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos) y FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2023. *OCDE-FAO Perspectivas agrícolas 2023-2032*. https://www.oecd.org/es/publications/ocde-fao-perspectivas-agricolas-2023-2032_2a-d6c3ab-es.html
- Paramamborda, I. A. 2017. *¿Qué nos dicen las prácticas de gestión del pastoreo en los predios ganaderos familiares sobre su funcionamiento y resultado productivo?*
- Peyrou, J. 2016. *La cadena de la carne vacuna*. Universidad Católica del Uruguay.
- Polcaro, S. 2022. "Análisis de resultados de la Encuesta de Buenas Prácticas de Manejo de Campo Natural." En *Anuario OPYPA 2022*. Montevideo: Ministerio de Ganadería, Agricultura y Pesca.
- Ruggia, A., S. Dogliotti, V. Aguerre, M. M. Albicette, A. Albin, O. Blumetto, G. Cardozo, C. Leoni, G. Quintans, S. Scarlato, P. Tiftonell y W. A. H. Rossing. 2021. "The Application of Ecologically Intensive Principles to the Systemic Redesign of Livestock Farms on Native Grasslands: A Case of Co-Innovation in Rocha, Uruguay." *Agricultural Systems* 191: 103148. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103148>.

- Skovron, C. y R. Titiunik. 2015. "A Practical Guide to Regression Discontinuity Designs in Political Science." *American Journal of Political Science* 2015: 1–36.
- Steinfeld, H. 2006. *Livestock's Long Shadow: Environmental Issues and Options*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura.
- Stocker, T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P. M. Midgley, eds. 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Uruguay XXI. 2024. Informe sector ganadero—2024. <https://www.uruguayxxi.gub.uy/es/centro-informacion/articulo/informe-sector-ganadero-2024/>.
- Winters, P., L. Salazar y A. Maffioli. 2010. *Designing Impact Evaluations for Agricultural Projects*. Washington, DC: Banco Interamericano de Desarrollo. <http://dx.doi.org/10.18235/0008595>.

Apéndice



Tabla S.3.1 Evaluaciones de impacto de programas ganaderos para la producción de carne bovina

Artículo	Método	Resultado	Hallazgos
1 País y período: Uruguay, 2001–2003. Nombre del programa: Programa Ganadero (Programa Uruguay Rural). Componente 1: Promoción de la innovación en la producción vaca-ternero. Tipo de datos: panel. Observaciones: N=990 (tratados=520 y controles=470). Universo: ciclo completo y vaca-ternero hasta 1250 ha CONEAT. Período de análisis: 2001–2003			
López y Maffioli (2008)	Matching por puntaje de propensión con diferencias en diferencias	Registro de eventos físicos Registro de eventos económicos Terneros/vaca reproductora PER=terneros/vacas/año Grado de especialización Efecto dosis (monto del subsidio)	25,3 pp 18,7 pp Sin efecto Sin efecto 5,5 pp Sin efecto
2 País y período: Uruguay, 2006–2010. Nombre del programa: Programa Uruguay Rural. Tipo de datos: panel. Observaciones: N=22.020 (tratados=413 y controles=21.607). Universo: ciclo completo y vaca-ternero hasta 1250 ha CONEAT. Período de análisis: 2006–2010			
López y Maffioli (2008)	Por probabilidad inversa de ser tratado con diferencias en diferencias	Nacimientos de terneros Ventas netas de terneros	(11,79; 14,2) 4,59
3 País y período: Uruguay, 2015–2016. Nombre del programa: Programa Familiar Integral y Sustentable (PFIS). Tipo de datos: panel. Observaciones: N=19.133 (tratados=648 y controles=18.485). Universo: Criadores y ciclo completo hasta 1250 ha CONEAT. Período de análisis: 2015–2017			
Durán et al. (2018)	Matching con entropía y diferencias en diferencias	Carne bovina/ha	11,1 (valor p=3,87%)
4 País y período: Uruguay, 2014–2015. Nombre del programa: Inclusión de Bosques en Sistemas Productivos Agropecuarios. Tipo de datos: panel. Observaciones: N=18.097 (tratados=123 y controles=17.974). Universo: productores de carne bovina. Período de análisis: 2015–2017			
Durán et al. (2018)	Matching con entropía y diferencias en diferencias	Carne ovina y carne bovina/ha	Sin efecto
5 País y período: Uruguay, 2013–2019. Nombre del programa: Proyecto Ganaderos Familiares y Cambio Climático. Tipo de datos: panel. Observaciones: N=344 (tratados=157 y controles=190). Universo: productores ovinos y bovinos. Período de análisis: 2015–2017			
Durán y Laguna (2021)	Matching con entropía y diferencias en diferencias	Reproducción continua Diagnóstico de actividad ovárica Diagnóstico de preñez Manejo del ganado según condición corporal Pastoreo en un solo rodeo Destete precoz Destete temporario Suplementación	Sin efecto Sin efecto 0,228 (valor p<5%) Sin efecto Sin efecto Sin efecto Sin efecto Sin efecto

Fuente: Autores.

Anexo 3.1. Criterios de evaluación y marco metodológico para evaluar las propuestas del PFIS

El marco de evaluación constaba de dos componentes principales: los criterios individuales y la coherencia general de la propuesta.

Criterios individuales	
Claridad y calidad de la información diagnóstica	La propuesta ofrece un diagnóstico claro, en el que se esbozan las principales limitaciones y oportunidades. Existe coherencia interna entre el diagnóstico, la estrategia propuesta y las medidas y objetivos previstos.
Coherencia entre el diagnóstico, las medidas y el presupuesto	Las actividades propuestas se ajustan a las limitaciones y los objetivos identificados. Las estimaciones presupuestarias son realistas, adecuadas al contexto productivo y están justificadas.
Aplicación de medidas tácticas y estratégicas	La propuesta incluye medidas a corto y medio plazo adecuadas al contexto productivo y que pueden llevarse a cabo con los recursos disponibles.
Pertinencia, viabilidad y sostenibilidad de las actividades propuestas	Las actividades son pertinentes, técnicamente viables y económicamente viables. Contribuyen a la sostenibilidad a largo plazo del sistema, teniendo en cuenta la infraestructura, la experiencia, la justificación de los costes y la existencia de indicadores cuantificables.
Coherencia general	
Coherencia técnica e integralidad	La propuesta integra de manera eficaz la innovación tecnológica, la gestión de recursos y las estrategias de adaptación al clima, en consonancia con los objetivos del programa.
Gestión tecnológica (reducción de la brecha tecnológica)	Adopción de tecnologías pertinentes y específicas para el contexto que mejoren la productividad al tiempo que reducen de forma sostenible la brecha tecnológica.
Adaptación al cambio climático	Las acciones propuestas son coherentes con el perfil de riesgo ambiental del sistema de producción e incluyen estrategias de mitigación o adaptación cuando es necesario.

Anexo 3.2. Inversiones y prácticas del PFIS en las unidades de producción de carne vacuno

Este anexo resume las principales prácticas e inversiones realizadas por los productores ganaderos que participaron en el programa PFIS.

Tabla S.3.2 Productores ganaderos, por tipo de prácticas e inversiones

Prácticas e inversiones	Productores	Gasto (US\$)
Asistencia técnica en recursos naturales	982 (94%)	1.105.175 (10%)
Asistencia técnica tecnológica y productiva	975 (93%)	446.593 (4%)
Gestión del agua	500 (48%)	2.158.025 (20%)
Riego	36 (3%)	26.397 (0,2%)
Manejo del estiércol	12 (1%)	9.547 (0,1%)
Manejo de pastos	595 (57%)	1.680.780 (16%)
Prácticas de conservación del suelo	310 (30%)	874.984 (8%)
Inversiones y prácticas tecnológicas y productivas	980 (94%)	4.524.978 (42%)
Total	1.046	10.826.479

Table S.3.3 Categorías y subcategorías de inversiones y prácticas

Categoría	Subcategorías
Gestión del agua	Inversiones en fuentes de agua Inversiones en distribución de agua Infraestructura hídrica animal
Riego	Inversiones en riego
Manejo del estiércol	Inversiones en manejo del estiércol
Manejo de pastos y biodiversidad	Manejo de pastos naturales Conservación y manejo de la biodiversidad del bosque nativo
Prácticas de conservación del suelo	Prácticas de minimización de la erosión del suelo Rotación de cultivos y pastos
Inversiones y prácticas tecnológicas y productivas	Genética Capacidades gerenciales Infraestructura Mejoras en los procesos productivos Nutrición Prácticas organizativas y asociativas Salud animal

Anexo 3.3. Metodología para la estimación de la producción de carne de vacuno

La estimación de la producción de carne de vacuno en kilogramos de peso vivo se basa en la clasificación del ganado por sexo y edad, la asignación a cada grupo de un peso medio representativo y el cálculo de las contribuciones ponderadas de varios componentes del ciclo de producción. Estos componentes incluyen las variaciones en el stock ganadero, los movimientos de animales entre productores, los envíos a faena y el consumo en la explotación.

La producción total de carne en peso vivo de cada unidad de producción para el ejercicio agrícola t (que abarca desde el 1 de julio del año $t-1$ hasta el 30 de junio del año t), se compone de la suma de las variaciones entre stocks ganaderos, las diferencias entre entradas y salidas de ganado, los envíos al matadero y el consumo en la propia explotación. Cada término de la ecuación se indexa por categoría y unidad de producción, y los pesos de los animales se imputan utilizando los microdatos de ventas de ganado para engorde en los remates y en los pesos promedios nacionales de faena anuales reportados por el INAC (Aguirre, 2022a).

$$Beef_k^{t-1,t} = \sum_{i=1}^I \alpha_{i,k}^{Stock} \Delta Stock_k^{t-1,t} + \sum_{i=1}^I \alpha_{i,k}^{Replacement} (Exit_{i,k}^{t-1,t} - Entry_{i,k}^{t-1,t}) + \sum_{i=1}^I \alpha_{i,k}^{sl} SL_{i,k}^{t-1,t} + \alpha_K^{cons} cons_k^{t-1,t}$$

Para permitir el análisis comparativo entre explotaciones de distinto tamaño, la producción total de carne se divide por la superficie dedicada al pastoreo de ganado, lo que proporciona una medida de la productividad parcial expresada en kilogramos de carne de vacuno por hectárea.

Anexo 3.4. Metodología para la estimación de las emisiones de gases de efecto invernadero

Las emisiones de gases de efecto invernadero del sector ganadero se calculan utilizando datos anuales del DICOSE-SNIG. Las emisiones incluyen el metano procedente de la fermentación entérica, el metano derivado de la gestión del estiércol y el óxido nitroso procedente de las heces y la orina depositadas en los pastos. El marco de estimación se ajusta a las directrices del IPCC (Calvo Buendía *et al.*, 2019; Stocker *et al.*, 2013; Eggleston *et al.*, 2006) y utiliza valores del potencial de calentamiento global en un horizonte de 100 años (GWP100-AR5), en el que 1 kg de CH₄ corresponde a 28 kg de CO₂ equivalente, y 1 kg de N₂O equivale a 265 kg de CO₂ equivalente.

Las emisiones de metano procedentes de la fermentación entérica se calculan combinando los valores por defecto del IPCC con datos de actividad específicos de cada país, incluyendo el número de animales y las características del régimen alimentario. Los factores de emisión dependen de la ingesta bruta de energía, que a su vez está influenciada por las demandas energéticas fisiológicas del animal (mantenimiento, lactancia, gestación y crecimiento) y la digestibilidad del forraje consumido. Los datos nacionales sobre la calidad del forraje y su distribución por categoría de animales sirven de base para este cálculo.

Las emisiones de metano procedentes del estiércol se calculan teniendo en cuenta el contenido de sólidos volátiles de las heces y un factor de conversión de metano. En el caso del ganado vacuno de carne, la metodología se simplifica, ya que el estiércol permanece en el campo sin necesidad de medidas de gestión adicionales. Las emisiones de óxido nitroso, tanto directas como indirectas, también se estiman a partir de datos específicos de Uruguay sobre el equilibrio entre la ingesta y la retención de nitrógeno por parte del ganado, así como de los parámetros correspondientes del IPCC.

Tabla S.3.4 Factores de emisión de CH₄ por fermentación entérica, por categoría y año

Categoría	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Novillos de 3 años o más	74,55	74,55	75,73	75,69	74,98	75,09	73,02	74,36	74,03
Novillos de 1 a 2 años	45,28	45,28	45,96	45,93	45,00	44,96	44,23	44,84	44,69
Novillos de 2 a 3 años	57,22	57,22	58,18	58,72	58,27	58,29	56,99	58,09	57,92
Terneros	38,65	38,65	38,88	38,87	38,58	38,61	37,65	38,56	38,55
Toros	76,89	76,89	76,87	76,87	76,85	76,87	74,81	76,84	76,83
Vacas de cría	62,29	62,29	62,27	62,27	62,25	62,27	60,53	62,24	62,23
Vacas de engorde	65,70	65,70	66,76	66,74	65,17	65,02	63,54	64,63	64,67
Vaquillonas de 2 años o más	55,62	55,62	55,34	55,94	55,52	55,39	53,84	55,28	55,29
Vaquillonas de 1 a 2 años	45,66	45,66	45,68	44,84	44,47	44,48	43,22	44,42	44,36

Tabla S.3.5 Factor de emisión de CH₄ para la gestión del estiércol, por categoría y año

Categoría	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Novillos de 3 años o más	1,41	1,41	1,45	1,45	1,42	1,42	1,35	1,40	1,39
Novillos de 1 a 2 años	0,85	0,85	0,87	0,87	0,84	0,84	0,81	0,83	0,83
Novillos de 2 a 3 años	1,08	1,08	1,11	1,12	1,09	1,09	1,05	1,09	1,08
Terneros	0,76	0,76	0,77	0,77	0,76	0,76	0,73	0,76	0,76
Toros	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,55	1,47	1,55	1,55
Vacas de cría	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,19	1,25	1,25
Vacas de engorde	1,24	1,24	1,28	1,28	1,22	1,22	1,17	1,20	1,21
Vaquillonas de 2 años o más	1,09	1,09	1,09	1,10	1,09	1,09	1,04	1,08	1,08
Vaquillonas de 1 a 2 años	0,90	0,90	0,90	0,88	0,87	0,87	0,83	0,87	0,87

Tabla S.3.6 Factores de emisión de N₂O de la orina y el estiércol, por categoría y año

Categoría	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Novillos de 3 años o más	2,75	2,75	2,68	2,68	2,72	2,74	2,70	2,76	2,77
Novillos de 1 a 2 años	1,71	1,71	1,66	1,66	1,73	1,74	1,72	1,74	1,75
Novillos de 2 a 3 años	2,08	2,08	2,01	2,10	2,19	2,19	2,19	2,20	2,21
Terneros	1,16	1,16	1,15	1,15	1,17	1,18	1,15	1,18	1,18
Toros	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,08	2,02	2,08	2,08
Vacas de cría	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,68	1,64	1,68	1,68
Vacas de engorde	2,43	2,43	2,35	2,35	2,45	2,47	2,44	2,49	2,48
Vaquillonas de 2 años o más	1,68	1,68	1,65	1,67	1,71	1,71	1,68	1,71	1,71
Vaquillonas de 1 a 2 años	1,39	1,39	1,36	1,34	1,38	1,38	1,35	1,38	1,38

Las emisiones de óxido nitroso procedentes del depósito de heces y orina se estiman mediante ecuaciones que tienen en cuenta la proporción de residuos depositados en los pastos. Los datos sobre las cantidades son específicos de cada país; los factores y coeficientes se han extraído de las tablas estándar del IPCC.

Los factores de emisión anuales detallados para cada categoría de ganado se recopilan en tablas separadas. Estas recogen las emisiones de metano procedentes de la fermentación entérica y el estiércol, las emisiones de óxido nitroso procedentes de los excrementos y la orina, y las emisiones agregadas expresadas en equivalentes de CO₂ por tipo de animal y año.

Tabla S.3.7 Factores de emisión compuestos equivalentes de CO₂, por categoría y año (kg CO₂e GWP100AR5)

Categoría	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022
Novillos de 3 años o más	2.856	2.856	2.871	2.870	2.861	2.867	2.797	2.852	2.846
Novillos de 1 a 2 años	1.745	1.745	1.751	1.751	1.741	1.744	1.717	1.740	1.738
Novillos de 2 a 3 años	2.183	2.183	2.193	2.232	2.242	2.244	2.205	2.240	2.238
Terneros	1.411	1.411	1.414	1.414	1.412	1.414	1.379	1.412	1.412
Toros	2.747	2.747	2.746	2.746	2.746	2.746	2.672	2.745	2.745
Vacas de cría	2.226	2.226	2.225	2.225	2.224	2.225	2.162	2.224	2.224
Vacas de engorde	2.519	2.519	2.527	2.526	2.508	2.510	2.457	2.503	2.501
Vaquillonas de 2 años o más	2.034	2.034	2.016	2.039	2.037	2.033	1.981	2.031	2.031
Vaquillonas de 1 a 2 años	1.672	1.672	1.666	1.636	1.635	1.636	1.590	1.633	1.632

Anexo 3.5. Comparabilidad entre productores incluidos y no incluidos

En esta sección se comparan las características observables en la línea de base entre los grupos tratados y no tratados en torno al umbral de elegibilidad de la segunda convocatoria del PFIS, definido por una puntuación de corte de 66 puntos. Se presentan estadísticas descriptivas para comparar la composición de postulantes del programa a cada lado del umbral dentro de intervalos de puntuación progresivamente más amplios centrados en el umbral: ± 1 , ± 2 , ± 3 , ± 4 y ± 5 puntos.

Tabla S.3.8. Balance de covariables en torno al punto de corte de elegibilidad del PFIS, segunda convocatoria

Ventana	Rango de puntaje (tratados vs. control)	Variable	Media tratados	DE	Media control	DE	Valor p
± 1	66 vs. 65	Unidades ganaderas	91,8	186,8	87,2	132,7	0,86
		Superficie (CONEAT 100)	74	146	87,4	151	0,58
		Carne bovina/superficie	116	82,7	91	54,2	0,18
		Intensidad de GEI	25,4	8,9	26,5	12	0,6
± 2	66–67 vs. 64–65	Unidades ganaderas	95,8	177	88	147,9	0,9
		Superficie (CONEAT 100)	83,9	149,3	101,8	168,1	0,41
		Carne bovina/superficie	117	77,4	101,2	57,9	0,29
		Intensidad de GEI	25	10	25,7	13,5	0,79
± 3	66–68 vs. 63–65	Unidades ganaderas	93,5	158,9	79,2	135,4	0,39
		Superficie (CONEAT 100)	87,8	151,4	86,7	153,7	0,96
		Carne bovina/superficie	106,4	72,8	103,2	58,3	0,76
		Intensidad de GEI	27,2	15	26,1	13,95	0,66
± 4	66–69 vs. 62–65	Unidades ganaderas	92,8	153	77,4	125,6	0,27
		Superficie (CONEAT 100)	93,9	152,1	82	137,5	0,41
		Carne bovina/superficie	106,9	71,7	102,9	57,9	0,66
		Intensidad de GEI	26,5	14,5	27	14,1	0,79
± 5	66–70 vs. 61–65	Unidades ganaderas	89,2	146	83	137,8	0,64
		Superficie (CONEAT 100)	90,5	145,2	86,4	144,8	0,76
		Carne bovina/superficie	107,9	70,9	104,9	58,1	0,73
		Intensidad de GEI	27,2	16	26,6	13,6	0,75

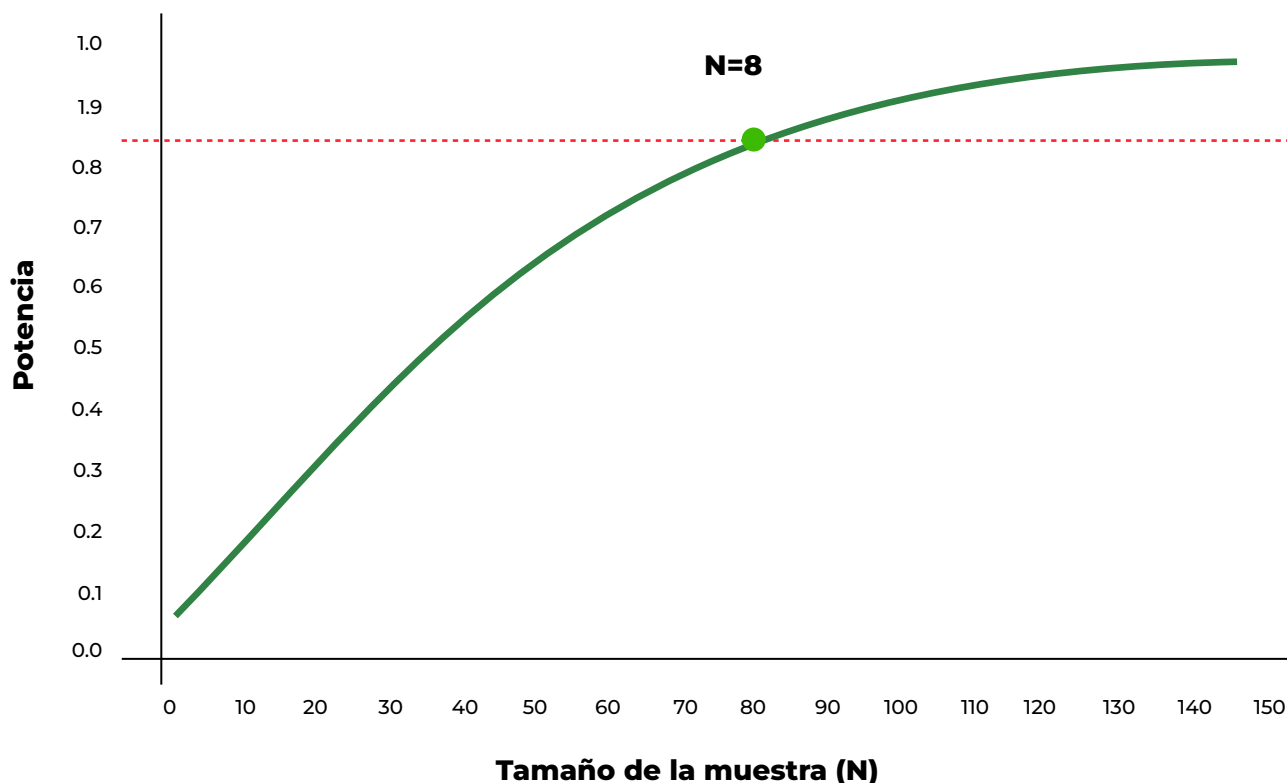
Dentro de cada ventana, realizamos pruebas de diferencias de medias sobre: unidades de ganaderas, superficie de la explotación (medida en hectáreas ajustadas según el CONEAT 100), producción de carne de vacuno por hectárea e intensidad de las emisiones de GEI (véase la tabla S.3.6). Estas pruebas proporcionan evidencia sobre si las unidades situadas justo por encima y por debajo del umbral son estadísticamente similares en sus características previas al tratamiento, una condición necesaria para la validez de un diseño de regresión por discontinuidad. Los resultados no muestran diferencias estadísticamente significativas en todas las ventanas de puntuación y variables, lo que indica que los grupos tratados y de control cercanos al umbral son comparables. Esto respalda la validez interna de la estrategia de RDD empleada.

Anexo 3.6. Análisis de potencia

Para evaluar la probabilidad de rechazar la hipótesis nula de que no existe efecto del tratamiento cuando en realidad sí existe (la potencia estadística), realizamos un análisis de potencia basado en una prueba t clásica de dos colas.

Suponemos un efecto del tratamiento equivalente a un aumento del 10% en la producción de carne de vacuno por hectárea, una desviación estándar de 0,3 y un nivel de significación de $\alpha = 0,05$. Dado un tamaño de muestra de $N = 81$, la potencia resultante es de aproximadamente el 85%. Esto significa que existe una probabilidad del 85% de rechazar correctamente la hipótesis nula de que no hay efecto del tratamiento cuando el efecto es realmente distinto de cero.

Figura S.3.1 Potencia estadística de la prueba t para la evaluación del impacto PFIS



Anexo 3.7. Inferencia exacta

En este anexo se estiman los valores p de la prueba estadística de igualdad de medias, empleando la inferencia exacta para diseños de regresión discontinua con el enfoque de aleatorización local (Cattaneo *et al.*, 2016). Los valores p resultantes son cualitativamente similares a los obtenidos mediante la inferencia asintótica para evaluar el efecto de los PFIS sobre la producción de carne de vacuno por hectárea y la intensidad de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Tabla S.3.9. Valores p para variables de resultados seleccionadas

Variable	Impacto	Valor p asintótico	Valor p aleatorizado	N
Carne bovina/ha	5,156	0,76	0,73	80
Intensidad de GEI	2,928	0,47	0,46	96

Anexo 3.8. Análisis de sensibilidad del efecto del PFIS sobre la producción de carne de vacuno por hectárea y la intensidad del GEI

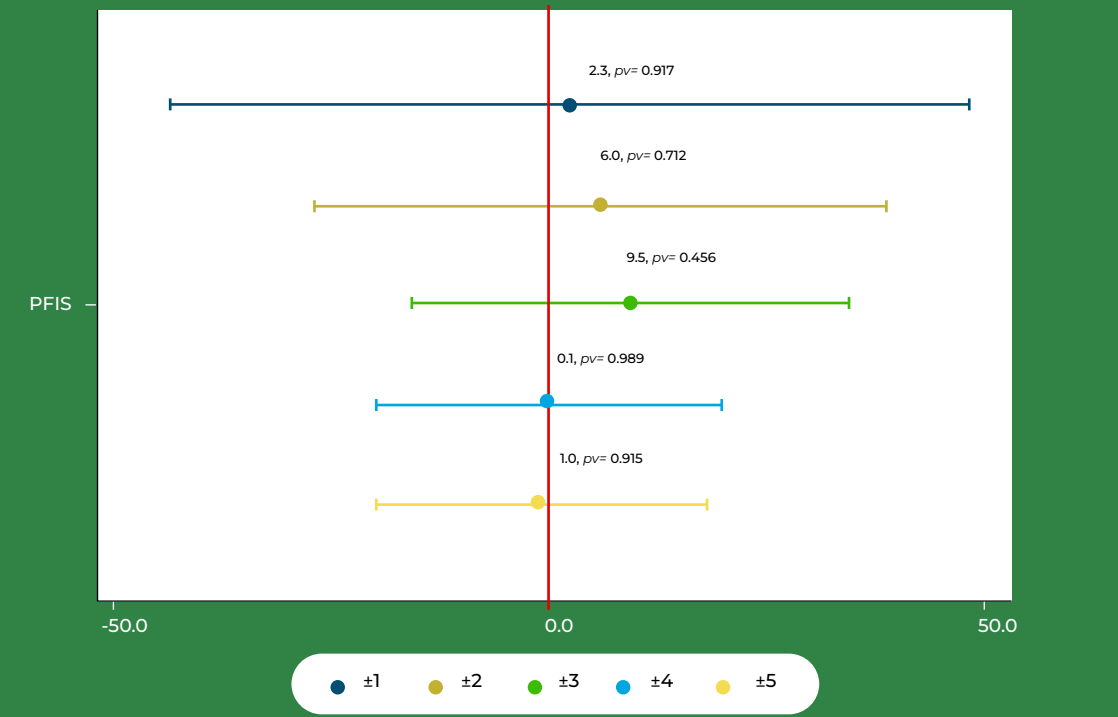
Para comprobar la solidez de nuestras principales conclusiones, realizamos un análisis de sensibilidad del efecto del PFIS sobre la producción de carne de vacuno por hectárea y la intensidad de las emisiones de GEI. Controlamos por variables observadas previas al tratamiento procedentes de los formularios de solicitud del PFIS y del sistema SNIG para tener en cuenta potenciales diferencias en la composición entre los grupos tratados y los de control.

Se utiliza el algoritmo de entropía para reponderar el grupo de control, de modo que la distribución de las covariables (unidades de ganado, superficie ganadera, calidad del suelo [CONEAT], proporción de superficie con forraje mejorado, y producción de carne de vacuno e intensidad de GEI de referencia) balancee con la del grupo tratado. Este método minimiza la divergencia de Kullback-Leibler respecto a una distribución de pesos uniforme, al tiempo que garantiza el balance de las covariables (Hainmueller, 2012).

Utilizando estas ponderaciones, estimamos los efectos del tratamiento mediante modelos de regresión lineal ponderada. Para evaluar la sensibilidad, repetimos el análisis en intervalos de puntuación cada vez más amplios en torno al umbral de elegibilidad (de ± 1 a ± 5 puntos).

En todas las especificaciones, los resultados se mantienen cualitativamente consistentes y estadísticamente no significativos tanto para la producción de carne de vacuno por hectárea como para la intensidad de GEI. Estos hallazgos refuerzan la solidez de nuestras principales conclusiones.

Sensibilidad del impacto del PFIS en la producción de carne de vacuno por hectárea con diferentes intervalos de puntuación



Sensibilidad del impacto del PFIS en las emisiones de gases de efecto invernadero con diferentes anchos de banda



4

LIMITACIONES A LA SOSTENIBILIDAD EN LA GANADERÍA: EVIDENCIA PARA MÉXICO

Saúl Basurto-Hernández, Allan
Beltrán y Luis Peña-Lévano





Resumen

Este artículo analiza los obstáculos para la adopción de prácticas de pastoreo sostenibles. A partir de los Censos Agrícolas de México de 2007 y 2022, elaboramos un conjunto de datos de panel de 2.454 municipios y desarrollamos un índice de sostenibilidad ambiental a nivel municipal basado en las prácticas de pastoreo. Este índice sirve como variable dependiente en un modelo de regresión de panel fraccional de efectos fijos bidireccional, que estima el efecto de los obstáculos estructurales, financieros, informativos e institucionales para la adopción de dichas prácticas. Entre nuestros principales resultados, los municipios con mayores superficies de pastoreo tienden a aplicar prácticas insostenibles. Los regímenes de tenencia de la tierra actúan como limitaciones estructurales. El acceso a apoyos financieros, como créditos y subsidios, y a servicios de extensión mejora significativamente la sostenibilidad. Sin embargo, los seguros agrícolas se asocian negativamente con la adopción de prácticas sostenibles. Estos resultados se mantienen sólidos en diferentes tamaños de explotación, sistemas de producción y esquemas alternativos de ponderación de las prácticas sostenibles en el índice. Las conclusiones ponen de relieve la necesidad de intervenciones de política a medida que aborden las barreras a la producción ganadera sostenible y sirvan de base para esfuerzos más amplios destinados a promover prácticas agrícolas ambientalmente sostenibles en las economías en desarrollo.



Introducción

Las prácticas de pastoreo sostenible han cobrado relevancia en el esfuerzo mundial por mitigar el cambio climático, mejorar la sostenibilidad ambiental y apoyar los medios de vida rurales. A pesar de su potencial para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), prevenir la degradación del suelo y mejorar la resiliencia de los ecosistemas, la adopción de métodos de pastoreo sostenible sigue siendo limitada en muchas regiones. Los estudios existentes ponen de relieve las barreras técnicas y económicas, pero escasean los análisis exhaustivos a gran escala que integren factores socioeconómicos, institucionales y ambientales. Este artículo contribuye a la literatura al abordar esa brecha, proporcionando una de las primeras evaluaciones empíricas de las barreras para la adopción de prácticas de pastoreo sostenible, utilizando un conjunto de datos novedoso. México, un país con un extenso pastoreo de ganado, sirve como caso ilustrativo. El estudio brinda información relevante sobre los factores estructurales, financieros y demográficos que influyen en la adopción de prácticas sostenibles. Los resultados no solo proporcionan evidencia útil para los responsables de política en México, sino que también ofrecen perspectivas más amplias que pueden servir de base para iniciativas sostenibles en otros países.

Definimos las prácticas de pastoreo sostenible como aquellas que reducen el daño ambiental (por ejemplo, la erosión del suelo), mejoran la regeneración de los pastos y mitigan las emisiones de gases de efecto invernadero. A partir de datos a nivel de unidad de producción (UP) procedentes de censos agrícolas, elaboramos un conjunto de datos de panel a nivel municipal que comprende más de un millón de UP al año (INEGI, 2007, 2022). Siguiendo a Lebacqz *et al.* (2012), desarrollamos un índice

de sostenibilidad ambiental (ESI) que asigna ponderaciones a las prácticas de producción en función de su sostenibilidad inherente. Para identificar los obstáculos que impiden la adopción de prácticas sostenibles, nos basamos en un modelo de regresión fraccionada en el que la variable dependiente es el ESI y el conjunto de variables de control incluye la superficie de pastoreo, la proporción de tierras agrícolas bajo régimen ejidal y comunal, y el acceso a seguros, créditos, servicios de extensión y subsidios,

así como características de los productores tales como la edad, el nivel educativo, el género y el origen étnico.

Nuestros hallazgos ponen de relieve varios obstáculos para la sostenibilidad. Los municipios con mayores extensiones de pastos tienden a recurrir en mayor medida a prácticas insostenibles. La tenencia de la tierra constituye un obstáculo estructural significativo, ya que las tierras ejidales presentan un menor nivel de sostenibilidad en comparación con las tierras privadas o comunales. El acceso al crédito, a los subsidios y a los servicios de extensión influye positivamente en la sostenibilidad, al facilitar la adopción de prácticas avanzadas y las inversiones en infraestructura sostenible. Por el contrario, los seguros agrícolas se asocian negativamente con la sostenibilidad. La educación se relaciona sistemáticamente con

una mayor sostenibilidad, lo que pone de relieve la importancia de los conocimientos y las habilidades técnicas. El análisis de la heterogeneidad revela que el apoyo financiero y técnico resulta especialmente eficaz para las UP pequeñas y mixtas, mientras que las UP de doble propósito son las que más se benefician de una combinación de subsidios y servicios de extensión. Los resultados indican la necesidad de intervenciones personalizadas que aborden los retos específicos a los que se enfrentan las UP de diferentes tamaños y sistemas de producción. Las conclusiones de este artículo proporcionan datos empíricos útiles para el diseño de políticas y programas destinados a promover prácticas ganaderas sostenibles.

El resto del documento se estructura de la siguiente manera:



La **sección 4.1** ofrece una visión general de estudios previos, centrándose en la sostenibilidad.



La **sección 4.2** presenta los datos y la metodología.



La **sección 4.3** presenta nuestro estudio de caso.



Las **secciones 4.4 y 4.5** presentan y analizan el conjunto de resultados, respectivamente.



La **sección 4.6** concluye.





4.1 Revisión de la literatura

Esta revisión de la literatura se divide en dos secciones. La primera sección se centra en los indicadores de sostenibilidad y analiza cómo se mide la sostenibilidad y los distintos marcos utilizados para evaluar el desempeño ambiental de los sistemas de producción ganadera. La segunda sección examina las barreras para implementar prácticas sostenibles, a partir de estudios empíricos que ponen de relieve los retos prácticos a los que se enfrentan los productores. En conjunto, estas dos vertientes de la literatura establecen la base para evaluar la sostenibilidad de las prácticas de pastoreo en México y orientan la construcción de un índice de sostenibilidad fundamentado en la teoría y sensible a las realidades prácticas de la producción ganadera.

4.1.1. Indicadores de sostenibilidad para la producción ganadera

La agricultura sostenible se ocupa de la capacidad de los agroecosistemas para seguir siendo productivos a largo plazo. Muchos autores distinguen entre sostenibilidad ecológica (o ambiental), económica y social. La sostenibilidad ecológica se define como el mantenimiento del ecosistema global o del “capital natural”, que sirve tanto como “fuente” de insumos como “sumidero” de residuos (Goodland, 1995). La dimensión ecológica de la sostenibilidad es fundamental para la sostenibilidad general, ya que constituye un requisito previo para las dimensiones económica y social.

Los índices de sostenibilidad sirven como herramientas cuantitativas que miden el avance de las prácticas agrícolas hacia el desarrollo sostenible (Zhen y Routray, 2003). En la literatura existen diversas clasificaciones de indicadores y objetivos ambientales (Alkan Olsoon et al., 2009; Meul

et al., 2008; Sadok *et al.*, 2008; van der Werf y Petit, 2002). En el caso de la producción ganadera, estos índices pueden clasificarse como indicadores basados en los medios de producción o basados en los efectos de la producción, cada uno de los cuales ofrece enfoques distintos para evaluar los efectos ambientales. Los indicadores basados en medios de producción, se centran en las prácticas productivas de los ganaderos, como las tasas de carga ganadera; los indicadores basados en efectos evalúan los resultados de esas prácticas, como las concentraciones de nitrato en las aguas subterráneas (Lebacqz *et al.*, 2012).

Los indicadores basados en efectos y en medios de producción difieren en cuanto a su mensurabilidad y relevancia ambiental. Los primeros tienen una alta relevancia ambiental debido a su vínculo directo con los objetivos y a su especificidad contextual, pero son difíciles de implementar desde el punto de vista metodológico o práctico. Los segundos son fáciles de implementar debido a la disponibilidad de datos y la facilidad de cálculo, pero tienen una baja calidad predictiva de los impactos ambientales (van der Werf y Petit, 2002; van der Werf *et al.*, 2009).

Los indicadores basados en efectos se utilizan comúnmente para evaluar la sostenibilidad de las UP a nivel micro, pero requieren datos complejos, lo que los hace poco prácticos para estudios a gran escala. Desde la perspectiva de las UP, los parámetros que suelen evaluarse incluyen la erosión del suelo, la calidad del suelo, la calidad del agua, la calidad de las prácticas agrícolas, el uso de fertilizantes, la rotación de cultivos y los métodos de cultivo (van der Werf y Petit, 2002; Hayati, 2017). Los estudios que utilizan indicadores basados en efectos suelen tener tamaños de muestra limitados. Por ejemplo, Bravo-Medina *et al.* (2017) analizaron datos de 10 UP en Ecuador, y Chand *et al.* (2011, 2015) evaluaron 120 y 60 UP lecheras en India. De manera similar, Jara de Garcia *et al.* (2023) evaluaron 60 UP en Perú, Sulewski y Kłoczko-Gajewska (2018) se centraron en 600 UP en Polonia, y Vences *et al.* (2015) analizaron 29 UP en México. Estos pequeños tamaños de muestra ponen de relieve los retos que plantea ampliar las evaluaciones de sostenibilidad a poblaciones más grandes, dado que sigue siendo difícil recopilar datos integrales en regiones más amplias. Los indicadores basados en efectos no permiten monitorear relaciones de causa y efecto, lo que dificulta su uso para formular recomendaciones específicas para los productores (Bockstaller *et al.*, 2008).

Los indicadores basados en medios de producción se utilizan ampliamente para evaluar la sostenibilidad ambiental porque son fáciles de implementar y están directamente vinculados a las prácticas productivas. Estos indicadores se basan en datos accesibles, como el uso de fertilizantes y la rotación de cultivos, y son más sencillos de aplicar en estudios a gran escala. Como resultado, muchos enfoques basados en datos priorizan los indicadores basados en medios de producción para evaluar la sostenibilidad ambiental en la agricultura. Entre los 12 indicadores examinados por van der Werf y Petit (2002), tres son particularmente relevantes para nuestro estudio porque se basan en indicadores basados en medios de producción, se centran en la sostenibilidad ambiental y utilizan datos a nivel de UP. El índice de sostenibilidad de los agricultores de Taylor *et al.* (1993) asigna puntuaciones a 33 prácticas agrícolas involucradas en la producción de repollo, y cada práctica contribuye positiva o negativamente a una puntuación general de sostenibilidad ecológica. El método de “ecopuntos” evalúa tanto las prácticas agrícolas como el mantenimiento del paisaje, y asigna puntuaciones en consecuencia (Mayrhofer *et al.*, 1996).

Los indicadores de sostenibilidad de las UP de Vilani evalúan la sostenibilidad agroecológica, socioterritorial y económica mediante la puntuación de prácticas y comportamientos agrícolas, lo que hace que este método sea aplicable a diversos tipos de UP (Vilani, 1999). Estos enfoques demuestran la versatilidad y practicidad de los indicadores basados en medios de producción en las evaluaciones de sostenibilidad.

En general, la literatura existente indica que la implementación de los principios del desarrollo sostenible en la agricultura requiere, en la práctica, índices adecuados que permitan evaluar y monitorear el estado del sector y de las UP.

4.1.2. Obstáculos para las prácticas de pastoreo sostenible

Un creciente conjunto de investigaciones ha examinado las barreras para la adopción de prácticas de pastoreo sostenible que, pese a sus beneficios económicos y ambientales ampliamente documentados, siguen teniendo una adopción limitada en todo el mundo. Estas barreras son multifacéticas y abarcan desafíos conductuales, financieros, informativos, de infraestructura e institucionales que interactúan en contextos socioeconómicos, agroecológicos y políticos complejos. Los estudios han empleado una combinación de enfoques cuantitativos, como el análisis econométrico de grandes conjuntos de datos, y métodos cualitativos, incluidos grupos focales y encuestas, para obtener información.

Los enfoques cuantitativos han identificado las restricciones crediticias, la falta de asistencia técnica y la conciencia insuficiente como barreras significativas para la adopción de innovaciones (Karali *et al.*, 2014; Kollmuss y Agyeman, 2002). Las técnicas cualitativas han revelado perspectivas matizadas sobre cómo superar los obstáculos mediante programas participativos de educación y extensión dirigidos a productores, adaptados a las prioridades y capacidades locales (Blackstock *et al.*, 2010; Chevalier y Buckles, 2013). La evidencia para América Latina refleja las tendencias mundiales relacionadas con la inseguridad en la tenencia de la tierra y las políticas gubernamentales desalineadas (de Janvry y Sadoulet, 2001). Sin embargo, los cambios estructurales en la agricultura, como el aumento del tamaño de los hatos, también afectan las prácticas de pastoreo en países desarrollados como Alemania (Eggers *et al.*, 2014).

Los obstáculos conductuales abarcan las actitudes frente al riesgo que implica la apertura de los productores a innovaciones, las perspectivas temporales futuras que moldean las decisiones de inversión y las presiones contrapuestas sobre las prioridades operativas (Karali *et al.*, 2014; Wreford *et al.*, 2017). Además, la resistencia actitudinal suele derivarse de evaluaciones racionales,

más que de problemas de motivación (Gillespie *et al.*, 2007). Las barreras financieras incluyen los elevados costos iniciales de ciertas prácticas sostenibles, especialmente para los productores que no tienen acceso al crédito ni a programas de apoyo gubernamental (Mills *et al.*, 2017; Stuart *et al.*, 2014). Incluso las opciones aparentemente beneficiosas para todas las partes pueden enfrentar costos de transacción ocultos que impiden su difusión (MacLeod *et al.*, 2015). Entre los gastos relevantes se incluyen la búsqueda de información, la administración, el monitoreo y los requisitos de presentación de informes (Wreford *et al.*, 2017).

Los obstáculos informativos, en particular la conciencia limitada y los requisitos de conocimiento, predominan en la investigación sobre la adopción de prácticas agrícolas sostenibles (Prokopy *et al.*, 2008; Rochecouste *et al.*, 2015). Los medios para transferir información y demostrar innovaciones incluyen los servicios de extensión y las redes de aprendizaje entre productores (Baumgart-Getz *et al.*, 2012). Los impedimentos de infraestructura incluyen la inseguridad en la tenencia de la tierra, que impide las inversiones a largo plazo; la escasez de agua para riego; la insuficiencia de infraestructura eléctrica y de caminos que conecten a las UP con los mercados; y las ubicaciones remotas sin acceso a los mercados de insumos y productos agrícolas (Aguilar-Gallegos *et al.*, 2015; Wreford *et al.*, 2017). La expansión de la escala operativa y del tamaño de los hatos en el sector lechero de Alemania demuestra cómo los cambios estructurales pueden influir en las prácticas de pastoreo a lo largo del tiempo (Eggers *et al.*, 2014).

Los obstáculos institucionales incluyen programas de apoyo gubernamental insuficientes en términos de financiamiento, diseño o focalización (Stuart *et al.*, 2014). Las políticas agrícolas contradictorias pueden afianzar inadvertidamente las barreras al fomentar la expansión de la producción o subsidiar insumos sin incorporar disposiciones sobre adaptación climática o sostenibilidad (Wreford *et al.*, 2017). Las características sociodemográficas, como la edad, la educación, el género y la cultura, pueden plantear barreras para la adopción (Adesina y Baidu-Forson, 1995; Baumgart-Getz *et al.*, 2012; Knowler y Bradshaw, 2007). Los productores de mayor edad suelen mostrar resistencia a las innovaciones. La formación agrícola formal y la búsqueda activa de información se asocian con una mayor probabilidad de adopción. Los roles de género, las dinámicas de toma de decisiones en los hogares y las tradiciones culturales moldean los juicios sobre las prácticas agrícolas adecuadas.

En general, resulta esencial adoptar una perspectiva multidimensional, dado que las barreras se interrelacionan en marcos socioeconómicos, agroecológicos y políticos que requieren la integración de instrumentos de información, incentivos económicos y reformas institucionales (Kollmuss y Agyeman, 2002). Las técnicas cuantitativas y cualitativas pueden diagnosticar obstáculos específicos de cada región en los sistemas agrícolas para orientar políticas destinadas a superar las barreras y promover prácticas sostenibles. Superar las barreras requiere identificar los obstáculos pertinentes a nivel local, priorizar los impedimentos y diseñar políticas que aborden las brechas de información, las restricciones de costos y las fallas institucionales (Gillespie *et al.*, 2007; Mills *et al.*, 2017). Las iniciativas gubernamentales participativas y adaptadas a cada contexto pueden fortalecer los servicios de extensión y proporcionar los incentivos económicos necesarios, al tiempo que reforman las políticas que no están alineadas con los objetivos de sostenibilidad (Chevalier y Buckles, 2013; Rochecouste *et al.*, 2015).



4.2 Datos y metodología

Utilizamos datos de los censos agrícolas de 2007 y 2022 (INEGI, 2007, 2022), correspondientes a 1,13 millones y 1 millón de UP, respectivamente, que crían ganado y reportan información sobre prácticas de pastoreo y gestión de las UP, para construir un conjunto de datos de panel a nivel municipal. Nuestro análisis se basa en el panel a nivel municipal, en lugar de agrupar unidades transversales, dado que los censos no permiten hacer seguimiento de las UP a lo largo del tiempo.

Los censos reportan datos sobre el número de cabezas de ganado bajo seis prácticas de producción: libre pastoreo, pastoreo controlado, manejo estabulado y semiestabulado, uso de alimento balanceado y rotación de potreros (véase la tabla A.4.1 en el apéndice para una visión general). Además, los datos incluyen variables relacionadas con la superficie y la tenencia de la tierra, como la superficie total de pastoreo y las tierras agrícolas clasificadas según distintos regímenes de tenencia (ejidal,¹³ comunal y privada). Los censos también proporcionan información sobre el acceso de los productores a instrumentos financieros, incluidos el seguro agrícola y el crédito, así como al apoyo gubernamental en forma de subsidios y servicios de extensión. Por último, se registran características sociodemográficas de los productores, incluidos los años de educación, el género, si el productor habla una lengua indígena y la edad.¹⁴ El conjunto de datos también identifica los tipos de producción de las UP, distinguiendo entre sistemas de producción de carne vacuna, leche, doble propósito y mixtos,¹⁵ lo que ofrece información adicional sobre la heterogeneidad de las operaciones ganaderas.

¹³ Se trata de tierras que el Gobierno asignó a las comunidades tras la Revolución Mexicana, entre 1910 y 1921. Los beneficiarios de esta asignación de tierras pueden utilizar o arrendar sus tierras y, desde hace poco, pueden venderlas con la aprobación de la Asamblea General de ejidatarios.

¹⁴ Aunque los censos agrícolas del INEGI incluyen datos correspondientes a 1991 (INEGI, 1991), estos carecen del nivel de detalle suficiente para poder compararlos directamente con datos más recientes. En concreto, el censo de 1991 omite información sobre dos de las seis prácticas de pastoreo y seis de las doce variables de control. Además, solo proporciona datos agregados sobre el número de cabezas de ganado en pastoreo, sin diferenciar entre sistemas de pastoreo libre y controlado. Dadas estas limitaciones, nuestro análisis utiliza datos de los censos de 2007 y 2022.

¹⁵ La categoría de explotaciones mixtas comprende aquellas en las que la producción de carne, leche o de doble propósito coexiste con otros tipos de ganado, como toros (machos reproductores) o bueyes, lo que refleja la diversidad de estrategias de producción utilizadas por los ganaderos.

Para nuestro análisis, primero agregamos los datos a nivel de UP al nivel municipal. En concreto, calculamos agregados a nivel municipal para las principales variables, incluida la proporción de UP que implementan alguna de las seis prácticas de pastoreo, la superficie total de pastoreo y el tipo de tenencia de la tierra. Además, incorporamos datos sobre la proporción de UP con acceso a seguro agrícola, crédito, subsidios y servicios de extensión. También se consideran características sociodemográficas, incluidos los años promedio de educación y la edad de los productores, así como la proporción de productores hombres y de aquellos que hablan una lengua indígena. Nuestro conjunto final de datos de panel consta de información censal agregada sobre poblaciones de UP para 2.464 municipios en 2007 y 2022.

A partir de nuestro conjunto de datos, desarrollamos un índice de sostenibilidad ambiental (ESI) para reflejar el nivel de sostenibilidad de las prácticas de producción. Siguiendo el enfoque de Lebacqz *et al.* (2012), nuestro ESI asigna ponderaciones a las prácticas agrícolas en función de su sostenibilidad inherente. Este enfoque se basa en los marcos establecidos por Taylor *et al.* (1993), Mayrhofer *et al.* (1996) y Vilani (1999), que utilizan indicadores de sostenibilidad basados en medias.

Nuestro índice se centra en múltiples dimensiones de la sostenibilidad, pero está limitado por la disponibilidad de datos a las prácticas de pastoreo y alimentación. Reconociendo que la sostenibilidad abarca diversas dimensiones, conceptualizamos las prácticas de los productores como parte de un continuo que va desde “muy sostenibles” hasta “muy insostenibles”. Así, el ESI refleja el nivel general de sostenibilidad de cada municipio, teniendo en cuenta las prácticas predominantes. Nuestro enfoque nos permite modelar cómo las restricciones socioeconómicas, financieras e institucionales afectan la sostenibilidad ambiental en la producción ganadera a través de su efecto en el ESI. Definimos el ESI de la siguiente manera:

$$ESI_{it} = \sum_j^J w_j y_{jit}$$

donde w_j es la ponderación específica de la práctica j_{th} , y y_{jit} denota la proporción de UP que implementan la práctica j en el municipio i en el tiempo t . La sostenibilidad de cada práctica está captada por la ponderación w_j , que se determina con base en la literatura existente.

Para el escenario principal de ponderación, López (2025) indica que, en promedio, un ternero en libre pastoreo alcanza el peso óptimo a los 42 meses, periodo durante el cual emite 11,5 tCO₂e. Sin embargo, si el ternero es estabulado en una etapa temprana —por ejemplo, a los 20 meses—, las emisiones se reducirían un 54%, porque la estabulación acelera el engorde del ternero. Una vez que el ternero está estabulado, la innovación tecnológica, el manejo adecuado del estiércol y el uso de alimento balanceado pueden reducir aún más las emisiones, de 1,5 a 0,4 tCO₂e. Steinfeld *et al.* (2006) encuentran que los sistemas extensivos e intensivos generan el 13% y el 5% del total de emisiones antropogénicas mundiales, respectivamente, lo que aporta respaldo adicional al argumento de que el libre pastoreo tiende a ser más perjudicial para el medio ambiente que las prácticas de estabulación.

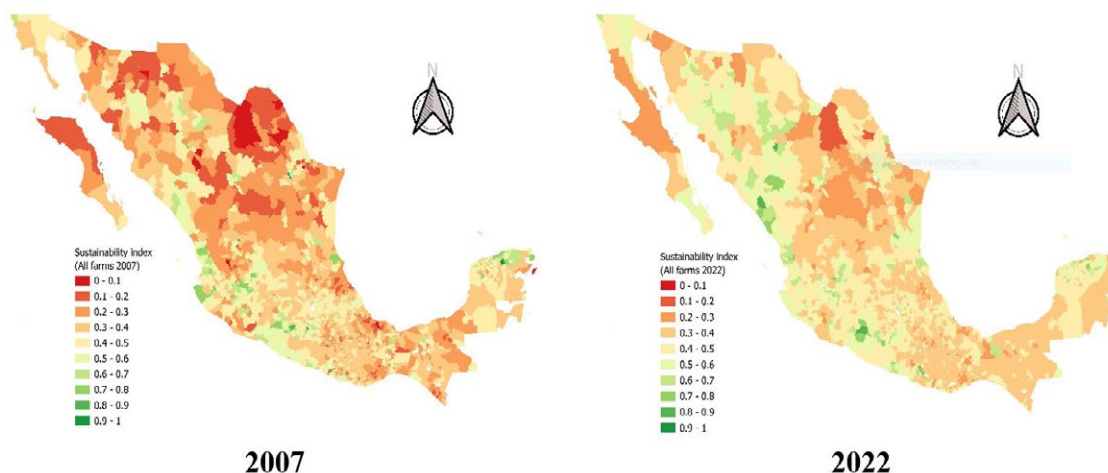
En lo que respecta a la erosión del suelo y la regeneración de los pastos, Lai y Kumar (2020) llevaron a cabo un metaanálisis basado en 287 artículos para evaluar los efectos del pastoreo sobre las propiedades del suelo y, por consiguiente, sobre la regeneración de los pastos. Sus resultados indican que el pastoreo intensivo es más perjudicial para la calidad del suelo que el pastoreo moderado, el ligero o la ausencia de pastoreo, ya que reduce el carbono orgánico del suelo, el nitrógeno total, la relación carbono-nitrógeno, el contenido de agua y el potasio. Por el contrario, el pastoreo ligero aumenta el carbono orgánico y el amonio del suelo, lo que mejora la calidad del suelo. Lai y Kumar (2020) también demostraron que el pastoreo intensivo tiene una mayor probabilidad de provocar sobrepastoreo (70%) en comparación con el pastoreo moderado (14%) y el ligero (10%). Por lo tanto, el pastoreo libre y sin control parece ser más perjudicial que otras prácticas en términos de emisiones de GEI, calidad del suelo y regeneración de los pastos. López (2025) concluye que el uso de alimentos balanceados puede reducir aún más las emisiones de GEI.

La tabla A.4.2 del apéndice presenta una visión general de las consideraciones de sostenibilidad asociadas a cada práctica, tal como se sugiere en la literatura, junto con las ponderaciones correspondientes w_j . La práctica más sostenible es el uso de alimentos balanceados ($w_j = 3$), que ocupa el primer puesto debido a sus contribuciones positivas a la eficiencia ganadera y a la reducción del impacto ambiental (López, 2025). Por el contrario, el libre pastoreo se identifica como la práctica menos sostenible ($w_j = -2$), principalmente debido a su asociación con el pastoreo excesivo y la degradación ambiental, tal como se ha explicado anteriormente (Lai y Kumar, 2020). Las prácticas restantes se sitúan entre estos dos extremos, representando un espectro de niveles de sostenibilidad. Prácticas como el pastoreo controlado y la rotación de potreros son relativamente sostenibles y promueven una mejor gestión de los pastos y mejores resultados ambientales, mientras que los sistemas semiestabulados y estabulados plantean retos en la gestión del estiércol y la eficiencia de los recursos. Debido al debate sobre la sostenibilidad relativa de las prácticas de producción incluidas en nuestro análisis, consideramos tres escenarios de ponderación alternativos, que permiten realizar una prueba de robustez de nuestros resultados bajo diferentes supuestos sobre las ponderaciones de sostenibilidad asignadas a cada práctica, analizados en la sección 6 más adelante.

Para nuestro análisis, normalizamos los valores del ESI restando de cada observación del ESI el valor mínimo del ESI en la muestra y dividiendo el resultado por el valor máximo del ESI, utilizando la siguiente fórmula: $\frac{ESI_{it} - \min(ESI)}{\max(ESI)}$ donde (ESI_{it}) son los valores originales.¹⁶ De este modo, los valores de nuestro índice oscilan entre 0 y 1, donde 0 representa las prácticas menos sostenibles y 1, las más sostenibles. Esta transformación facilita la interpretación del índice y de los resultados econométricos. La figura 4.1 muestra la distribución espacial del ESI normalizado. El mapa revela un aumento general del índice de sostenibilidad a lo largo del tiempo, lo que sugiere un cambio de prácticas de pastoreo menos sostenibles a otras más sostenibles entre los ganaderos. Además, las prácticas insostenibles son más frecuentes en las regiones del norte de México, especialmente en Coahuila y Chihuahua, donde el pastoreo libre sigue siendo la práctica dominante.

¹⁶ Téngase en cuenta que (ESI) es negativo

Figura 4.1 Índice de sostenibilidad ambiental: distribución espacial, 2007 y 2022



Fuente: Elaboración propia basada en datos del INEGI (2007, 2022).

Para identificar las barreras que impiden la adopción de prácticas sostenibles, seguimos a Papke y Wooldridge (1996, 2008) y adoptamos un modelo de datos de panel de respuesta fraccionaria para tener en cuenta la acotación de la variable dependiente. Este enfoque resulta especialmente adecuado para conjuntos de datos con una amplia dimensión transversal y un número limitado de periodos de tiempo, como ocurre en nuestro estudio. Papke y Wooldridge (2008) señalan que los modelos lineales de panel con efectos fijos convencionales pueden dar lugar a estimaciones imprecisas y generar potencialmente valores previstos fuera del rango válido de la variable dependiente. Por el contrario, el modelo de respuesta fraccionaria garantiza que los valores estimados se mantengan dentro del intervalo unitario y aborda cuestiones relacionadas con la dependencia serial. Así, dado un conjunto de variables explicativas x_{it} , el modelo se especifica de la siguiente manera:

$$E(ESI_{it} | x_{it}, c_i) = \Phi(x_{it} \beta + c_i)$$

donde $\Phi(\cdot)$ representa la función de distribución acumulada normal estándar, ESI_{it} es el índice ESI , c_i es el efecto no observado y β son los parámetros. Para identificar β , Papke y Wooldridge (2008) asumen que, condicional a c_i , x_{it} es estrictamente exógeno, y que c_i sigue una distribución condicional, como en Chamberlain (1980); es decir, $c_i | x_{it} \sim \text{Normal}(\psi + (x_{it} \gamma), \sigma^2)$. Para su aplicación empírica, estimamos el siguiente modelo:

$$E(ESI_{it} | x_{it}, \gamma_t, \lambda_{mt}) = \Phi(x_{it} \beta + \alpha_i + \gamma_t + \lambda_{mt})$$

donde α_i , γ_t y λ_{mt} representan los efectos fijos municipales, anuales y de estado-año, respectivamente. El conjunto de variables independientes, x_{it} , comprende la superficie de pastoreo; el

régimen de tenencia de la tierra; el acceso al crédito, a los seguros, a los subsidios y a los servicios de extensión; y las características sociodemográficas. La interpretación de los coeficientes en un modelo de respuesta fraccionaria puede resultar compleja debido a la naturaleza no lineal de la especificación probit. Por lo tanto, en nuestro análisis nos centramos en interpretar el signo de los coeficientes y en comparar la magnitud relativa entre las diferentes variables explicativas.

La tabla A.4.3 del apéndice muestra las estadísticas descriptivas de las variables de nuestro modelo. En promedio, la práctica de pastoreo más extendida en México es el libre pastoreo (32% de todas las UP), seguida de la rotación de potreros (17%) y el uso de alimentos balanceados (17%). Estas prácticas no son mutuamente excluyentes: tanto las prácticas sostenibles como las insostenibles pueden coexistir en una misma UP. La superficie media de pastoreo por municipio es de 13.600 hectáreas. La mayor parte de las tierras agrícolas son privadas (el 47% del total); las tierras ejidales y comunales representan en conjunto el 52% del total de tierras. En cuanto al acceso a los recursos, el 41% de las UP de los municipios recibió subsidios y el 4% tuvo acceso a crédito. Sin embargo, el acceso a los servicios de extensión y a los seguros agrícolas sigue siendo muy bajo, ya que solo el 4% y el 1% de las UP se benefician de estos recursos, respectivamente. Esto sugiere que, aunque la producción ganadera en México está fuertemente subsidiada, existe una brecha significativa en la prestación de servicios de extensión. En cuanto a las características sociodemográficas, el productor medio es un hombre de 55 años, con cinco años de estudios. Solo el 23% de los productores habla una lengua indígena; esta variable nos sirve como indicador de pertenencia a una etnia indígena.





4.3 Resultados

A partir de nuestro conjunto de datos de panel, estimamos una serie de modelos para identificar los obstáculos que dificultan la adopción de prácticas de producción sostenibles. La figura 4.2 ofrece una representación gráfica de los principales resultados del modelo de regresión fraccional, y la tabla A.4.4 del apéndice presenta los resultados econométricos completos, incluidos los obtenidos a partir de un modelo de panel lineal estándar. Aunque los resultados de los modelos lineales y de los modelos de panel fraccional muestran algunas diferencias, la mayoría de las conclusiones se mantienen en ambas especificaciones. Nuestro análisis de los resultados se centra en el modelo de panel fraccional, que se adapta mejor a la naturaleza acotada del ESI. Las conclusiones ofrecen información valiosa sobre el papel de las características de las UP ganaderas, el acceso a los recursos y al apoyo gubernamental, así como de los factores sociodemográficos, a la hora de determinar los resultados de sostenibilidad en los distintos municipios.

Los resultados sugieren que los municipios con mayores extensiones de pastos tienden a recurrir en mayor medida a prácticas insostenibles. Este resultado puede explicarse por la tendencia de los municipios con extensas zonas de pastoreo a recurrir a sistemas de pastoreo libre, en los que es posible que los ganaderos no tengan plenamente en cuenta la escasez de pastos a la hora de tomar decisiones destinadas a optimizar sus beneficios.

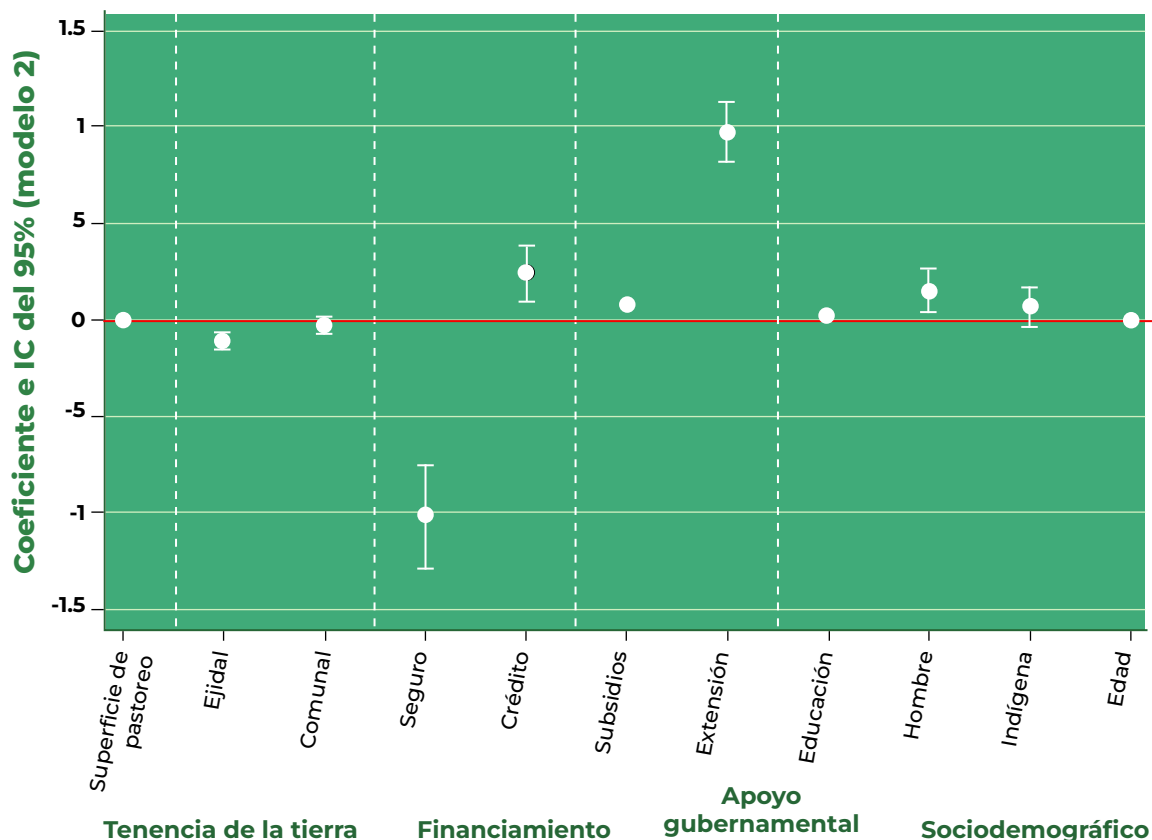
En cuanto a los regímenes de tenencia de la tierra, algunos estudios sugieren que la gestión comunitaria de la tierra puede conducir a resultados sostenibles si los propietarios establecen reglas, normas y mecanismos de aplicación claros para evitar la sobreexplotación de los recursos de uso común, como las zonas de pastoreo (Gebremedhin *et al.*, 2004). Por el contrario, otros estudios sostienen que los sistemas de pastoreo de libre acceso suelen dar lugar a un uso excesivo de los recursos, lo que provoca escasez de forraje, degradación del suelo y degradación

ambiental. Nuestros hallazgos coinciden con estas últimas preocupaciones, e indican que la producción ganadera en tierras ejidales se asocia con una menor sostenibilidad en comparación con las tierras privadas, pero no se observa una diferencia significativa entre las tierras privadas y las comunales. Dado que los ejidos se gestionan, en la mayoría de los casos, como recursos de uso común, la ausencia de una propiedad bien definida puede incentivar a los productores a adoptar prácticas insostenibles. Este resultado pone de relieve los retos de gobernanza y coordinación que a menudo dificultan la aplicación de estrategias de pastoreo sostenibles en las tierras ejidales, lo que subraya la necesidad de contar con marcos institucionales más sólidos que respalden la gestión colectiva de la tierra.

El acceso al apoyo financiero y gubernamental desempeña un papel crucial en la configuración de los resultados en materia de sostenibilidad. El coeficiente relativo al seguro agrícola sugiere que los municipios con una mayor cobertura de seguro tienden a presentar valores más bajos del ESI. Este resultado podría reflejar un riesgo moral: los productores asegurados podrían tener menos incentivos para adoptar prácticas sostenibles y confiar, en su lugar, en la compensación económica en caso de que se produzcan resultados ambientales adversos. Sin embargo, el acceso al crédito, a los subsidios y a los servicios de extensión muestra efectos positivos y significativos sobre la sostenibilidad. La adopción de prácticas sostenibles, como el ganado estabulado, la rotación de potreros y el uso de alimentos balanceados, requiere inversiones en nueva infraestructura o en insumos más costosos, lo que podría explicar la relación positiva entre el acceso al crédito y el ESI. Aunque solo el 3,7% de las UP ganaderas de un municipio medio reciben servicios de extensión, estos programas de asistencia técnica contribuyen de manera significativa a la promoción de prácticas sostenibles.

En cuanto a las características sociodemográficas, el nivel educativo de los productores tiene un efecto positivo y significativo: los productores con mayor nivel educativo son más propensos a adoptar prácticas sostenibles. Este hallazgo concuerda con la literatura existente, que sugiere que unos niveles educativos más altos contribuyen a una mayor conciencia y a una mejor comprensión de los beneficios a largo plazo de las prácticas ganaderas respetuosas con el medio ambiente. Dado que el productor medio tiene educación primaria incompleta, un año adicional de escolarización es importante para aumentar la probabilidad de adoptar prácticas sostenibles. Ni el hecho de hablar una lengua materna ni la edad son estadísticamente significativos.

Figura 4.2 Estimaciones de los parámetros: regresión fraccional de panel



Fuente: Elaboración propia con base en datos del INEGI (2007, 2022).

En general, los resultados de nuestro modelo sugieren que el apoyo financiero y técnico, junto con las iniciativas educativas, desempeñan un papel fundamental en la promoción de prácticas de pastoreo sostenibles. Sin embargo, dos factores estructurales —el régimen de tenencia de la tierra y el tamaño de las UP— plantean obstáculos importantes que deben abordarse mediante intervenciones de política específicas. Entre todos los factores, el efecto negativo de los seguros agrícolas y el efecto positivo de los servicios de extensión destacan por su magnitud relativamente mayor, lo que pone de relieve la importancia de políticas específicas que aborden tanto los incentivos financieros como la difusión de conocimientos para mejorar los resultados en materia de sostenibilidad.



4.4 Discusión

Para profundizar en el análisis de los factores que influyen en la adopción de prácticas sostenibles, analizamos la heterogeneidad de los resultados dividiendo la muestra en función del tamaño y el tipo de UP. En cuanto al tamaño de las UP, seguimos los criterios del INEGI y las clasificamos como pequeñas (menos de 11 cabezas), medianas (entre 11 y 84 cabezas) o grandes (más de 84 cabezas). En cuanto al tipo de explotación, utilizamos cuatro categorías mutuamente excluyentes: UP de carne, lecheras, de doble propósito y mixtas.¹⁷ Una UP se incluye en una de estas categorías si al menos el 75% de su hato corresponde al tipo respectivo; esto garantiza que se refleje con precisión el enfoque principal de la producción. La tabla 4.1 muestra los resultados del modelo de regresión de panel fraccionado sobre la división del ESI, según el tamaño y el tipo de explotación.

El efecto negativo y significativo de la superficie de pastoreo sobre la sostenibilidad en la mayoría de los modelos sugiere que tanto las UP pequeñas como las grandes se enfrentan a mayores retos, probablemente debido al pastoreo excesivo y al agotamiento de los recursos. La ganadería extensiva se asocia a menudo con sistemas pastoriles ineficientes, la sobreexplotación de los recursos y una gestión inadecuada del estiércol, lo que puede contribuir al incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero, la degradación del suelo, la pérdida de biodiversidad y una reducción de la capacidad de carga. Por el contrario, el efecto es no significativo en el caso de las UP de tamaño medio, que pueden aplicar mejores prácticas de gestión localizadas.

En todos los tipos de UP, el aumento de la superficie de pastoreo para los ganaderos de carne y leche, incluidas las UP de doble propósito, reduce el ESI. En general, los sistemas de alimentación con pastos requieren una superficie significativamente mayor durante un periodo más prolongado por unidad de leche o carne para alcanzar un objetivo de producción, en comparación

¹⁷ Tal como se ha definido anteriormente, una explotación mixta incluye aquellas en las que la producción de carne, leche o doble propósito coexiste con otros tipos de ganado, como toros (machos reproductores) o bueyes.

con los sistemas de alimentación con granos. Las elevadas necesidades de recursos de la producción lechera (Loera y Banda, 2017), unidas a la complejidad de gestionar zonas de pastoreo más extensas, contribuyen a una menor sostenibilidad.

Los resultados relativos a los regímenes de tenencia de la tierra muestran que el efecto de las tierras ejidales sobre la sostenibilidad varía en función tanto del tamaño como del tipo de UP, lo que pone de relieve las complejidades asociadas a la gestión colectiva de la tierra. En el caso de las UP pequeñas y medianas, una mayor proporción de tierras ejidales se asocia con menores resultados en materia de sostenibilidad, lo que sugiere que los retos asociados a la gestión de los recursos de uso común afectan de manera desfavorable a estas UP, al limitar su capacidad para implementar prácticas sostenibles. Por el contrario, la proporción de tierras comunales no muestra un efecto significativo en las UP pequeñas, lo que sugiere que la tenencia comunal puede ofrecer resultados de sostenibilidad similares a los de las tierras privadas, la categoría de referencia, posiblemente debido a una gobernanza local más sólida o a prácticas de gestión tradicionales establecidas que mitigan el agotamiento de los recursos. En el caso de las UP grandes, la proporción de tierras ejidales no tiene un efecto significativo. Por otro lado, una mayor proporción de tierras comunales en los municipios con UP grandes tiene un efecto positivo y significativo, lo que sugiere que las UP más grandes con un menor número de propietarios permiten una mejor gestión de los recursos.

El efecto de los regímenes de tenencia de la tierra también varía según el tipo de UP. Las UP de carne, lecheras y mixtas no muestran diferencias significativas en los resultados de sostenibilidad entre las tierras ejidales, comunales y privadas. En las UP de doble propósito, los resultados revelan un efecto contrastado de la tenencia de la tierra sobre la sostenibilidad: una mayor proporción de tierras ejidales se asocia con una menor sostenibilidad en comparación con las tierras privadas, mientras que las tierras comunales muestran un efecto positivo y significativo. El efecto negativo de las tierras ejidales sugiere que las exigencias de la producción dual de carne y productos lácteos ejercen una presión considerable sobre los recursos compartidos. El efecto positivo de las tierras comunales, sin embargo, sugiere que, en las condiciones adecuadas, los acuerdos de tenencia comunal pueden favorecer resultados más sostenibles. Este resultado puede reflejar una mejor coordinación entre los propietarios comunales, donde grupos más reducidos de partes interesadas son capaces de establecer y hacer cumplir acuerdos de pastoreo colectivo que evitan la sobreexplotación y promueven prácticas de rotación. A diferencia de los sistemas ejidales, donde las estructuras de gobernanza pueden estar más fragmentadas y sujetas a influencias políticas, las tierras comunales pueden beneficiarse de prácticas de gestión tradicionales más sólidas que facilitan la cooperación y la planificación de recursos a largo plazo.

El efecto del apoyo financiero en la sostenibilidad también varía significativamente según el tamaño y el tipo de UP ganadera. En el caso de las UP pequeñas, el acceso al crédito tiene un efecto positivo y significativo. Este hallazgo sugiere que los recursos financieros son esenciales

para las explotaciones a pequeña escala, que a menudo se enfrentan a limitaciones financieras debido a la escasez de garantías y de flujo de caja. El crédito permite a estos ganaderos invertir en prácticas sostenibles, como la rotación de pastos, la mejora de la calidad del forraje y los sistemas de riego eficientes. Por el contrario, los seguros no tienen un efecto significativo, lo que indica que es posible que los pequeños productores no dependan en gran medida de ellos para influir en la sostenibilidad de sus prácticas de producción. En el caso de las UP de tamaño medio, los seguros tienen un efecto negativo y significativo, lo que indica que los ganaderos asegurados de esta categoría pueden incurrir en prácticas insostenibles, como el exceso de carga ganadera, lo que conduce al pastoreo excesivo y al agotamiento de los recursos. La cobertura de los seguros puede reducir los incentivos para una gestión cuidadosa de los pastos y una planificación de la sostenibilidad a largo plazo, ya que la compensación económica proporciona una red de seguridad frente a posibles pérdidas. El acceso al crédito, sin embargo, no tiene un efecto significativo en las UP de tamaño medio. En el caso de los grandes productores, ni el crédito ni los seguros afectan de manera significativa a la sostenibilidad.

En el caso de las UP ganaderas de carne, el acceso al crédito tiene un efecto positivo y significativo, lo que sugiere que el apoyo financiero ayuda a los productores de carne a invertir en la mejora de infraestructura y en prácticas de manejo de pastos que contribuyen a obtener mejores resultados ambientales. Por el contrario, los seguros tienen un efecto negativo, aunque no significativo. En las UP lecheras, el acceso a los seguros tiene un efecto negativo y significativo, lo que respalda la hipótesis de que los ganaderos lecheros asegurados podrían aumentar en exceso el número de cabezas de ganado o sobreexplotar los recursos debido a la red de seguridad financiera que proporcionan los seguros. La producción lechera requiere un uso intensivo de recursos y exige una gestión cuidadosa de los alimentos balanceados, el agua y el estiércol, aspectos que pueden dejar de ser prioritarios cuando se percibe que la mitigación de riesgos financieros está en curso. Por el contrario, el acceso al crédito no muestra un efecto significativo, lo que sugiere que las UP lecheras pueden recurrir a fuentes alternativas de inversión para mejorar la sostenibilidad. En el caso de las UP de doble propósito, tanto el crédito como el seguro tienen efectos positivos y significativos. El efecto positivo del seguro en esta categoría podría indicar que los sistemas de producción diversificados proporcionan una mayor estabilidad financiera y una mejor gestión de los recursos, lo que permite a los ganaderos utilizar el seguro como herramienta de resiliencia en lugar de asumir riesgos. En el caso de las UP mixtas, el crédito tiene un efecto positivo y significativo, mientras que el efecto del seguro es negativo, aunque no significativo.

El PROGAN (Programa de Incentivos a la Productividad Ganadera) constituye el principal programa de subsidios destinado a potenciar la productividad, promover el uso sostenible de la tierra y mejorar los resultados ambientales, además de ofrecer servicios de extensión, como formación sobre técnicas de pastoreo rotativo, prácticas de conservación del agua y sistemas mejorados de gestión del estiércol. Los resultados indican que el apoyo gubernamental desempeña un papel fundamental en la promoción de prácticas de pastoreo sostenibles, y que tanto los subsidios

como los servicios de extensión aportan beneficios significativos en UP de diversos tamaños y tipos. Aunque ambos mecanismos contribuyen positivamente a la sostenibilidad, sus efectos varían según las diferentes escalas operativas y los sistemas de producción, lo que refleja las diferencias en el acceso a los recursos, los conocimientos y las necesidades operativas.

En el caso de las UP pequeñas, tanto los subsidios como los servicios de extensión mejoran significativamente la sostenibilidad. Esto refleja su dependencia del apoyo financiero para adoptar incluso prácticas sostenibles básicas, así como su mayor sensibilidad al conocimiento que proporcionan los servicios de extensión, dado su acceso limitado a los conocimientos especializados y a la infraestructura. Por el contrario, las UP de tamaño medio solo se benefician de los servicios de extensión, ya que los subsidios no son significativos para este grupo. Esto sugiere que las UP de tamaño medio aún carecen de la escala o de los incentivos financieros necesarios para realizar inversiones sustanciales en sostenibilidad y, en su lugar, dependen de la orientación técnica para optimizar sus prácticas. En el caso de las UP de gran tamaño, tanto los subsidios como los servicios de extensión muestran efectos positivos significativos, pero la naturaleza de su efecto difiere. Las grandes UP utilizan los subsidios para financiar tecnologías avanzadas que requieren un uso intensivo de recursos, como la alimentación de precisión y la gestión automatizada de residuos, y los servicios de extensión complementan estos esfuerzos proporcionando los conocimientos técnicos necesarios para implementar estas innovaciones de manera eficaz.

En el caso de las UP ganaderas de carne, los servicios de extensión mejoran significativamente la sostenibilidad, probablemente debido a su papel en la mejora de la gestión del pastoreo y del estiércol; sin embargo, los subsidios no muestran ningún efecto significativo, lo que refleja las limitaciones del apoyo financiero para abordar los problemas estructurales inherentes a los sistemas de pastoreo extensivo. También en el caso de las UP lecheras, los servicios de extensión son importantes para la sostenibilidad, ya que abordan las elevadas demandas de recursos de la producción, mientras que los subsidios siguen siendo no significativos, lo que sugiere que los incentivos financieros por sí solos no impulsan eficazmente el cambio en estos sistemas intensivos. En el caso de las UP de doble propósito, sin embargo, tanto los subsidios como los servicios de extensión aportan beneficios significativos, lo que refleja la sinergia entre el apoyo financiero y técnico para facilitar prácticas de gestión integradas que equilibran las exigencias de la producción de carne y de productos lácteos. Por último, en el caso de las UP mixtas, el efecto positivo tanto de los subsidios como de los servicios de extensión pone de relieve su papel combinado para respaldar los sistemas de producción diversificados, permitiendo inversiones en sistemas de alimentación y estrategias de gestión sostenible.

Los resultados revelan diferencias notables en los resultados de sostenibilidad vinculados a factores sociodemográficos, lo que refleja dinámicas estructurales y culturales más amplias en México. El género desempeña un papel significativo, especialmente en las UP más pequeñas, donde los productores varones se encuentran en mejor posición para adoptar prácticas sostenibles.

nibles debido a su mayor acceso a la tierra y a los recursos financieros. En las zonas rurales de México, las normas históricas y culturales suelen limitar la participación de las mujeres en la propiedad de la tierra y en la toma de decisiones, y sus responsabilidades en las tareas domésticas y agrícolas limitan su capacidad para centrarse en la implementación de iniciativas orientadas a la sostenibilidad. En las UP medianas y grandes, sin embargo, las disparidades de género no tienen un efecto significativo en la sostenibilidad. Estas UP suelen gestionarse como empresas formales, en las que las mujeres pueden ocupar puestos directivos o de copropiedad.

La educación muestra un efecto positivo y significativo de forma sistemática en la sostenibilidad en la mayoría de los tipos y tamaños de UP. En las UP medianas y grandes, los productores con estudios tienden a percibir la sostenibilidad como una inversión a largo plazo y cuentan con los conocimientos financieros necesarios para acceder a préstamos y adoptar prácticas avanzadas. Esta relación es especialmente marcada en los sistemas de doble propósito, donde la gestión de las complejidades de la producción tanto de carne como de leche requiere mayores niveles de conocimientos técnicos. Las UP pequeñas constituyen aquí la excepción: la educación tiene un efecto negativo y significativo, ya que la escasa escolarización formal y las limitaciones financieras suelen llevar a los ganaderos a recurrir a métodos tradicionales de baja intensidad. Esto pone de relieve las barreras estructurales a las que se enfrentan los pequeños productores a la hora de recurrir a la educación para alcanzar la sostenibilidad.

Por lo general, la edad presenta una correlación negativa con la sostenibilidad, ya que los productores de más edad suelen mostrarse más reacios a adoptar nuevas prácticas. Este efecto es especialmente significativo en el caso de los pequeños ganaderos, en quienes la falta de educación formal puede reforzar la resistencia al cambio, y en el de los grandes agricultores, que tienden en mayor medida a mantener prácticas de gestión tradicionales. Por el contrario, los productores más jóvenes, especialmente aquellos preocupados por el medio ambiente, se muestran más dispuestos a introducir mejoras en sus UP y a adoptar prácticas sostenibles que se ajusten a las demandas del mercado. Por último, aunque los resultados no muestran un efecto significativo de la identidad indígena sobre la sostenibilidad en general, el efecto negativo observado en los sistemas de doble propósito pone de relieve las presiones sobre los recursos asociadas a las tierras ejidales compartidas, que a menudo están vinculadas a las comunidades indígenas. La tabla A5 del apéndice muestra los resultados por tamaño y tipo utilizando el modelo de panel lineal; en general, los resultados son coherentes.

Tabla 4.1 Estimaciones de parámetros basadas en el ESI: regresión fraccional de panel, por tamaño y tipo

Variable	Pequeño	Mediano	Grande	Carne bovina	Lechería	Doble propósito	Mixto
Superficie de pastoreo	-0,00209* (0,00125)	4,61e-05 (0,000300)	-0,000784*** (0,000179)	-0,000367*** (0,000116)	-0,0174*** (0,00378)	-0,00245*** (0,000692)	-4,88e-05 (0,000133)
Ejidal	-0,0677*** (0,0222)	-0,0567* (0,0312)	0,00680 (0,0414)	-0,0264 (0,0184)	-0,00377 (0,0234)	-0,111*** (0,0282)	-0,0417 (0,0265)
Comunal	-0,0107 (0,0222)	-0,120** (0,0562)	0,150** (0,0616)	-4,76e-06 (0,0392)	-0,0509 (0,0482)	0,0995* (0,0578)	-0,0445 (0,0386)
Seguro	-0,156 (0,124)	-0,559*** (0,118)	-0,140 (0,117)	-0,00394 (0,112)	-0,242** (0,101)	0,205* (0,111)	-0,0852 (0,169)
Crédito	0,240*** (0,0819)	0,113 (0,0930)	0,0855 (0,0750)	0,116** (0,0585)	0,0537 (0,0648)	0,126** (0,0621)	0,140* (0,0743)
Subsidio	0,0842*** (0,0183)	-0,0410 (0,0341)	0,0971*** (0,0367)	0,0302 (0,0242)	-0,0144 (0,0274)	0,101*** (0,0308)	0,0573** (0,0265)
Extensión	0,602** (0,248)	0,298*** (0,0520)	0,233*** (0,0479)	0,619*** (0,0583)	0,407*** (0,0491)	0,401*** (0,0645)	0,529*** (0,0535)
Educación	-0,00785** (0,00346)	0,0188*** (0,00378)	0,00647** (0,00326)	0,0185*** (0,00321)	0,0162*** (0,00342)	0,0227*** (0,00281)	0,0165*** (0,00369)
Hombre	0,139*** (0,0506)	0,0420 (0,0700)	-0,0116 (0,0614)	-0,00181 (0,0432)	-0,0251 (0,0417)	0,0787 (0,0603)	0,104** (0,0501)
Indígena	-0,00379 (0,0374)	-0,0210 (0,0838)	-0,0298 (0,0818)	0,0112 (0,0496)	-0,0222 (0,0583)	-0,166*** (0,0546)	0,00832 (0,0560)
Edad	-0,00442*** (0,00132)	0,000518 (0,00148)	-0,00465*** (0,00135)	-0,00173 (0,00110)	0,000106 (0,000981)	-0,000230 (0,00134)	-0,00241 (0,00147)
Constante	0,0773 (0,0909)	-0,217* (0,119)	0,260** (0,107)	-0,458*** (0,0816)	-0,0578 (0,0780)	-0,590** (0,237)	-0,0973 (0,107)
Observaciones	4.880	4.486	2.823	4.543	3.161	3.712	4.705
Efectos fijos de año	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Efectos fijos municipales	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Efectos fijos de estado × año	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Errores estándar robustos entre paréntesis. ***p < 0,01, **p < 0,05, *p < 0,1.
Nota: La variable dependiente es el ESI correspondiente.

Para verificar la solidez de nuestros resultados, hemos analizado el orden de clasificación de la sostenibilidad en tres escenarios de sensibilidad, en los que se varía el orden de una práctica de gestión con respecto al escenario anterior, tal como se muestra en la tabla A2.



Sensibilidad 1: La rotación de potreros ocupa un lugar más alto que el pastoreo controlado. Este ajuste se justifica porque la rotación de potreros fomenta el movimiento frecuente del ganado, lo que garantiza una distribución más uniforme del estiércol, un mejor ciclo de nutrientes y una mayor retención de agua. Por el contrario, el pastoreo controlado puede permitir periodos de pastoreo más prolongados en cada sección, lo que podría dar lugar a una degradación localizada si no se gestiona adecuadamente. Por lo tanto, la rotación de potreros puede ofrecer una mejor recuperación de los pastos y una mayor eficiencia de la tierra, lo que la convierte en una opción más sostenible.



Sensibilidad 2: Los sistemas de semiestabulación obtienen una puntuación más alta que los sistemas de estabulación total. Aunque ambos sistemas implican zonas de pastoreo limitadas, los sistemas semiestabulados permiten el acceso al aire libre, lo que reduce los riesgos asociados a la acumulación de estiércol, la contaminación del agua y la contaminación atmosférica que se dan en los sistemas totalmente estabulados. Además, los sistemas semiestabulados permiten que el ganado pade de forma natural, lo que puede contribuir a un mejor aprovechamiento de los pastos y al bienestar animal, y se ajusta mejor a los objetivos de sostenibilidad.



Sensibilidad 3: Los sistemas de producción estabulados se consideran los menos sostenibles. Este cambio refleja el hecho de que los sistemas de producción en recintos cerrados requieren una gestión intensiva de los recursos para la eliminación de residuos, el abastecimiento de piensos y el control de las emisiones. A diferencia de los sistemas de pastoreo libre y de semiestabulación, los sistemas de cría en recintos cerrados dependen totalmente de los insumos alimenticios externos y generan altas concentraciones de residuos, lo que conlleva mayores riesgos ambientales si la gestión del estiércol es inadecuada.

El análisis de sensibilidad pone de relieve la importancia de contextualizar las clasificaciones de sostenibilidad basándose en factores como el ciclo de los nutrientes, la gestión del estiércol, la dependencia de los piensos y la eficiencia en el uso de la tierra, garantizando así que las evaluaciones de sostenibilidad tengan en cuenta las variaciones prácticas en el rendimiento de los sistemas de producción. La tabla A6 del apéndice muestra los resultados del análisis de sensibilidad. Observamos que nuestros resultados principales son coherentes bajo diferentes criterios de sostenibilidad. Por lo tanto, las conclusiones de este artículo pueden suponer una contribución importante al generar evidencia aplicable para políticas y programas que puedan promover prácticas ganaderas sostenibles. Dado que la ganadería es vital para los medios de vida rurales y la seguridad alimentaria, y que además afecta al cambio climático, los hallazgos podrían tener importantes implicaciones de política y prácticas para la transición hacia la sostenibilidad ambiental en todo el sector ganadero de México.



4.5 Conclusión

Este estudio examina las barreras para la adopción de prácticas de producción sostenibles en México, utilizando un conjunto de datos a nivel municipal elaborado a partir de datos a nivel de UP de los censos agropecuarios de 2007 y 2022. A partir de este conjunto de datos, desarrollamos un índice de sostenibilidad ambiental para evaluar la adopción de prácticas sostenibles. Mediante un modelo de regresión de panel fraccionado, analizamos la influencia de factores estructurales, financieros y sociodemográficos en los resultados de sostenibilidad. Nuestros hallazgos brindan información útil sobre los complejos retos que rodean a la sostenibilidad en la producción ganadera.

Los resultados muestran que los municipios con mayores superficies de pastoreo son más propensos a presentar prácticas insostenibles, lo que refleja las presiones sobre los recursos asociadas a los sistemas de pastoreo extensivo. Los regímenes de tenencia de la tierra también presentan importantes barreras estructurales; las tierras ejidales muestran una menor sostenibilidad en comparación con las tierras privadas o comunales, lo que pone de relieve los retos de gobernanza y las ineficiencias en la gestión de los recursos de uso común. Por el contrario, el acceso a apoyo financiero y técnico, como créditos, subsidios y servicios de extensión, mejora significativamente la sostenibilidad al permitir a los productores adoptar prácticas avanzadas e invertir en infraestructura sostenible. Sin embargo, los seguros tienen una asociación negativa con la sostenibilidad, probablemente debido al riesgo moral: las redes de seguridad financiera reducen los incentivos para adoptar prácticas sostenibles.

El análisis de la heterogeneidad entre los distintos tamaños y tipos de UP revela una dinámica matizada. Las UP pequeñas se benefician de manera importante de los servicios de extensión y los subsidios, lo que refleja su dependencia del apoyo externo para superar las limitaciones de recursos y conocimientos. Las UP medianas se benefician principalmente del apoyo técnico,

ya que las limitaciones financieras y la falta de economías de escala dificultan las inversiones sustanciales en sostenibilidad. En el caso de las UP de gran tamaño, tanto los subsidios como los servicios de extensión facilitan la adopción de tecnologías avanzadas, lo que pone de relieve la importancia de un apoyo financiero y técnico integrado. Entre los distintos tipos de UP, las de doble propósito y las mixtas son las que obtienen mayores beneficios del apoyo gubernamental, lo que refleja su capacidad para equilibrar las demandas de uso intensivo de recursos con prácticas de gestión sostenible. Además, la educación mejora sistemáticamente la sostenibilidad, especialmente en el caso de las UP medianas y grandes, y los productores más jóvenes demuestran una mayor adaptabilidad a las prácticas sostenibles, probablemente impulsada por la conciencia ambiental y las oportunidades de mercado.

Las recomendaciones de política incluyen el fortalecimiento de las estructuras de gobernanza de las tierras ejidales para abordar los retos de gestión de los recursos de uso común y mejorar la coordinación entre los usuarios de la tierra. Es fundamental ampliar el acceso al crédito y a los servicios de extensión, ya que estos recursos mejoran significativamente la sostenibilidad en UP de todos los tamaños y tipos, al facilitar las inversiones en prácticas avanzadas y proporcionar a los ganaderos conocimientos técnicos esenciales. Sin embargo, el acceso sigue siendo limitado, ya que solo el 4% de las UP se benefician actualmente de los servicios de extensión. El diseño de programas a medida que atiendan a las necesidades específicas de las UP pequeñas, medianas y grandes también es importante para garantizar un acceso equitativo a los mecanismos de apoyo y la adopción efectiva de prácticas sostenibles. Estas recomendaciones podrían incorporarse a las políticas mediante la modificación de las normas de funcionamiento del PROGAN, la principal iniciativa del Gobierno mexicano para mejorar la productividad ganadera, con el fin de armonizar mejor sus objetivos con las metas de sostenibilidad.

Las investigaciones futuras deberían analizar los beneficios a largo plazo de estas intervenciones, en particular su eficacia para promover mejores prácticas de pastoreo y mejorar los resultados ambientales con el paso del tiempo. Además, el estudio del papel de los incentivos basados en el mercado, como los créditos de carbono, los sistemas de certificación o los subsidios vinculados a la sostenibilidad, podría aportar información valiosa sobre cómo los mecanismos económicos podrían fomentar aún más la adopción de prácticas sostenibles.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada por el Banco Interamericano de Desarrollo a través del proyecto “Tecnologías para la producción ganadera sostenible en América Latina y el Caribe”. Agradecemos a Samanta Pacheco Morales su ayuda en la depuración de datos y la búsqueda bibliográfica. Quisiéramos dar las gracias al Comité Científico del BID por sus útiles comentarios y sugerencias. Asimismo, estamos en deuda con los participantes en los congresos de 2025 de la AERE, la EAERE y la AAEA por sus comentarios sobre versiones anteriores de este manuscrito. Este proyecto no habría sido posible sin el apoyo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), que facilitó el acceso a los microdatos del censo agrícola.



Referencias



- Adesina, A. A. y J. Baidu-Forson. 1995. "Farmers' Perceptions and Adoption of New Agricultural Technology: Evidence from Analysis in Burkina Faso and Guinea, West Africa." *Agricultural Economics* 13 (1): 1–9.
- Aguilar-Gallegos, N., M. Muñoz-Rodríguez, H. Santoyo-Cortés, J. Aguilar-Ávila y L. Klerkx. 2015. "Information Networks That Generate Economic Value: A Study on Clusters of Adopters of New or Improved Technologies and Practices among Oil Palm Growers in Mexico." *Agricultural Systems* 135: 122–132.
- Alkan Olsson, J., C. Bockstaller, L. Stapleton, F. Ewert, R. Knapen, O. Therond, G. Geniaux et al. 2009. "A Goal-Oriented Indicator Framework to Support Integrated Assessment of New Policies for Agri-Environmental Systems." *Environmental Science and Policy* 12: 562–572.
- Alvez, J. P., A. L. Schmitt, J. C. Farley, J. D. Erickson y V. E. Méndez. 2014. "Transition from Semi-Confinement to Pasture-Based Dairy in Brazil: Farmers' View of Economic and Environmental Performances." *Agroecology and Sustainable Food Systems* 38 (9): 995–1014.
- Baumgart-Getz, A., L. S. Prokopy y K. Floress. 2012. "Why Farmers Adopt Best Management Practices in the United States: A Meta-Analysis of the Adoption Literature." *Journal of Environmental Management* 96 (1): 17–25.
- Bilotta, G. S., R. E. Brazier y P. M. Haygarth. 2007. "The Impacts of Grazing Animals on the Quality of Soils, Vegetation, and Surface Waters in Intensively Managed Grasslands." *Advances in Agronomy* 94: 237–280.
- Blackstock, K. L., J. Ingram, R. Burton, K. M. Brown y B. Slee. 2010. "Understanding and Influencing Behaviour Change by Farmers to Improve Water Quality." *Science of the Total Environment* 408 (23): 5631–5638.
- Bockstaller, C., L. Guichard, D. Makowski, A. Aveline, P. Girardin y S. Plantureux. 2008. "Agri-Environmental Indicators to Assess Cropping and Farming Systems: A Review." *Agronomy for Sustainable Development* 28: 139–149.
- Borhan, M. S., S. Mukhtar, S. Capareda, S. Rahman y L. F. M. Rebellon. 2012. "Greenhouse Gas Emissions from Housing and Manure Management Systems at Confined Livestock Operations." En *Waste Management—An Integrated Vision*, editado por L. F. M. Rebellon, 259–296. Rijeka, Croacia: InTech.
- Bravo-Medina, C., H. Marín, P. Marrero-Labrador, M. E. Ruiz, B. Torres-Navarrete, H. Navarrete-Alvarado, G. Durazno-Alvarado y D. Changoluisa-Vargas. 2017. "Evaluación de la sustentabilidad mediante indicadores en unidades de producción de la provincia de Napo, Amazonia ecuatoriana." *Biogro* 29 (1): 23–36.
- Chamberlain, G. 1980. "Analysis of Covariance with Qualitative Data." *Review of Economic Studies* 47 (1): 225–238.

- Chand, P., S. Sirohi y S. K. Sirohi. 2011. "Using Sustainable Production Index for Development of Livestock Sector: Case Study of an Arid Region in India." *Journal of Applied Animal Research* 39 (3): 234–238.
- . 2015. "Development and Application of an Integrated Sustainability Index for Small-Holder Dairy Farms in Rajasthan, India." *Ecological Indicators* 56: 23–30.
- Chevalier, J. M. y D. J. Buckles. 2013. *Participatory Action Research: Theory and Methods for Engaged Inquiry*. Routledge.
- De Janvry, A. y E. Sadoulet. 2001. "Income Strategies among Rural Households in Mexico: The Role of Off-Farm Activities." *World Development* 29 (3): 467–480.
- Eggers, M., M. Kayser y J. Isselstein. 2014. "Grassland Farmers' Attitudes toward Climate Change in the North German Plain." *Regional Environmental Change* 14 (4): 1–11.
- Garg, M. R., P. L. Sherasia, B. T. Phondba y S. A. Hossain. 2014. "Effect of Feeding a Balanced Ration on Milk Production, Microbial Nitrogen Supply and Methane Emissions in Field Animals." *Animal Production Science* 54 (10): 1657–1661.
- Gebremedhin, B., J. Pender y G. Tesfay. 2004. "Collective Action for Grazing Land Management in Crop–Livestock Mixed Systems in the Highlands of Northern Ethiopia." *Agricultural Systems* 82 (3): 273–290. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2004.07.004>.
- Gillespie, J., S. A. Kim y K. Paudel. 2007. "Why Don't Producers Adopt Best Management Practices? An Analysis of the Beef Cattle Industry." *Agricultural Economics* 36 (1): 89–102.
- Goodland, R. 1995. "The Concept of Environmental Sustainability." *Annual Review of Ecology and Systematics* 26 (1): 1–24.
- Hayati, D. 2017. *A Literature Review on Frameworks and Methods for Measuring and Monitoring Sustainable Agriculture*. Informe técnico de Global Strategy 22. Roma.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 1991. Censo Agropecuario 1991. <https://www.inegi.org.mx/programas/cagf/1991/>.
- . 2007. Censo Agropecuario 2007. <https://www.inegi.org.mx/programas/cagf/2007/>.
- . 2022. Censo Agropecuario 2022. <https://www.inegi.org.mx/programas/ca/2022/>.
- Jara de García, G. P. T., L. M. Durand-Chávez, H. A. Quispe-Ccasa, J. L. Linares-Rivera, G. T. S. Portocarrero, R. C. Tito, H. V. V. Pérez et al. 2023. "Sustainability of Livestock Farms: The Case of the District of Moyobamba, Peru." *Helyon* 9 (2).

- Karali, E., B. Brunner, R. Doherty, A. Hersperger y M. Rounsevell. 2014. "Identifying the Factors That Influence Farmer Participation in Environmental Management Practices in Switzerland." *Human Ecology* 42 (6): 951–963.
- Knowler, D. y B. Bradshaw. 2007. "Farmers' Adoption of Conservation Agriculture: A Review and Synthesis of Recent Research." *Food Policy* 32 (1): 25–48.
- Kollmuss, A. y J. Agyeman. 2002. "Mind the Gap: Why Do People Act Environmentally and What Are the Barriers to Pro-Environmental Behavior?" *Environmental Education Research* 8 (3): 239–260.
- Lai, L. y S. Kumar. 2020. "A Global Meta-Analysis of Livestock Grazing Impacts on Soil Properties." *PloS One* 15 (8): e0236638.
- Lebacqz, T., P. V. Baret y D. Stilmant. 2012. "Sustainability Indicators for Livestock Farming: A Review." *Agronomy for Sustainable Development* 33 (2): 311–327.
- Loera, J. y J. Banda. 2017. "Industria lechera en México: parámetros de la producción de leche y abasto del mercado interno." *Revista de Investigaciones Altoandinas* 19 (4): 419–426. <https://doi.org/10.18271/ria.2017.317>.
- López, E. 2025. "Ganadería bovinos carne: actividad sustentable en México." Consejo Mexicano de la Carne. <https://comecarne.org/ganaderia-bovinos-carne-actividad-sustentable-en-mexico/>.
- MacLeod, M., D. Moran, V. Eory, R. M. Rees, A. Barnes, C. F. Topp, B. Ball et al. 2015. "Developing Greenhouse Gas Marginal Abatement Cost Curves for Agricultural Emissions from Crops and Soils in the UK." *Agricultural Systems* 103: 198–209.
- Mayrhofer, P., C. Steiner y E. Gärber. 1996. *Regional Programm Ökopunkte Niederösterreich*. Informationsheft. Viena: NÖ Landschaftsfonds.
- Meul, M., S. Van Passel, F. Nevens, J. Dessein, E. Rogge, A. Mulier y A. Van Hauwermeiren. 2008. "MOTIFS: A Monitoring Tool for Integrated Farm Sustainability." *Agronomy for Sustainable Development* 28 (2): 321–332.
- Mills, J., P. Gaskell, J. Ingram, J. Dwyer, M. Reed y C. Short. 2017. "Engaging Farmers in Environmental Management through a Better Understanding of Behaviour." *Agriculture and Human Values* 34 (2): 283–299.
- Papke, L. E. y J. M. Wooldridge. 1996. "Econometric Methods for Fractional Response Variables with an Application to 401(k) Plan Participation Rates." *Journal of Applied Econometrics* 11 (6): 619–632.

- . 2008. "Panel Data Methods for Fractional Response Variables with an Application to Test Pass Rates." *Journal of Econometrics* 145 (1–2): 121–133.
- Pimentel, D. y N. Kounang. 1998. "Ecology of Soil Erosion in Ecosystems." *Ecosystems* 1 (5): 416–426.
- Prokopy, L. S., K. Floress, D. Klotthor-Weinkauff y A. Baumgart-Getz. 2008. "Determinants of Agricultural Best Management Practice Adoption: Evidence from the Literature." *Journal of Soil and Water Conservation* 63 (5): 300–311.
- Prokopy, L. S., K. Floress, J. G. Arbuckle, S. P. Church, F. R. Eanes, Y. Gao, B. M. Gramig et al. 2019. "Adoption of Agricultural Conservation Practices in the United States: Evidence from 35 Years of Quantitative Literature." *Journal of Soil and Water Conservation* 74 (5): 520–534.
- Rochecouste, J. F., P. Dargusch, D. Cameron y C. Smith. 2015. "An Analysis of the Socio-Economic Factors Influencing the Adoption of Conservation Agriculture as a Climate Change Mitigation Activity in Australian Dryland Grain Production." *Agricultural Systems* 135: 20–30.
- Sadok, W., F. Angevin, J. E. Bergez, C. Bockstaller, B. Colomb, L. Guichard, R. Reau y T. Doré. 2008.

Apéndice



Tabla A.4.1 México: distribución de las prácticas agropecuarias, por estado

Estado	Pastoreo libre	Pastoreo controlado	Estabulado	Semi estabulado	Uso de alimentos balanceados	Rotación de potreros	Unidades de Producción (miles)	Cabezas (miles)
Aguascalientes	37,6	12,7	28,1	16,2	34,8	22,1	7,4	273,6
Baja California	46,9	10,9	20,7	10,3	36,8	23,3	1,5	259,2
Baja California Sur	78,4	4,3	4,7	8,1	60,2	11,8	2,9	122,7
Campeche	66,0	28,3	6,3	9,4	12,7	40,3	17,2	572,4
Coahuila	59,3	8,6	8,7	6,2	25,2	17,0	8,8	621,2
Colima	63,3	20,9	7,1	4,5	32,8	46,7	4,7	124,7
Chiapas	44,4	12,9	3,1	5,9	9,9	35,4	93,5	1.614,5
Chihuahua	63,6	10,7	11,9	8,3	45,4	36,8	34,8	1.742,5
Ciudad de México	5,3	4,2	11,1	5,3	16,8	5,6	0,7	6,4
Durango	63,6	10,7	10,1	10,1	37,4	35,1	34,4	1.576,3
Guanajuato	23,6	6,5	14,1	6,6	19,2	10,7	35,3	551,8
Guerrero	32,3	16,8	6,6	4,8	23,5	33,5	63,7	982,5
Hidalgo	17,9	4,3	8,6	4,0	11,7	14,6	35,7	352,1
Jalisco	60,7	20,5	21,7	18,3	38,7	37,8	57,0	2.116,0
México	9,3	3,5	5,8	2,9	12,4	6,9	58,1	413,6
Michoacán	37,1	8,7	6,7	5,5	27,3	30,4	50,8	1.238,9
Morelos	25,7	11,2	11,9	11,9	29,3	19,8	7,3	108,9
Nayarit	49,9	29,6	3,9	3,4	22,3	56,7	17,1	458,8
Nuevo León	54,3	11,2	7,8	5,3	20,9	23,6	11,4	541,1
Oaxaca	28,6	10,8	5,2	3,2	7,7	23,6	80,1	905,5
Puebla	13,7	3,2	7,9	2,9	10,0	7,3	41,6	369,0
Querétaro	24,9	5,6	9,2	6,0	16,5	15,0	10,6	326,9
Quintana Roo	56,1	23,2	4,4	14,9	13,8	36,6	3,7	86,2
San Luis Potosí	37,0	9,2	7,6	5,0	16,5	23,2	37,8	963,3
Sinaloa	50,8	21,2	5,6	10,1	40,2	49,2	20,4	938,3
Sonora	81,4	15,8	11,8	13,3	54,3	46,8	20,0	1.251,3
Tabasco	65,4	31,0	7,2	7,6	8,7	34,3	50,7	1.382,0
Tamaulipas	57,4	21,3	4,1	3,6	23,3	40,9	18,0	621,0
Tlaxcala	2,9	0,9	10,0	2,5	12,4	0,7	10,3	61,7
Veracruz	55,7	19,2	2,7	2,9	18,2	43,3	115,0	2.694,0
Yucatán	40,1	19,2	7,1	12,9	25,6	37,7	13,4	381,5
Zacatecas	55,4	7,3	9,4	6,1	19,8	31,3	38,5	895,7
Total	42,9	13,6	7,7	6,3	20,6	30,0	1.002,7	24.553,6

Fuente: Elaboración propia con base en INEGI (2022). Nota: Las cifras representan la proporción del total de fincas que implementan cada práctica en cada estado. Dado que las fincas pueden adoptar múltiples prácticas y estas no son mutuamente excluyentes, los totales por estado superan el 100%.

Tabla A.4.2 Índice de sostenibilidad ambiental: ponderaciones específicas por práctica

Práctica	Características de sostenibilidad	w_j	Sensibilidad		
			1	2	3
Pastoreo libre	Suele conducir al sobrepastoreo, la degradación del suelo, la contaminación del agua y la pérdida de cobertura vegetal. La concentración de ganado puede afectar la salud del suelo y los ecosistemas locales (Billota et al., 2007; Prokopy et al., 2019).	-2	-2	-2	-1
Semiconfinado	Ofrece algunos beneficios ambientales, como la reducción de la compactación del suelo y el sobrepastoreo, pero la concentración del estiércol aumenta los desafíos de manejo (Alvez et al., 2014).	-1	-1	0,5	-0,5
Confinado	La concentración de estiércol suele generar contaminación del aire (amoníaco y metano) y contaminación del agua. Requiere recursos importantes para manejar los residuos y mitigar los efectos ambientales (Borhan et al., 2012).	-0,5	-0,5	-0,5	-2
Rotación de potreros	Promueve el ciclo de nutrientes, reduce el sobrepastoreo y mejora la retención de agua en los suelos. Opción relativamente sostenible (Teague et al., 2013).	1	2	2	2
Pastoreo controlado	La rotación del ganado optimiza el uso de los pastos y permite su regeneración. Mejora la salud del suelo, reduce la erosión y mejora la distribución del estiércol, lo que disminuye los riesgos de contaminación (Sanjari et al., 2009).	2	1	1	1
Alimentación balanceada	Mejora la nutrición animal y reduce las emisiones de metano y los residuos de estiércol. Promueve una conversión alimenticia eficiente, lo que reduce los daños ambientales de la ganadería, como la contaminación por sobrecarga de nutrientes y las emisiones de metano. Opción altamente sostenible (Garg et al., 2014).	3	3	3	3

Tabla A.4.3 Estadísticas descriptivas

Variable	Descripción	N	Media	DE	Mín.	Máx.
sust_index_0722	ESI de 2007 y 2022	4.890	0,402	0,112	0,00	1,00
farms_grazing_p	Fincas con pastoreo libre (proporción)	4.890	0,320	0,266	0,00	1,00
farms_grazingc_p	Fincas con pastoreo controlado (proporción)	4.890	0,095	0,116	0,00	0,87
farms_stabled_p	Fincas con ganado confinado (proporción)	4.890	0,077	0,105	0,00	1,00
farms_semi_p	Fincas con ganado semiconfinado (proporción)	4.890	0,058	0,075	0,00	1,00
farms_balfeed_p	Fincas con alimentación balanceada (proporción)	4.890	0,166	0,175	0,00	1,00
farms_padrot_p	Fincas con rotación de potreros (proporción)	4.890	0,171	0,196	0,00	0,92
area_grazing	Superficie de pastoreo (1.000 hectáreas)	4.890	13,600	56,690	0,00	1.078
ejidal_p	Tierras ejidales (proporción)	4.890	0,348	0,308	0,00	1,00
communal_p	Tierras comunales (proporción)	4.890	0,170	0,322	0,00	1,00
private_p	Tierras privadas (proporción)	4.890	0,475	0,331	0,00	1,00
farms_insurance_p	Fincas con seguro (proporción)	4.890	0,008	0,024	0,00	0,45
farms_credit_p	Fincas con crédito (proporción)	4.890	0,043	0,063	0,00	0,53
farms_subsid_p	Fincas con subsidios (proporción)	4.890	0,408	0,225	0,00	1,00
farms_exten_p	Fincas con servicios de extensión (proporción)	4.890	0,037	0,052	0,00	0,83
farmers_educ	Años promedio de educación de los productores	4.890	5,060	2,201	0,00	17,0
farmers_male_p	Productores hombres (proporción)	4.890	0,885	0,068	0,25	1,00
farmers_indigenous_p	Productores indígenas (proporción de productores que hablan una lengua nativa)	4.890	0,233	0,346	0,00	1,00
farmers_age	Edad promedio de los productores	4.890	55,510	4,179	36,0	79,0

Fuente: Elaboración propia con base en datos del INEGI (2007, 2022).

Tabla A.4.4 Estimaciones de parámetros basadas en el ESI: modelos de panel lineal y fraccional

Variable	Panel lineal (modelo 1)	Panel fraccional (modelo 2)
area_grazing	-0,000165*** (3,07e-05)	-0,000655*** (0,000216)
ejidal_p	0,00338 (0,00620)	-0,105*** (0,0298)
communal_p	-0,0151** (0,00679)	-0,0337 (0,0252)
farms_insurance_p	-0,357*** (0,0713)	-1,012*** (0,160)
farms_credit_p	0,123*** (0,0320)	0,238*** (0,0878)
farms_subsid_p	0,00390 (0,00838)	0,0811*** (0,0237)
farms_exten_p	0,464*** (0,0382)	0,979*** (0,0932)
farmers_educ	0,00737*** (0,00132)	0,0193*** (0,00426)
farmers_male_p	0,0397* (0,0241)	0,152** (0,0703)
farmers_indigenous_p	-0,0241*** (0,00566)	0,0734 (0,0615)
farmers_age	-0,00107** (0,000462)	-0,000859 (0,00152)
Constante	0,441*** (0,0467)	-0,107 (0,118)
Observaciones	4.890	4.890
Efectos fijos de año	Sí	Sí
Efectos fijos municipales	Sí	Sí
Efectos fijos de estado × año	Sí	Sí

Errores estándar robustos entre paréntesis. ***p < 0,01, **p < 0,05, *p < 0,1.
Nota: La variable dependiente es el ESI.

Tabla A.4.5 Estimaciones de parámetros basadas en el ESI: modelo de panel lineal, por tamaño y tipo

Variable	Pequeño	Mediano	Grande	Carne bovina	Leche	Doble propósito	Mixto
area_grazing	-0,000646 (0,000660)	1,28e-05 (0,000146)	0,000281*** (9,60e-05)	-0,00011* (5,73e-05)	-0,00620*** (0,00183)	-0,000833** (0,000343)	-1,56e-05 (6,48e-05)
ejidal_p	-0,0239** (0,0116)	-0,0196 (0,0161)	0,00236 (0,0220)	-0,0101 (0,00919)	-0,00133 (0,0119)	-0,0394*** (0,0143)	-0,0139 (0,0134)
communal_p	-0,00381 (0,0118)	-0,0408 (0,0280)	0,0539* (0,0318)	-0,00226 (0,0190)	-0,0180 (0,0249)	0,0359 (0,0294)	-0,0164 (0,0186)
farms_insurance_p	-0,0632 (0,0622)	-0,204*** (0,0597)	-0,0500 (0,0629)	0,00485 (0,0568)	-0,0861 (0,0530)	0,0771 (0,0580)	-0,0385 (0,0733)
farms_credit_p	0,0910** (0,0425)	0,0416 (0,0486)	0,0314 (0,0389)	0,0420 (0,0290)	0,0173 (0,0333)	0,0442 (0,0311)	0,0507 (0,0375)
farms_subsid_p	0,0304*** (0,00965)	-0,0158 (0,0171)	0,0367* (0,0195)	0,0107 (0,0119)	-0,00469 (0,0137)	0,0368** (0,0155)	0,0187 (0,0131)
farms_exten_p	0,229* (0,135)	0,108*** (0,0265)	0,0885*** (0,0251)	0,228*** (0,0307)	0,149*** (0,0257)	0,150*** (0,0339)	0,197*** (0,0275)
farmers_educ	-0,00256 (0,00179)	0,00648*** (0,00187)	0,00240 (0,00173)	0,00668*** (0,00163)	0,00578*** (0,00174)	0,00818*** (0,00142)	0,00587*** (0,00184)
farmers_male_p	0,0497* (0,0264)	0,0128 (0,0350)	-0,00545 (0,0326)	-0,000807 (0,0211)	-0,00876 (0,0209)	0,0278 (0,0300)	0,0356 (0,0246)
farmers_indigenous_p	-0,000464 (0,0200)	-0,00323 (0,0412)	-0,0121 (0,0430)	0,00290 (0,0248)	-0,00757 (0,0292)	-0,0580** (0,0268)	0,00353 (0,0273)
farmers_age	-0,00160** (0,000693)	0,000196 (0,000739)	-0,00172** (0,000702)	-0,000622 (0,000549)	4,00e-05 (0,000495)	-6,61e-05 (0,000675)	-0,000841 (0,000727)
Constante	0,431*** (0,0431)	0,317*** (0,0540)	0,510*** (0,0537)	0,329*** (0,0386)	0,342*** (0,0380)	0,312*** (0,0478)	0,330*** (0,0495)
Observaciones	4.880	4.486	2.823	4.543	3.161	3.712	4.705
R cuadrado	0,243	0,176	0,158	0,294	0,232	0,171	0,159
Municipios	2.461	2.335	1.588	2.426	1.881	2.152	2.445
Efectos fijos de año	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Efectos fijos municipales	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Efectos fijos de estado × año	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Errores estándar robustos entre paréntesis. ***p < 0,01, **p < 0,05, *p < 0,1.
Nota: La variable dependiente es el ESI correspondiente.

Tabla A.4.6. Análisis de sensibilidad

Variable	ESI 1 Panel	ESI 1 Fraccional	ESI 2 Panel	ESI 2 Fraccional	ESI 3 Panel	ESI 3 Fraccional
area_grazing	-0,000239** (0,000120)	-0,000727*** (0,000233)	-0,000209* (0,000118)	-0,000634*** (0,000227)	-0,000195* (0,000116)	-0,000563** (0,000224)
ejidal_p	-0,0398** (0,0157)	-0,107*** (0,0298)	-0,0334** (0,0155)	-0,0883*** (0,0294)	-0,0400** (0,0162)	-0,112*** (0,0320)
communal_p	-0,00948 (0,0124)	-0,0251 (0,0236)	-0,0126 (0,0119)	-0,0331 (0,0226)	-0,00863 (0,0124)	-0,0242 (0,0260)
farms_insurance_p	-0,404*** (0,0895)	-1,127*** (0,170)	-0,394*** (0,100)	-1,104*** (0,191)	-0,392*** (0,0927)	-1,109*** (0,180)
farms_credit_p	0,0628 (0,0432)	0,175** (0,0812)	0,0599 (0,0443)	0,165** (0,0828)	0,0547 (0,0396)	0,160** (0,0779)
farms_subsid_p	0,0453*** (0,0123)	0,125*** (0,0235)	0,0387*** (0,0126)	0,106*** (0,0240)	0,0458*** (0,0121)	0,129*** (0,0243)
farms_exten_p	0,450*** (0,0491)	1,193*** (0,0931)	0,470*** (0,0512)	1,248*** (0,0967)	0,469*** (0,0508)	1,235*** (0,0988)
farmers_educ	0,0156*** (0,00227)	0,0413*** (0,00433)	0,0111*** (0,00231)	0,0294*** (0,00438)	0,0204*** (0,00232)	0,0584*** (0,00461)
farmers_male_p	0,0510 (0,0376)	0,141** (0,0715)	0,0550 (0,0423)	0,147* (0,0800)	0,0648* (0,0364)	0,188** (0,0731)
farmers_indigenous_p	0,0386 (0,0310)	0,0990* (0,0591)	0,0231 (0,0312)	0,0578 (0,0594)	0,0345 (0,0261)	0,0924* (0,0527)
farmers_age	-4,10e-05 (0,000766)	-0,000103 (0,00145)	-0,000370 (0,000775)	-0,000878 (0,00146)	0,00106 (0,000756)	0,00290* (0,00151)
Constante	0,263*** (0,0579)	-0,273** (0,115)	0,309*** (0,0614)	-0,112 (0,121)	0,112** (0,0568)	-0,853*** (0,117)
Observaciones	4.890	4.890	4.890	4.890	4.890	4.890
Municipios	2.464		2.464		[Revisar: 0,464]	
Efectos fijos de año	Sí	Sí	Sí	Sí	[Revisar: 2,464]	
Efectos fijos municipales	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí
Efectos fijos de estado × año	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí

Errores estándar robustos entre paréntesis. ***p < 0,01, **p < 0,05, *p < 0,1.

5

DECISIONES EN MATERIA DE GANADERÍA EN UNA FRONTERA POSCONFLICTO: EVIDENCIA DE LA ORINOQUÍA COLOMBIANA

Hernando Flórez-Díaz, Emiliano-López Barrera,
Adriana María Molina-Romero, Diana Elisa
Correa-Pinilla y Carlos Fontanilla-Díaz

A Colombian flag with horizontal stripes of yellow, blue, and red is waving on a white flagpole against a clear blue sky. The flag is partially obscured by a white rectangular box containing text.

Resumen

La región de la Orinoquía, la última frontera agrícola de Colombia, presenta tanto oportunidades como retos para la producción ganadera sostenible. Las iniciativas destinadas a promover la producción ganadera sostenible hacen hincapié en la mejora del manejo de las praderas y en una carga animal ecológicamente adecuada; sin embargo, su adopción varía considerablemente debido a limitaciones institucionales, económicas y biofísicas. Este estudio aplica un marco de modelización de elección binaria dual para examinar dos decisiones relacionadas: la adopción de un manejo sostenible de las praderas y el mantenimiento de la carga animal sostenible. Nuestro enfoque permite realizar estimaciones tanto secuenciales como independientes para evaluar si estas decisiones están interrelacionadas o si están determinadas por factores distintos. Los resultados ponen de relieve el papel central de la seguridad de la tenencia: la propiedad de la tierra aumenta significativamente la probabilidad de adoptar prácticas sostenibles. El apoyo institucional —en particular, la asistencia técnica y el uso de tecnología— también fomenta la adopción, aunque los efectos varían según el contexto. Los ganaderos de más edad y con mayor experiencia son menos propensos a adoptarlas, lo que sugiere una dependencia de la trayectoria. En cuanto a las decisiones sobre la carga ganadera, los sistemas de pastoreo rotacional y alterno se asocian con menores probabilidades de mantener tasas sostenibles, lo que probablemente refleja la complejidad de la implementación y las limitaciones de recursos. Las zonas de ceba más extensas se correlacionan con resultados menos sostenibles, posiblemente debido a ineficiencias en los sistemas con baja carga animal que entrañan el riesgo de degradación de la tierra o deforestación. Estos hallazgos son sólidos en todas las especificaciones y proporcionan información útil para diseñar intervenciones específicas y sensibles al contexto con el fin de promover la producción ganadera sostenible en la Orinoquía colombiana, y pueden servir de base para intervenciones de política más adaptadas a las regiones ganaderas de frontera.



Introducción

Los sistemas ganaderos se encuentran entre los principales responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), principalmente a través de la fermentación entérica, la gestión del estiércol y el cambio en el uso del suelo. En 2018, las emisiones relacionadas con la ganadería ascendieron a aproximadamente 3.500 millones de toneladas de CO₂ equivalente, lo que representa el 67% de todas las emisiones del sector agrícola y refleja un aumento del 15% desde 1990 (FAO, 2020). Abordar esta huella es una prioridad mundial. Las estrategias de mitigación, como la mejora del manejo de las praderas, la integración de cultivos, ganado y árboles, y los avances en nutrición animal, pueden reducir las emisiones al tiempo que mejoran el captura de carbono, reducen la deforestación y apoyan la intensificación sostenible. El sector ganadero por sí solo podría contribuir hasta en un 50% al potencial total de mitigación en la agricultura, la silvicultura y otros usos de la tierra (AFOLU) (Nugrahaeningtyas et al., 2024).

Las soluciones tecnológicas son esenciales, pero insuficientes: su adopción depende de los incentivos y las capacidades de los productores, así como del entorno institucional en general. Prácticas como el pastoreo rotacional y la recuperación de praderas degradadas aportan beneficios ambientales, pero sus resultados suelen ser graduales, lo que requiere inversiones iniciales o sacrificios temporales en materia de productividad (Bahrami et al., 2025). En condiciones de escasez de liquidez, inseguridad en los derechos sobre la tierra u horizontes de planificación cortos, los beneficios percibidos de la sostenibilidad pueden parecer limitados, incluso cuando las intervenciones están bien diseñadas (Bahrami et al., 2025; McConnell, 1983).

América Latina se enfrenta a retos únicos a la hora de promover transiciones sostenibles en los sistemas agroalimentarios. Como uno de los principales exportadores de carne vacuna,

soya y azúcar, la región está profundamente integrada en las cadenas de valor mundiales, pero se caracteriza por la desigualdad estructural, la informalidad y la exposición reiterada a perturbaciones socioambientales (López-Roldán y Fachelli, 2021; Barrett et al., 2019). Muchos productores carecen de acceso al crédito, a la asistencia técnica o a la infraestructura y, por lo tanto, tienen una capacidad limitada para cumplir las normas de sostenibilidad emergentes o adaptarse a las perturbaciones globales (López Barrera et al., 2022; Dumortier et al., 2024). Estas limitaciones se ven agravadas por la persistente concentración de la propiedad de la tierra, la fragmentación institucional y el legado de los conflictos, que debilitan la capacidad del Estado para impulsar un desarrollo inclusivo (López Barrera, 2025).

La seguridad de la tenencia de la tierra es un factor determinante para la inversión a largo

plazo. La tenencia de la tierra —ya sea formal o consuetudinaria— se asocia sistemáticamente con una mayor adopción de prácticas de conservación, especialmente aquellas cuyos beneficios se obtienen a largo plazo (Lawry *et al.*, 2017; Ali *et al.*, 2022). La inseguridad de la tenencia acorta los horizontes de planificación y desalienta las mejoras de la tierra, sobre todo cuando el desplazamiento o la propiedad en disputa siguen siendo un riesgo. Estas dinámicas son especialmente graves en la Orinoquía colombiana, una zona fronteriza posconflicto con una gobernanza territorial débil, tenencia informal y disputas territoriales activas. Los patrones de acumulación por desposesión —a través del desplazamiento, la manipulación del registro catastral y el uso de la ganadería como control territorial— han marginado a los pequeños ganaderos y limitado el acceso al crédito y al apoyo (Triana-Ángel *et al.*, 2025; Richani, 2013; Giraldo Mejía, 2019). A pesar del Acuerdo de Paz de 2016 con las FARC, los grupos armados sucesores y

las disputas en curso por la restitución de tierras perpetúan la incertidumbre (Restrepo *et al.*, 2006; Rivera-Lozada *et al.*, 2025).

Este estudio analiza cómo las limitaciones institucionales, ambientales y de gestión influyen en la adopción de prácticas de manejo sostenible de las praderas y en las decisiones sobre la carga animal ecológicamente adecuada entre los ganaderos de la Orinoquía. Contribuye a la información sobre cómo la seguridad de la tenencia, las condiciones agroecológicas y el apoyo institucional influyen en las transiciones hacia la sostenibilidad en contextos de informalidad, gobernanza débil y conflicto. Mediante un modelo de elección binaria dual aplicado a datos de encuestas a nivel de explotación ganadera combinados con indicadores espaciales, analizamos cómo las limitaciones determinan resultados distintos pero complementarios y extraemos lecciones relevantes para las políticas destinadas a promover el desarrollo ganadero sostenible en América Latina y más allá.

El resto del documento se organiza de la siguiente manera:



Sección 5.1 Antecedentes.



Sección 5.4 Resultados.



Sección 5.2 Materiales y métodos.



Sección 5.5 Discusión y limitaciones.



Sección 5.3 Datos.



Sección 5.6 Conclusiones.





5.1 Antecedentes

La producción ganadera es un sector tradicional y de gran importancia económica en Colombia, que ocupa 39 millones de hectáreas y contribuye con un 1,7% al producto interno bruto (PIB) del país, un 20,2% al PIB agrícola y un 51,5% al PIB ganadero. Da empleo a 1,1 millones de personas y genera 11.000 millones de pesos al año (Sandoval *et al.*, 2023; Campuzano *et al.*, 2022; Becking *et al.*, 2021; Fedegán, 2024). Con un censo ganadero de 29,2 millones de cabezas —lo que lo sitúa en el cuarto lugar de América Latina y en el undécimo a nivel mundial—, el país ha experimentado un aumento del 22,3% en su censo durante los últimos ocho años (González-Quintero *et al.*, 2022; Durana *et al.*, 2023; ICA, 2024). Sin embargo, el sector sigue siendo en gran medida extensivo y de baja productividad, con una carga animal media de 0,7 animales/ha y un aumento de peso diario de 0,445 kg, por debajo de los 1,22 animales/ha y 0,482 kg/día de Brasil (Fedegán, 2023; ABIEC, 2024; Oliveira *et al.*, 2018). Casi el 80% de las explotaciones ganaderas colombianas cuentan con menos de 50 animales, lo que genera ineficiencias y plantea retos ambientales y económicos.

La región de la Orinoquía —que comprende Arauca, Casanare, Meta y Vichada— es fundamental para la producción ganadera, ya que alberga el 21,4% del inventario nacional (6,2 millones de cabezas repartidas en 51.669 explotaciones) en 24,68 millones de hectáreas, de las cuales el 19,8% son aptas para la ganadería (UPRA, 2016; ICA, 2024). Los sistemas de producción van desde la cría hasta los de doble propósito (Fargetton *et al.*, 2017), pero el desarrollo se ve limitado por una infraestructura deficiente, un acceso restringido al crédito y recursos financieros limitados, así como por el legado del conflicto armado (López-Barrera *et al.*, 2022). La tenencia de la tierra constituye una barrera fundamental. Aunque los procesos de paz y las reformas impulsaron cierta expansión agrícola, solo el 4% de los 5,19 millones de hectáreas consideradas aptas para la agricultura en la subregión de la Altillanura se encuentran actualmente en cultivos (UPRA, 2016; Fontanilla-Díaz *et al.*, 2021). En el departamento del Meta, solo el 16% de las predios rurales cuentan con títulos de propiedad formales, y se estima que el 73% de las tierras productivas carece de documentación clara (Bonilla-Mejía *et al.*, 2024). La inseguridad de la tenencia desalienta la inversión y la adopción de prácticas sostenibles. Datos recientes muestran que las tierras sin

título son más vulnerables a la deforestación y al acaparamiento de tierras, mientras que las parcelas con título —especialmente aquellas que cuentan con apoyo institucional— reducen la pérdida de bosques (Clerici *et al.*, 2020).

Los sistemas ganaderos de la región también plantean importantes preocupaciones ambientales. Entre 2009 y 2018, las emisiones de AFOLU aumentaron notablemente a partir de 2015, coincidiendo con el proceso de paz (Biocarbono, 2024; Triana-Ángel *et al.*, 2025). En 2018, la ganadería contribuyó con el 27% de las emisiones de AFOLU, procedentes en su mayoría de los departamentos de Meta y Casanare. Las intensidades de emisión son elevadas: 29,37 kg de CO₂-eq/kg de peso vivo, en comparación con los 23 de Argentina y los 22,1 de Uruguay, y 3,67 kg de CO₂-eq/kg de leche corregida por grasa y proteína, frente a una media mundial de 2,8 (Biocarbono, 2024; FAO y NZAGRC, 2017; INAC, 2024; Opio *et al.*, 2013). Estos niveles ponen de relieve la urgencia de prácticas de mitigación.

La intensificación sostenible —mediante el pastoreo rotacional o la suplementación animal— podría reducir las emisiones entre un 35% y un 44%, al tiempo que aumentaría la productividad (Souza *et al.*, 2021; Mestra *et al.*, 2019). Sin embargo, las limitaciones económicas y de comportamiento dificultan su adopción. Los elevados costos de los insumos, el acceso limitado al crédito y la volatilidad del mercado disuaden la inversión (Parodi *et al.*, 2022; Tapasco *et al.*, 2019). Solo el 30% de los productores recibe asistencia técnica, y el 85% cita la falta de conocimientos como una barrera importante. Aunque solo el 23% manifiesta resistencia al cambio, la inercia conductual —especialmente entre los productores experimentados— sugiere aversión al riesgo. Estas limitaciones suelen verse agravadas por la inseguridad de la tenencia de la tierra, lo que debilita los incentivos para prácticas de gestión a largo plazo, como el pastoreo rotacional y el mejor manejo de las praderas.

Entre las diversas prácticas de sostenibilidad de la región, se destacan dos por ser observables empíricamente y relevantes desde el punto de vista normativo: la adopción de un manejo sostenible de las praderas y el ajuste de la carga animal. Aunque están vinculadas conceptualmente, estas prácticas difieren en cuanto a complejidad, costo y exposición institucional. El pastoreo rotacional, por ejemplo, requiere cambios en la infraestructura y la mano de obra, que suelen ser un requisito previo para ajustar el tamaño del hato. Por el contrario, los cambios en la carga animal pueden responder a presiones a corto plazo, como la disponibilidad de forraje o las variaciones bruscas de las precipitaciones, pero entrañan el riesgo de degradación de las praderas si no se realizan mejoras estructurales. Comprender cómo estos factores ambientales, institucionales y económicos influyen en estas decisiones es clave para impulsar sistemas ganaderos sostenibles.

Analizamos ambas prácticas utilizando un marco empírico que evalúa si se adoptan de forma secuencial o independiente y si sus factores determinantes difieren de manera relevante para las políticas. Este enfoque ofrece información sobre cómo la tenencia de la tierra, las limitaciones ambientales y el apoyo institucional influyen en las transiciones hacia la sostenibilidad en el sector ganadero de Colombia.



5.2 Materiales y métodos

5.2.1 Conclusiones de la encuesta utilizada para orientar la estrategia empírica

Para fundamentar nuestra estrategia empírica, llevamos a cabo una encuesta basada en la percepción de 70 ganaderos de las subregiones de Piedemonte, Altillanura y Sabana Inundable. La encuesta identificó limitaciones de carácter conductual, institucional, financiero y ambiental que afectan a la adopción de prácticas de pastoreo sostenibles, entre ellas las disparidades regionales, la inseguridad de la tenencia de la tierra, la resistencia al cambio y el acceso limitado a la asistencia técnica. Estos hallazgos contribuyeron a definir la estructura de nuestro modelo y la selección de variables, en particular en lo que respecta a la posible secuencia entre las decisiones sobre el manejo de las praderas y la carga animal. Los resultados detallados de la encuesta de preselección se recogen en los materiales complementarios, sección 4.1.

5.2.2 Modelo econométrico y estimación

El manejo sostenible de las praderas —en particular, el pastoreo rotacional— está ampliamente reconocido como una intervención fundamental tanto para la mitigación como para la adaptación al cambio climático en los sistemas ganaderos (Souza *et al.*, 2021; Rincón *et al.*, 2018). A diferencia del pastoreo continuo, los sistemas rotacionales favorecen la recuperación de los pastos, aumentan la calidad del forraje y la biomasa, y mejoran las reservas de carbono orgánico del suelo, lo que, en conjunto, reduce las emisiones de metano entérico por kilogramo de carne bovina producida (Mestra *et al.*, 2019; Biocarbono, 2024; Rincón *et al.*, 2025). Estas mejoras también aumentan la resiliencia ante perturbaciones climáticas, como las sequías y las lluvias torrenciales, gracias a una mejor estructura del suelo y a una mayor capacidad de retención de agua (Rincón *et al.*, 2018).

La segunda decisión se refiere a la carga animal —definida como el número de animales por hectárea de pasto—, un indicador fundamental de la intensidad del pastoreo, la productividad y la sostenibilidad ambiental. En los sistemas de producción extensiva, como los de la región de la Orinoquía, una carga animal óptima es fundamental para evitar tanto la subutilización como el sobrepastoreo. La baja carga animal puede indicar un uso ineficiente de la tierra, lo que conduce a un rendimiento económico insuficiente; la elevada carga animal puede degradar la calidad del suelo, afectar el rebrote de los pastos, aumentar las emisiones de gases de efecto invernadero por unidad de producto e intensificar las presiones de deforestación debido a la necesidad de tierras de pastoreo adicionales (Fedegán, 2023; Molina Romero *et al.*, 2021). Por lo tanto, una carga ganadera sostenible se sitúa en un “punto óptimo” que equilibra la carga animal con la capacidad regenerativa del sistema de pastoreo, lo que permite aumentar la productividad al tiempo que se salvaguardan los servicios ecosistémicos a largo plazo.

Nuestro enfoque empírico se basa tanto en fundamentos agronómicos como en conocimientos sobre el comportamiento obtenidos a partir de una encuesta de percepción realizada a productores regionales. Estos conocimientos indicaron que muchos ganaderos perciben la mejora de las condiciones de las praderas—en particular mediante el pastoreo rotacional— como un requisito previo para ajustar el tamaño del hato. En los sistemas de bajos insumos, la disponibilidad de forraje suele ser la principal limitante para la expansión del hato, lo que significa que, sin una mejora de las praderas, una mayor carga animal conduciría a la degradación de la tierra en lugar de a una intensificación sostenible (López-Barrera *et al.*, 2022; Tapasco *et al.*, 2019).

Esta lógica condicional nos lleva a examinar la posible existencia de un marco de elección binaria en dos etapas, en el que la primera etapa modela la adopción de un manejo sostenible de las praderas y la segunda etapa estima la decisión de mantener una carga animal sostenible, potencialmente condicionada a la primera. Al mismo tiempo, no consideramos esta secuencia como una estructura inmutable. Más bien, comprobamos explícitamente la interdependencia entre estos comportamientos mediante modelos bivariados y de selección. Para evaluar formalmente si las dos decisiones son estadísticamente interdependientes, estimamos un modelo probit bivariado y comprobamos la correlación en los términos de error. El resultado —el coeficiente de interdependencia no fue estadísticamente significativo ($p = 0,8289$)— sugiere que los factores no observados no influyen conjuntamente en ambas decisiones. Basándonos en esta evidencia, adoptamos en última instancia una estrategia de modelización dual: presentamos un modelo secuencial de dos etapas para reflejar la lógica de comportamiento sugerida por los productores y la teoría, y una especificación de elección binaria independiente para dar cuenta de la falta de interdependencia estadística significativa. Las variables de control incluyen las características de las explotaciones, los sistemas de pastoreo, las restricciones financieras y el acceso a apoyo técnico, así como indicadores relacionados con la tenencia de la tierra, para reflejar el papel de la incertidumbre institucional en la configuración de las decisiones de sostenibilidad, en consonancia con los marcos establecidos para modelar la toma de decisiones de los agricultores en condiciones de incertidumbre (Feder *et al.*, 1985; Deressa *et al.*, 2009).

5.2.2.1 Decisiones de los ganaderos sobre prácticas ganaderas sostenibles

La toma de decisiones de los agricultores en relación con el manejo sostenible de las praderas y la carga animal puede seguir una estructura secuencial o independiente. Para tener en cuenta ambas posibilidades, estimamos modelos econométricos alternativos. La primera decisión se refiere al tipo de manejo de las praderas —clasificada como extensiva o no extensiva— y la segunda se refiere a la carga animal. Basándonos en criterios empíricos y ambientales (Fedegán, 2023; Molina Romero *et al.*, 2021), clasificamos la carga animal menor a uno o superiores a cuatro animales por hectárea como insostenibles, y las comprendidas entre uno y cuatro como sostenibles. Este rango refleja un equilibrio entre la eficiencia en el uso de los recursos y la capacidad regenerativa de los pastos (Rincón *et al.*, 2025).

La bibliografía existente y los datos de campo de la región de la Orinoquía ponen de relieve que el manejo sostenible de las praderas, como el pastoreo rotacional, mejora la calidad y la disponibilidad del forraje, lo que suele ser una condición previa para ajustar la carga animal en los sistemas de bajos insumos (Rincón *et al.*, 2018; López-Barrera *et al.*, 2022; Rincón *et al.*, 2025). Paralelamente, las limitaciones institucionales, en particular la inseguridad de la tenencia de la tierra, pueden condicionar la disposición y la capacidad de los productores para adoptar estrategias de gestión a largo plazo, influyendo tanto en las decisiones relativas a los pastos como en las relativas al hato. Dado que la tenencia afecta a la estabilidad percibida del acceso a la tierra, puede influir tanto en la adopción de prácticas de pastoreo sostenibles como en el ajuste de la carga animal, aunque con distintos grados de influencia.

Sin embargo, dado que no está claro si estas decisiones se toman de forma secuencial o independiente, estimamos tanto modelos de elección binaria en dos etapas como modelos de elección binaria independientes para identificar los factores asociados a cada decisión de adopción (véase la sección 3.2.4 para más detalles). Este doble enfoque nos permite comprobar si distintos factores conductuales y estructurales —incluidos los riesgos relacionados con la tenencia— actúan de manera diferente en las dos dimensiones de la sostenibilidad.

5.2.2.2 Adopción de la sostenibilidad en el manejo de las praderas

El manejo sostenible de las praderas se refiere a los sistemas de pastoreo rotacional o mejorado que aplican cargas animales adecuadas, permiten períodos de descanso y ocupación apropiados, y evitan el pastoreo excesivo. Estas prácticas mejoran la calidad y la disponibilidad de los pastos, aumentan la productividad de carne bovina por hectárea y contribuyen a la mitigación del cambio climático al mejorar la captura de carbono en el suelo y reducen las emisiones de metano entérico (Rincón *et al.*, 2025).

Modelamos la decisión de adoptar un manejo sostenible de las praderas como un resultado binario. Concretamente, definimos una variable latente, W_n^* , que refleja la propensión no observada de los agricultores a adoptar estas prácticas:

$$W_n^* = \gamma_1 z_n^{\text{institutional}} + \gamma_2 z_n^{\text{economic}} + \gamma_3 z_n^{\text{structural}} + \gamma_4 z_n^{\text{sociodemographic}} + \gamma_5 z_n^{\text{environmental}} + \epsilon_n$$

donde W^* es una variable latente que representa la propensión no observada del ganadero a adoptar un manejo sostenible de las praderas. Los términos $z_n^{\text{institutional}}$, z_n^{economic} , $z_n^{\text{structural}}$, $z_n^{\text{sociodemographic}}$ representan los factores institucionales, económicos, estructurales, sociodemográficos y ambientales que influyen en la decisión, incluida la seguridad de la tenencia de la tierra, que, según la hipótesis, desempeña un papel fundamental en la configuración de las decisiones de inversión a largo plazo. Los coeficientes γ_1 , γ_2 , γ_3 , γ_4 y γ_5 reflejan la importancia relativa de estos factores, y ϵ_n es un término de error aleatorio que sigue una distribución logística. Dado que W_n^* no se observa directamente, estimamos el resultado binario W_n como:

$$W_n = \begin{cases} 1, & \text{if } W_n^* > 0 \text{ (farmer adopts sustainable pasture management practices)} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

La probabilidad de adopción se estima utilizando un modelo logit:

$$P(W_n = 1 \mid z_n^{\text{institutional}}, z_n^{\text{economic}}, z_n^{\text{structural}}, z_n^{\text{sociodemographic}}, z_n^{\text{environmental}}) = \frac{e^{\gamma_0 + \gamma_1 z_n^{\text{institutional}} + \gamma_2 z_n^{\text{economic}} + \gamma_3 z_n^{\text{structural}} + \gamma_4 z_n^{\text{sociodemographic}} + \gamma_5 z_n^{\text{environmental}}}}{1 + e^{\gamma_0 + \gamma_1 z_n^{\text{institutional}} + \gamma_2 z_n^{\text{economic}} + \gamma_3 z_n^{\text{structural}} + \gamma_4 z_n^{\text{sociodemographic}} + \gamma_5 z_n^{\text{environmental}}}}$$

5.2.3 Decisión sobre la carga animal sostenible

Examinamos la decisión de mantener una carga animal sostenible, definida como tener entre uno y cuatro animales por hectárea. La decisión se modela como un resultado binario utilizando una variable latente Y_n^* , que capta la propensión no observada del ganadero a adoptar una carga animal sostenible.

Aunque los estudios agronómicos sugieren que las prácticas mejoradas de manejo de las praderas —en particular, el pastoreo rotacional— pueden mejorar la disponibilidad de forraje, la salud del suelo y la capacidad de carga (Beck et al., 2020; Rapiya et al., 2025), no imponemos *a priori* una estructura secuencial estricta. En su lugar, evaluamos si la carga animal sostenible está empíricamente asociada con la adopción de manejo sostenible de las praderas o se determinan de forma independiente. Un manejo deficiente de las praderas puede reducir la biomasa

forrajera y aumentar el riesgo de degradación, mientras que las prácticas mejoradas pueden crear condiciones que favorezcan una carga animal sostenible. Esto motiva la comprobación de especificaciones de modelización tanto independientes como secuenciales.

Estimamos dos especificaciones alternativas. En el modelo independiente, la decisión sobre la carga animal se modela sin tener en cuenta el manejo de las praderas:

$$Y_n^* = \beta_0 + \beta_1 X_n^{\text{institutional}} + \beta_2 X_n^{\text{economic}} + \beta_3 X_n^{\text{structural}} + \beta_4 X_n^{\text{sociodemographic}} + \beta_5 X_n^{\text{environmental}} + \eta_n$$

En el modelo secuencial, incluimos la decisión sobre el manejo de las praderas W_n como variable explicativa para evaluar su posible influencia en el resultado de la carga animal:

$$Y_n^* = \theta_0 + \theta_1 W_n + \theta_2 X_n^{\text{institutional}} + \theta_3 X_n^{\text{economic}} + \theta_4 X_n^{\text{structural}} + \theta_5 X_n^{\text{sociodemographic}} + \theta_6 X_n^{\text{environmental}} + v_n$$

donde Y^* es la variable latente que representa la decisión de mantener una carga animal sostenible. Se incluye W_n para reflejar el efecto del manejo sostenible de las praderas en las decisiones relativas a la carga animal. $X_n^{\text{institutional}}$, X_n^{economic} , $X_n^{\text{structural}}$, $X_n^{\text{sociodemographic}}$ y $X_n^{\text{environmental}}$ son vectores de variables explicativas que incluyen factores institucionales, económicos, estructurales, sociodemográficos y ambientales que influyen en la decisión. Los parámetros β_0 y θ_1 son los términos de intersección, y $\beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4, \beta_5, \theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$, y θ_6 son coeficientes estimados que cuantifican los efectos de las variables explicativas sobre las decisiones relativas a la carga ganadera. Los términos de error aleatorio η_n y v_n siguen una distribución logística. Dado que, Y_n^* no se observa, estimamos el resultado binario Y_n como:

$$Y_n = \begin{cases} 1, & \text{if } Y_n^* > 0 \text{ (farmer maintains a sustainable stocking rate)} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

La probabilidad de mantener una carga animal sostenible se estima para la especificación independiente como:

$$P(Y_n=1 | X_n^{\text{institutional}}, X_n^{\text{economic}}, X_n^{\text{structural}}, X_n^{\text{sociodemographic}}, X_n^{\text{environmental}}) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X_n^{\text{institutional}} + \beta_2 X_n^{\text{economic}} + \beta_3 X_n^{\text{structural}} + \beta_4 X_n^{\text{sociodemographic}} + \beta_5 X_n^{\text{environmental}}}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X_n^{\text{institutional}} + \beta_2 X_n^{\text{economic}} + \beta_3 X_n^{\text{structural}} + \beta_4 X_n^{\text{sociodemographic}} + \beta_5 X_n^{\text{environmental}}}}$$

Y la probabilidad de mantener una carga animal sostenible se estima para la especificación secuencial como:

$$P(Y_n=1 | W_n, X_n^{\text{institutional}}, X_n^{\text{economic}}, X_n^{\text{structural}}, X_n^{\text{sociodemographic}}, X_n^{\text{environmental}}) = \frac{e^{\theta_0 + \theta_1 W_n + \theta_2 X_n^{\text{institutional}} + \theta_3 X_n^{\text{economic}} + \theta_4 X_n^{\text{structural}} + \theta_5 X_n^{\text{sociodemographic}} + \theta_6 X_n^{\text{environmental}}}}{1 + e^{\theta_0 + \theta_1 W_n + \theta_2 X_n^{\text{institutional}} + \theta_3 X_n^{\text{economic}} + \theta_4 X_n^{\text{structural}} + \theta_5 X_n^{\text{sociodemographic}} + \theta_6 X_n^{\text{environmental}}}}$$

5.2.3.1 Estrategia de estimación: comprobación de decisiones secuenciales e independientes con agrupación regional

Para analizar el comportamiento de adopción de los ganaderos, estimamos dos modelos de elección binaria correspondientes a la adopción de prácticas sostenibles de manejo de las praderas y de carga animal sostenible. En lugar de suponer una secuencia de comportamiento predeterminada, evaluamos tanto estructuras de decisión secuenciales como independientes, motivadas por el razonamiento agronómico, los resultados de las encuestas de percepción y las limitaciones contextuales observadas en la Orinoquía colombiana. Esta estrategia nos permite examinar si la decisión de mantener una carga animal sostenible está condicionada a la adopción previa de un manejo sostenible de las praderas o si ambos comportamientos están determinados de forma independiente por un conjunto común de limitaciones.

En el primer modelo, estimamos la probabilidad de adoptar un manejo sostenible de las praderas en función de variables institucionales, económicas, estructurales, sociodemográficas y ambientales, tal como se detalla en la tabla complementaria S.5.12. Cabe destacar que la seguridad de la tenencia de la tierra se considera un factor institucional importante, dada su relevancia para determinar las decisiones a largo plazo e influir en la adopción de prácticas sostenibles.

En el segundo modelo, estimamos la probabilidad de mantener una carga animal sostenible utilizando dos especificaciones alternativas. El modelo independiente analiza esta decisión de forma aislada, mientras que el modelo secuencial incluye el manejo sostenible de las praderas como variable explicativa para comprobar si condiciona el comportamiento de la carga animal. Ambas especificaciones incorporan las mismas cinco categorías temáticas de covariables, junto con variables de control adicionales relacionadas con el sistema de pastoreo, el tipo de gestión, los insumos financieros y los indicadores de productividad.

Todos los modelos se estiman utilizando especificaciones logit binarias mediante estimación de máxima verosimilitud. Para tener en cuenta la dependencia espacial y la posible correlación intramunicipal en las perturbaciones no observadas, los errores estándar se agrupan a nivel municipal, en consonancia con el diseño de muestreo de la encuesta. Este enfoque evita los riesgos de sobreajuste de los efectos fijos espaciales, al tiempo que preserva la validez de la inferencia. Los diagnósticos del factor de inflación de la varianza (VIF) confirman que la multicolinealidad no es un problema entre las variables explicativas seleccionadas (tabla complementaria S.5.13).

Al permitir múltiples vías de comportamiento e incorporar explícitamente las restricciones institucionales relacionadas con la tenencia, esta estrategia de estimación proporciona un marco flexible y riguroso para identificar los factores que impulsan la adopción de prácticas sostenibles en el sector ganadero colombiano.

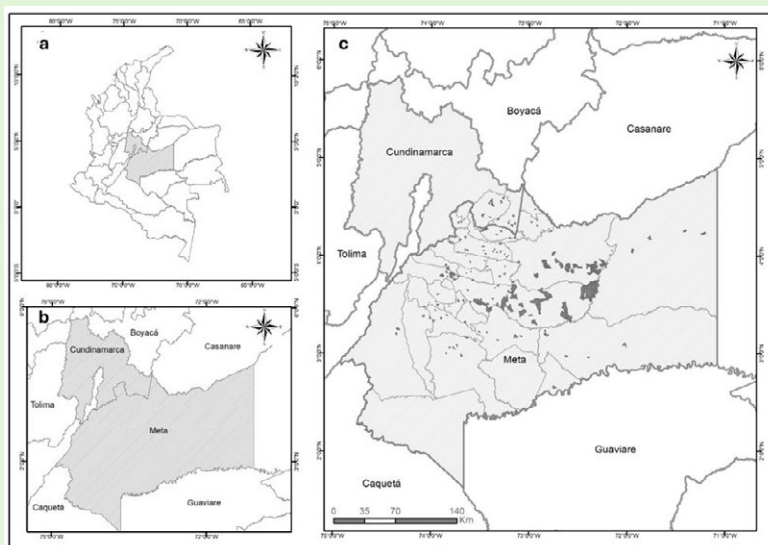


5.3 Datos

Este estudio se basa en dos fuentes de datos complementarias para analizar la toma de decisiones de los ganaderos con relación a la adopción de prácticas de pastoreo sostenibles. El conjunto de datos principal procede de una encuesta estructurada a nivel de explotación ganadera de ceba realizada por AGROSAVIA en 23 municipios de los departamentos de Meta y Cundinamarca, en Colombia (Figura 5.1).

Las zonas de muestreo se definieron en función de la frontera agrícola (Figura S.5.2), y el estudio siguió un diseño de muestreo aleatorio estratificado acorde con las metodologías del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE). Se seleccionaron un total de 327 explotaciones ganaderas en función de criterios de elegibilidad, entre los que se incluían mantener más de 10 animales destetos, haber declarado ventas de ganado entre enero de 2016 y octubre de 2017, y dedicarse a actividades de ceba, ya fuera de forma exclusiva o como parte de un sistema de producción ganadero más amplio. Estos criterios garantizaron la comparabilidad entre las unidades que participan activamente en el segmento de ceba de bovinos. El censo y las segmentaciones de las regiones se detallan en las figuras S3 y S4, y la figura S5 ofrece una referencia geoespacial de la zona de San Martín, Meta.

Figura 5.1 Área de estudio. El panel (a) destaca los departamentos de Meta y Cundinamarca en Colombia. El panel (b) ofrece una vista detallada del departamento de Meta. El panel (c) muestra los 21 municipios de Meta y los dos de Cundinamarca incluidos en el estudio, junto con los 120 segmentos y agrupaciones seleccionados a partir del Censo Nacional Agropecuario (CNA) y la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA). Los polígonos correspondientes al área de estudio se georreferenciaron y visualizaron utilizando ArcGIS 10.8.



El estudio incluye un amplio conjunto de variables a nivel de explotación ganadera relevantes para las decisiones sobre la adopción de prácticas sostenible de praderas y la carga animal: características del hato, uso del suelo, prácticas de pastoreo, uso de insumos y mano de obra, costos de producción y datos demográficos de los productores (por ejemplo, edad, nivel educativo, experiencia). Las explotaciones presentan una gran heterogeneidad en cuanto al tamaño de las tierras, la composición del hato, la estructura de la mano de obra y el comportamiento inversor. La explotación media tiene una extensión de 237,8 hectáreas, de las cuales 22,4 hectáreas se dedican a pastos para la ceba; el resto suele ser bosque natural y terrenos no agrícolas. El ganado entra en la fase de ceba a una edad media de 21,3 meses y se sacrifica a los 34,8 meses, pasando de 270,7 kg a 452,4 kg de peso. El 75% de las explotaciones utiliza el pastoreo rotacional, y los sistemas continuos y alternos, alrededor del 12% cada uno. Las diferencias en el mantenimiento de registros, el uso de herramientas digitales y la asignación de mano de obra ilustran aún más la diversidad de los modelos de producción.

Para complementar la encuesta, integramos variables espaciales y ambientales procedentes de conjuntos de datos macro de dominio público. Los datos climáticos —precipitaciones y temperaturas medias para el período 2016–2017— proceden del sistema satelital CHIRPS, que ofrece información de alta resolución sobre la variabilidad meteorológica y la exposición climática a largo plazo. Los datos sobre el suelo, procedentes del geoportal del Instituto Agustín Codazzi de Colombia, incluyen la acidez, la concentración de aluminio y el tipo de terreno, factores que determinan la productividad de los pastos y el riesgo de degradación. Estos indicadores ambientales están georreferenciados a los municipios y localidades de las explotaciones agrícolas incluidas en la muestra, lo que proporciona un contexto espacial para estimar las limitaciones ambientales.

Mediante la combinación de los conjuntos de datos a nivel de explotación ganadera y de datos ambientales (tabla complementaria S.5.22), la estrategia empírica examina cómo las decisiones de manejo como las condiciones biofísicas exógenas determinan el comportamiento de adopción. Para tener en cuenta la toma de decisiones correlacionada espacialmente, los errores estándar se agrupan a nivel municipal. Se evitó el uso de efectos fijos debido a la limitada variación intramunicipal, que habría absorbido el poder explicativo. La agrupación conserva la variación al tiempo que corrige la correlación espacial (Cameron y Miller, 2015; Wooldridge, 2010).

5.3.1 Variables en las estimaciones empíricas

Aunque el marco de modelización se basa conceptualmente en la distinción entre las decisiones de adopción y la intensidad del uso del suelo, no imponemos *a priori* una estructura de estimación secuencial. En su lugar, analizamos si las dos decisiones —la adopción de prácticas sostenibles de manejo de las praderas y el mantenimiento de una carga animal sostenible— deben modelizarse de forma conjunta o independiente. Esto es fundamental: aunque el razonamiento agronómico y la información de los ganaderos suelen sugerir una progresión desde el manejo de las praderas hacia las decisiones sobre la carga animal, la interdependencia real de los comportamientos puede variar según el contexto.

Para evaluar esto de forma empírica, estimamos un modelo probit bivariado con ambos resultados binarios y examinamos el coeficiente de correlación (ρ) entre los términos de error. La estimación de ρ fue de aproximadamente 0,29, basándonos en la transformación arcotangente hiperbólica (*athrho*) utilizada en el proceso de estimación. Sin embargo, la prueba de chi-cuadrado de Wald correspondiente no fue estadísticamente significativa ($\chi^2(1) = 0,08$; $p = 0,7734$), lo que indica que no hay evidencia de una correlación no observada entre las dos decisiones. Este

resultado respalda la hipótesis de que los ganaderos pueden abordar estas elecciones como distintas, en lugar de estar vinculadas estructuralmente. En consecuencia, procedemos a realizar estimaciones para cada resultado utilizando modelos probit estándar. Este enfoque da cabida a vías explicativas diferenciales entre los dos resultados y evita posibles pérdidas de eficiencia o dificultades de identificación asociadas a un modelo conjunto mal especificado.

Los análisis previos, como la correlación tetracórica ($\rho = 0,27$; $p = 0,004$), una regresión en forma reducida ($p = 0,003$) y una prueba de independencia chi-cuadrado ($p = 0,003$), sugerían cierto grado de asociación entre los resultados observados. Sin embargo, al no existir una correlación estadísticamente significativa en las perturbaciones subyacentes, la especificación bivariada no ofrece ninguna ventaja clara. Por lo tanto, interpretamos las decisiones como empíricamente independientes —aunque siguen estando teóricamente conectadas— y las analizamos en paralelo. Esta estructura ofrece tanto flexibilidad analítica como transparencia a la hora de atribuir efectos a conjuntos específicos de covariables.

5.3.1.1 Factores asociados a la adopción de un manejo sostenible de las praderas

La primera decisión modelizada se refiere a la adopción de prácticas sostenibles de manejo de las praderas. La variable dependiente es un indicador binario que toma el valor 1 si el ganadero declara haber aplicado medidas como el pastoreo rotativo, el mantenimiento de la cobertura vegetal o el descanso estratégico de los potreros, y 0 en caso contrario. La clasificación se basa en autoinformes y rasgos de gestión observables, y se identifica a alrededor del 63% de los ganaderos como adoptantes. Esta configuración binaria sigue la literatura establecida sobre la adopción de prácticas ganaderas (Knowler y Bradshaw, 2007; Kassie *et al.*, 2013).

Entre las variables institucionales, destaca la seguridad de la tenencia de la tierra. Una variable binaria recoge la propiedad plena de la tierra, un factor clave para las inversiones territoriales a largo plazo. En la Orinoquía colombiana, afectada por el conflicto, la seguridad de la tenencia reduce los riesgos asociados a las inversiones irreversibles y está estrechamente vinculada a un comportamiento orientado a la conservación. Trabajos anteriores subrayan la importancia de la tenencia en contextos de fragilidad institucional y reclamaciones territoriales contrapuestas (Clerici *et al.*, 2020; Deininger y Feder, 2009).

Otros factores institucionales incluyen el acceso a la asistencia técnica, definida como extensión o capacitación formal, y la adopción previa de tecnologías agrícolas modernas, medida mediante un indicador binario. Estos reflejan la exposición de los ganaderos a redes de innovación y sistemas de apoyo en condiciones de incertidumbre.

Las condiciones económicas se reflejan en el valor total de los activos productivos de la explotación y en los costos variables, que incluyen los gastos en alimentos, insumos veterinarios y

mano de obra. Estos representan la liquidez y los activos disponibles, lo que concuerda con conclusiones anteriores sobre cómo las limitaciones financieras influyen en la adopción de prácticas (Latruffe y Nauges, 2014). Las variables sociodemográficas de control incluyen la edad, el género y un índice de experiencia ganadera, medido como porcentaje de la vida dedicado a la cría de ganado bovino, que reflejan las diferencias en cuanto a conocimientos, etapa de la vida y tolerancia al riesgo (Genius *et al.*, 2006). Las variables estructurales describen la heterogeneidad agroecológica y operativa: orientación de la producción (leche, carne, doble propósito), tipo de terreno, acidez del suelo (pH) y saturación de aluminio, condiciones físicas que determinan la viabilidad de las prácticas de pastoreo sostenibles.

Las condiciones ambientales se representan mediante la temperatura media y las precipitaciones georreferenciadas (2016), lo que permite captar las presiones climáticas relevantes para la degradación de los pastos. En la tabla complementaria S.5.4 se recogen las comprobaciones de robustez realizadas con datos climáticos de 2016 -. Esta estructura variable multidimensional sigue la línea de información reciente que aboga por modelos de adopción integrados a nivel institucional, económico y ambiental (Pannell *et al.*, 2006; Kassie *et al.*, 2013).

Los modelos se estiman mediante regresiones logit de máxima verosimilitud. Los errores estándar se agrupan a nivel municipal para corregir la correlación de errores intramunicipales, en consonancia con el diseño estratificado de la encuesta. Las definiciones de las variables y los detalles de codificación se encuentran disponibles en las tablas complementarias S.5.1 y S.5.2.

5.3.1.2 Factores asociados a la participación social sostenible

Estimamos dos especificaciones de modelo para evaluar los factores determinantes de la carga animal sostenible. La primera incluye la adopción de manejo sostenible de las praderas como covariable, con el fin de comprobar la interdependencia conductual: los sistemas de manejo de praderas resilientes pueden permitir una intensificación sostenible del hato. La segunda excluye el manejo de las praderas, considerando la carga animal como una decisión independiente que podría verse condicionada por restricciones superpuestas, pero distintas. Esta estrategia de doble modelo comprueba la interdependencia sin presuponer una secuencia conductual.

Al igual que en el modelo de adopción de manejo sostenible de las praderas, la seguridad de la tenencia de la tierra sigue siendo fundamental. Las variables institucionales, sociodemográficas, estructurales, ambientales y de control son las mismas que en el modelo de adopción de prácticas sostenibles, y las diferencias se indican a continuación. Se incluye la plena propiedad de la tierra para reflejar la seguridad institucional, que puede influir en el comportamiento de la carga animal tanto a través de la capacidad de inversión como de la actitud ante el riesgo. Los productores con acceso inseguro a la tierra pueden evitar ajustes en el hato debido a la incertidumbre sobre la base de producción, lo que concuerda con conclusiones más amplias sobre los derechos de propiedad y la intensificación ganadera. Otro factor institucional es el acceso a la asistencia técnica, definido como la participación en actividades formales de extensión o

capacitación. Dicha exposición puede influir en el conocimiento de los umbrales óptimos de carga animal o en las respuestas de adaptación a las condiciones de las praderas. Las variables sociodemográficas incluyen la edad del productor, el género y el índice de experiencia ganadera, lo que refleja los conocimientos generacionales y las preferencias de riesgo (Genius *et al.*, 2006). Las características estructurales del sistema —tipo de terreno, pH del suelo y saturación de aluminio— reflejan las limitaciones agroecológicas que afectan al forraje y a la capacidad de carga. También controlamos el sistema de pastoreo (continuo, alterno, rotacional), el tipo de manejo (extensivo, no extensivo) y la orientación de la producción (carne, leche, doble propósito), que influyen en las decisiones de carga animal y en el rendimiento del sistema (Rao *et al.*, 2012). Las condiciones ambientales están representadas por la temperatura media y las precipitaciones georreferenciadas de 2016, que determinan la disponibilidad de biomasa y los ciclos estacionales del forraje. Las variables económicas incluyen los costos variables (por ejemplo, alimentos, mano de obra, servicios veterinarios) como indicador de la escala y la intensidad de la explotación. También incluimos indicadores de la eficiencia de la ceba (aumento de peso por tiempo de ceba) y el tamaño de la zona de ceba, lo que permite captar las limitaciones espaciales y de productividad en el manejo del hato.

Los modelos se estiman mediante regresiones logit de máxima verosimilitud. Los errores estándar se agrupan a nivel municipal para tener en cuenta la correlación intraclúster y el diseño estratificado de la encuesta. Esto permite realizar una inferencia sólida sobre si la carga animal sostenible se determina conjunta o independientemente de las prácticas de manejo del pastoreo. Al combinar factores institucionales, económicos, biofísicos y de comportamiento, nuestro enfoque ofrece una comprensión multidimensional de los factores determinantes de las decisiones sobre la carga animal sostenible en la Orinoquía colombiana y en regiones fronterizas similares.

5.3.2 Descripción de los datos y las variables

El conjunto de datos comprende 327 observaciones y un conjunto exhaustivo de variables para modelar la adopción de prácticas de gestión sostenible de pastos y las decisiones sobre la carga ganadera (Tabla 5.1). La primera variable dependiente es un indicador binario que toma el valor 1 si el ganadero declara haber adoptado un conjunto de prácticas ambientalmente sostenibles (media = 0,63). La segunda, también binaria, toma el valor 1 si la explotación mantiene carga animal dentro de un rango sostenible (media = 0,73), captando tanto el subpastoreo como el sobrepastoreo con relación a los parámetros de referencia ecológicos.

Tabla 5.1 Estadísticas resumidas de las variables utilizadas en los modelos

Restricción	Variable	Obs.	Media	DE	Mín.	Máx.
Variables dependientes	Manejo sostenible de las praderas	327	0,63	0,48	0	1
	Carga animal	327	0,73	0,44	0	1
Sociodemográfica	Edad	327	55,29	12,79	21	91
	Género	327	0,83	0,38	0	1
Institucional	Índice de experiencia	327	0,36	0,17	0,026	0,794
	Tenencia de la tierra	327	0,87	0,34	0	1
	Asistencia técnica	327	4,98	0,97	1	6
	Adopción de tecnología	327	0,08	0,27	0	1
Estructural	Tipo de terreno	327	2,1	1,2	1	5
	Acidez del suelo	327	2,58	0,76	1	3
	Nivel de aluminio	327	2,71	0,52	1	3
	Tipo de pastoreo	327	2,64	0,69	1	3
	Tipo de manejo	327	1,9	0,45	1	4
	Orientación productiva	327	3,06	1,35	1	6
Ambiental	Temperatura promedio, 2016	327	23,82	3,76	16,91	29,38
	Precipitación, 2016	327	3.275,62	359,92	1.735,44	3.840,29
Económica	Costos variables	327	575.997	563.047	100.429	5.849.225
	Recursos totales	327	37.400.000	516.000.000	1.495.356	50.200.000.000
	Eficiencia de finalización	327	191.023	202.643	14.538	2.003.777
	Superficie de finalización	327	82,24	175,85	4	2.000

Las variables explicativas se agrupan en cinco ámbitos: sociodemográfico, institucional, estructural, ambiental y económico. Las variables sociodemográficas incluyen la edad de los ganaderos (media = 55,29; DE = 12,79), el género (83% hombres) y el índice de experiencia (media = 0,36; DE = 0,17), que refleja los años dedicados a la ganadería en relación con la edad. La tenencia de la tierra se codifica como una variable binaria (1 = propiedad plena, 0 = todos los demás casos). Aunque la encuesta original ofrecía 10 tipos de tenencia, incluidos el arrendamiento, la aparcería y el usufructo, la codificación binaria se ajusta a las mejores prácticas (Lawry *et al.*, 2017; Bonilla-Mejía *et al.*, 2024) y permite realizar una prueba conservadora del papel de la tenencia en la adopción de prácticas sostenibles.

Las variables institucionales incluyen el acceso a la asistencia técnica (media = 4,98 en una escala de 1 a 6) y una variable binaria para la adopción de otras tecnologías (media = 0,08). Los indicadores estructurales abarcan el terreno (media = 2,10), la acidez del suelo (2,58), la toxicidad por aluminio (2,71), el sistema de pastoreo (2,64), el tipo de gestión (1,90) y la orientación de la explotación (3,06), cada uno de ellos medido en sus respectivas escalas ordinales. Las variables ambientales incluyen la temperatura georreferenciada de 2016 (media = 23,82 °C), las precipitaciones (3.275,62 mm) y los indicadores del suelo mencionados anteriormente. Las condiciones económicas se recogen mediante medidas continuas: los costos variables (media = 575.997 COP; DE = 563.047), recursos totales de la explotación (37,4 millones de COP; DE = 51,6 millones) y dos indicadores relacionados con engórdela ceba: eficiencia de la ceba (media = 191.023; DE = 202.643) y superficie del área de la ceba (82,24 ha; DE = 175,85).

Esta estructura permite el modelado integrado de los factores que impulsan la adopción. Los diagnósticos del VIF (Tabla complementaria S.5.13) indican que no hay motivos de preocupación por la multicolinealidad. Los errores estándar se agrupan a nivel municipal para corregir la correlación espacial, evitando el uso de efectos fijos dada la limitada variación dentro de cada municipio.



5.4 Resultados

En esta sección se presentan los resultados empíricos sobre el manejo sostenible de las praderas y las decisiones relativas a la carga animal entre los productores de ganado de ceba. El análisis se desarrolla en dos partes. En primer lugar, se comprueba si estas decisiones son condicionalmente dependientes o independientes. Esta estructura flexible permite especificaciones adaptadas a cada resultado y tiene en cuenta las distintas limitaciones y los factores facilitadores. Las variables explicativas (sociodemográficas, institucionales, estructurales, ambientales y económicas) nos permiten evaluar la importancia relativa de cada ámbito. Para garantizar la solidez del análisis, se comprueba la multicolinealidad utilizando los coeficientes VIF y los errores estándar agrupados a nivel municipal, con el fin de corregir la correlación espacial entre los ganaderos en contextos similares. No se aplican efectos fijos debido a la limitada variación dentro de los municipios, lo que comprometería la identificabilidad del modelo. En los materiales complementarios se detallan otras comprobaciones de solidez, incluidas especificaciones alternativas y definiciones de variables, y la tabla complementaria S.5.12 proporciona las definiciones de cada variable de la tabla 5.1.

5.4.1 Decisión sobre el manejo sostenible de las praderas

La tabla 5.2 presenta los efectos marginales de un modelo probit que estima los factores asociados a la adopción de un manejo sostenible de las praderas. El resultado binario es igual a 1 si el ganadero declara utilizar prácticas como el pastoreo rotacional, el descanso de los potreros o el mantenimiento de la cobertura vegetal, y 0 en caso contrario. La tenencia de la tierra se considera un determinante institucional central, lo que refleja su influencia hipotética en los horizontes temporales y los incentivos para el uso de la tierra a largo plazo. Un indicador binario de propiedad

plena, definido en la sección 3.2.6, distingue a los propietarios de los ganaderos con otros tipos de tenencia. Las restantes covariables siguen las descritas en el modelo de adopción de manejo de praderas (sección 4.2) y abarcan los ámbitos sociodemográfico, institucional, estructural, ambiental y económico. Los errores estándar se agrupan a nivel municipal para tener en cuenta la autocorrelación espacial, y los bajos valores del VIF descartan la multicolinealidad.

Tabla 5.2 Efectos marginales de los factores asociados con el manejo sostenible de las praderas

Variable	dy/dx	Error est.	P> z	IC del 95%	
Edad	-0,00047	0,002	0,798	-0,004	0,003
Género	0,09850	0,079	0,212	-0,056	0,253
Índice de experiencia	-0,20488	0,305	0,502	-0,803	0,393
Tenencia de la tierra	0,29156	0,058	0,000	0,178	0,405
Asistencia técnica	-0,04440	0,021	0,037	-0,086	-0,003
Adopción de tecnología	0,22543	0,109	0,039	0,011	0,440
Tipo de terreno	0,00216	0,037	0,953	-0,070	0,074
Acidez del suelo	0,03418	0,051	0,506	-0,067	0,135
Nivel de aluminio	-0,38463	0,146	0,008	-0,670	-0,099
Orientación productiva	0,00670	0,016	0,669	-0,024	0,037
Temperatura promedio, 2016	0,00624	0,031	0,840	-0,054	0,067
Precipitación, 2016	-0,00005	0,000	0,886	-0,001	0,001
Costos variables	0,00000	0,000	0,332	0,000	0,000
Recursos totales	0,00000	0,000	0,151	0,000	0,000
Observaciones			327		

Los efectos marginales representan la variación en la probabilidad prevista de adopción por cada aumento de una unidad en cada variable explicativa, manteniendo constantes las demás. Los resultados son sólidos en diversas especificaciones del modelo, incluidos los modelos logit y probit bivariado. Aunque el análisis destaca asociaciones estadísticamente significativas, nuestras interpretaciones son cautelosas debido al diseño transversal y a la posible endogeneidad. No se formulan afirmaciones causales.

La tenencia de la tierra muestra la asociación positiva más fuerte: los propietarios tienen un 29% más de probabilidades de adoptar prácticas sostenibles ($dy/dx = 0,29$; $p < 0,001$), lo que concuerda con los vínculos establecidos entre la seguridad de la tenencia y la inversión a largo plazo. Esta especificación binaria ofrece una prueba conservadora, dada la baja frecuencia de los regímenes de tenencia alternativos.

Entre los factores ambientales, la saturación de aluminio en el suelo se asocia de manera significativa y negativa con la adopción ($dy/dx = -0,38$; $p = 0,008$), lo que sugiere que las barreras bio-

físicas pueden dificultar la adopción. Las variables institucionales presentan resultados dispares: la adopción de tecnología está vinculada positivamente a la adopción ($dy/dx = 0,23$; $p = 0,039$), pero la asistencia técnica muestra una asociación negativa ($dy/dx = -0,04$; $p = 0,037$). Esto último podría reflejar una heterogeneidad no observada o causalidad inversa en el acceso a los servicios de apoyo. Otras covariables —características demográficas, rasgos estructurales, condiciones climáticas e indicadores económicos— no muestran asociaciones significativas.

En general, los resultados indican que la tenencia de la tierra, las limitaciones ambientales y los factores institucionales influyen significativamente en la adopción del manejo sostenible de las praderas, lo que tiene impacto en el diseño de intervenciones de política específicas. Las asociaciones son sólidas, pero no causales, lo que justifica una investigación más profunda sobre los mecanismos subyacentes.

5.4.2 Decisión sobre la carga animal sostenible

La tabla 5.3 presenta los efectos marginales de un modelo probit que estima los determinantes de las decisiones sobre la carga animal sostenible. Se consideran dos especificaciones: una incluye el manejo sostenible de las praderas como covariable para comprobar la secuencia de comportamientos, mientras que la otra, recogida en los materiales complementarios, trata las decisiones sobre la carga animal de forma independiente. Los resultados son consistentes en ambas.

El resultado binario es igual a 1 si una explotación ganadera de ceba cumple el umbral de carga animal sostenible. La tenencia de la tierra se considera un determinante institucional fundamental en este modelo, dada su supuesta influencia en los horizontes temporales y los incentivos para el uso de la tierra a largo plazo. Un indicador binario de plena propiedad, definido en la sección 3.2.6, distingue a los propietarios de los ganaderos con otros tipos de tenencia. Todas las demás covariables son las descritas en el modelo de adopción de manejo de praderas (sección 4.2). Los errores estándar se agrupan a nivel municipal para abordar la autocorrelación espacial, y los bajos valores de VIF confirman la ausencia de multicolinealidad.

La tabla 5.3 presenta los efectos marginales, los errores estándar, los valores p y los intervalos de confianza del 95%, que representan el cambio en la probabilidad prevista de carga animal sostenible por cada aumento de una unidad en cada covariable, manteniendo constantes las demás.

Tabla 5.3 Efectos marginales de los factores asociados con tasas de carga animal sostenible

Variable	dy/dx	Error est.	P> z	IC del 95%	
Manejo sostenible de las praderas	0,014	0,033	0,667	-0,050	0,078
Edad	0,001	0,001	0,523	-0,002	0,003
Género	0,034	0,037	0,345	-0,037	0,106
Índice de experiencia	-0,220	0,099	0,026	-0,413	-0,026
Tenencia de la tierra	0,049	0,034	0,155	-0,018	0,116
Asistencia técnica	0,010	0,026	0,710	-0,041	0,060
Tipo de terreno	0,022	0,027	0,415	-0,030	0,074
Acidez del suelo	-0,074	0,033	0,025	-0,139	-0,009
Nivel de aluminio	0,043	0,062	0,491	-0,079	0,165
Tipo de pastoreo	-0,075	0,043	0,080	-0,158	0,009
Tipo de manejo	0,018	0,038	0,643	-0,057	0,092
Orientación productiva	-0,020	0,014	0,153	-0,048	0,008
Temperatura promedio, 2016	0,001	0,017	0,960	-0,033	0,035
Precipitación, 2016	0,000	0,000	0,075	0,000	0,000
Costos variables	0,000	0,000	0,966	0,000	0,000
Eficiencia de finalización	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000
Superficie de finalización	-0,001	0,000	0,000	-0,002	-0,001
Observaciones	327				

Los resultados incluyen una asociación negativa entre el índice de experiencia y la carga animal sostenible ($dy/dx = -0,22$; $p = 0,026$), lo que sugiere que los ganaderos de ceba con más experiencia pueden adherirse a cargas bajas y menos sostenibles. La acidez del suelo también muestra una asociación negativa ($dy/dx = -0,074$; $p = 0,025$), lo que pone de relieve las limitaciones biofísicas de la intensificación sostenible. Por el contrario, la eficiencia de la ceba se asocia positivamente con la carga animal sostenible ($p = 0,003$), pero la superficie del área de la ceba tiene un efecto negativo significativo ($p < 0,001$), lo que indica que las limitaciones espaciales pueden fomentar prácticas más intensivas y sostenibles.

La tenencia de la tierra muestra una asociación positiva, aunque estadísticamente no significativa ($dy/dx = 0,049$; $p = 0,155$). Aunque no es concluyente, su tendencia constante respalda su relevancia como posible factor facilitador. El manejo sostenible de las praderas, incluida como covariable, no es estadísticamente significativa, lo que sugiere que las decisiones relativas al manejo de las praderas y a la carga animal pueden tomarse de forma independiente. Otras variables—incluidas las características demográficas, el terreno, el clima y los costos—no muestran efectos estadísticamente significativos. Los diagnósticos de multicolinealidad (VIF) confirman que la dependencia lineal entre los regresores no es motivo de preocupación.

En general, los resultados indican que las limitaciones biofísicas, las medidas de eficiencia y las características de los ganaderos determinan las decisiones sobre la carga animal sostenible. La ausencia de una relación estadísticamente significativa con el manejo sostenible de las praderas respalda el modelado de ambos comportamientos por separado. Al igual que en todos los estudios transversales, las interpretaciones son correlacionales y no causales.



5.5 Discusión y limitaciones

Entre los ganaderos de ceba de nuestro estudio, la seguridad de la tenencia de la tierra se perfila como un factor facilitador constante de las prácticas de sostenibilidad: los ganaderos propietarios de tierras son significativamente más propensos a adoptar prácticas sostenibles, lo que concuerda con la literatura disponible sobre el papel de la tenencia en el fomento del manejo responsable de la tierra a largo plazo. Sin embargo, los derechos sobre la tierra por sí solos no son suficientes. Las limitaciones ambientales —en particular, la elevada saturación de aluminio— y las deficiencias institucionales siguen obstaculizando la adopción de estas prácticas, incluso entre los propietarios de la tierra.

Estos patrones son especialmente relevantes en regiones posconflicto como la Orinoquía colombiana, donde persisten la titulación incompleta y la gobernanza fragmentada. El fuerte vínculo entre la tenencia y la adopción probablemente refleje un legado estructural más profundo del conflicto y la fragilidad institucional, lo que sugiere una relevancia más amplia para otras regiones fronterizas que se enfrentan al desarrollo basado en la tierra.

La disposición a la innovación también es importante: el acceso a tecnologías modernas se asocia positivamente con la adopción. Por el contrario, la asistencia técnica se asocia negativamente, posiblemente debido a la baja calidad de los programas, a la falta de adecuación a las necesidades de los agricultores o a una causalidad inversa, en la que los agricultores con dificultades son más propensos a buscar apoyo. Estos hallazgos ponen de relieve la necesidad de mejorar los servicios de extensión, tanto en su diseño como en su prestación.

En lo que respecta a las decisiones sobre la carga animal sostenible, no se encontró una relación significativa con la adopción de prácticas de manejo del pastoreo sostenible, lo que sugiere que estos aspectos no van automáticamente de la mano. En cambio, la experiencia de los ganaderos, la acidez del suelo y el tamaño de las zonas de ceba de los bovinos son factores más predictivos.

En concreto, las áreas grandes de ceba se asocian con resultados menos sostenibles, lo que tal vez refleje la existencia de sistemas extensivos con una carga animal baja que contribuyen a la degradación de las praderas o a la deforestación. Esto pone en tela de juicio la suposición de que la escala por sí sola garantiza la eficiencia y refuerza la necesidad de contar con indicadores de sostenibilidad ajustados al rendimiento.

Aunque no se puede inferir causalidad debido a que se trata de datos transversales, las comprobaciones de robustez —incluidos los modelos probit, logit y probit bivariado— arrojan resultados consistentes. Un marco probit bivariado revela una dependencia estadística limitada entre las decisiones relativas al manejo de las praderas y a la carga animal. Los diagnósticos del VIF no indican multicolinealidad, y los errores estándar agrupados a nivel municipal abordan la posible correlación intragrupal.

En general, los resultados ponen de relieve la importancia de las estrategias de política integradas que, al mismo tiempo, refuercen la tenencia de la tierra, aborden las limitaciones biofísicas y mejoren el apoyo institucional. El estudio contribuye a la creciente evidencia sobre los determinantes estructurales de la intensificación sostenible, ofreciendo ideas prácticas para las regiones que se encuentran en proceso de recuperación posconflicto y transformación ganadera.



5.6 Conclusions

Este estudio aporta evidencia empírica sobre los factores que influyen en la adopción del manejo sostenible de las praderas y de cargas animales ecológicamente adecuadas por parte de los productores ganaderos de la región de la Orinoquía en Colombia. Mediante una encuesta estructurada a las explotaciones ganaderas de ceba y modelos de elección binaria dual, examinamos las limitaciones y las condiciones propicias en los ámbitos sociodemográfico, institucional, estructural y ambiental.

La seguridad de la tenencia de la tierra se perfila como un determinante sólido y consistente de la adopción de prácticas de manejo sostenible de las praderas, lo que coincide con investigaciones previas que vinculan la seguridad de la tenencia con la gestión responsable de la tierra

a largo plazo. Sin embargo, la propiedad de la tierra por sí sola no es suficiente. Las limitaciones biofísicas —en particular, la elevada saturación de aluminio en los suelos— y el escaso apoyo institucional pueden obstaculizar la adopción de prácticas sostenibles, incluso entre los propietarios de las fincas.

Estas conclusiones revisten especial relevancia en regiones afectadas por conflictos, como la Orinoquía, donde los desplazamientos, los regímenes de tenencia informales y la fragmentación de los servicios públicos han debilitado los cimientos institucionales necesarios para el desarrollo sostenible. En tales contextos, las intervenciones en materia de tenencia deben integrarse con estrategias destinadas a restablecer la presencia del Estado, recuperar las tierras degradadas y reforzar los servicios de extensión pecuaria. Las limitaciones estructurales e institucionales aquí identificadas pueden ser aplicables también a otras regiones en situación de posconflicto o fronterizas que se encuentran en proceso de transición ganadera.

Por el contrario, los resultados relativos a la carga animal muestran relaciones más débiles y más dependientes del contexto. El manejo sostenible de las praderas no parece influir significativamente en las decisiones sobre la carga animal, lo que sugiere que los efectos indirectos en el comportamiento entre las prácticas de sostenibilidad son limitados. En cambio, la experiencia de los ganaderos, la acidez del suelo y la superficie de área de ceba son factores más predictivos. Cabe destacar que las grandes áreas de ceba se asocian con resultados de carga animales menos sostenibles, lo que posiblemente refleje ineficiencias en los sistemas con carga animal que pueden degradar la tierra o fomentar la deforestación. Esto pone de relieve la necesidad de diseñar políticas sensibles a la escala y de comprender con mayor detalle la dinámica de los sistemas ganaderos extensivos.

Aunque el análisis se basa en datos transversales y no puede respaldar afirmaciones causales, la solidez de los resultados en todas las especificaciones del modelo (logit, probit, probit bivariado), junto con los controles de multicolinealidad y agrupamiento espacial, refuerza la validez de nuestras conclusiones. En general, los resultados subrayan la necesidad de estrategias de política integradas que combinen derechos seguros de propiedad de la tierra, sistemas de extensión receptivos y el reconocimiento de las limitaciones agroecológicas locales. Los trabajos futuros podrían aprovechar enfoques longitudinales y de métodos mixtos para profundizar en la comprensión de las transiciones hacia la sostenibilidad en los sistemas ganaderos y fundamentar intervenciones equitativas y específicas para cada contexto.

Agradecimientos

Expresamos nuestro agradecimiento a todos los productores participantes por sus valiosas contribuciones, a Jorge Humberto Argüelles por su orientación estadística y a Manuel Eduardo Ostos por su dedicación al trabajo de campo y a la sistematización de los datos de la encuesta. Agradecemos al Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE) por desarrollar e implementar la metodología de la encuesta. También agradecemos el apoyo financiero y técnico brindado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural de Colombia, AGROSAVIA y el Banco Interamericano de Desarrollo.



Referencias



- Ali, E. 2021. Farm households' adoption of climate-smart practices in subsistence agriculture: Evidence from northern Togo. *Environmental Management*, 67(5), 949–962.
- ABIEC (Asociación Brasileña de Industrias Exportadoras de Carne). 2024. Brazilian Beef Exporters Association. Beef report. Brazilian beef profile. 106 pp. https://www.abiec.com.br/wp-content/uploads/beefreport_v2024_ENG.pdf
- Bahrami, S., M. R. Rad y R. M. Nayga Jr. 2025. "Land Tenure and Conservation in Agriculture: Evidence from United States Farm-Level Data." *Land Use Policy* 153: 107534.
- Barrett, C. B., T. Reardon, J. Swinnen y D. Zilberman. 2019. "Structural Transformation and Economic Development: Insights from the Agri-Food Value Chain Revolution." Cornell University: 1–56.
- Beck, P. A., M. R. Beck, S. A. Gunter, J. T. Biermacher y R. L. Gillen. 2020. "Stocking Rate Impacts Performance and Economics of Grazing Beef Steers on Mixed-Grass Prairies of the Southern Great Plains." *Translational Animal Science* 4 (3): 134. <https://doi.org/10.1093/tas/txaa134>.
- Becking, J. B. T., M. Ramírez y L. D. Díaz. 2021. Building Pathways to Sustainable Cattle Ranching in Colombia. Why and How Private Sector Should Engage and Support the Sustainable Transformation of Cattle Production in Colombia. Documento del Banco Mundial. Washington, DC: Banco Mundial. <https://documents1.worldbank.org/curated/en/653941623047310683/pdf/Building-Pathways-to-Sustainable-Cattle-Ranching-in-Colombia-Why-and-How-Private-Sector-Should-Engage-and-Support-the-Sustainable-Transformation-of-Cattle-Production-in-Colombia.pdf>.
- Biocarbono. 2024. Informe del Inventario de Gases de Efecto Invernadero del sector AFOLU en Municipios de la Orinoquía (2009–2018). Paisajes Forestales Sostenibles (ISF), Fondo Biocarbono. Colombia: MADR (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural). <https://biocarbono.org/wp-content/uploads/2024/09/Resumen-Informe-del-Inventario-de-GEI-del-sector-AFOLU-en-municipios-de-la-Orinoquia.pdf>
- Blanco, M., G. Ripoll, C. Delavaud y I. Casasús. 2020. "Performance, Carcass and Meat Quality of Young Bulls, Steers and Heifers Slaughtered at a Common Body Weight." *Livestock Science* 240: 104156. <https://doi.org/10.1016/j.livsci.2020.104156>.
- Bones, E. R., W. Paris, O. A. D. Costa, A. L. Paula, V. P. Belli, A. C. S. Neves y L. F. G. Menezes. 2023. "Influence of Irrigation and Supplementation on Performance and Ingestive Behavior of Beef Cattle on Mixed Grass Pastures." *Revista Brasileira de Zootecnia* 52: e20220055. <https://doi.org/10.37496/rbz5220220055>.
- Bonilla-Mejía, L. y J. S. Morales. 2024. "Jam-Barrel Politics." *The Review of Economics and Statistics* 106 (1): 167–183.
- Cameron, A. C. y D. L. Miller. 2015. "A Practitioner's Guide to Cluster-Robust Inference." *Journal of Human Resources* 50 (2): 317–372. <https://doi.org/10.3368/jhr.50.2.317>.

- Campuzano, L., N. Triana y S. Burkart. 2022. "Cattle Ranching in Colombia: A Monolithic Industry?" HALAC – Historia Ambiental, Latinoamericana y Caribeña 12 (2): 81–106. <https://doi.org/10.32991/2237-2717.2022v12i2.p81-106>.
- Clerici, N., D. Armenteras, P. Kareiva, R. Botero, J. P. Ramírez-Delgado, G. Forero-Medina, J. Ochoa et al. 2020. "Deforestation in Colombian Protected Areas Increased during Post-Conflict Periods." Scientific Reports 10 (1): 4971. Doi: 10.1038/s41598-020-61861-y
- Deininger, K. y G. Feder. 2009. "Land Registration, Governance, and Development: Evidence and Implications for Policy." The World Bank Research Observer 24 (2): 233–266. <https://doi.org/10.1093/wbro/lkp007>.
- Deressa, T. T., R. M. Hassan, C. Ringler, T. Alemu y M. Yesuf. 2009. "Determinants of Farmers' Choice of Adaptation Methods to Climate Change in the Nile Basin of Ethiopia." Global Environmental Change 19 (2): 248–255.
- Dumortier, J., A. Elobeid y M. Carriquiry. 2024. "Impacts of Geopolitics and Policy on Latin American Biodiversity and Water Resources." Agribusiness. <https://doi.org/10.1002/agr.21965>.
- Durana, C., E. Murgueitio y B. Murgueitio. 2023. "Sustainability of Dairy Farming in Colombia's High Andean Region." Frontiers in Sustainable Food Systems 7: 1223184. <https://doi.org/10.3389/fsu-2023.1223184>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2020. Livestock and Environment Statistics: Manure and Greenhouse Gas Emissions. Global, Regional and Country Trends 1990–2018. FAOSTAT Analytical Brief 14. <https://openknowledge.fao.org/items/aa0d210e-e5e8-4010-9a7f-e7605a57a263>.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) y NZAGRC. 2017. Low-Emissions Development of the Beef Cattle Sector in Argentina – Reducing Enteric Methane for Food Security and Livelihoods. Roma: FAO. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bits-treams/76591634-07df-4b82-a0fb-0125e24e798a/content>.
- Fargetton, X., J. C. Fuentes, J. L. Tauta y G. Rodríguez. 2017. Análisis de la cadena de valor de la ganadería de la Orinoquia. Aplicación para la optimización del portafolio de proyectos. Proyecto: Métodos para la evaluación ex ante del impacto, la optimización y la priorización de propuestas de I+D+i de Corpoica. Meta: Análisis de cadenas de valor para la evaluación ex ante de macroproyectos corporativos: aplicación para la optimización del macroproyecto de ganadería en la Orinoquia. Documento de trabajo. Corpoica.
- Fedegán. 2023. Indicadores productivos y reproductivos regionales. <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/general>.
- . 2024. Cifras de referencia. Julio. <https://www.fedegan.org.co/estadisticas/general>.

- Feder, G., R. E. Just y D. Zilberman. 1985. "Adoption of Agricultural Innovations in Developing Countries: A Survey." *Economic Development and Cultural Change* 33 (2): 255–298.
- Flórez, F., J. Galíndez, J. F. Gutierrez y S. Burkart. 2024. *Economic Evaluation of Sustainable Intensification of Cattle Farming in the Colombian Orinoco Region: Two Case Studies from the Municipality of Puerto Gaitán, Meta*. Cali, Colombia: CGIAR Initiative on Livestock and Climate. <https://hdl.handle.net/10568/155434>.
- Flórez Díaz, H., M. León Llanos, H. Ballesteros, S. Castañeda, E. Moreno, G. Martínez Correal et al. 2015. "Calidad de la carne de bovinos criollos y europeos y sus cruces con cebú en las condiciones de la Orinoquia colombiana." *Revista AICA* 6: 381–387. <https://www.aicarevista.com/n%C3%BAmeros/vol%C3%BAmes-6-2015/>.
- Fontanilla-Díaz, C. A., P. V. Preckel, J. Lowenberg-DeBoer, J. Sanders y L. M. Peña-Lévano. 2021. "Identifying Profitable Activities on the Frontier: The Altillanura of Colombia." *Agricultural Systems* 192: 103199. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103199>.
- García-Winder, M. y H. Chavarría, eds. 2017. *The Outlook for Agriculture and Rural Development in the Americas: A Perspective on Latin America and the Caribbean 2017–2018*. San José, Costa Rica: Comisión Económica para América Latina y el Caribe, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura e Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. <https://repositorio.cepal.org/handle/11362/42282>.
- Genius, M., C. J. Pantzios y V. Tzouvelekas. 2006. "Information Acquisition and Adoption of Organic Farming Practices." *Journal of Agricultural and Resource Economics* 31 (1): 93–113.
- Giraldo Mejía, L. M. 2019. *La concentración de la tierra y la violencia en Colombia: factores desencadenantes de la resistencia armada a mediados del siglo XX*. Tesis de grado, Universidad Pedagógica Nacional, Bogotá, Colombia. <http://upnblib.pedagogica.edu.co/handle/20.500.12209/10760>.
- González-Quintero, R., M. T. van Wijk, A. Ruden, M. Gómez, H. Pantevez, F. Castro-Llanos, A. Notenbaert y J. Arango. 2022. "Yield Gap Analysis to Identify Attainable Milk and Meat Productivities and the Potential for Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Cattle Systems of Colombia." *Agricultural Systems* 195: 103303. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2021.103303>.
- González-Salazar, E., J. H. Duarte-Vargas, V. Díaz-Avila y R. D. Castañeda-Serrano. 2021. "Desempeño y calidad de carne de bovinos en confinamiento alimentados con diferentes niveles de subproductos agrícolas." *Revista MVZ Córdoba* 26 (2): e1950. <https://doi.org/10.21897/rmvz.1950>.
- ICA (Instituto Colombiano Agropecuario). 2024. *Censo pecuario 2023*. <https://www.ica.gov.co/areas/pecuaria/servicios/epidemiologia-veterinaria/censos-2016/censo-2018>.
- INAC (Instituto Nacional de Carnes). 2024. *A Journey through the Uruguayan Beef Chain 2024*. Annual Sustainability Report. <https://www.inac.uy/innovaportal/file/27005/1/annual-report-2024.pdf>.

- Kassie, M., M. Jaleta, B. Shiferaw, F. Mmbando y M. Mekuria. 2013. "Adoption of Interrelated Sustainable Agricultural Practices in Smallholder Systems: Evidence from Rural Tanzania." *Technological Forecasting and Social Change* 80 (3): 525–540.
- Knowler, D. y B. Bradshaw. 2007. "Farmers' Adoption of Conservation Agriculture: A Review and Synthesis of Recent Research." *Food Policy* 32 (1): 25–48.
- Latruffe, L. y C. Nauges. 2014. "Technical Efficiency and Conversion to Organic Farming: The Case of France." *European Review of Agricultural Economics* 41 (2): 227–253.
- Lawry, S., C. Samii, R. Hall, A. Leopold, D. Hornby y F. Mtero. 2017. "The Impact of Land Property Rights Interventions on Investment and Agricultural Productivity in Developing Countries: A Systematic Review." *Journal of Development Effectiveness* 9 (1): 61–81. <https://doi.org/10.1080/19439342.2016.1160947>.
- León-Llanos, L. M. y H. Flórez-Díaz. 2016. "La importancia del temperamento en la producción de ganado de carne bovina." *Orinoquia* 20 (2): 55–63. <https://doi.org/10.22579/20112629.354>.
- Lopez Barrera, E. 2025. "Trade Realignments and the Need for Integrated Modeling Research in Latin America's Agri-Food Sector." *Agribusiness*. <https://doi.org/10.1002/agr.22057>.
- López-Barrera, E., L. Peña-Lévano, J. Lowenberg-DeBoer, C. Fontanilla-Díaz y M. Mosquera-Montoya. 2022. "Sustainable Businesses Development in Post-Conflict Zones: A Case in Rural Colombia." *Journal of Agribusiness in Developing and Emerging Economies* 12 (4): 730–749. <https://doi.org/10.1108/JADEE-11-2021-0299>.
- López-Roldán, P. y S. Fachelli. 2021. *Towards a Comparative Analysis of Social Inequalities Between Europe and Latin America*. Barcelona: Education and Work Research Group, Autonomous University of Barcelona; Springer. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-48442-2>.
- McConnell, K. E. 1983. "An Economic Model of Soil Conservation." *American Journal of Agricultural Economics* 65: 83–89. <https://doi.org/10.2307/1240340>.
- Mestra, V. L., A. A. Sierra, C. Ariza y M. O. Mayorga. 2019. "Methane Emissions in Response to Supplementation in Beef-Cattle Fed a Tropical Grass-Based in Colombian Caribbean." Documento presentado en la Seventh Greenhouse Gas and Animal Agriculture Conference, Foz do Iguaçu, Brasil, 4–8 de agosto. <http://www.ggaa2019.org/sites/default/files/proceedings-ggaa2019.pdf>
- Molina Romero, A. M., H. Flórez Díaz y M. E. Ostos Triana. 2021. *Manual de costos y análisis financiero para el sistema productivo de ganadería de ceba en la Orinoquía colombiana*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7405064>.

- Nugrahaeningtyas, E., L. Jong-Sik y P. Kyu-Hyun. 2024. "Greenhouse Gas Emissions from Livestock: Sources, Estimation, and Mitigation." *Journal of Animal Science and Technology* 66 (6): 1083–1098. <https://doi.org/10.5187/jast.2024.e86>.
- Oliveira, P. P. A., R. R. S. Corte, S. L. Silva, P. H. M. Rodriguez, L. S. Sakamoto, A. F. Pedroso, R. R. Tullio y A. Berndt. 2018. "The Effect of Grazing System Intensification on the Growth and Meat Quality of Beef Cattle in the Brazilian Atlantic Forest Biome." *Meat Science* 139: 157–161. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.01.019>.
- Opio, C., P. Gerber, A. Mottet, A. Falcucci, G. Tempio, M. MacLeod, T. Vellinga, B. Henderson y H. Steinfeld. 2013. *Greenhouse Gas Emissions from Ruminant Supply Chains – A Global Life Cycle Assessment*. Roma: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. <https://www.fao.org/4/i3461e/i3461e.pdf>.
- Pannell, D. J., G. R. Marshall, N. Barr, A. Curtis, F. Vanclay y R. Wilkinson. 2006. "Understanding and Promoting Adoption of Conservation Practices by Rural Landholders." *Australian Journal of Experimental Agriculture* 46 (11): 1407–1424.
- Parodi, A., S. Valencia-Salazar, A. M. Loboguerrero, D. Martínez-Barón, E. Murgueitio y I. Vázquez-Rowe. 2022. "The Sustainable Transformation of the Colombian Cattle Sector: Assessing Its Circularity." *PLOS Climate* 1 (10): e0000074. <https://doi.org/10.1371/journal.pclm.0000074>.
- Rao, E. J., B. Brümmer y M. Qaim. 2012. "Farmer Participation in Supermarket Channels, Production Technology, and Efficiency: The Case of Vegetables in Kenya." *American Journal of Agricultural Economics* 94 (4): 891–912.
- Rapiya, M., M. Mndela y A. Rameolo. 2025. "Sustainable Food Systems Through Livestock–Pasture Integration." *Agriculture* 15 (9): 967. <https://doi.org/10.3390/agriculture15090967>.
- Restrepo, J. A., M. Spagat y J. F. Vargas. 2006. "The Severity of the Colombian Conflict: Cross-Country Datasets versus New Micro-Data." *Journal of Peace Research* 43 (1): 99–115. <https://doi.org/10.1177/0022343306059924>.
- Richani, N. 2013. *Systems of Violence, Second Edition: The Political Economy of War and Peace in Colombia*. Albany, NY: State University of New York Press. <https://dx.doi.org/10.1353/book24349>.
- Rincón, A., H. Flórez, H. Ballesteros y M. León. 2018. "Efecto de la fertilización en la productividad de una pastura de *Brachiaria humidicola* cv. Llanero en el Piedemonte de los Llanos Orientales de Colombia." *Tropical Grasslands–Forrajes Tropicales* 6 (3): 158–168. [https://doi.org/10.17138/tgft\(6\)158-168](https://doi.org/10.17138/tgft(6)158-168).
- Rincón, A., H. Flórez, H. Ballesteros, O. Cerinza y M. León. 2025. *Productividad de carne bovina en sistemas sostenibles de pastoreo intensivo para pequeños productores de la Orinoquia colombiana*. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia). <https://doi.org/10.21930/agrosavia.manual.7408157>.

- Rincón, C. A., P. J. E. Baquero y D. H. Flórez. 2012. Manejo de la nutrición mineral en sistemas ganaderos de los Llanos Orientales de Colombia. Villavicencio, Meta: Corpoica. <https://repository.agrosavia.co/server/api/core/bitstreams/82ec5c9f-ac39-4861-a619-7ca019eba70e/content>.
- Rivera-Lozada, I. C., A. M. Gómez Sánchez y J. Uni-Chilito. 2025. "Persistence of the Armed Conflict in Colombia: An Agreement without Peace." *Economía*. <https://doi.org/10.1108/ECON-10-2023-0165>.
- Sandoval, D. F., J. F. Flórez, K. J. Enciso, M. E. Sotelo y B. Stefan. 2023. "Economic-Environmental Assessment of Silvo-Pastoral Systems in Colombia: An Ecosystem Service Perspective." *Heliyon* 9 (8): e19082. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e19082>.
- SAS Institute Inc. 2020. SAS® Enterprise Guide 8.3: Guía del usuario. Cary, NC: SAS Institute Inc. <https://documentation.sas.com/api/docsets/egug/8.3/content/egug.pdf?locale=es#nameddest=titlepage>.
- Souza, C. F. G., A. Bannink, M. O. Mayorga, A. N. Hristov y Latin America Methane Project Collaborators. 2021. "Enteric Methane Mitigation Strategies for Ruminant Livestock Systems in the Latin America and Caribbean Region: A Meta-Analysis." *Journal of Cleaner Production* 312: 127693. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127693>.
- Tapasco, J., J. F. LeCog, A. Ruden, J. S. Rivas y J. Ortiz. 2019. "The Livestock Sector in Colombia: Toward a Program to Facilitate Large-Scale Adoption of Mitigation and Adaptation Practices." *Frontiers in Sustainable Food Systems* 3: 61. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2019.00061>.
- Torregroza, L., S. Reza, E. Suárez, M. Espinosa, H. Cuadrado, I. Pastrana, S. Mejía et al. 2015. "Producción de carne en pasturas irrigadas y fertilizadas de Brachiaria híbrido cv. Mulato II en el valle del Sinú." *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria* 16 (1): 131-138. <http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v16n1/v16n1a12.pdf>.
- Triana-Ángel, N., M. Pazos Cárdenas y S. Burkart. 2025. *Land, Cows, and Bullets: The Complex History of Cattle Ranching and Armed Conflict in Colombia*. Cali, Colombia: Alliance of Bioversity International and CIAT. <https://alliancebioversityciat.org/stories/land-cows-bullets-complex-history-cattle-ranching-armed-conflict-colombia>.
- UPRA (Unidad de Planificación Rural Agropecuaria). 2016. Sistema de Información para la Planificación Rural Agropecuaria, SIPRA. <https://sipra.upra.gov.co/nacional>.
- Vera-Infanzón, R. y C. A. Ramírez-Restrepo. 2020. "Producción continua de carne en sistemas extensivos de cría en las sabanas tropicales del oriente de Colombia. Long-Term Beef Production in Extensive Cow-Calf Systems in the Tropical Savannas of Eastern Colombia." *Revista de la Facultad de Medicina Veterinaria y de Zootecnia* 67 (1): 42-59. <https://doi.org/10.15446/rfmvz.v67n1.87678>.
- Wooldridge, J. M. 2010. *Econometric Analysis of Cross Section and Panel Data*. Cambridge, MA: MIT Press.

Apéndice



1. Estadísticas descriptivas y características de la muestra

Para las estadísticas descriptivas de las variables seleccionadas se utilizó el procedimiento MEANS de SAS Institute (2020). Las Tablas 5.1 a 5.5 presentan las estadísticas descriptivas de las variables seleccionadas relacionadas con el uso del suelo, el hato, las praderas, el pastoreo, la explotación, los registros y el manejo de la información. En general, las explotaciones ganaderas de ceba encuestadas en los departamentos de Meta y Cundinamarca eran relativamente grandes, con una media de 237,77 hectáreas y cerca de 45 hectáreas de bosque natural por explotación. Algunas explotaciones también cuentan con cultivos de transición y permanentes, así como con bosques plantados, con menos de 10 hectáreas de cada cultivo por explotación (Tabla S.5.1).

Tabla S.5.1 Estadísticas descriptivas de variables relacionadas con el uso del suelo

Variable	n	Media	DE	EE	Mín.	Máx.	LIC	LSC
Área en Pastos, ha	327	237,77	514,74	28,47	4	6.000	181,77	293,76
Cultivos transitorios, ha	327	2,76	22,08	1,22	0	350	0,36	5,17
Cultivos permanentes, ha	327	2,50	22,79	1,26	0	300	0,023	4,98
Bosque plantado, ha	327	5,28	30,95	1,71	0	300	1,91	8,65
Barbecho, ha	327	8,77	66,56	3,68	0	1.000	1,52	16,01
Área de descanso, ha	327	8,84	49,69	2,75	0	600	3,43	14,24
Malezas, ha	327	12,11	59,71	3,30	0	800	5,61	18,60
Bosque natural, ha	327	44,98	153,72	8,50	0	2.000	28,26	61,71
Uso no agropecuario, ha	327	4,53	34,91	1,93	0	620	0,73	8

DE: desviación estándar

EE: error estándar

Mín.: mínimo

Máx.: máximo

LIC: límite inferior del intervalo de confianza del 95% para la media

LSC: límite superior del intervalo de confianza del 95% para la media

En los sistemas de ganadería de ceba de los departamentos del Meta y Cundinamarca, los parámetros productivos son relativamente bajos. Los machos (novillos, toros y toretes) y las hembras (vacas y novillas) comienzan la fase de engorde a edades relativamente avanzadas, lo que da lugar a un período de engorde cercano a un año y a una edad de sacrificio de tres años o más (Tabla S.5.2). El precio de venta de las hembras y los machos por kilogramo de peso vivo en 2017 fue de 1,39 y 1,55 dólares estadounidenses, respectivamente.

Table S.5.2 Estadísticas descriptivas de variables relacionadas con el manejo del hato de ceba

Variable	n	Media	DE	EE	Mín.	Máx.	LIC	LSC
Edad inicial de las hembras, meses	76	32,22	27,47	3,15	7	138	26,05	38,39
Edad inicial de los machos, meses	290	21,31	11,14	0,65	4	96	20,03	22,59
Edad final de las hembras, meses	76	43,65	25,35	2,91	12	141	37,86	49,45
Edad final de los machos, meses	290	34,75	10,16	0,60	10	100	33,57	35,92
Peso inicial de las hembras, kg	76	291,95	81,14	9,31	118	460	273,31	310,19
Peso inicial de los machos, kg	290	270,72	76,05	4,47	100	560	261,97	279,47
Peso final de las hembras, kg	76	431,79	60,66	6,96	300	550	80,23	120,47
Peso final de los machos, kg	290	452,35	73,88	4,34	206	650	383,81	418,51
Precio de venta de hembras en pie, USD ^a	75	602,8	142,8	16,5	323	866,7	570	635,7
Precio de venta de machos en pie, USD ^a	290	701,6	154,5	9,1	308,2	1.725	683,7	719,3

a En 2017, US\$1 = COP 3.000.

DE: desviación estándar

EE: error estándar

Mín.: mínimo

Máx.: máximo

LIC: límite inferior del intervalo de confianza del 95% para la media

LSC: límite superior del intervalo de confianza del 95% para la media

La superficie dedicada al mantenimiento de los praderas en la explotación era mayor que la utilizada para la fase de ceba o engorde. El número de potreros utilizados para la finalización de la ceba era de aproximadamente nueve, con períodos cortos de pastoreo rotacional que rondaban los 20 días en promedio. Este período es significativamente más corto que el período medio de rotación de 30 días observado en la región de la Orinoquia (Rincón *et al.*, 2018). La suplementación con sales minerales se proporcionó de forma constante a un nivel relativamente alto (Tabla S.5.3), superando la media regional de 60 g/día (Rincón *et al.*, 2012).

Tabla S.5.3 Estadísticas descriptivas de variables relacionadas con el manejo de pastos y el pastoreo

Variable	n	Media	DE	EE	Mín.	Máx.	LIC	LSC
Área de praderas con mantenimiento, ha	327	51,45	93,57	5,17	0	800	41,27	61,63
Área de praderas con mantenimiento para finalización de la ceba, ha	327	22,36	37,48	2,07	0	250	18,28	26,43
Número de potreros de pastos para la finalización de la ceba	327	9,19	31,84	1,76	1	480	5,73	12,66
Días de rotación de las praderas para finalización de la ceba	327	20,53	24,04	1,33	0	365	18	23,15
Consumo de sal mineralizada, g/día	313	114,04	127,9	7,23	30	213	99,82	128,27
Consumo de sal mineralizada, días por mes	310	29,29	4	0,23	1	60	28,84	29,74

DE: desviación estándar

EE: error estándar

Mín.: mínimo

Máx.: máximo

LIC: límite inferior del intervalo de confianza del 95% para la media

LSC: límite superior del intervalo de confianza del 95% para la media

En las explotaciones encuestadas, el número de trabajadores contratados fue notablemente superior a la media regional para los sistemas de ceba o engorde, que es de aproximadamente 30 al mes (Fedegán, 2024). La participación de la mano de obra familiar fue relativamente baja. Sin embargo, una proporción significativa de los empleados de las explotaciones estaba contratada de forma permanente, lo que contrasta con la media regional de dos trabajadores por explotación (Fedegán, 2024). La inversión de capital en las actividades de engorde mostró una gran variabilidad, al igual que los costes asociados a la tierra y al transporte (Tabla S.5.4).

Tabla S.5.4 Estadísticas descriptivas de variables relacionadas con el manejo de la finca

Variable	n	Media	DE	EE	Mín.	Máx.	LIC	LSC
Número de jornales contratados	324	50,38	91,32	1	1	365	40,40	60,36
Mano de obra familiar, %	327	12,97	28,5	0	0	100	9,87	16,07
Mano de obra permanente para la ceba, %	327	79,53	36,3	0	0	100	75,58	83,48
Mano de obra temporal para la ceba, %	327	6,23	18,55	0	0	100	4,22	8,25
Recursos propios para engorde, USD ^{a,b}	237	9.524	12.903	333,3	333,3	112.000	7.873	11.175
Costo de transporte, USD ^a	216	81,7	101,4	1,7	1,7	1.000	68,01	95,3
Costo de la tierra, USD ^a	324	276,4	264,8	1,0	1,0	3.560	247,5	305,4

^a En 2017, US\$1 = COP 3.000.

^b Recursos propios del productor.

DE: desviación estándar

EE: error estándar

Mín.: mínimo

Máx.: máximo

LIC: límite inferior del intervalo de confianza del 95% para la media

LSC: límite superior del intervalo de confianza del 95% para la media

En general, los ganaderos de las explotaciones de ceba encuestados utilizan registros técnicos y de software en bajos porcentajes. Las fuentes de información de plataformas estatales y privadas se utilizaban ocasionalmente (Tabla S.5.5).

Tabla S.5.4 Estadísticas descriptivas de variables relacionadas con el uso de registros y la gestión de la información

Variable	n	Media	DE	EE	Mín.	Máx.	LIC	LSC
Uso de registros técnicos ^a , %	327	30,45	44,31	2,45	0	100	25,63	35,27
Uso de registros en software, %	327	3,46	14,29	0,79	0	100	1,91	5,02
Uso de otros registros, % ^a	327	23,80	41,47	2,29	0	100	19,29	28,31
Fuente de información ^b SIPSA, %	327	3,73	18,44	1,02	0	100	1,72	5,73
Fuente de información: centro de abastecimiento, %	327	11,31	29,55	1,63	0	100	8,10	14,52
Fuente de información: plaza de mercado, %	327	10,06	25,9	1,43	0	100	7,24	12,87
Fuente de información: vendedores, %	327	16,26	31,94	1,77	0	100	12,79	19,74

^a Incluye registros financieros y contables.

^b Incluye las plataformas o páginas web en las que el productor accede a información técnica.

DE: desviación estándar

EE: error estándar

Mín.: mínimo

Máx.: máximo

LIC: límite inferior del intervalo de confianza del 95% para la media

LSC: límite superior del intervalo de confianza del 95% para la media

Mediante el procedimiento PROC FREQ de SAS Institute (2020), se evaluó una prueba de chi-cuadrado de dependencia —que incluía las pruebas de chi-cuadrado de Pearson, de razón de verosimilitud y de Mantel-Haenszel— para las variables cualitativas. Esto reveló una asociación entre el tipo de sistema productivo y las prácticas de pastoreo. Las explotaciones que cuentan con un sistema productivo basado en un ciclo completo (cría, levante y ceba) eran más propensas a adoptar un sistema de pastoreo rotacional para la fase de ceba que los demás sistemas (Tabla S.5.6; $X^2 (10, N = 327) = 323,48, p < 0,00004$).

Tabla S.5.6. Sistema productivo, por práctica de pastoreo

Práctica de pastoreo ^a	Lechería	Ciclo completo ^b	Levante de carne bovina ^c	Engorde de carne bovina ^d	Otro sistema de carne bovina ^e	Doble propósito ^f	Total
ALTERNO							
Frecuencia	2	15	1	12	7	3	40
Porcentaje	0,61	4,59	0,31	3,67	2,14	0,92	12,23
% de la fila ^g	5,00	37,50	2,50	30,00	17,50	7,50	
% de la columna ^h	10,53	10,34	3,70	13,19	28,00	15,00	
CONTINUO							
Frecuencia	2	18	2	4	5	8	39
Porcentaje	0,61	5,50	0,61	1,22	1,53	2,45	11,93
% de fila	5,13	46,15	5,13	10,26	12,82	20,51	
% de columna	10,53	12,41	7,41	4,40	20,00	40,00	
ROTACIONAL							
Frecuencia	15	112	24	75	13	9	248
Porcentaje	4,59	34,25	7,34	22,94	3,98	2,75	75,84
% de fila	6,05	45,16	9,68	30,24	5,24	3,63	
% de columna	78,95	77,24	88,89	82,42	52,00	45,00	
Total	19 5,81	145 44,34	27 8,26	91 27,83	25 7,65	20 6,12	327 100,00

^a En el pastoreo alterno, los pastos se dividen en dos potreros y el ganado se traslada de uno a otro. En el pastoreo continuo, el ganado tiene acceso permanente a una pradera grande durante todo el año. En el pastoreo rotacional, un pasto se divide en tres o más potreros y el ganado se traslada de uno a otro.

^b El ciclo completo comprende todo el proceso de cría de ganado para carne bovina, desde la reproducción y el nacimiento hasta el sacrificio, e incluye las fases de cría, levante y ceba o engorde.

^c Después del destete, los terneros ingresan a praderas para ganar peso antes de entrar en la fase de ceba o engorde, aproximadamente con 350 kg de peso vivo.

^d El ganado pastorea en praderas para alcanzar el peso de mercado deseado, de 450 a 500 kg de peso vivo.

^e “Otros” incluye el sistema de cría, en el que los terneros se crían junto con sus madres hasta el destete.

^f El ganado de doble propósito son bovinos cruzados con razas de carne bovina como de leche.

^g Representa el porcentaje del tipo de sistema productivo.

^h Representa el porcentaje de las prácticas de manejo del pastoreo.

Se observó una asociación entre las prácticas de manejo del pastoreo y el nivel de intensificación del sistema productivo. Las explotaciones que aplicaban un sistema intensivo eran más propensas a adoptar el pastoreo rotacional para la fase de ceba que las que se encontraban en otros niveles de intensificación (Tabla S7; X^2 (6, N = 327) = 2.475,41, $p < 0,00001$). Los sistemas de producción ganadera en la Orinoquia van desde los extensivos, que dependen en gran medida de los recursos naturales con bajos insumos y tasas de crecimiento lentas, hasta los sistemas intensivos, caracterizados por altas densidades de carga animal, alimentación suplementaria y una mano de obra significativa (Vera-Infanzón y Ramírez-Restrepo, 2020). Los sistemas de confinamiento maximizan la producción, pero requieren elevados insumos externos (González-Salazar *et al.*, 2021). Los sistemas de semiconfinamiento, que combinan elementos de los enfoques extensivo e intensivo, ofrecen un equilibrio potencial entre productividad y sostenibilidad.

La estrategia de producción óptima depende de una evaluación multifacética de los recursos disponibles, las demandas del mercado, las consideraciones medioambientales y la viabilidad económica. Flórez *et al.* (2024) propusieron una intensificación sostenible de los sistemas ganaderos en la Orinoquia, que comprende sistemas silvopastoriles (SSP), pastos mejorados y buenas prácticas ganaderas para aumentar la productividad animal y la carga animal, lo que generaría beneficios (por ejemplo, mayores ingresos para las familias rurales, reducción de la pobreza) y realizaría la mitigación de los daños (por ejemplo, la deforestación y las emisiones de gases de efecto invernadero).

Tabla S.5.7. Sistema de intensificación, por práctica de manejo del pastoreo

Práctica de pastoreo ^a	Extensivo ^a	Intensivo ^b	Confinamiento ^c	Semiconfinamiento ^d	Total
ALTERNO					
Frecuencia	3	37	0	0	40
Porcentaje	0,92	11,31	0,00	0,00	12,23
% de fila ^e	7,50	92,50	0,00	0,00	
% de columna ^f	6,67	13,45	0,00	0,00	
CONTINUO					
Frecuencia	37	2	0	0	39
Porcentaje	11,31	0,61	0,00	0,00	11,93
% de fila	94,87	5,13	0,00	0,00	
% de columna	82,22	0,73	0,00	0,00	
ROTACIONAL					
Frecuencia	5	236	1	6	248
Porcentaje	1,53	72,17	0,31	1,83	75,84
% de fila	2,02	95,16	0,40	2,42	
% de columna	11,11	85,82	100,00	100,00	
Total	45 13,76	275 84,10	1 0,31	6 1,83	327 100,00

a El sistema extensivo depende principalmente de los recursos naturales, con insumos mínimos, y presenta índices productivos bajos en comparación con los sistemas intensivos.

b El sistema intensivo utiliza altos niveles de insumos y manejo, y presenta índices productivos altos en comparación con los sistemas extensivos.

c El sistema de confinamiento es un tipo específico de sistema intensivo en el que el ganado se confina en un corral o en un espacio limitado de engorde durante la fase de engorde.

d El semiconfinamiento es un sistema en el que el ganado pasa parte de la fase de engorde confinado en un corral o espacio de engorde y el resto del tiempo pastando en pastos.

e Representa el porcentaje del tipo de sistema de intensificación.

f Representa el porcentaje de las prácticas de pastoreo.

Los ganaderos adquieren el ganado para la ceba de diversas maneras. Los ganaderos que crían su propio ganado eran más propensos a adoptar un sistema de pastoreo rotacional para la fase de engorde, en comparación con los ganaderos que adquieren el ganado para la ceba por otros medios (Tabla S.5.8; X^2 (14, N = 324) = 263,720, $p < 0,0232$).

Tabla S.5.8 Origen del ganado para la ceba o engorde, por práctica de manejo del pastoreo

Práctica de pastoreo	Subasta	Feria	Finca	Otra finca	Compra local	Compra regional	Otro	Total
ALTERNO								
Frecuencia	5	2	17	5	6	4	1	40
Porcentaje	1,54	0,62	5,25	1,54	1,85	1,23	0,31	12,35
% de fila ^a	12,50	5,00	42,50	12,50	15,00	10,00	2,50	
% de columna ^b	17,24	40,00	11,18	35,71	14,29	10,00	2,30	
CONTINUO								
Frecuencia	2	0	27	1	5	2	2	39
Porcentaje	0,62	0,00	8,33	0,31	1,54	0,62	0,62	12,04
% de fila	5,13	0,00	69,23	2,56	12,82	5,13	5,13	
% de columna	6,90	0,00	17,76	7,14	11,90	5,00	4,76	
ROTACIONAL								
Frecuencia	22	3	108	8	31	34	39	245
Porcentaje	6,79	0,93	33,33	2,47	9,57	10,49	12,03	75,62
% de fila	8,98	1,22	44,08	3,27	12,65	13,88	15,92	
% de columna	75,86	60,00	71,05	57,14	73,81	85,00	92,85	
Total	29 8,95	5 1,54	152 46,91	14 4,32	42 12,96	40 12,35	42 12,96	324 100,00

^a Representa el porcentaje del origen del ganado.

^b Representa el porcentaje de las prácticas de pastoreo.

Los ganaderos pueden engordar tanto toros como novillos, pero aquellos que engordan únicamente novillos eran más propensos a adoptar un sistema de pastoreo rotacional (Tabla S9; X^2 (2, N = 282) = 168,842, $p < 0,0002$). Aunque los toros tienen un mayor aumento de peso que los novillos (Blanco *et al.*, 2020), generalmente se prefieren los novillos para el engorde del ganado porque la carne de novillo tiende a ser más tierna (Flórez Díaz *et al.*, 2015), y los novillos suelen ser más dóciles y más fáciles de manejar que los toros (León-Llanos y Flórez-Díaz, 2016).

Tabla S.5.9 Ganado de ceba engorde, por práctica de manejo del pastoreo

Práctica de pastoreo ^a	Toros	Novillos	Total
ALTERNO			
Frecuencia	20	18	38
Porcentaje	7,09	6,38	13,48
% de fila ^a	52,63	47,37	
% de columna ^b	23,53	9,14	
CONTINUO			
Frecuencia	3	32	35
Porcentaje	1,06	11,35	12,41
% de fila	8,57	91,43	
% de columna	3,53	16,24	
ROTACIONAL			
Frecuencia	62	147	209
Porcentaje	21,99	52,13	74,11
% de fila	29,67	70,33	
% de columna	72,94	74,62	
Total	85 30,14	197 69,86	282 100,00

^a Representa el porcentaje de la condición sexual del ganado.

^b Representa el porcentaje de las prácticas de pastoreo.

Los costos de la fase de ceba o engorde varían de acuerdo con el tipo de ceba realizado. Los ganaderos que invierten más en el manejo de los animales eran más propensos a adoptar un sistema de pastoreo rotacional que los que invierten en asistencia técnica, servicios públicos, impuestos, etc. (Tabla S10; X^2 (12, N = 324) = 272,336, $p < 0,0072$).

Tabla S.5.10 Inversiones, por práctica de manejo del pastoreo

Práctica de pastoreo	Tierra	Manejo animal	Asistencia técnica	Honorarios	Servicios públicos	Impuestos	Otro	Total
ALTERNO								
Frecuencia	6	13	0	14	0	7	0	40
Porcentaje	1,85	4,01	0,00	4,32	0,00	2,16	0,00	12,35
% de fila	15,00	32,50	0,00	35,00	0,00	17,50	0,00	
% de columna	20,00	11,11	0,00	10,53	0,00	21,21	0,00	
CONTINUO								
Frecuencia	1	5	2	25	2	4	0	39
Porcentaje	0,31	1,54	0,62	7,72	0,62	1,23	0,00	12,04
% de fila	2,56	12,82	5,13	64,10	5,13	10,26	0,00	
% de columna	3,33	4,27	40,00	18,80	40,00	12,12	0,00	
ROTACIONAL								
Frecuencia	23	99	3	94	3	22	1	245
Porcentaje	7,10	30,56	0,93	29,01	0,93	6,79	0,31	75,62
% de fila	9,39	40,41	1,22	38,37	1,22	8,98	0,41	
% de columna	76,67	84,62	60,00	70,68	60,00	66,67	100,00	
Total	30 9,26	117 36,11	5 1,54	133 41,05	5 1,54	33 10,19	1 0,31	324 100,00

Los ganaderos utilizan diversas fuentes para abastecer de agua al ganado. Los ganaderos que utilizan sistemas de riego eran más propensos a adoptar un sistema de pastoreo rotacional que los que utilizan otros sistemas (Tabla S11; $X^2(10, N = 308) = 200,958, p < 0,0284$). Los ganaderos de ceba que utilizan sistemas de riego principalmente durante la estación seca son más propensos a adoptar prácticas de pastoreo rotacional, ya que el riego aumenta la producción de forraje, lo que permite una división eficaz de los pastos y el movimiento de los animales (Torregroza *et al.*, 2015). Además, el riego aumenta la productividad y el valor nutricional de los pastos, con una mayor producción ganadera por superficie en períodos de déficit hídrico (Bones *et al.*, 2023). Al realizar la mitigación de la variabilidad asociada a la dependencia de las precipitaciones, los sistemas de riego crean un entorno más estable que favorece la implementación y el mantenimiento de rotaciones de pastoreo planificadas.

Tabla S.5.11 Fuentes de agua, por práctica de manejo del pastoreo

Práctica de pastoreo ^a	Acueducto	Estanque	Lluvia	Río	Carrotanque	Riego	Total
ALTERNO							
Frecuencia	2	0	2	16	0	16	36
Porcentaje	0,65	0,00	0,65	5,19	0,00	5,19	11,69
% de fila	5,56	0,00	5,56	44,44	0,00	44,44	
% de columna	11,76	0,00	13,33	14,55	0,00	11,03	
CONTINUO							
Frecuencia	0	0	0	22	2	15	39
Porcentaje	0,00	0,00	0,00	7,14	0,65	4,87	12,66
% de fila	0,00	0,00	0,00	56,41	5,13	38,46	
% de columna	0,00	0,00	0,00	20,00	33,33	10,34	
ROTACIONAL							
Frecuencia	15	15	13	72	4	114	233
Porcentaje	4,87	4,87	4,22	23,38	1,30	37,01	75,65
% de fila	6,44	6,44	5,58	30,90	1,72	48,93	
% de columna	88,24	100,00	86,67	65,45	66,67	78,62	
Total	17 5,52	15 4,87	15 4,87	110 35,71	6 1,95	145 47,08	308 100,00

2. Detalles metodológicos y antecedentes adicionales

Tabla S.5.12 Variables utilizadas en el modelo econométrico de dos etapas

Categoría	Variable	Descripción	Decisión del modelo 1	Decisión del modelo 2
Variables dependientes	<i>Manejo sostenible de las praderas</i>	Indica si el productor adopta prácticas de manejo sostenible de pastos: 1 = sostenible, incluido conservación del suelo, control de la erosión y preservación de la biodiversidad; 0 = no sostenible.	N/A	Sí/No
	<i>Carga animal</i>	Indica si el número de animales por hectárea se ubica dentro del rango sostenible: 1 = sostenible, dentro de mínimos y máximos predefinidos; 0 = no sostenible, por debajo del mínimo o por encima del máximo.	N/A	Sí
Sociodemográfica	<i>Edad</i>	Edad del productor.	Sí	Sí
	<i>Género</i>	Variable binaria: 1 = hombre y 0 = mujer.	Sí	Sí
	<i>Índice de experiencia</i>	Años de experiencia del productor en ganadería, presentado como índice.	Sí	Sí

Categoría	Variable	Descripción	Decisión del modelo 1	Decisión del modelo 2
Institucional	<i>Tenencia de la tierra</i>	Situación de tenencia de la tierra del productor: 1 = propia; 0 = otras formas de tenencia, incluidos uso compartido o compartido de la tierra, aparcería, arrendamiento de la tierra, acuerdos de uso o arreglos alternativos, como derechos de tenencia informales, colectivos o jurídicamente diferenciados.	Sí	Sí
	<i>Asistencia técnica</i>	Indica si el productor ha recibido servicios de asistencia técnica: 1 = alguna forma de asistencia técnica o formación académica pertinente de una fuente pública o privada; 0 = sin asistencia técnica.	Sí	No
	<i>Adopción de tecnología</i>	Indica si el productor adopta tecnologías ganaderas modernas.	Sí	No
Estructural	<i>Tipo de terreno</i>	Forma dominante del terreno en la finca: 1 = abanicos aluviales, 2 = colinas coluviales, 3 = lomas, 4 = planicie aluvial, 5 = terrazas.	Sí	Sí
	<i>Acidez del suelo</i>	Nivel de acidez del suelo: 1 = ácido, 2 = fuertemente ácido y ácido, y 3 = fuertemente ácido.	Sí	Sí
	<i>Nivel de aluminio</i>	Nivel de aluminio en el suelo: 1 = bajo, 2 = medio y 3 = alto.	Sí	Sí
	<i>Tipo de pastoreo</i>	Sistema de pastoreo utilizado en el engorde de ganado: 1 = pastoreo continuo, 2 = pastoreo alterno, 3 = pastoreo rotacional.	No	Sí
	<i>Tipo de manejo</i>	Sistema de manejo del ganado: 0 = extensivo (sistema tradicional de cría basado en pastoreo), 1 = no extensivo (incluidos sistemas de pastoreo no extensivo, confinamiento y semiconfinamiento).	No	Sí
	<i>Orientación productiva</i>	Sistema productivo principal de la finca: 1 = producción lechera, 2 = ciclo completo y/o ciclo parcial (incluida la cría, el levante y la ceba), y 3 = doble propósito (producción de leche y carne).	Sí	Sí
Ambiental	<i>Temperatura promedio, 2016</i>	Temperatura promedio georreferenciada, 2016.	Sí	Sí
	<i>Precipitación, 2016</i>	Precipitación promedio georreferenciada, 2016.	Sí	Sí
Económica	<i>Costos variables</i>	Costos que fluctúan con la producción (por ejemplo, alimentación, gastos veterinarios, mano de obra).	Sí	Sí
	<i>Recursos totales</i>	Total de recursos financieros y materiales disponibles para la operación de la finca.	Sí	No
	<i>Eficiencia de finalización</i>	Eficiencia del proceso de engorde del ganado.	No	Sí
	<i>Superficie de finalización</i>	Superficie total utilizada para las operaciones de engorde del ganado.	No	Sí
	<i>Código municipal</i>	Ubicación geográfica de la finca, utilizada como efecto fijo para controlar la heterogeneidad regional en el análisis.	Agrupado	Agrupado

Tabla S.5.13

Estimaciones del factor de inflación de la varianza (VIF) para la evaluación de multicolinealidad del modelo de manejo sostenible de praderas

Variable	VIF	1/VIF
Edad	1,07	0,934
Género	1,04	0,959
Índice de experiencia	1,11	0,898
Tenencia de la tierra	1,10	0,907
Asistencia técnica	1,13	0,885
Adopción de tecnología	1,45	0,691
Tipo de terreno	1,87	0,536
Acidez del suelo	1,52	0,659
Nivel de aluminio	1,92	0,521
Orientación productiva	1,10	0,912
Temperatura promedio, 2016	3,73	0,268
Precipitación, 2016	2,76	0,362
Costos variables	1,38	0,726
Recursos totales	1,09	0,916
VIF medio	1,59	

Tabla S.5.14

Estimaciones del factor de inflación de la varianza (VIF) para la evaluación de multicolinealidad del modelo de carga animal

Variable	VIF	1/VIF
Manejo sostenible de las praderas	1,36	0,734
Edad	1,06	0,942
Género	1,06	0,946
Índice de experiencia	1,16	0,861
Tenencia de la tierra	1,19	0,841
Asistencia técnica	1,11	0,898
Tipo de terreno	1,91	0,523
Acidez del suelo	1,53	0,654
Nivel de aluminio	2,11	0,474
Tipo de pastoreo	1,85	0,540
Tipo de manejo	1,83	0,546
Orientación productiva	1,12	0,897
Temperatura promedio, 2016	3,63	0,275
Precipitación, 2016	2,73	0,366
Costos variables	1,14	0,879
Eficiencia de finalización	1,06	0,943
Superficie de finalización	1,15	0,870
VIF medio	1,59	

2.1. Datos basados en información geográfica

La información geográfica se refiere a los atributos que permiten describir los procesos objeto de estudio; la información cartográfica se refiere a los resultados gráficos o mapas de la información geográfica. En este estudio, nos referimos a datos vectoriales y ráster, en los que relacionamos la información geográfica de variables como el tipo de suelo, la temperatura ambiente y las precipitaciones para caracterizar biofísicamente las áreas de los segmentos y agrupaciones del Censo Nacional Agrícola (CNA) y la Encuesta Nacional Agrícola (ENA). Estos datos se utilizaron en el proyecto de estructuración de los costos de la ceba de bovinos y complementan el análisis de la encuesta mediante un modelo econométrico.

En la siguiente tabla se presentan las variables que se van a evaluar, el tipo de datos, el formato y las fuentes de información utilizadas para caracterizar el área de estudio o incluidas en el modelo econométrico.

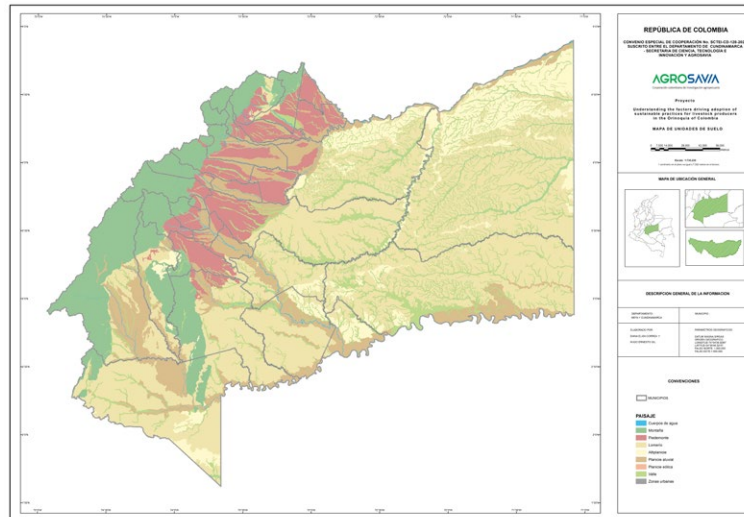
Tabla S.5.15

Variables, datos, formato y fuente de información de las variables geográficas

Variable	Tipo de datos	Formato	Fuente de datos
Límites departamentales y municipales	Vectorial	Shapefile	DANE Geoportal – Geovisor Consulta del Marco Geoestadístico Nacional (MGN)
Unidades de suelo de Meta y departamento de Cundinamarca	Vectorial	Shapefile	IGAC Datos Abiertos Agrología GEOPORTAL
Frontera agrícola	Vectorial	Shapefile	UPRA SIPRA
Precipitación	Ráster	TIF	CHIRPS – Climate Hazards Center. UC Santa Barbara CHIRPS: Rainfall Estimates from Rain Gauge and Satellite Observations Climate Hazards Center – UC Santa Barbara
Temperatura ambiente	Ráster	TIF	NASA Power https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/

El proceso de recopilación de información cartográfica básica y temática a escala 1:100 000 se inició con los archivos shapefile de los estudios edafológicos de Meta y Cundinamarca del Instituto Geográfico Agustín Codazzi, un geoportal de datos abiertos <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia> (Figura S.5.1).

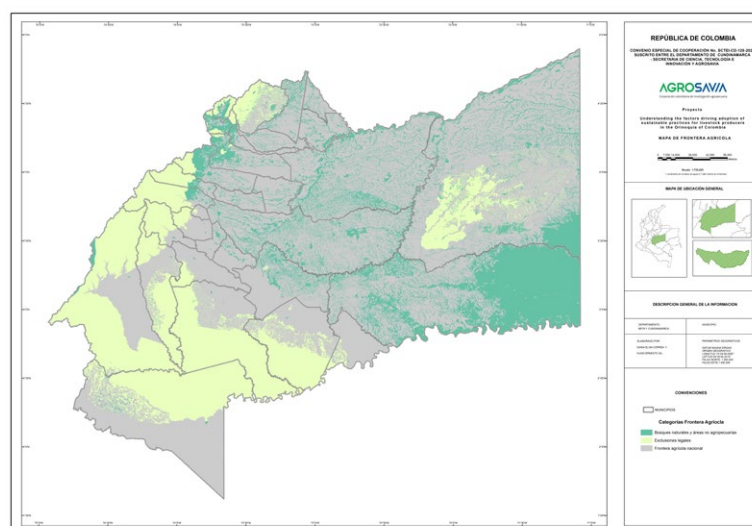
Figura S.5.1 Unidades de suelo de los departamentos de Meta y Cundinamarca



IGAC <https://geoportal.igac.gov.co/contenido/datos-abiertos-agrologia>.

Asimismo, para el departamento del Meta, comenzando por el municipio de San Martín, donde se realizaron más estudios (51), se tomó la frontera agrícola establecida por la Unidad de Planificación Rural del Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural (UPRA) de <https://sipra.upra.gov.co/nacional> (Figura S.5.2).

Figura S.5.2 Frontera agrícola del departamento del Meta, incluido el municipio de San Martín



SIPRA, UPRA. <https://sipra.upra.gov.co/territorial>

Figura S.5.3 Áreas de segmentos y conglomerados del Censo Nacional Agrícola (CNA) y la Encuesta Nacional Agrícola (ENA) para el departamento de Cundinamarca. Las áreas verdes corresponden a los municipios de Medina y Paratebueno (Molina Romero *et al.*, 2021)

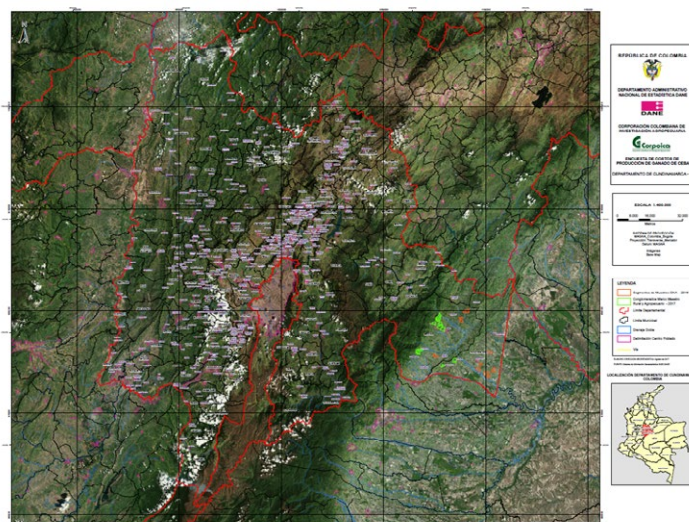


Figura S.5.4 Áreas de segmentos y conglomerados del Censo Nacional Agrícola (CNA) y la Encuesta Nacional Agrícola (ENA) para el departamento del Meta. Las áreas verdes corresponden a los municipios seleccionados (Molina Romero *et al.*, 2021)

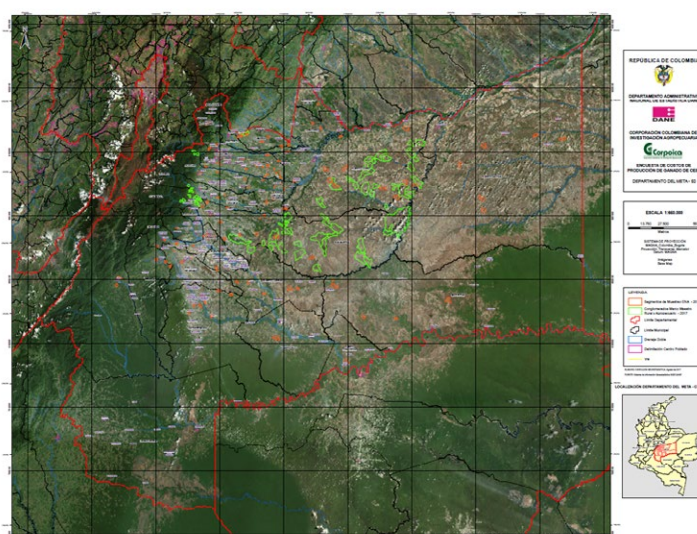


Figura S.5.5 Segmentos y conglomerados de San Martín (Meta) georreferenciados en el software ArcGIS 10.8

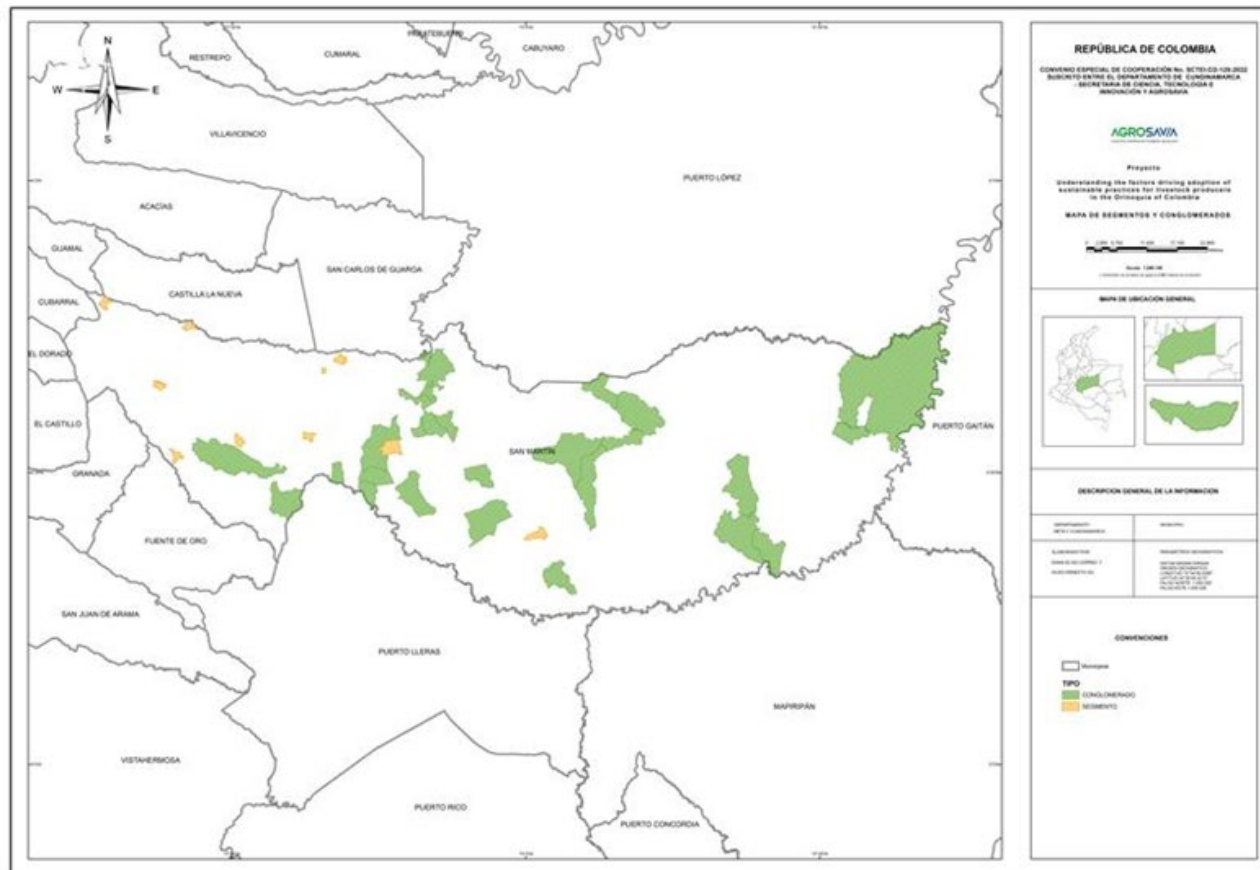


Tabla S.5.16 Superficie total de segmentos y conglomerados del municipio de San Martín, Meta

FID	Tipo	Código	Superficie (hectáreas)
0	Segmento	50080502	286,90
1	Segmento	50086202	241,88
2	Segmento	50905801	231,86
3	Segmento	50100401	35,16
4	Conglomerado	506890121	963,16
5	Conglomerado	506890107	469,96
6	Conglomerado	506890051	3.065,66
7	Segmento	50097404	278,61
8	Segmento	50097304	74,40
9	Conglomerado	506890098	4.490,90
10	Conglomerado	506890094	1.992,69
11	Conglomerado	506890176	1.609,15
12	Conglomerado	506890181	5.812,14
13	Conglomerado	506890168	1.682,68
14	Conglomerado	506890012	28.124,89
15	Segmento	50110003	292,47
16	Conglomerado	506890189	6.056,26
17	Segmento	50100602	284,96
18	Segmento	50110104	268,35
19	Conglomerado	506890233	2.777,86
20	Conglomerado	506890232	1.086,17
21	Conglomerado	506890211	799,50
22	Conglomerado	506890223	2.916,64
23	Conglomerado	506890218	1.625,04
24	Conglomerado	506890157	4.329,07
25	Segmento	50207401	862,67
26	Conglomerado	506890161	509,77
27	Conglomerado	506890016	1.157,14
28	Conglomerado	506890145	1.289,13
29	Conglomerado	506890217	1.560,38
30	Conglomerado	506890245	4.050,81
31	Conglomerado	506890197	3.696,76
32	Segmento	50223503	502,23
33	Conglomerado	506890272	2.048,95
34	Conglomerado	506890205	4.343,82
35	Conglomerado	506890247	4.964,00
36	Conglomerado	506890261	2.818,19
Total			97.580,24

Tabla S.5.17 Efectos marginales del modelo probit bivariado sobre el manejo sostenible de praderas

Variable	dy/dx	Error est.	P> z	IC del 95%	
Edad	-0,002	0,006	0,796	-0,013	0,010
Género	0,319	0,256	0,214	-0,184	0,821
Índice de experiencia	-0,660	0,997	0,508	-2,614	1,294
Tenencia de la tierra	0,940	0,178	0,000	0,592	1,289
Asistencia técnica	-0,143	0,067	0,034	-0,275	-0,010
Adopción de tecnología	0,726	0,350	0,038	0,040	1,413
Tipo de terreno	0,006	0,118	0,958	-0,224	0,237
Acidez del suelo	0,111	0,164	0,497	-0,210	0,432
Nivel de aluminio	-1,241	0,505	0,014	-2,231	-0,251
Orientación productiva	0,022	0,050	0,667	-0,077	0,120
Temperatura promedio, 2016	0,020	0,100	0,840	-0,176	0,216
Precipitación, 2016	0,000	0,001	0,888	-0,002	0,002
Costos variables	0,000	0,000	0,332	0,000	0,000
Recursos totales	0,000	0,000	0,154	0,000	0,000
Observaciones			327		

Tabla S.5.18 Efectos marginales del modelo probit bivariado sobre la carga animal

Variable	dy/dx	Error est.	P> z	IC del 95%	
Edad	0,003	0,005	0,511	-0,006	0,012
Género	0,151	0,151	0,319	-0,146	0,448
Índice de experiencia	-0,915	0,405	0,024	-1,709	-0,121
Tenencia de la tierra	0,218	0,153	0,154	-0,082	0,519
Asistencia técnica	0,036	0,105	0,732	-0,169	0,241
Tipo de terreno	0,089	0,112	0,425	-0,130	0,309
Acidez del suelo	-0,303	0,139	0,030	-0,576	-0,030
Nivel de aluminio	0,159	0,253	0,531	-0,337	0,654
Tipo de pastoreo	-0,307	0,168	0,068	-0,636	0,023
Tipo de manejo	0,076	0,156	0,626	-0,230	0,381
Orientación productiva	-0,084	0,054	0,122	-0,190	0,022
Temperatura promedio, 2016	0,005	0,071	0,943	-0,135	0,145
Precipitación, 2016	-0,001	0,001	0,071	-0,002	0,000
Costos variables	0,000	0,000	0,964	0,000	0,000
Eficiencia de finalización	0,000	0,000	0,005	0,000	0,000
Superficie de finalización	-0,006	0,002	0,000	-0,009	-0,003
Observaciones			327		

Tabla S.5.19 Efectos marginales del modelo logit sobre el manejo sostenible de praderas

Variable	dy/dx	Error est.	P> z	IC del 95%	
Edad	0,000	0,002	0,931	-0,004	0,003
Género	0,106	0,078	0,172	-0,046	0,258
Índice de experiencia	-0,211	0,289	0,465	-0,777	0,355
Tenencia de la tierra	0,265	0,072	0,000	0,123	0,406
Asistencia técnica	-0,045	0,020	0,026	-0,084	-0,005
Adopción de tecnología	0,213	0,132	0,106	-0,045	0,471
Tipo de terreno	0,007	0,041	0,856	-0,073	0,087
Acidez del suelo	0,054	0,065	0,405	-0,073	0,182
Nivel de aluminio	-0,455	0,180	0,011	-0,807	-0,103
Orientación productiva	0,006	0,014	0,681	-0,021	0,033
Temperatura promedio, 2016	0,028	0,051	0,586	-0,072	0,128
Precipitación, 2016	0,000	0,001	0,615	-0,002	0,001
Costos variables	0,000	0,000	0,230	0,000	0,000
Recursos totales	0,000	0,000	0,294	0,000	0,000
Observaciones			327		

Tabla S.5.20 Efectos marginales del modelo logit sobre la carga animal, con manejo sostenible de praderas como regresor

Variable	dy/dx	Error est.	P> z	IC del 95%	
Manejo sostenible de pastos	0,012	0,031	0,703	-0,049	0,072
Edad	0,001	0,001	0,488	-0,001	0,003
Género	0,032	0,035	0,357	-0,036	0,100
Índice de experiencia	-0,209	0,107	0,050	-0,418	0,000
Tenencia de la tierra	0,047	0,032	0,147	-0,017	0,110
Asistencia técnica	0,006	0,025	0,806	-0,043	0,055
Tipo de terreno	0,024	0,033	0,468	-0,041	0,090
Acidez del suelo	-0,074	0,041	0,075	-0,155	0,007
Nivel de aluminio	0,043	0,070	0,540	-0,095	0,181
Tipo de pastoreo	-0,071	0,045	0,113	-0,159	0,017
Tipo de manejo	0,023	0,038	0,537	-0,051	0,097
Orientación productiva	-0,019	0,015	0,219	-0,049	0,011
Temperatura promedio, 2016	0,000	0,019	0,985	-0,037	0,036
Precipitación, 2016	0,000	0,000	0,111	0,000	0,000
Costos variables	0,000	0,000	0,984	0,000	0,000
Eficiencia de finalización	0,000	0,000	0,007	0,000	0,000
Superficie de finalización	-0,001	0,000	0,002	-0,002	-0,001
Observaciones			327		

Tabla S.5.21 Efectos marginales del modelo probit sobre la carga animal, sin manejo sostenible de praderas como regresor

Variable	dy/dx	Error est.	P> z	IC del 95%	
Edad	0,001	0,001	0,514	-0,002	0,003
Género	0,037	0,036	0,293	-0,032	0,107
Índice de experiencia	-0,222	0,101	0,027	-0,420	-0,025
Tenencia de la tierra	0,053	0,036	0,144	-0,018	0,124
Asistencia técnica	0,009	0,025	0,728	-0,040	0,058
Tipo de terreno	0,022	0,027	0,421	-0,031	0,074
Acidez del suelo	-0,074	0,033	0,025	-0,138	-0,009
Nivel de aluminio	0,038	0,061	0,534	-0,082	0,159
Tipo de pastoreo	-0,074	0,043	0,083	-0,158	0,010
Tipo de manejo	0,020	0,036	0,571	-0,050	0,090
Orientación productiva	-0,020	0,014	0,152	-0,048	0,008
Temperatura promedio, 2016	0,002	0,018	0,924	-0,033	0,036
Precipitación, 2016	0,000	0,000	0,063	0,000	0,000
Costos variables	0,000	0,000	0,959	0,000	0,000
Eficiencia de finalización	0,000	0,000	0,003	0,000	0,000
Superficie de finalización	-0,001	0,000	0,000	-0,002	-0,001
Observaciones			327		

Tabla S.5.22 Efectos marginales del modelo logit sobre la carga animal, sin manejo sostenible de praderas como regresor

Variable	dy/dx	Error est.	P> z	IC del 95%	
Edad	0,001	0,001	0,487	-0,001	0,003
Género	0,035	0,034	0,312	-0,033	0,102
Índice de experiencia	-0,212	0,109	0,052	-0,426	0,002
Tenencia de la tierra	0,051	0,035	0,145	-0,017	0,118
Asistencia técnica	0,006	0,024	0,820	-0,042	0,053
Tipo de terreno	0,024	0,033	0,472	-0,042	0,090
Acidez del suelo	-0,074	0,041	0,075	-0,155	0,007
Nivel de aluminio	0,039	0,069	0,572	-0,097	0,175
Tipo de pastoreo	-0,071	0,045	0,118	-0,159	0,018
Tipo de manejo	0,025	0,036	0,480	-0,045	0,096
Orientación productiva	-0,019	0,015	0,219	-0,049	0,011
Temperatura promedio, 2016	0,000	0,019	0,986	-0,037	0,037
Precipitación, 2016	0,000	0,000	0,096	0,000	0,000
Costos variables	0,000	0,000	0,977	0,000	0,000
Eficiencia de finalización	0,000	0,000	0,008	0,000	0,000
Superficie de finalización	-0,001	0,000	0,002	-0,002	-0,001
Observaciones			327		

4. Contexto de decisión y prácticas de gestión de los ganaderos de ceba o engorde

4.1 Percepciones sobre las barreras de adopción y la lógica de decisión

Para fundamentar nuestra estrategia empírica, realizamos una encuesta basada en la percepción a 70 ganaderos de las subregiones del Piedemonte, la Altillanura y la Sabana Inundable de la Orinoquia colombiana. La encuesta tenía un doble propósito: en primer lugar, servir como diagnóstico conductual para comprender las barreras autoinformadas a las que se enfrentan los productores al considerar prácticas de pastoreo sostenibles; y, en segundo lugar, servir de base para seleccionar variables explicativas y estructurar la estrategia de identificación. En lugar de asumir un marco de decisión a priori, permitimos que las respuestas de los ganaderos revelaran la lógica y la secuencia de las decisiones de adopción.

Una de las conclusiones más destacadas fue la existencia de disparidades regionales en las limitaciones señaladas por los productores. En Altillanura, el 37 % de los agricultores señaló la volatilidad del mercado como principal barrera para la adopción de prácticas sostenibles, y el 35 % citó las deficiencias en las infraestructuras. Por el contrario, el 65 % de los productores de la Sabana Inundable señaló los eventos climáticos extremos como su principal preocupación, seguido por el 50 %, que identificó la degradación del suelo y del agua. Estas diferencias ponen de relieve la importancia de tener en cuenta el contexto ambiental y de mercado, lo que respalda la inclusión de efectos fijos regionales y variables de capital natural en el modelo empírico.

Las limitaciones financieras se revelaron como una preocupación generalizada en todas las subregiones. En la Sabana Inundable, el 50 % de los agricultores señaló un acceso limitado al crédito y otro 50 % señaló los elevados costos de producción como principales obstáculos para la adopción de nuevas tecnologías. Las limitaciones crediticias también fueron mencionadas por el 35 % de los agricultores de Piedemonte y el 32 % de los de Altillanura. Estas cifras refuerzan los hallazgos bien establecidos en la literatura sobre las restricciones de liquidez y su efecto en la adopción de tecnología (Feder *et al.*, 1985), lo que justifica la inclusión de variables que recojan las condiciones de acceso financiero y el coste de los insumos.

Las barreras institucionales y de información también resultaron ser considerables. El 48 % de los ganaderos encuestados afirmó carecer de conocimientos suficientes sobre técnicas de pastoreo sostenible, y el 54 % no estaba afiliado a ninguna asociación de productores. Estas limitaciones

implican un acceso limitado a los canales de innovación, lo que justifica la inclusión de variables que midan el acceso a la asistencia técnica, los servicios de extensión y las redes organizativas. El papel de la presencia institucional es especialmente relevante, dado que solo una minoría de los productores de la muestra declaró haber participado alguna vez en programas formales de sostenibilidad.

Los factores socioculturales y de comportamiento añadieron otra capa de complejidad. La resistencia al cambio fue un tema recurrente, especialmente entre los productores de más edad y con mayor experiencia. Esta reticencia fue señalada por el 68 % de los agricultores de la Sabana Inundable, el 52 % en el Piedemonte y el 50 % en la Altillanura. Estas respuestas sugieren un alto grado de inercia conductual y respaldan la integración de variables demográficas (por ejemplo, edad, años de experiencia) en el modelo empírico, en consonancia con la bibliografía sobre dependencia de la trayectoria y aversión al riesgo en la agricultura (García-Winder y Chavarría, 2017).

Durante las conversaciones con los ganaderos también surgieron inquietudes sobre la seguridad de la tenencia de la tierra, especialmente en Altillanura, donde la titulación formal sigue siendo limitada y la ocupación informal está muy extendida. Aunque no se abordó mediante una pregunta de respuesta fija, muchos productores aludieron a la incertidumbre sobre la propiedad de la tierra como un factor que desalienta la inversión a largo plazo en prácticas sostenibles, tales como el pastoreo rotacional y la recuperación de las praderas degradadas. Este tema informal, pero recurrente, concuerda con conclusiones más amplias de la literatura sobre el papel de la seguridad de la tenencia en la viabilidad del manejo sostenible de la tierra (Bonilla-Mejía *et al.*, 2024; Clerici *et al.*, 2020).

Es importante destacar que la encuesta de percepción reveló que muchos productores consideran que la mejora del manejo de las praderas es un paso previo necesario para ajustar la carga animal, lo que sugiere una posible estructura secuencial en su toma de decisiones. Para reflejar esta perspectiva conductual sin perder flexibilidad empírica, estructuramos nuestro análisis de manera que se pusieran a prueba tanto enfoques de modelización secuenciales como independientes. Esta decisión, basada en las propias percepciones de los ganaderos, nos permitió explorar si estas prácticas representan procesos de adopción distintos o interrelacionados, al tiempo que garantizamos que la estrategia empírica se mantuviera en consonancia con la realidad de los productores. La tabla S.5.23 resume las variables a nivel de finca.

Tabla S.5.23 Estadísticas resumidas de variables a nivel de finca

Variable	Media	DE	Mín.	Máx.
Uso del suelo				
Superficie de la finca (ha)	237,8	516,7	4	6.000
Área en pastos para la ceba (ha)	22,4	37,5	0	250
Bosque natural (ha)	45	153,7	0	2.000
Área sin uso agropecuario (ha)	4,5	34,9	0	620
Manejo del hato				
Edad inicial de los machos para la ceba (meses)	21,3	11,1	4	96
Edad final de los machos de ceba (meses)	34,8	10,2	10	100
Peso inicial de los machos para la ceba (kg)	270,7	76,1	100	560
Peso final de los machos de ceba (kg)	452,4	73,9	206	650
Precio de venta de machos en pie (USD)	701,6	154,5	308,2	1.725
Prácticas de pastoreo				
Pastoreo rotacional (%)	75%			
Pastoreo continuo (%)	12%			
Pastoreo alterno (%)	12%			
Número de potreros utilizados	9,2	31,8	1	480
Días de rotación	20,5	24	0	365
Consumo de sal mineralizada (g/día)	114	127,9	30	213
Manejo de la finca				
Mano de obra contratada (jornales/mes)	50,4	91,3	1	365
Mano de obra familiar (%)	13	28,5	0	100
Mano de obra permanente (%)	79,5	36,3	0	100
Mano de obra temporal (%)	6,2	18,6	0	100
Costo de transporte (USD)	81,7	101,4	1,7	1.000
Costo de la tierra (USD)	276,4	264,8	1	3.560
Registros y manejo de la información				
Uso de registros técnicos (%)	30,5		0	100
Uso de registros en software (%)	3,5		0	100
Uso de otros registros (%)	23,8	41,5	0	100

4.2 Heterogeneidad de las explotaciones agrícolas y limitaciones para la adopción de prácticas sostenibles

La tabla S.5.23 presenta las estadísticas descriptivas de nuestras variables a nivel de finca, lo que pone de manifiesto una considerable heterogeneidad en el uso del suelo, el manejo del ganado, las prácticas de pastoreo, la estructura de la mano de obra y el registro de la información. El tamaño medio de las explotaciones es de 237,8 hectáreas, pero la distribución presenta una gran asimetría (DE = 514,7), y algunas explotaciones superan las 6.000 hectáreas. El área de la finca en

pastos para la ceba ocupan una media de 22,4 hectáreas, pero la composición general del uso del suelo es más diversa de lo que parece a primera vista. Las explotaciones también informan de superficies pequeñas, pero no desdeñables, dedicadas a cultivos transitorios como el maíz, el arroz y la soya (2,76 ha de media), cultivos permanentes como los cítricos y la papaya (2,50 ha), bosques plantados para madera (5,28 ha), tierras en barbecho (8,77 ha), zonas de descanso (8,84 ha) y terrenos dominados por arvenses (12,11 ha). Estas cifras sugieren que, aunque la ceba sigue siendo la actividad dominante, en un subconjunto de explotaciones existen sistemas de uso mixto y estrategias de diversificación. Las zonas de bosque natural representan una media de 45 hectáreas, lo que subraya la importancia medioambiental de las decisiones sobre el uso del suelo en la región.

Los terrenos no agrícolas (media = 4,53 ha) incluyen infraestructuras, caminos internos y viviendas, pero en algunos casos también reflejan acuerdos de arrendamiento de terrenos, lo cual resulta especialmente relevante en las explotaciones de ceba, donde los productores pueden alquilar temporalmente las áreas con pastos. Sin embargo, debido a las limitaciones del diseño de la encuesta, no podemos desagregar los contratos de arrendamiento de las explotaciones permanentes. La variable del costo de la tierra declarada (media = 276,4 \$/ha) recoge bien el costo de alquiler imputado (para quienes arriendan tierras) o bien el costo de oportunidad de la tierra en propiedad, según lo declarado por el productor. Esta heterogeneidad en la interpretación sugiere que el costo de la tierra debe tratarse con cautela en los ejercicios de modelización.

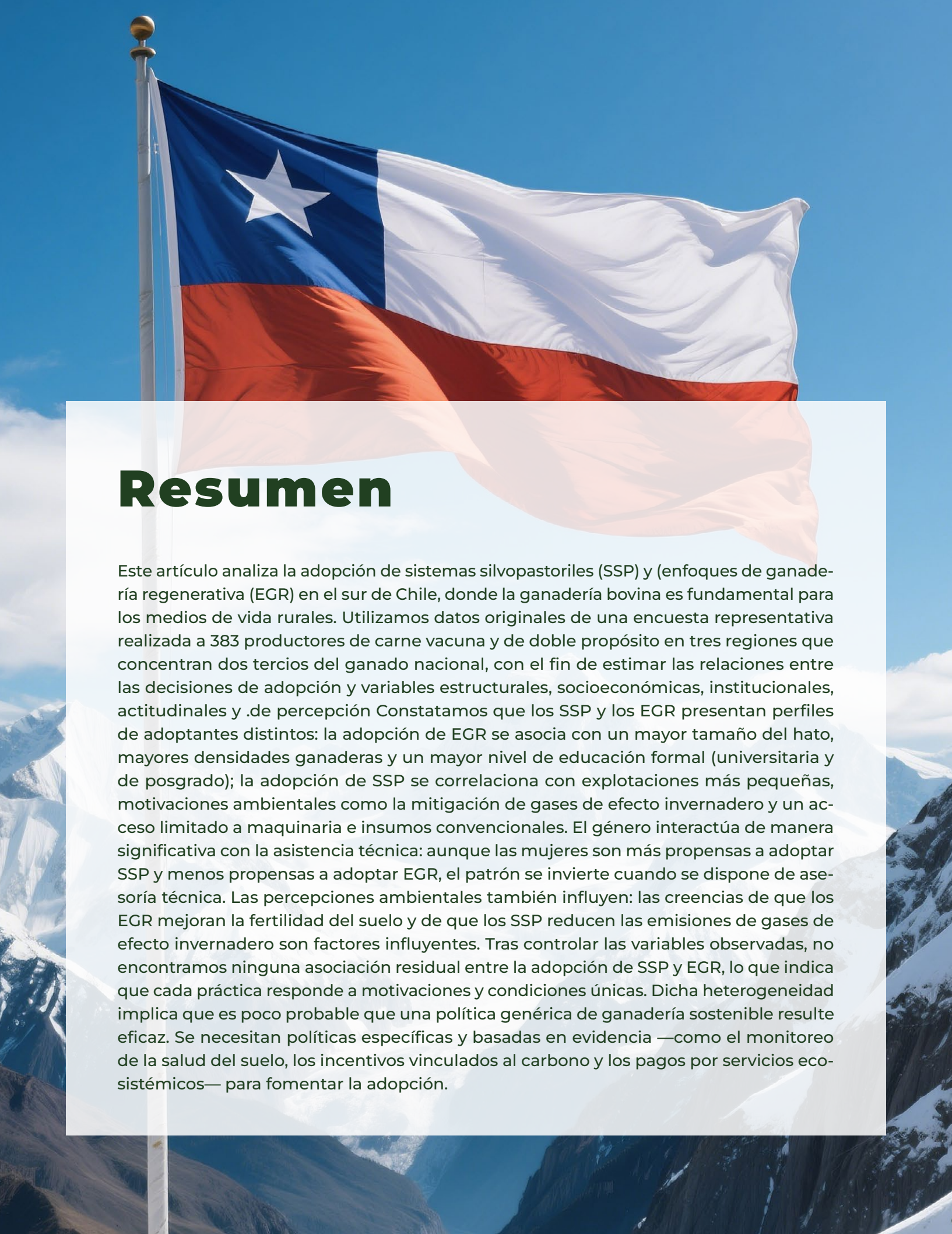
La dinámica laboral también pone de manifiesto importantes dimensiones sociodemográficas. Aunque el número medio de trabajadores contratados remunerados es modesto (50,4 salarios al mes), la mano de obra familiar sigue siendo relevante en el 13 % de las explotaciones, con una amplia variación (DE = 28,5). La mano de obra permanente es la forma de empleo predominante (media = 79,5 %), mientras que la mano de obra temporal se utiliza de forma moderada (6,2 %). Estos patrones concuerdan con los sistemas semicomerciales caracterizados por una combinación de mano de obra familiar y comercial y una mecanización limitada. Sin embargo, la falta de indicadores sociodemográficos detallados —como el tamaño del hogar, el nivel educativo o el género del responsable de la explotación— limita nuestra capacidad para explorar resultados más amplios en materia de equidad o medios de vida, y reconocemos esto como una limitación del instrumento de encuesta actual.

Por último, el uso limitado de sistemas de registro de información puede limitar la toma de decisiones fundamentadas. Solo el 30,5 % de los productores declaró utilizar algún tipo de registro técnico, y apenas el 3,5 % utilizaba herramientas de software digital. Esta escasa adopción de sistemas formales de registro podría obstaculizar la planificación a largo plazo, la trazabilidad y la adopción de prácticas de manejo sostenible. En conjunto, estas observaciones descriptivas sugieren que los ganaderos operan en sistemas complejos y diversificados en los que se entrecruzan limitaciones técnicas, económicas e informativas, lo que justifica la inclusión de múltiples variables a nivel de explotación y de hogar en el análisis empírico.

6

¿QUÉ CONFIGURA LA ADOPCIÓN DE SISTEMAS SILVOPASTORILES Y GANADERÍA REGENERATIVA? EVIDENCIA DE CHILE

Felipe Bravo-Peña, Homa Taheri
y Claus Köbrich



Resumen

Este artículo analiza la adopción de sistemas silvopastoriles (SSP) y (enfoques de ganadería regenerativa (EGR) en el sur de Chile, donde la ganadería bovina es fundamental para los medios de vida rurales. Utilizamos datos originales de una encuesta representativa realizada a 383 productores de carne vacuna y de doble propósito en tres regiones que concentran dos tercios del ganado nacional, con el fin de estimar las relaciones entre las decisiones de adopción y variables estructurales, socioeconómicas, institucionales, actitudinales y de percepción. Constatamos que los SSP y los EGR presentan perfiles de adoptantes distintos: la adopción de EGR se asocia con un mayor tamaño del hato, mayores densidades ganaderas y un mayor nivel de educación formal (universitaria y de posgrado); la adopción de SSP se correlaciona con explotaciones más pequeñas, motivaciones ambientales como la mitigación de gases de efecto invernadero y un acceso limitado a maquinaria e insumos convencionales. El género interactúa de manera significativa con la asistencia técnica: aunque las mujeres son más propensas a adoptar SSP y menos propensas a adoptar EGR, el patrón se invierte cuando se dispone de asesoría técnica. Las percepciones ambientales también influyen: las creencias de que los EGR mejoran la fertilidad del suelo y de que los SSP reducen las emisiones de gases de efecto invernadero son factores influyentes. Tras controlar las variables observadas, no encontramos ninguna asociación residual entre la adopción de SSP y EGR, lo que indica que cada práctica responde a motivaciones y condiciones únicas. Dicha heterogeneidad implica que es poco probable que una política genérica de ganadería sostenible resulte eficaz. Se necesitan políticas específicas y basadas en evidencia —como el monitoreo de la salud del suelo, los incentivos vinculados al carbono y los pagos por servicios ecosistémicos— para fomentar la adopción.



Introducción

En el sector ganadero, el cambio climático y la degradación ambiental plantean importantes retos que exigen respuestas transformadoras. La producción ganadera representa aproximadamente el 14,5% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial y contribuye a la deforestación y a la pérdida de biodiversidad (Li y Jiang, 2021; Rojas-Downing *et al.*, 2017). Al mismo tiempo, el cambio climático afecta negativamente a la salud animal, la productividad y el rendimiento reproductivo, lo que pone en peligro la sostenibilidad y la resiliencia de los sistemas ganaderos (Bernabucci, 2019). Las iniciativas de mitigación y adaptación se centran cada vez más en prácticas ganaderas sostenibles. Los sistemas mixtos de cultivo y ganadería, por ejemplo, pueden reducir la deforestación en 76 millones de hectáreas a lo largo de 30 años (Weindl *et al.*, 2015), y una gestión mejorada aumenta la productividad con menos daños ambientales (Melo *et al.*, 2021). Estrategias como la mejora de la calidad de los piensos, la selección genética y la gestión de la salud animal también aumentan la resiliencia ante el estrés climático (Paul *et al.*, 2020; Schader *et al.*, 2015). Los enfoques integrados pueden generar sinergias al reducir las emisiones y mejorar los servicios ecosistémicos (Notenbaert *et al.*, 2021).

Dos aproximaciones —los enfoques de ganadería regenerativa (EGR) y los sistemas silvopastoriles (SSP)— han suscitado un interés cada vez mayor. Los EGR comprenden prácticas de pastoreo adaptativas centradas en un pastoreo de alta densidad y corta duración, seguido de largos períodos de recuperación de los pastos (Bravo-Peña *et al.*, 2025). Se ha demostrado que mejoran el secuestro de car-

bono en el suelo (Santos *et al.*, 2024), reducen las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y mejoran el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar animal (Pinheiro Machado, 2016; Pinheiro-Machado *et al.*, 2021). Los SSP integran árboles, forraje y ganado en una única unidad de producción; contribuyen al secuestro de carbono, promueven la biodiversidad y mejoran la fertilidad del suelo,

al tiempo que aumentan la flexibilidad de la producción y diversifican los ingresos de las explotaciones agrícolas (Yadav *et al.*, 2019).

A pesar de sus ventajas, la investigación empírica sobre la adopción de EGR y SSP es limitada. Hace casi dos décadas, Prokopy *et al.* (2008) señalaron que la mayoría de los estudios sobre la adopción de prácticas sostenibles se centraban en los sistemas de cultivo más que en la ganadería, una tendencia que continúa en la actualidad. Por ejemplo, Arslan (2020) destacó un sesgo significativo hacia las prácticas agronómicas en los estudios de adopción realizados en África, en los que solo el 2% abordaba la ganadería. Los datos sobre la adopción de EGR y SSP son aún más escasos.

El presente estudio tiene por objeto contribuir a reducir esta brecha mediante el análisis de los factores estructurales, socioeconómicos, institucionales y de percepción asociados a la adopción de EGR y SSP en Chile, utilizando datos de una muestra representativa de productores ganaderos de tres regiones que concentran dos tercios del hato ganadero nacional. Se trata de uno de los primeros estudios econométricos sobre la adopción de enfoques de ganadería regenerativa y sistemas silvopastoriles en los sistemas ganaderos latinoamericanos. Nuestros hallazgos contribuyen no solo a los objetivos climáticos y a la agenda de desarrollo rural de Chile, sino también a los esfuerzos globales más amplios para promover la sostenibilidad del sector ganadero en regiones que se enfrentan a retos ambientales y socioeconómicos similares.

El resto del documento se estructura de la siguiente manera:



Sección 6.1

Revisión de la literatura



Sección 6.2

Marco analítico



Sección 6.3

Datos



Sección 6.4

Marco empírico



Sección 6.5

Resultados



Sección 6.6

Discusión



Sección 6.7

Conclusiones





6.1 Revisión de la literatura

Aunque la investigación directa sobre la adopción de sistemas ganaderos silvopastoriles y regenerativos es limitada, los estudios relacionados con la agroforestería, los sistemas integrados de cultivo y ganadería y la ganadería sostenible ofrecen información relevante. En esta sección se resumen los datos empíricos a nivel mundial sobre los principales obstáculos para su adopción.

Factores estructurales: tamaño de la explotación y del hato. La evidencia sugiere que las explotaciones y los hatos de mayor tamaño son más propensos a adoptar tecnologías sostenibles, ya que pueden absorber mejor los costos iniciales y destinar tierras a la experimentación (Herrera et al., 2023; Hyland et al., 2018; Mujeyi et al., 2022). Estas tendencias son consistentes en todas las estrategias de pastoreo, la agroforestería y los sistemas integrados de cultivo y ganadería (Jara-Rojas et al., 2020; Owombo y Idumah, 2017; Perosa et al., 2021).

Condiciones económicas, disponibilidad de mano de obra y recursos. Aunque la estabilidad financiera facilita la adopción de SSP (Apan-Salcedo et al., 2022), el contexto es importante: algunos estudios observan una mayor adopción entre los productores con ingresos más bajos (Zabala et al., 2022). Las prácticas que requieren mucha mano de obra, como los SSP y los EGR, tienen más probabilidades de ser adoptadas cuando los productores disponen de más trabajadores (Beshir et al., 2022; Hyland et al., 2018). El acceso limitado a la maquinaria y los elevados costos de mantenimiento también se citan como obstáculos (Vargas-De la Mora et al., 2021).

Variables sociodemográficas: edad, género y nivel educativo. Los agricultores más jóvenes suelen mostrarse más abiertos a la innovación (Gebrezgabher et al., 2015), mientras que los de más edad pueden mostrarse reacios a adoptar prácticas a largo plazo cuyos beneficios se obtienen también a largo plazo (Jara-Rojas et al., 2020). Aunque los datos sobre SSP y EGR son escasos, los estudios sobre agricultura climáticamente inteligente sugieren que las explotaciones agrícolas dirigidas por mujeres pueden estar más comprometidas con la sostenibilidad (Bravo-Peña, 2025; Mujeyi et al., 2022). La relación entre el nivel educativo y la adopción varía según la práctica. La educación superior suele estar vinculada a la adopción de prácticas técni-

camente complejas, como la medición de GEI y las innovaciones en agricultura circular (Fernández-Habas *et al.*, 2022; Herrera *et al.*, 2023). Sin embargo, existen datos contradictorios (véanse Gebrezgabher *et al.*, 2015; Ogunlana, 2004).

Redes, asistencia técnica, formación e intercambio de conocimientos. La pertenencia a organizaciones de productores aumenta la adopción de SSP y EGR al reducir la incertidumbre y facilitar la acción colectiva (Didier y Brunson, 2004; Zabala *et al.*, 2022). Del mismo modo, la pertenencia a estas organizaciones puede mejorar el flujo de información técnica y experiencias prácticas, tal como se ha observado en la agroforestería y el cultivo en franjas (Beshir *et al.*, 2022; Ogunlana, 2004). La asistencia técnica y la formación suelen facilitar la adopción (Perosa *et al.*, 2021; Vargas-De la Mora *et al.*, 2021), aunque los servicios de extensión convencionales no siempre son eficaces (de Souza *et al.*, 2021).

Percepciones de los beneficios y los costos. Las ganancias percibidas en materia de medio ambiente o productividad influyen en las decisiones de adopción (de Mello Brandão Vinholis *et al.*, 2021). Cuando los beneficios no están claros o los rendimientos se retrasan, los productores pueden optar por no participar (Abolhassani *et al.*, 2013; Borges, 2015). Los elevados costos iniciales de las prácticas de sostenibilidad agrícola, por ejemplo, cercas, árboles y mano de obra, son un factor disuasorio conocido (Abdul-Salam *et al.*, 2022), especialmente cuando los agricultores trabajan con limitaciones financieras (Didier y Brunson, 2004).

Riesgo, influencias sociales, actitudes ambientales y motivaciones. El miedo al fracaso, la incertidumbre y la resistencia al cambio desalientan la adopción (Calle *et al.*, 2013; Martin *et al.*, 2004; Vargas-De la Mora *et al.*, 2021). Las herramientas de reducción de riesgos, como los seguros de cosechas o los contratos a plazo, pueden contrarrestar estas preocupaciones y aumentar la adopción (Melo *et al.*, 2021). Las normas sociales y la presión social pueden obstaculizar o fomentar la adopción, dependiendo de las prácticas predominantes (Didier y Brunson, 2004). La conciencia ambiental —especialmente el conocimiento sobre la salud del suelo y el cambio climático— suele favorecer la adopción; la falta de conciencia puede limitar el interés (Herrera *et al.*, 2023; Wang *et al.*, 2020).



6.2 Marco analítico

El trabajo de Griliches (1957) sobre la adopción de semillas híbridas de maíz sentó las bases para la modelización de la adopción de tecnología en la agricultura. Los estudios posteriores sobre las decisiones de adopción de los agricultores han utilizado con frecuencia modelos econométricos con variables dependientes limitadas, basados en un marco analítico de utilidad aleatoria (Olwande *et al.*, 2009; Pindyck y Rubinfeld, 1998; Rahelizatovo y Gillespie, 2004). Utilizamos este enfoque para examinar la adopción de EGR y SSP. Dado que este marco está bien establecido en la literatura, aquí solo ofrecemos una breve descripción.

Supongamos que la utilidad del agricultor n al elegir la opción i , U_{ni} , tiene un componente observado, V_{ni} , y otro no observado, ϵ_{ni} , de tal manera que $U_{ni} = V_{ni} + \epsilon_{ni}$ (Train, 2009). La hipótesis de que ϵ_{ni} sigue una distribución de valores extremos independiente e idénticamente distribuida (IID) implica un modelo logit de elección discreta (Luce y Suppes, 1965).

Suponemos que la utilidad representativa de los agricultores es lineal en los parámetros y adopta la forma $U_{ni} = \beta'x_{ni} + \epsilon_{ni}$, donde x_{ni} es un vector de variables observadas relacionadas con las prácticas sostenibles i . El modelo cumple la hipótesis de independencia de alternativas irrelevantes (IIA), lo que significa que las probabilidades relativas de adoptar SSP frente a EGR dependen únicamente de los atributos de estas dos opciones (apéndice, sección A4.3.6).

Sea N el tamaño de la muestra. Entonces, la probabilidad de que la persona n elija la alternativa que realmente ha elegido sería $\prod_i (P_{ni})^{y_{ni}}$, donde $y_{ni} = 1$ si la persona n elige la alternativa i , y $y_{ni} = 0$ en caso contrario, y $P_{ni} = \frac{e^{V_{ni}}}{\sum_{j=1}^J e^{V_{nj}}}$ es la probabilidad de elección entre las opciones.

Suponiendo que las elecciones de los responsables de la toma de decisiones son independientes, algo que respalda nuestro muestreo estratificado aleatorio, podemos derivar la probabilidad de que la persona n elija la alternativa que se observó que elegía realmente

como $L(\beta) = \prod_{n=1}^N \prod_{i=1}^I (P_{ni})^{y_{ni}}$, donde β es un vector que contiene los parámetros del modelo. La función de verosimilitud logarítmica es entonces $LL(\beta) = \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^I y_{ni} \ln(P_{ni})$, y el estimador es el valor de β que maximiza esta función. En el caso de las funciones de utilidad lineales en los parámetros, McFadden (1972) demuestra que $LL(\beta)$ es globalmente cóncava.



6.3 Datos

6.3.1 Encuesta

6.3.1.1 Descripción de la encuesta

Nuestro estudio se centra en tres regiones (unidades administrativas de primer orden) del sur de Chile —La Araucanía, Los Ríos y Los Lagos— donde la ganadería bovina constituye una actividad económica fundamental caracterizada por sistemas de producción fragmentados. Estas regiones concentran aproximadamente dos tercios del hato ganadero nacional. Según el Censo Agropecuario, la zona alberga 14.918 explotaciones ganaderas que gestionan un total de 924.740 cabezas de ganado, con un tamaño medio de 70 hectáreas y 62 cabezas por explotación (INE, 2022). El pastoreo es la principal estrategia de alimentación: la zona de estudio incluye 580.000 hectáreas de pastizales naturales, 427.000 hectáreas de pastos mejorados y 81.000 hectáreas de cultivos forrajeros (INE, 2024). Los productores a pequeña escala predominan en la región —más de la mitad de las explotaciones cuentan con menos de 10 cabezas de ganado—, aunque existen algunas explotaciones de gran tamaño. Esta fragmentación convierte a la zona en un buen caso de estudio para examinar la dinámica de los sistemas ganaderos basados en pastos y el potencial para implementar prácticas de gestión sostenible del pastoreo.

6.3.1.2 Muestreo

El muestreo se basó en el Sistema Oficial de Información Pecuaria de Chile (SIPEC), un registro obligatorio que mantiene el Servicio Agrícola y Ganadero (SAG). Dado que los productores deben presentar un inventario pecuario actualizado al SIPEC al menos una vez al año —entre el 1 de agosto y el 30 de noviembre—, la versión a la que accedimos en mayo de 2024 refleja las

declaraciones correspondientes al segundo semestre de 2023. Filtramos los registros para incluir únicamente explotaciones ganaderas de carne o de doble propósito con al menos 10 cabezas de ganado y cuya información de contacto estuviera disponible. Este filtrado dio como resultado un universo de muestreo de 6.767 explotaciones elegibles en las tres regiones.

La muestra se estratificó por región, tamaño del hato y sexo del ganadero, reflejando la estructura recogida en el último Censo Agropecuario. Se aplicaron ponderaciones de postestratificación para ajustar el sesgo de respuesta. Estimamos el tamaño de muestra necesario utilizando la fórmula de Cochran para poblaciones finitas (Cochran, 1977), con un nivel de confianza del 95% y un margen de error del 5%. Esto dio como resultado un objetivo de 382 encuestados. Suponiendo una tasa de respuesta del 15%, seleccionamos aleatoriamente a 2.569 productores para contactar con ellos.

6.3.1.3 Recopilación de datos

De los 2.569 seleccionados, equivalentes a la tasa de respuesta estimada del 15%, solo fue necesario contactar con 1.675 para alcanzar el tamaño de muestra previsto. El orden de las llamadas se aleatorizó para evitar sesgos de selección. De los 1.675 contactados, aproximadamente el 10% tenía datos de contacto no válidos y otro 10% no cumplía los criterios de elegibilidad. Los casos restantes no respondieron tras tres intentos y se clasificaron como “no responde”. La tasa de respuesta ajustada fue del 28,6%, lo que supuso 383 entrevistas completadas. Las encuestas se realizaron por teléfono entre el 28 de octubre y el 5 de diciembre de 2024, utilizando el software Qualtrics. El cuestionario figura en el apéndice, sección A7.

6.3.2 Variables

6.3.2.1 Variables dependientes

Definimos tres variables dependientes binarias que recogen el estado de adopción: (1) adopción de SSP; (2) adopción de EGR, y (3) adopción conjunta de ambas (Tabla 6.1). Durante la encuesta, los productores recibieron descripciones de cada práctica y confirmaron si las habían implementado. La adopción de EGR requirió una verificación adicional de los intervalos de rotación de ≤ 3 días, basada en criterios agronómicos de la bibliografía (Kampherbeek *et al.*, 2023; Kanneganti y Kaffka, 1995; Teutscherová *et al.*, 2021).

Tabla 6.1 Definición y codificación de las variables de adopción

Variable	Codificación	Explicación para la persona entrevistada
Adopción de SSP: adopción de sistemas silvo-pastoriles (SSP)	0 = No; 1 = Sí (adopta SSP, no adopta EGR)	"Esta práctica integra la ganadería con el mantenimiento de árboles en la misma superficie. Consiste en plantar árboles y arbustos en las áreas de pastoreo y permite obtener productos adicionales, como madera, leña y frutas."
Adopción de EGR: adopción de enfoques de ganadería regenerativa (EGR)	0 = No (no adopta o rotación >3 días); 1 = Sí (adopta EGR, rotación ≤3 días y no adopta SPP)	"Esta estrategia se centra en aplicar métodos planificados de pastoreo. Consiste en rotar el ganado entre distintas áreas de pastoreo o potreros de forma organizada, mantener una alta densidad de animales durante períodos cortos y luego permitir que los pastos se recuperen. Entre los ejemplos específicos se incluyen el llamado pastoreo holístico planificado, el pastoreo adaptativo multipotrero, el pastoreo rotacional intensivo, el pastoreo regenerativo o el pastoreo racional Voisin, entre otros."
Adopción conjunta: adopción de SSP y EGR	0 = No (no adopta ninguno o solo uno); 1 = Sí (adopta ambos)	N/A

6.3.2.2 Control variables

Las variables de control abarcan seis dimensiones. (1) Las características de la explotación agrícola reflejan variables estructurales y de gestión (por ejemplo, el ciclo de producción o la densidad ganadera). (2) Los datos demográficos incluyen la edad, el género y el nivel educativo. (3) El apoyo institucional incluye la pertenencia a organizaciones, la formación y el acceso al asesoramiento. (4) Las actitudes y el comportamiento miden las percepciones sobre la intensidad de la mano de obra y los costos, las preferencias de riesgo y el preferencia por el *statu quo*. (5) La dinámica social y comunitaria tiene en cuenta la influencia de los pares, las normas sociales y el reconocimiento. (6) Las percepciones ambientales evalúan las creencias sobre el cambio climático, la fertilidad del suelo y la mitigación de los gases de efecto invernadero. Las definiciones completas y la codificación figuran en la tabla 6.2; los signos esperados y las fuentes se encuentran en el apéndice, sección A4, tabla A4.

Tabla 6.2 Categorías, definiciones y codificación de las variables de control

Categoría	Variable	Definición	Codificación
Características de la finca	<i>prod cycle</i>	Ciclo productivo: principal orientación productiva de la finca	Cría-recría [0], cría-engorde [1], cría [2], recría-engorde [3], recría [4], engorde [5], ciclo completo [6]
	<i>income</i>	Ingreso de la finca: número de animales comercializados en los últimos 12 meses	Continua (número de animales vendidos)
	<i>stratum</i>	Tamaño del hato: número de bovinos propiedad de la finca (categoría)	Categoría: 10–24 [1], 25–49 [2], 50–99 [3], 100–249 [4], 250+ [5]
	<i>La Araucanía; Los Lagos; Los Ríos</i>	Región: ubicación geográfica de la finca	Los Lagos, Los Ríos, La Araucanía (variables dicotómicas)
	<i>stock rate</i>	Tasa de carga: superficie de la finca (ha) dividida por el número de animales	Continua (ha/animal)
Demográficas	<i>educ</i>	Nivel educativo: máximo nivel educativo completado	Educación primaria o menos [1], educación secundaria [2], educación terciaria [3], posgrado [4]
	<i>sex</i>	Género: sexo biológico del encuestado registrado por el entrevistador	0 = hombre, 1 = mujer
	<i>age</i>	Edad: estimada a partir del número nacional de identificación	Continua (años)
Capital institucional y social	<i>org</i>	Pertenencia a organizaciones: asociaciones de productores o cooperativas	Ninguna [0], una o más membresías [1]
	<i>training</i>	Participación en programas de capacitación o talleres sobre manejo ganadero o de pastizales en los últimos 12 meses	Ninguna [0], una vez [1], dos veces [2], más de dos veces [3]
	<i>advisor access</i>	Acceso a asistencia técnica: frecuencia de acceso	Nunca [0], ocasionalmente [1], frecuentemente [2]
	<i>type assistance</i>	Tipo de asistencia: principal fuente de asistencia técnica	Programa gubernamental [1], profesional contratado [2], asesor de proveedor de insumos [3], productor par [4]
	<i>sps info; rla info</i>	Acceso a información (SSP/EGR) sobre SSP o EGR en los últimos 12 meses	No [0], sí [1] para cada práctica

Categoría	Variable	Definición	Codificación
Actitudinales y conductuales	<i>sps labor; rla labor</i>	Requisitos de mano de obra (SSP/ EGR) para EGR o SSP en relación con las prácticas actuales	Menos [0], igual [1], más [2] para cada práctica
	<i>machine access</i>	Acceso a insumos/maquinaria: facilidad de acceso a insumos y maquinaria	Difícil [0], moderado [1], fácil [2]
	<i>sps cost; rla cost</i>	Percepción del costo de implementar EGR o SSP	Bajo [0], moderado [1], alto [2]
	<i>risk aversion</i>	Preferencia de riesgo basada en escenarios hipotéticos tipo lanzamiento de moneda	De alta propensión al riesgo [0] a alta aversión al riesgo [3]
	<i>status quo</i>	Creencia sobre el statu quo: preferencia por prácticas familiares frente a nuevas prácticas	De acuerdo [0], en desacuerdo [1]
Influencia social y comunitaria	<i>peer influence</i>	Influencia de pares: importancia percibida de las opiniones de pares	Baja [0], moderada [1], alta [2]
	<i>social norm</i>	Aceptación social: percepción de la aceptación social de SSP y EGR	No aceptada [0], moderadamente aceptada [1], ampliamente aceptada [2]
	<i>recognition</i>	Reconocimiento percibido por implementar prácticas sostenibles	Reconocimiento de los esfuerzos: bajo [0] a alto [2]
Percepciones ambientales	<i>climate change</i>	Preocupación por los efectos del cambio climático en la producción ganadera	Nada preocupado [0] a muy preocupado [4]
	<i>sps soil; rla soil</i>	Fertilidad del suelo: creencia de que EGR o SSP mejora los suelos	No [0], sí [1]
	<i>sps climate; rla climate</i>	Reducción de GEI: creencia de que SSP o EGR reduce las emisiones	No [0], sí [1]



6.4 Marco empírico

Analizamos los datos de la encuesta siguiendo los procedimientos estándar para el muestreo complejo (Lehtonen y Pahkinen, 2004; Levy y Lemeshow, 2013), teniendo en cuenta las ponderaciones de estratificación y el número de observaciones por estrato. Nuestro análisis se centró en tres resultados: (i) la adopción de SSP; (ii) la adopción de EGR, y (iii) la adopción conjunta de ambas. Todos los modelos se estimaron utilizando el mismo marco de regresión logística ponderada por la encuesta para garantizar la comparabilidad:

$$\ln\left(\frac{P(y = y_i)}{P(y = y_o)}\right) = b_{i0} + b_{i1} X_{i1} + b_{i2} X_{i2} + b_{i3} X_{i3} + \dots + b_{ik} X_{ik}$$

donde y_i es la elección de producción i , y_o es la elección de producción base, y X_{it} son variables independientes.

Comenzamos por definir un modelo exhaustivo que incluía todas las variables enumeradas en tabla 6.2, las cuales reflejan las dimensiones estructurales, institucionales y actitudinales que, según la bibliografía, se han relacionado anteriormente con el comportamiento de adopción (sección 2). En lugar de estimar un único modelo final desde el principio, fuimos construyendo la especificación de forma gradual, por etapas. En primer lugar, examinamos las variables estructurales, tales como los datos demográficos, las características de producción y los factores regionales, antes de incorporar elementos institucionales como la pertenencia a organizaciones, el apoyo técnico y la participación en cursos de formación. Una vez evaluados estos factores fundamentales, ampliamos el modelo para tener en cuenta rasgos de comportamiento, entre ellos las preferencias de riesgo, las normas sociales y el preferencia por el *statu quo*. Por último, introdujimos percepciones específicamente vinculadas a la adopción de SSP y EGR, como las expectativas de beneficios ambientales o el acceso a la información. Este enfoque secuencial nos permitió observar cómo cada bloque de variables contribuía al rendimiento y la interpretabilidad del modelo.

A lo largo de este proceso, realizamos un seguimiento exhaustivo de los indicadores de diagnóstico. La multicolinealidad se evaluó mediante los factores de inflación de la varianza generalizados (GVIF), que no revelaron correlaciones problemáticas entre las variables explicativas (apéndice A4). También comparamos especificaciones de modelos alternativos utilizando criterios de información (AIC, BIC) y medidas de pseudo-R², como el R² de McFadden, cuyos resultados detallados se recogen en las tablas complementarias. Cuando la teoría sugería posibles sinergias, exploramos términos de interacción —por ejemplo, entre la preferencia por el *statu quo* y la aversión al riesgo, o entre el género y la participación en la formación— y conservamos únicamente aquellos que mejoraban significativamente el ajuste del modelo.

A medida que refinamos los modelos, priorizamos la parsimonia y a la coherencia teórica. Las especificaciones finales representan un equilibrio entre la significación estadística, la precisión predictiva y la interpretabilidad necesaria para obtener conclusiones de política. Además de los análisis separados de la adopción de SSP y EGR, examinamos la posibilidad de una decisión conjunta de adopción. Definimos un indicador de adopción conjunta —codificado como 1 cuando se implementaban tanto SSP como EGR, y como 0 en caso contrario— y lo sometimos al mismo procedimiento de construcción de modelos. Para tener en cuenta las posibles correlaciones entre las decisiones de adopción de SSP y EGR, también exploramos un modelo bivariado, comprobando explícitamente la estructura de correlación de errores de las dos ecuaciones.



6.5 Resultados

6.5.1 Estadísticas descriptivas

Hemos comparado los indicadores demográficos, estructurales y actitudinales por género (véase la tabla S.6.3 del apéndice para consultar las estadísticas descriptivas completas). En promedio, los agricultores varones son ligeramente mayores y gestionan explotaciones más grandes con hatos más numerosos, aunque las diferencias son modestas. Por el contrario, las agricultoras declaran tener mayores densidades ganaderas y mayores ventas de animales, lo que sugiere una producción más intensiva a pesar de poseer explotaciones más pequeñas. Los hombres

declaran tener un mejor acceso a la maquinaria. Las mujeres reciben más asistencia técnica y participan más en la formación. Las mujeres también expresan una mayor preocupación por el cambio climático y una mayor aversión al riesgo. Aunque perciben costos de implementación más elevados para los EGR, sus expectativas de beneficios son similares a las de los hombres.

En lo que respecta al capital social, los hombres declaran una mayor influencia de los pares y un mayor reconocimiento percibido, lo que posiblemente refleje la naturaleza predominantemente masculina del sector. Sin embargo, las mujeres refieren un acceso ligeramente más frecuente a la información sobre SSP y EGR.

Los patrones de adopción no muestran diferencias significativas entre géneros en cuanto a SSP o adopción conjunta, pero los hombres son significativamente más propensos a adoptar EGR (38,9% frente a 30,4%). La adopción conjunta sigue siendo baja (~12%) para ambos grupos.

6.5.2 Resultados de la regresión comparativa (SSP, EGR, adopción conjunta)

La tabla 6.3 presenta los principales resultados de la regresión relativos a la adopción de SSP, EGR y ambas prácticas conjuntamente. Las estimaciones se basan en modelos logit ponderados por la encuesta. Presentamos el efecto marginal promedio (AME, por su sigla en inglés), los errores estándar y los niveles de significación. Los efectos fijos para el ciclo de producción y la región se incluyen en los modelos, pero se omiten en la tabla 6.3 por razones de concisión (en el apéndice, tabla A.6.8, se incluye una versión que incorpora los efectos fijos). Tal como se expone en la sección 7, los resultados deben interpretarse como asociaciones y no como efectos causales.

Tabla 6.3 Asociación entre adopción y características de los productores: efectos marginales promedio

Variable	SSP	EGR	Conjunta
Edad	-0,001*** (0,0003)	0,003*** (0,0003)	0,000** (0,0002)
Sexo (mujer)	0,163*** (0,010)	-0,279*** (0,022)	-0,117*** (0,012)
Tamaño del hato	-0,015*** (0,003)	0,021*** (0,003)	0,015*** (0,002)
Educación: secundaria	0,018** (0,009)	0,058*** (0,009)	0,023*** (0,006)
Educación: universitaria	-0,029*** (0,010)	0,044*** (0,010)	0,040*** (0,007)
Educación: posgrado	-0,087*** (0,019)	0,117*** (0,018)	0,155*** (0,015)
Ingreso (animales vendidos)	0,000*** (0,00001)	0,000*** (0,00001)	-0,000*** (0,00001)
Tasa de carga (ha/animal)	-0,017*** (0,002)	0,049*** (0,002)	0,004*** (0,001)
Organización (asociación)	0,002 (0,009)	-0,060*** (0,009)	0,083*** (0,006)
Acceso a asesoría	0,034*** (0,005)	0,004 (0,006)	-0,084*** (0,005)
Capacitación	-0,041*** (0,004)	0,072*** (0,004)	0,034*** (0,002)
Statu quo (prefiere lo familiar)	-0,021*** (0,007)	0,026*** (0,007)	-0,044*** (0,005)
Efecto de pares	-0,057*** (0,005)	-0,101*** (0,004)	0,033*** (0,004)
Aversión al riesgo	-0,024*** (0,003)	0,032*** (0,003)	-0,005* (0,002)
Acceso a maquinaria	-0,066*** (0,005)	-0,033*** (0,005)	0,019*** (0,004)
Información sobre SSP	0,050*** (0,010)		0,146*** (0,009)
SSP mejora el suelo	-0,036*** (0,008)		0,088*** (0,011)
SSP reduce GEI	0,089*** (0,008)		0,171*** (0,009)
Información sobre EGR		-0,090*** (0,009)	-0,007 (0,009)
EGR mejora el suelo		0,218*** (0,018)	0,059*** (0,014)
EGR reduce GEI		-0,041** (0,008)	-0,098*** (0,007)
Sexo × acceso a asesoría	-0,219*** (0,010)	0,120*** (0,016)	0,119*** (0,007)
Seudo-R ²	0,305	0,264	0,338
AIC	407,41	270,38	368,55
BIC	517,95	392,77	479,09
Observaciones	383	383	383

Notas: *p<0.1; **p<0.05; ***p<0.01. Todos los modelos incluyen efectos fijos para el ciclo de producción y la región, que se han omitido en esta tabla por razones de espacio

6.5.2.1 Factores comunes asociados a la adopción de ambas prácticas

Nuestros resultados muestran que ciertos factores están relacionados con la adopción tanto de SSP como de EGR. La educación secundaria (bachillerato) se asocia de manera sistemática y positiva con los tres resultados: +1,8 puntos porcentuales para SSP, +5,8 puntos porcentuales para EGR y +2,3 puntos porcentuales para la adopción conjunta (todos con $p < 0,01$), en comparación con quienes solo tienen educación primaria o un nivel inferior. Varios factores tienen efectos similares en la adopción tanto de SSP como de EGR, pero un efecto diferente en la adopción conjunta. Una mayor sensibilidad a las opiniones de los pares reduce la probabilidad de adoptar SSP (-5,7 pp) y EGR (-10,1 pp), pero aumenta la adopción conjunta (+3,3 pp), lo que indica dinámicas sociales divergentes entre la adopción de una sola innovación y la de múltiples innovaciones. El acceso a la maquinaria refleja este patrón: un acceso más fácil reduce la probabilidad de adoptar SSP (-6,6 pp) y EGR (-3,3 pp), pero se asocia positivamente con la adopción conjunta (+1,9 pp). Por último, aunque los ingresos agrícolas —representados por el número de animales vendidos— son estadísticamente significativos en los tres modelos, el tamaño del efecto es mínimo ($< +0,01$ pp por animal vendido adicional) en todos los modelos, lo que sugiere que su importancia económica es limitada.

6.5.2.2 Factores de divergencia en las prácticas

Hay varios factores que influyen de manera diferente en SSP y EGR. La edad es estadísticamente significativa, pero su influencia es sustancialmente débil a la hora de explicar los patrones de adopción; por ejemplo, el aumento de la edad de 30 a 60 años eleva la probabilidad de adopción de EGR en solo +0,09 pp. Las dinámicas de género son notables: las mujeres son más propensas a adoptar SSP (+16,3 pp), pero menos propensas a adoptar EGR (-27,9 pp) y ambas prácticas conjuntamente (-11,7 pp). Sin embargo, estos patrones cambian con el acceso al asesoramiento técnico. En el caso de las mujeres, la asistencia técnica reduce la adopción de SSP (interacción: -21,9 pp), pero aumenta la de EGR (+12,0 pp) y la adopción conjunta (+11,9 pp), lo que contrasta con los modestos efectos medios observados entre los hombres. El tamaño del hato se asocia negativamente con SSP (-1,5 pp por cada aumento de categoría), pero positivamente con EGR (+2,1 pp) y la adopción conjunta (+1,5 pp). La densidad ganadera muestra una división similar: negativa para SSP (-1,7 pp), pero positiva para EGR (+4,9 pp), lo que indica que los sistemas más intensivos se alinean mejor con la adopción de EGR. La educación superior (universitaria o de posgrado) también impulsa la divergencia. Los agricultores con estudios universitarios son menos propensos a adoptar SSP (-2,9 pp), pero más propensos a adoptar EGR (+4,4 pp). Estos efectos se amplifican en el nivel de posgrado (-8,7 pp para SSP; +11,7 pp para EGR). En cuanto

a la adopción conjunta, ambos niveles se asocian positivamente (+4,0 pp y +15,5 pp, respectivamente). La participación en cursos de formación aumenta la adopción de EGR (+7,2 pp) y la adopción conjunta (+3,4 pp), pero reduce la adopción de SSP (-4,1 pp). Los factores actitudinales también difieren. La preferencia por prácticas familiares reduce la adopción de SSP (-2,1 pp), pero aumenta la de EGR (+2,6 pp). Del mismo modo, una mayor aversión al riesgo reduce la adopción de SSP (-2,4 pp), pero aumenta la de EGR (+3,2 pp).

6.5.2.3 Factores específicos de cada práctica

Por último, identificamos factores específicos de la práctica que afectan únicamente a una determinada práctica o conjunto de prácticas. En el caso de SSP, el acceso a la información (+5,0 pp) y el asesoramiento técnico regular (+3,4 pp) se asocian positivamente con la adopción. La creencia en los beneficios de SSP para la mitigación de los GEI predice claramente su adopción (+8,9 pp), mientras que la creencia en las mejoras de la fertilidad del suelo se asocia negativamente (-3,6 pp). En el modelo de adopción conjunta, recibir información sobre SSP (+14,6 pp) y tener creencias positivas sobre la reducción de GEI (+17,1 pp) se encuentran entre los factores más influyentes. Cabe destacar que la percepción de que SSP mejora la fertilidad del suelo pasa de ser negativa en SSP a positiva en el modelo conjunto (+8,8 pp).

En el caso de EGR, la pertenencia a una organización (-6,0 pp) y la exposición a información específica sobre EGR (-9,0 pp) se asocian negativamente con la adopción. Por el contrario, la creencia en la mejora de la fertilidad del suelo que aporta EGR es el predictor positivo más fuerte (+21,8 pp). Sorprendentemente, la creencia en la mitigación de GEI de EGR se asocia negativamente (-4,1 pp), lo que posiblemente refleje una desconexión entre los discursos sobre el clima y la experiencia de los productores.

En el modelo de adopción conjunta, algunas asociaciones se invierten con respecto a los modelos de práctica individual. La influencia de los pares (+3,3 pp) y el acceso a la maquinaria (+1,9 pp) pasan a ser positivos; el acceso a la asistencia técnica, positivo para SSP, predice ahora una menor adopción conjunta (-8,4 pp), y la pertenencia a una organización se vuelve marcadamente positiva (+8,3 pp).

Además, exploramos la interdependencia residual en las decisiones de adopción utilizando un modelo logit bivariado. El análisis reveló una correlación no significativa entre las elecciones de SSP y EGR, lo que indica que los factores no observados compartidos parecen limitados. Las estimaciones detalladas y los diagnósticos de este modelo se presentan en el apéndice, sección A.6.44, tabla A.6.9.



6.6 Discusión

Nuestros resultados identifican los factores más destacados que influyen en la adopción de los sistemas silvopastoriles (SSP) y los enfoques de ganadería regenerativa (EGR) en el sur de Chile. Nos centramos en variables con efectos marginales promedio superiores a ± 5 puntos porcentuales, ya que los efectos más reducidos, aunque estadísticamente significativos, pueden tener una relevancia práctica limitada.

Las distintas prácticas pueden presentar perfiles de adopción divergentes. Estos patrones concuerdan con la teoría de la difusión de innovaciones (Rogers, 2003), que sostiene que las características de una innovación determinan su adopción. La adopción de EGR se alinea con rasgos vinculados a la intensificación sostenible: hatos más grandes, mayores densidades ganaderas, educación formal, interés en la mejora del suelo y participación en capacitación técnica (Campbell y King, 2022; Latawiec et al., 2014; Teutscherová et al., 2021). Los SSP, por el contrario, son más comunes entre los productores de menor escala, que probablemente se ven motivados por objetivos ambientales y de diversificación. Estos adoptantes perciben los SSP como una contribución a la mitigación de los GEI y señalan un menor acceso a la maquinaria, rasgos asociados a los sistemas multifuncionales o agroforestales (Nahed-Toral et al., 2013; Pignataro et al., 2016; Smith et al., 2022). Estas diferencias coinciden con evidencia más amplia según la cual los factores que impulsan la adopción varían según las prácticas de sostenibilidad (Ahmed, 2015; Anang et al., 2023; Prokopy et al., 2008). Por lo tanto, concebir la adopción de prácticas ganaderas sostenibles como un fenómeno homogéneo conlleva el riesgo de ignorar estas dinámicas tan distintas.

Las diferencias de género aportan evidencia relevante para los servicios de extensión. En consonancia con la bibliografía que ha identificado diferencias de género en la adopción de prácticas sostenibles (Bravo-Peña, 2025; Karami y Mansoorabadi, 2008), observamos que las mujeres son más propensas a adoptar SSP, pero menos propensas a adoptar EGR. Sin embargo, cuando las mujeres tienen acceso a asistencia técnica, este patrón se invierte. En el caso de SSP, la interacción entre ser mujer y recibir asesoramiento técnico es marcadamente negativa, lo que sugiere que los asesores pueden hacer hincapié en EGR porque EGR se alinea con los indicadores de productividad que se utilizan con frecuencia para evaluar los resultados o la eficiencia de las políticas públicas (DIPRES, 2018; Landini et al., 2017; Wright et al., 2025). Para las mujeres que carecen de dicho apoyo, SSP parece más viable, dado el papel de las mujeres en la diversificación de los ingresos y las estrategias de subsistencia del hogar (Cubbage et al., 2012; Nahed-Toral et al., 2013).

La educación parece reducir las barreras asociadas a la complejidad técnica. La educación universitaria se asocia positivamente con EGR y la adopción conjunta, pero se relaciona negativamente con SSP. Este patrón no implica necesariamente que los agricultores con mayor nivel educativo tengan una mayor preferencia por EGR. Más bien, sugiere que EGR presenta mayores barreras cognitivas y técnicas para su adopción, que la educación universitaria ayuda a reducir. Esto concuerda con investigaciones previas que muestran que la educación mejora la capacidad de adoptar tecnologías y prácticas complejas (López-Maciel *et al.*, 2025; Maini *et al.*, 2021; Ruzzante *et al.*, 2021). Por el contrario, una práctica menos compleja de implementar, como SSP, puede parecer más accesible para los agricultores con menor nivel de educación formal.

Las percepciones ambientales desempeñan un papel relevante como factores predictivos de la adopción. La creencia de que EGR mejora la fertilidad del suelo es el indicador más sólido en todos los modelos, lo que pone de relieve su relevancia para la productividad forrajera, la resiliencia y los beneficios percibidos (Barrowclough *et al.*, 2016; Leddin *et al.*, 2023; Rosa-Schleich *et al.*, 2024). Por el contrario, la adopción de SSP está más estrechamente vinculada a los beneficios ambientales colectivos, en particular a la mitigación de los gases de efecto invernadero. La naturaleza semi-permanente de los SSP puede acentuar la percepción de irreversibilidad y riesgo, lo que ayuda a explicar por qué la aversión al riesgo y la preferencia por el *statu quo* se asocian negativamente con la adopción de SSP, pero se relacionan positivamente con la adopción de EGR. Este patrón concuerda con las conclusiones de la literatura sobre agroforestería, que sugiere que la permanencia estructural de SSP puede aumentar su percepción de riesgo (Gebremedhin *et al.*, 2023).

El efecto de los pares configura los patrones de adopción de manera diferenciada. La influencia de los pares reduce la probabilidad de adoptar SSP o EGR por separado, pero aumenta la probabilidad de que se adopten conjuntamente. Es probable que esto refleje el contexto social: en entornos conservadores, los pares pueden reforzar las prácticas tradicionales, mientras que en contextos más progresistas pueden apoyar la innovación (Ball *et al.*, 2020; Muhammad *et al.*, 2019). De manera similar, el acceso a la maquinaria se correlaciona negativamente con la adopción por separado de SSP o EGR, pero presenta una correlación débilmente positiva con la adopción conjunta. Esto respalda la idea de que los productores con acceso limitado a la mecanización pueden recurrir a alternativas agroecológicas que requieren menos insumos (Gliessman, 2002). EGR, por ejemplo, puede reducir la dependencia del laboreo y los fertilizantes al mejorar las funciones del suelo mediante el pastoreo gestionado (Bravo-Peña *et al.*, 2025).

Limitaciones. A pesar de su cuidadoso diseño, nuestro estudio presenta varias limitaciones. En primer lugar, aunque el SIPEC es el registro oficial más completo de explotaciones ganaderas de Chile, es posible que no refleje plenamente los cambios recientes en la composición de los hatos o en la actividad de las explotaciones en el momento del muestreo. En segundo lugar, el hecho de basarnos en la información facilitada por los productores sobre la adopción de estas prácticas introduce un riesgo de clasificación errónea, especialmente en el caso de EGR, dada su complejidad técnica. Aunque se proporcionaron definiciones durante la encuesta, la identificación precisa dependía de la comprensión de los encuestados. Para abordar las inconsistencias, aplicamos un ajuste *a posteriori*, exigiendo intervalos de pastoreo rotativo inferiores a cuatro días, en consonancia

con las normas agronómicas. Sin embargo, es posible que este criterio operativo siga reflejando de forma imperfecta el comportamiento real. En tercer lugar, nuestro diseño empírico transversal y observacional limita la inferencia causal. Aunque controlamos múltiples covariables y comprobamos la robustez, los factores no observados—como las actitudes latentes o la dinámica del mercado—pueden sesgar las estimaciones. Por lo tanto, los resultados deben interpretarse como correlaciones. Por último, nuestros modelos binarios no captan la variación en la intensidad de la adopción. Las investigaciones futuras podrían aplicar modelos Tobit o de doble barrera (Cragg, 1971; Tobin, 1958) o explorar modelos de elección híbridos que incorporen constructos latentes (Abou-Zeid y Ben-Akiva, 2024), lo que permitiría obtener una visión más rica del comportamiento.



6.7 Conclusiones

Los perfiles de adopción de SSP y EGR son distintos. La adopción de EGR se asocia con hatos de mayor tamaño, mayores densidades ganaderas y un nivel educativo formal más elevado, lo que indica una orientación hacia la intensificación sostenible. Por el contrario, quienes adoptan SSP suelen ser productores a menor escala motivados por objetivos ambientales, como la mitigación de los gases de efecto invernadero, y que dependen en menor medida de la maquinaria convencional. Estos perfiles contrastantes ponen de relieve la necesidad de estrategias de extensión diferenciadas: la promoción de EGR debería hacer hincapié en la formación técnica y en los resultados en materia de salud del suelo, mientras que la divulgación de SSP debería centrarse en los servicios ecosistémicos y la diversificación de los ingresos.

En segundo lugar, existen relaciones complejas entre el género y la asistencia técnica. Las mujeres que carecen de apoyo técnico presentan mayor probabilidad de adoptar SSP, pero cuando tienen acceso al asesoramiento, sus patrones de adopción se inclinan hacia EGR. Aunque no se puede confirmar una relación de causalidad, estas dinámicas sugieren que los programas de extensión actuales podrían estar dando prioridad a prácticas intensivas como EGR, dejando de lado inadvertidamente SSP, que podrían encajar mejor con el papel descrito de las mujeres en la diversificación de los ingresos y la seguridad del hogar (Cubbage *et al.*, 2012; Landini *et al.*, 2017). Por lo tanto, los sistemas de extensión deberían ser sensibles al género y ofrecer orientación adaptada a los objetivos y contextos de los productores.

En tercer lugar, aunque no podemos descartar la posibilidad de una causalidad inversa, es decir, que la adopción influya en las percepciones, nuestros resultados sugieren que las percepciones ambientales y el capital técnico pueden contribuir a determinar las decisiones de adopción. Los beneficios percibidos, como la mejora de la fertilidad del suelo en el caso de EGR y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero en el caso de SSP, están estrechamente relacionados con la adopción. Un mayor nivel de educación formal aumenta significativamente la probabilidad de adoptar prácticas técnicamente complejas, mientras que los programas de formación específicos podrían ayudar a los productores con menor nivel educativo a superar las barreras percibidas. Si las percepciones efectivamente influyen en la adopción, las campañas de extensión deberían ir más allá de los mensajes genéricos sobre “sostenibilidad” y ofrecer información clara y concreta adaptada a la formación académica y a los canales de información de los productores; por ejemplo: “EGR aumenta la materia orgánica del suelo en un X% en Y años, lo que genera Z beneficios”, o “SSP captura X toneladas de CO₂ por hectárea”.

Por último, nuestros resultados sugieren que los responsables de política no deberían asumir automáticamente la existencia de sinergias entre estas prácticas. El análisis bivariado no muestra ninguna asociación residual significativa entre la adopción de SSP y la de EGR, lo que respalda la elaboración de modelos y el diseño de políticas independientes para cada una de ellas. Además, dado que la adopción de EGR está fuertemente impulsada por la convicción de los productores de que se obtienen mejoras cuantificables en la fertilidad del suelo, los programas públicos de extensión deberían dar prioridad al monitoreo de la salud del suelo en las explotaciones —como auditorías de suelo subsidiadas, calculadoras de costo-beneficio fáciles de usar y servicios de medición de carbono—, especialmente en el caso de las explotaciones más pequeñas. En cuanto a SSP, los programas de extensión pueden aprovechar los beneficios percibidos de la mitigación de los GEI poniendo a prueba incentivos vinculados al carbono y esquemas simplificados de verificación de GEI. Estas iniciativas podrían reforzarse mediante la nueva Ley de Biodiversidad y Áreas Protegidas (SBAP) de Chile, que establece un marco jurídico para los pagos por servicios ecosistémicos (PSE). Al compensar a los productores que conservan o restauran la vegetación autóctona a través de sistemas como SSP, los contratos de PSE podrían servir como herramienta financiera estratégica para promover la gestión sostenible de la tierra.

Las investigaciones futuras podrían dar prioridad a los diseños longitudinales para medir la evolución de la intensidad de adopción a lo largo del tiempo. Para avanzar hacia la inferencia causal será necesario recurrir a variables instrumentales o a experimentos naturales. En Chile, los subsidios del Instituto Nacional de Desarrollo Agropecuario (INDAP) o el acceso al sistema de incentivos del programa “Sostenibilidad Agroambiental de los Suelos Agrícolas” (SIRSD-S) podrían servir como instrumentos válidos. Además, se necesitan análisis de costo-beneficio sobre el terreno para conocer las percepciones de riesgo de los productores y fomentar una adopción más amplia. Los estudios cualitativos centrados en el género también pueden profundizar la comprensión de las barreras estructurales a las que se enfrentan las mujeres. Ampliar esta investigación a otros contextos latinoamericanos permitiría evaluar la escalabilidad y la relevancia institucional en diversos entornos agroecológicos.

Agradecimientos

Agradecemos al Dr. Emiliano López-Barrera (Universidad Texas A&M) y al Dr. Allen Blackman, así como al Comité Científico del BID, por sus valiosos comentarios a lo largo del estudio. También agradecemos al Servicio Agrícola y Ganadero de Chile (SAG) y al Instituto Nacional de Desarrollo Agropecuario (INDAP) por facilitar el acceso a los productores participantes. Extendemos nuestro más sincero agradecimiento a los ganaderos que participaron en la encuesta por su tiempo y sus aportes.



Referencias



- Abdul-Salam, Y., P. Ovando y D. Roberts. 2022. Understanding the economic barriers to the adoption of agroforestry: A real options analysis. *Journal of Environmental Management*, 302. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113955>
- Abolhassani, L., G. Oesten, S. Rajmis y H. Azadi. 2013. "Attitudes of Rangeland Holders towards Sustainable Range Management in Iran: A Case Study of the Semnan Rangelands." *Rangeland Journal* 35 (4): 435–443. <https://doi.org/10.1071/RJ11079>.
- Abu-Zeid, M. y M. Ben-Akiva. 2024. "Hybrid Choice Models." En *Handbook of Choice Modelling*, editado por S. Hess y A. Daly, 489–521. Edward Elgar Publishing. <https://doi.org/10.4337/9781800375635.00026>.
- Ahmed, M. H. 2015. Adoption of Multiple Agricultural Technologies in Maize Production of the Central Rift Valley of Ethiopia. <https://doi.org/10.22004/AG.ECON.231531>.
- Anang, B. T., G. Dagunga y M. Bosompem. 2023. "Predictors of Inoculant-Based Technology Adoption by Smallholder Soybean Farmers in Northern Ghana: Implications for Soil Fertility Management." *Agriculture and Food Security* 12 (29). <https://link.springer.com/article/10.1186/s40066-023-00435-3>.
- Apan-Salcedo, G. W., J. Nahed-Toral, E. Pérez-Luna, Á. Piñeiro-Vázquez y G. Jiménez-Ferrer. 2022. "Nivel de adopción de técnicas silvopastoriles en la Sierra Madre de Chiapas, México." [Revisar: falta el nombre de la revista o publicación] 25 (2). <https://doi.org/10.56369/tsaes.4001>.
- Arslan, A. 2020. "The Adoption of Improved Agricultural Technologies—A Meta-Analysis for Africa." *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3681375>.
- Ball, L., D. MacMillan, J. Tzanopoulos, A. Spalton, H. Al Hikmani y M. Moritz. 2020. "Contemporary Pastoralism in the Dhofar Mountains of Oman." *Human Ecology* 48 (3): 267–277. <https://doi.org/10.1007/s10745-020-00153-5>.
- Barrowclough, M., R. Stehouwer, J. Alwang, R. Gallagher, V. H. B. Mosquera y J. M. Domínguez. 2016. "Conservation Agriculture on Steep Slopes in the Andes: Promise and Obstacles." *Journal of Soil and Water Conservation* 71 (2): 91–102. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.2.91>.
- Bernabucci, U. 2019. "Climate Change: Impact on Livestock and How Can We Adapt." *Animal Frontiers* 9 (1): 3–5. <https://doi.org/10.1093/af/vfy039>.
- Beshir, M., M. Tadesse, F. Yimer y N. Brüggemann. 2022. "Factors Affecting Adoption and Intensity of Use of Teff-Acacia decurrens-Charcoal Production Agroforestry System in Northwestern Ethiopia." *Sustainability* 14 (8). <https://doi.org/10.3390/su14084751>.
- Borges, R. 2015. *The Role of Psychological Factors in the Adoption of Improved Natural Grassland by Brazilian Cattle Farmers in Biome Pampa*. Wageningen: Wageningen University. <https://edepot.wur.nl/341830>.

- Bravo-Peña, F. 2025. "Do Peers, Private Businesses, and Technical Advisors within Indigenous Farmers' Networks Encourage or Discourage Sustainable Farm Management?" *Journal of Cleaner Production* 521: 146254. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2025.146254>.
- Bravo-Peña, F., J. J. Toro-Letelier, N. Alvial-Cabrera, M. Hargreaves-Méndez y C. Alfaro-Rojas. 2025. Ganadería regenerativa: definición, caracterización y recomendaciones de política. Documento de proyecto LC/TS.2024/134. CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe).
- Calle, Z., E. Murgueitio, J. Chará, C. H. Molina, A. F. Zuluaga y A. Calle. 2013. "A Strategy for Scaling-up Intensive Silvopastoral Systems in Colombia." *Journal of Sustainable Forestry* 32 (7): 677–693. <https://doi.org/10.1080/10549811.2013.817338>.
- Campbell, A. y A. E. H. King. 2022. "Choosing Sustainability: Decision Making and Sustainable Practice Adoption with Examples from U.S. Great Plains Cattle Grazing Systems." *Animals* 12 (3): 286. <https://doi.org/10.3390/ani12030286>.
- Cochran, W. G. 1977. *Sampling Techniques*. 3.^a ed. Wiley.
- Cragg, J. G. 1971. "Some Statistical Models for Limited Dependent Variables with Application to the Demand for Durable Goods." *Econometrica* 39 (5): 829. <https://doi.org/10.2307/1909582>.
- Cubbage, F., G. Balmelli, A. Bussoni, E. Noellemeyer, A. N. Pachas, H. Fassola, L. Colcombet, B. Rossner, G. Frey, F. Dube, M. L. De Silva, H. Stevenson, J. Hamilton y W. Hubbard. 2012. "Comparing Silvopastoral Systems and Prospects in Eight Regions of the World." *Agroforestry Systems* 86 (3): 303–314. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9482-z>.
- De Mello Brandão Vinholis, M., M. S. Macchione Saes, M. J. Carrer y H. Meirelles de Souza Filho. 2021. "The Effect of Meso-Institutions on Adoption of Sustainable Agricultural Technology: A Case Study of the Brazilian Low Carbon Agriculture Plan." *Journal of Cleaner Production* 280. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124334>.
- De Souza, H., M. Vinholis, M. Carrer y R. Bernardo. 2021. "Determinants of Adoption of Integrated Systems by Cattle Farmers in the State of Sao Paulo, Brazil." *Agroforestry Systems* 95 (1): 103–117. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00565-8>.
- Didier, E. y M. Brunson. 2004. "Adoption of Range Management Innovations by Utah Ranchers." *Journal of Range Management* 57 (4): 330–336. <https://doi.org/10.2307/4003855>.
- DIPRES (Dirección de Presupuestos). 2018. Informe final de evaluación Evaluación Programas Gubernamentales (EPG). Programa de Desarrollo Local (PRODESAL), Instituto de Desarrollo Agropecuario (INDAP). Dirección de Presupuestos, Ministerio de Hacienda. https://www.dipres.gob.cl/597/articles-177358_informe_final.pdf.

- Fernández-Habas, J., P. Fernández-Rebollo, R. Gallardo-Cobos, T. Vanwalleghem y P. Sánchez-Zamora. 2022. "A Farmer's Perspective on the Relevance of Grassland-Related Innovations in Mediterranean Dehesa Systems." *Forests* 13 (8). <https://doi.org/10.3390/f13081182>.
- Gebremedhin, B., T. Tadesse, A. Hadera, G. Tesfay y M. M. Rannestad. 2023. "Risk Preferences, Adoption and Welfare Impacts of Multiple Agroforestry Practices." *Forest Policy and Economics* 156: 103069. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.103069>.
- Gebrezgabher, S., M. Meuwissen, G. Kruseman, D. Lakner y A. Lansink. 2015. "Factors Influencing Adoption of Manure Separation Technology in the Netherlands." *Journal of Environmental Management* 150: 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.029>.
- Gliessman, S. R. 2002. *Agroecología: Procesos ecológicos en agricultura sostenible*. CATIE.
- Griliches, Z. 1957. "Hybrid Corn: An Exploration in the Economics of Technological Change." *Econometrica* 25 (4): 501–522.
- Herrera, S., Z. Kallas, D. Szerbennikov, F. Thorne y S. McCarthy. 2023. "Towards Circular Farming: Factors Affecting EU Farmers' Decision to Adopt Emission-Reducing Innovations." *International Journal of Agricultural Sustainability* 21 (1). <https://doi.org/10.1080/14735903.2023.2270149>.
- Hyland, J. J., K. Heanue, J. McKillop y E. Micha. 2018. "Factors Influencing Dairy Farmers' Adoption of Best Management Grazing Practices." *Land Use Policy* 78: 562–571. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.07.006>. Top of Form
- Bottom of Form
- INE Chile (Instituto Nacional de Estadísticas de Chile). 2022. VIII Censo Agropecuario y Forestal (CAF) 2021 del Instituto Nacional de Estadísticas de Chile. <https://www.ine.gob.cl/estadisticas/economia/agricultura-agroindustria-y-pesca/censos-agropecuarios>.
- . 2024. Existencias de animales por especie a nivel nacional y regional, para el día de referencia 10 de marzo de 2021. VIII Censo Agropecuario y Forestal, año agrícola 2020–2021 [conjunto de datos]. https://www.ine.gob.cl/docs/default-source/censo-agropecuario/cuadros-estadisticos/2021/existencias-animales.xlsx?sfvrsn=d78db453_4.
- Jara-Rojas, R., S. Russey, L. Roco, D. Fleming-Muñoz y A. Engler. 2020. "Factors Affecting the Adoption of Agroforestry Practices: Insights from Silvopastoral Systems of Colombia." *Forests* 11 (6): 648. <https://doi.org/10.3390/f11060648>.
- Kampherbeek, E. W., L. E. Webb, B. J. Reynolds, S. A. Sistla, M. R. Horney, R. Ripoll-Bosch, J. P. Dubowsky y Z. D. McFarlane. 2023. "A Preliminary Investigation of the Effect of Solar Panels and Rotation Frequency on the Grazing Behavior of Sheep (*Ovis aries*) Grazing Dormant Pasture." *Applied Animal Behaviour Science* 258: 105799. <https://doi.org/10.1016/j.applanim.2022.105799>.

- Kanneganti, V. R. y S. R. Kaffka. 1995. "Forage Availability from a Temperate Pasture Managed with Intensive Rotational Grazing." *Grass and Forage Science* 50 (1): 55–62. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2494.1995.tb02294.x>.
- Karami, E. y A. Mansoorabadi. 2008. "Sustainable Agricultural Attitudes and Behaviors: A Gender Analysis of Iranian Farmers." *Environment, Development and Sustainability* 10 (6): 883–898. <https://doi.org/10.1007/s10668-007-9090-7>.
- Landini, F., W. Brites y M. I. Mathot y Rebolé. 2017. "Towards a New Paradigm for Rural Extensionists' In-Service Training." *Journal of Rural Studies* 51: 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2017.02.010>.
- Latawiec, A. E., B. B. N. Strassburg, J. F. Valentim, F. Ramos y H. N. Alves-Pinto. 2014. "Intensification of Cattle Ranching Production Systems: Socioeconomic and Environmental Synergies and Risks in Brazil." *Animal* 8 (8): 1255–1263. <https://doi.org/10.1017/S1751731114001566>.
- Leddin, C., E. Morse-McNabb, K. Smith, C. Ho y J. Jacobs. 2023. "How Can Improved Farmer Decisions and Farm System Impacts Resulting from the Use of Digital Forage Measurement Technologies on Dairy Farms Be Valued?" *Agricultural Systems* 212: 103755. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2023.103755>.
- Lehtonen, R. y E. Pahkinen. 2004. *Practical Methods for Design and Analysis of Complex Surveys*. John Wiley y Sons.
- Levy, P. y S. Lemeshow. 2013. *Sampling of Populations: Methods and Applications*. John Wiley y Sons.
- Li, B. V. y B. Jiang. 2021. "Responses of Forest Structure, Functions, and Biodiversity to Livestock Disturbances: A Global Meta-Analysis." *Global Change Biology* 27 (19): 4745–4757. <https://doi.org/10.1111/gcb.15781>.
- López-Maciel, M., P. Roebeling, K. Soma y J. Haumont. 2025. "Assessing the Constraints to and Drivers for the Adoption and Diffusion of Smart XG, Last-Mile Connectivity and Edge Computing Solutions in Agriculture: The Case of Digital Shepherds in Flanders, Belgium." *Land* 14 (3): 543. <https://doi.org/10.3390/land14030543>.
- Luce, R. D. y P. Suppes. 1965. "Preference, Utility and Subjective Probability." En *Handbook of Mathematical Psychology*, vol. 3. Wiley.
- Maini, E., M. De Rosa y Y. Vecchio. 2021. "The Role of Education in the Transition towards Sustainable Agriculture: A Family Farm Learning Perspective." *Sustainability* 13 (14): 8099. <https://doi.org/10.3390/su13148099>.
- Martin, C., J.-C. Castella, H. L. Anh, Y. Eguienta y T. T. Hieu. 2004. "A Participatory Simulation to Facilitate Farmers' Adoption of Livestock Feeding Systems Based on Conservation Agriculture in the

- Uplands of Northern Vietnam.” *International Journal of Agricultural Sustainability* 2 (2): 118–132. <https://doi.org/10.1080/14735903.2004.9684572>.
- McFadden, D. 1972. “Conditional Logit Analysis of Qualitative Choice Behavior.” [Revisar: referencia incompleta; faltan fuente/editorial, lugar, páginas o URL/DOI, según corresponda].
- Melo, O., N. Quiñones y D. Acuña. 2021. “Towards Sustainable Agriculture in Chile. Reflections on the Role of Public Policy.” *International Journal of Agriculture and Natural Resources* 48 (3): 186–209. <https://doi.org/10.7764/ijanr.v48i3.2359>.
- Muhammad, K., N. Mohammad, K. Abdullah, S. Mehmet, A. K. Ashfaq y R. Wajid. 2019. “Socio-Political and Ecological Stresses on Traditional Pastoral Systems: A Review.” *Journal of Geographical Sciences* 29 (10): 1758–1770. <https://doi.org/10.1007/s11442-019-1656-4>.
- Mujeyi, A., M. Mudhara y M. J. Mutenje. 2022. “Adoption Patterns of Climate-Smart Agriculture in Integrated Crop-Livestock Smallholder Farming Systems of Zimbabwe.” *Climate and Development* 14 (5): 399–408. <https://doi.org/10.1080/17565529.2021.1930507>.
- Nahed-Toral, J., A. Valdivieso-Pérez, R. Aguilar-Jiménez, J. Cámara-Cordova y D. Grande-Cano. 2013. “Silvopastoral Systems with Traditional Management in Southeastern Mexico: A Prototype of Livestock Agroforestry for Cleaner Production.” *Journal of Cleaner Production* 57: 266–279. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.06.020>.
- Notenbaert, A. M. O., S. Douxchamps, D. M. Villegas, J. Arango, B. K. Paul, S. Burkart, I. Rao et al. 2021. “Tapping into the Environmental Co-Benefits of Improved Tropical Forages for an Agroecological Transformation of Livestock Production Systems.” *Frontiers in Sustainable Food Systems* 5: 742842. <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.742842>.
- Ogunlana, E. 2004. “The Technology Adoption Behavior of Women Farmers: The Case of Alley Farming in Nigeria.” *Renewable Agriculture and Food Systems* 19 (1): 57–65. <https://doi.org/10.1079/RAF5200366>.
- Olwande, J., G. Sikei y M. Mathenge. 2009. Agricultural Technology Adoption: A Panel Analysis of Smallholder Farmers’ Fertilizer Use in Kenya. <https://escholarship.org/uc/item/9666220j>.
- Owombo, P. y F. Idumah. 2017. “Determinants of Agroforestry Technology Adoption among Arable Crop Farmers in Ondo State, Nigeria: An Empirical Investigation.” *Agroforestry Systems* 91 (5): 919–926. <https://doi.org/10.1007/s10457-016-9967-2>.
- Paul, B. K., J. C. Groot, B. L. Maass, A. M. Notenbaert, M. Herrero y P. A. Tittone. 2020. “Improved Feeding and Forages at a Crossroads: Farming Systems Approaches for Sustainable Livestock Development in East Africa.” *Outlook on Agriculture* 49 (1): 13–20. <https://doi.org/10.1177/0030727020906170>.

- Perosa, B., P. Newton y M. Carrer. 2021. "Access to Information Affects the Adoption of Integrated Systems by Farmers in Brazil." *Land Use Policy* 106. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105459>.
- Pignataro, A. G., S. I. Levy Tacher, J. R. Aguirre Rivera, J. Nahed Toral, M. González Espinosa y N. Rendón Carmona. 2016. "Silvopastoral Systems of the Chol Mayan Ethnic Group in Southern Mexico: Strategies with a Traditional Basis." *Journal of Environmental Management* 181: 363–373. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.06.036>.
- Pindyck, R. S. y D. L. Rubinfeld. 1998. *Econometric Models and Economic Forecasts*. 4.^a ed. Irwin McGraw-Hill.
- Pinheiro Machado, L. C. 2016. *Pastoreo Racional Voisin: tecnología agroecológica para el tercer milenio*. 6.^a ed. Hemisferio Sur S.A.
- Pinheiro-Machado, L. C., H. L. S. Seó, R. R. Daros, D. Enriquez-Hidalgo y A. V. Wendling. 2021. "Voisin Rational Grazing as a Sustainable Alternative for Livestock Production." *Animals* 11 (12): 3494. <https://doi.org/10.3390/ani11123494>.
- Prokopy, L. S., K. Floress, D. Klotthor-Weinkauff y A. Baumgart-Getz. 2008. "Determinants of Agricultural Best Management Practice Adoption: Evidence from the Literature." *Journal of Soil and Water Conservation* 63 (5): 300–311. <https://doi.org/10.2489/jswc.63.5.300>.
- Rahelizatovo, N. y J. Gillespie. 2004. "Factors Influencing the Implementation of Best Management Practices in the Dairy Industry." *Journal of Soil and Water Conservation* 59 (4): 166–175.
- Rogers, E. M. 2003. *Diffusion of Innovations*. 5.^a ed. Free Press.
- Rojas-Downing, M. M., A. P. Nejadhashemi, T. Harrigan y S. A. Woznicki. 2017. "Climate Change and Livestock: Impacts, Adaptation, and Mitigation." *Climate Risk Management* 16: 145–163. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2017.02.001>.
- Rosa-Schleich, J., J. Loos, M. Ferrante, O. Mußhoff y T. Tschardtke. 2024. "Mixed Farmers' Perception of the Ecological-Economic Performance of Diversified Farming." *Ecological Economics* 220: 108174. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108174>.
- Ruzzante, S., R. Labarta y A. Bilton. 2021. "Adoption of Agricultural Technology in the Developing World: A Meta-Analysis of the Empirical Literature." *World Development* 146: 105599. <https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2021.105599>.
- Santos, C. O. D., A. D. S. Pinto, M. P. D. Santos, B. J. R. Alves, M. B. R. Neto y L. G. Ferreira. 2024. "Livestock Intensification and Environmental Sustainability: An Analysis Based on Pasture Management Scenarios in the Brazilian Savanna." *Journal of Environmental Management* 355: 120473. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120473>.

- Schader, C., A. Muller, N. E.-H. Scialabba, J. Hecht, A. Isensee, K.-H. Erb, P. Smith et al. 2015. "Impacts of Feeding Less Food-Competing Feedstuffs to Livestock on Global Food System Sustainability." *Journal of the Royal Society Interface* 12 (113): 20150891. <https://doi.org/10.1098/rsif.2015.0891>.
- Smith, M. M., G. Bentrup, T. Kellerman, K. MacFarland, R. Straight, Lord Ameyaw y S. Stein. 2022. "Silvopasture in the USA: A Systematic Review of Natural Resource Professional and Producer-Reported Benefits, Challenges, and Management Activities." *Agriculture, Ecosystems and Environment* 326: 107818. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107818>.
- Teutscherová, N., E. Vázquez, M. Sotelo, D. Villegas, N. Velásquez, D. Baquero, M. Pulleman y J. Arango. 2021. "Intensive Short-Duration Rotational Grazing Is Associated with Improved Soil Quality within One Year after Establishment in Colombia." *Applied Soil Ecology* 159: 103835. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103835>.
- Tobin, J. 1958. "Estimation of Relationships for Limited Dependent Variables." *Econometrica* 26 (1): 24. <https://doi.org/10.2307/1907382>.
- Train, K. 2009. *Discrete Choice Methods with Simulation*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Vargas-De la Mora, A. L., M. A. Castillo-Santiago, T. O. Randhir, M. C. Hernández-Moreno, M. J. Cach-Pérez y V. Camacho-Valdéz. 2021. "Know to Improve: Factors That Influence the Transition towards Silvopastoral Systems in the Chiapas Coast." *Tropical and Subtropical Agroecosystems* 24 (3). <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-85126549112&partnerID=40&md5=b51d8cbab3b-52902693dc6f9bf4a13f>.
- Wang, Z., S. Ali, A. Akbar y F. Rasool. 2020. "Determining the Influencing Factors of Biogas Technology Adoption Intention in Pakistan: The Moderating Role of Social Media." *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17 (7). <https://doi.org/10.3390/ijerph17072311>.
- Weindl, I., H. Lotze-Campen, A. Popp, C. Müller, P. Havlík, M. Herrero, C. Schmitz y S. Rolinski. 2015. "Livestock in a Changing Climate: Production System Transitions as an Adaptation Strategy for Agriculture." *Environmental Research Letters* 10 (9): 094021. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/9/094021>.
- Wright, A., J. Wright, D. McCorkle y J. Hyde. 2025. "Are We Measuring Impact Accurately? Identifying Potential Sources of Bias in the Evaluation of Extension Personnel and Programs." *Applied Economic Perspectives and Policy* 47 (1): 49–64. <https://doi.org/10.1002/aepp.13478>.
- Yadav, A., M. Gendley, J. Sahu, P. Kumar Patel, K. Chandraker y A. Dubey. 2019. "Silvopastoral System: A Prototype of Livestock Agroforestry." *The Pharma Innovation Journal* 8 (2): 76–82.
- Zabala, A., L. Barrios y U. Pascual. 2022. "From Participation to Commitment in Silvopastoral Programmes: Insights from Chiapas, Mexico." *Ecological Economics* 200. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon>.

Apéndice



A1. Descripción de los datos y análisis preliminar

Tabla A.6.1 Comparación de las características de la muestra y población

Característica		Muestra (%)		Población (%)	Diferencia (%)
Género	Mujer	20,62%	Mujer	19,55%	1,07%
	Hombre	77,80%	Hombre	79,72%	1,92%
Estrato	Estrato 1	45,6%	Estrato 1	41,5%	4,1%
	Estrato 2	21,1%	Estrato 2	23,9%	2,8%
	Estrato 3	13,3%	Estrato 3	14,9%	1,6%
	Estrato 4	9,1%	Estrato 4	10,5%	1,4%
	Estrato 5	10,7%	Estrato 5	9,1%	1,6%
Región	Región 1	24,02%	Región 1	25,97%	1,95%
	Región 2	52,48%	Región 2	50,95%	1,53%
	Región 3	23,49%	Región 3	23,06%	0,43%

Ajuste mediante ponderaciones de muestreo. Dadas las ligeras discrepancias observadas, especialmente en los niveles educativos, aplicamos ponderaciones de muestreo para ajustar la subrepresentación o sobrerrepresentación de los grupos en nuestra muestra. Calculamos las ponderaciones utilizando la probabilidad inversa de selección para cada estrato, a partir de las proporciones de la población del censo agrícola.

Aplicación de las ponderaciones de muestreo. Incorporamos las ponderaciones de muestreo en la estimación del modelo logit multivariante para garantizar que los resultados sean representativos de la población. El análisis ponderado tiene en cuenta las diferencias en la probabilidad de selección y corrige cualquier posible sesgo debido al sobremuestreo o submuestreo de grupos específicos.

Incorporación al análisis empírico. Todas las estadísticas descriptivas y los análisis de regresión que se presentan en las secciones siguientes se ponderan utilizando las ponderaciones de muestreo derivadas de los datos de la población. Este enfoque mejora la validez de nuestros hallazgos y garantiza que sean generalizables a la población más amplia de ganaderos de las regiones del estudio.

A2. Preparación de variables para la modelización

Limpieza de datos. La EGR es una función de la frecuencia de rotación. Un subconjunto de los encuestados informó de su rotación en términos como «cada 1 a 7 días», «cada 2 a 4 días» o «depende de la temporada». Codificamos los valores de estos intervalos según la media de los números (4 y 3, respectivamente), y codificamos «depende de la temporada» como valores faltantes.

Valores perdidos. Hay dos categorías de variables que presentan valores perdidos: las categóricas y las numéricas. En el caso de las variables creadas a partir de las respuestas a preguntas condicionales, el encuestador formulaba preguntas de seguimiento basadas en las respuestas anteriores. Los valores perdidos indican que el encuestado no tuvo la oportunidad de responder a las preguntas de seguimiento, ya que estas no se le plantearon. Para completar los valores perdidos de estas variables, creamos artificialmente una opción adicional denominada «sin opinión» [0] y la utilizamos. Consideramos estas variables como categóricas, para evitar cualquier consecuencia negativa de esta manipulación de datos en el análisis. Estas variables son `type_assistance`, `rla_labor`, `sps_labor`, `sps_cost`, `rla_cost`, `rla_expectation` y `sps_expectation`.

La segunda categoría se basa en las respuestas a preguntas incondicionales: edad, nivel educativo, tamaño de la explotación, ingresos, norma social, tipo de suelo de la superficie cultivada, tipo de suelo de la superficie total, clima de la superficie cultivada, clima de la superficie total, aversión al riesgo y tasa de ganado. En este caso, los valores perdidos indican la falta de respuesta por parte de los participantes. Utilizamos la regresión sobre todas las demás variables sin valores faltantes para imputar dichos valores, que luego se introducen en los modelos como regresores numéricos. Utilizamos las siguientes variables para imputar los valores faltantes: `región`, `sexo`, `organización`, `formación`, `cambio climático`, `expectativa EGR`, `expectativa SSP`, `acceso a maquinaria`, `acceso a asesores`, `tipo de asistencia`, `statu quo`, `efecto_de_los_compañeros`, `reconocimiento`, `adopción_sps`, `adopción_rla`, `mano_de_obra_rla`, `mano_de_obra_sps`, `coste_sps`, `coste_rla`, `adopción_nominal`, `ciclo_de_producción`, `información_rla` e `información_sps`.

Las variables «educ», «social_norm», «rla_soil», «sps_soil», «rla_climate», «sps_climate» y «risk_aver-sion» de este grupo eran de tipo ficticio o categórico. Para preservar su naturaleza, utilizamos umbrales intermedios para crear categorías a partir de los valores continuos de estas variables.¹⁸ Completamos los valores faltantes de la variable `num_animal` (número de cabezas de ganado) con la observación más frecuente en los datos (moda de la variable), el número 10.

¹⁸ La variable `farm_size` no se incluyó en las regresiones porque la variable `stock_rate` representa ambas. Por lo tanto, no realizamos esta conversión para estas dos variables.

Tabla A.6.2 Tratamiento de las variables con valores faltantes

Variable	Valores faltantes	Método para completar los valores faltantes	Tipo de variable
Edad	17	Imputación por regresión	Numérica
Educación (educ)	4	Imputación por regresión	Numérica
Tamaño de la finca (farm_size)	1	Imputación por regresión	Numérica
Número de animales (num_animal)	2	Moda de las observaciones	Numérica
Ingreso (income)	5	Imputación por regresión	Numérica
Norma social (social_norm)	4	Imputación por regresión	Numérica
Efecto de la adopción de EGR en la fertilidad del suelo (rla_soil)	1	Imputación por regresión	Numérica
Efecto de la adopción de SSP en la fertilidad del suelo (sps_soil)	1	Imputación por regresión	Numérica
Efecto de la adopción de EGR en las emisiones de GEI (rla_climate)	4	Imputación por regresión	Numérica
Efecto de la adopción de SSP en las emisiones de GEI (sps_climate)	4	Imputación por regresión	Numérica
Aversión al riesgo (risk_aversion)	14	Imputación por regresión	Numérica
Tasa de carga (stock_rate)	4	Imputación por regresión	Numérica
Tipo de asistencia técnica (type_assistance)	143	Crear la opción “sin asistencia técnica”, que toma valor 0	Categórica
Expectativa de largo plazo sobre el beneficio económico de EGR (rla_expectation)	17	Crear la opción “sin opinión”, que toma valor 0	Categórica
Expectativa de largo plazo sobre el beneficio económico de SSP (sps_expectation)	231	Crear la opción “sin opinión”, que toma valor 0	Categórica
Número de trabajadores necesarios para implementar EGR (rla_labor)	17	Crear la opción “sin opinión”, que toma valor 0	Categórica
Número de trabajadores necesarios para implementar SSP (sps_labor)	231	Crear la opción “sin opinión”, que toma valor 0	Categórica
Costo de implementar EGR (rla_cost)	29	Crear la opción “sin opinión”, que toma valor 0	Categórica
Costo de implementar SSP (sps_cost)	151	Crear la opción “sin opinión”, que toma valor 0	Categórica

Sexo. Los participantes indicaron su género en una de tres categorías: masculino, femenino o jurídico (empresarial). Sin embargo, debido al número muy reducido de observaciones en la categoría «jurídico» (6 de 383), codificamos la variable para incluir solo dos valores: masculino y femenino. En el caso de las personas jurídicas, asignamos el sexo del representante legal.

Educación. La respuesta de los participantes que prefirieron no contestar a la pregunta sobre la educación se codificó como 99. Marcamos estas observaciones como faltantes y, en su lugar, calculamos un valor estimado para su nivel educativo mediante imputación por regresión.

Dos variables, «rla_satisfaction» y «sps_satisfaction», reflejan la experiencia de los ganaderos que ya han optado por un enfoque y, por lo tanto, no describen la decisión de los agricultores de adoptar la tecnología. Por lo tanto, las excluimos del modelo.

Algunos ganaderos creían que estaban practicando la EGR, pero dada la frecuencia de su rotación, su aplicación no resultaba eficaz. Para reflejar esto, definimos una variable ficticia *adoption_rla* que toma el valor 1 para aquellos que declararon aplicar la EGR y rotar el ganado como máximo cada 3 días (1 para aquellos que rotan con mayor frecuencia), y 0 en los demás casos.

A.3. Estadísticas descriptivas, por género

La tabla A.6.3 presenta las medias ponderadas y las proporciones de las variables demográficas, estructurales, institucionales, de actitud y relacionadas con la adopción, desglosadas por género. La tabla también incluye valores p basados en el diseño que comprueban las diferencias entre los encuestados de género masculino y femenino. Estas estadísticas proporcionan un contexto para interpretar los patrones específicos de género identificados en los modelos de regresión y respaldan el argumento de que las mujeres y los hombres se enfrentan a condiciones estructurales y entornos informativos diferentes.

En concreto, la tabla pone de relieve las disparidades de género en el acceso a la maquinaria, a los asesores y a la formación, así como en las percepciones sobre la carga laboral y los costes asociados a los sistemas silvopastoriles (SSP) y los enfoques de ganadería regenerativa (EGR). Las diferencias en la influencia de los pares, el reconocimiento y las actitudes relacionadas con el clima sugieren, además, que las decisiones de adopción tienen dimensiones arraigadas en el contexto social. Se presentan las tasas de adopción para cada práctica y su combinación, lo que ofrece un punto de referencia descriptivo para los análisis multivariantes.

Tabla A.6.3 Estadísticas resumidas de las variables, por género

Variable	Descripción	Hombres (304)	Mujeres (79)	Valor p
Demográficas				
Edad	Años	54,86	54,19	0,034**
Educación	Categoría	2,14	2,16	0,338
Características de la finca				
Tamaño de la finca	Hectáreas	92,88	80,75	0,014**
Tamaño del hato	Categoría	141,11	122,95	0,057*
Tasa de carga	Índice	1,78	2,00	0,000***
Ingreso de la finca	Número de animales vendidos	109,44	125,68	0,087*
Acceso a maquinaria	Escala	0,77	0,57	0,000***
Ciclo productivo	Categoría	3,35	3,42	0,157
Capital institucional y social				
Pertenencia a una organización	Escala	0,27	0,22	0,000***
Asistencia a capacitaciones	Escala	0,50	0,64	0,000***
Acceso a asesoría	Escala	0,78	1,04	0,000***
Tipo de asistencia	Categoría	0,91	0,99	0,000***
Acceso a información sobre EGR	Escala	0,20	0,27	0,000***
Acceso a información sobre SPS	Escala	0,08	0,11	0,000***
Norma social	Escala	1,01	1,01	0,117
Efecto de pares	Escala	1,27	1,12	0,000***
Reconocimiento	Escala	1,01	0,91	0,000***
Características actitudinales y conductuales				
Cambio climático	Escala	2,86	3,19	0,000***
Aversión al riesgo	Escala	1,51	1,71	0,000***
Creencia sobre el statu quo	Categoría	0,52	0,58	0,000***
Expectativa sobre SSP	Escala	1,02	1,07	0,106
Expectativa sobre EGR	Escala	2,64	2,67	0,080*
Actitud hacia EGR	Escala	0,87	0,83	0,000***
Percepción sobre la mano de obra para EGR	Escala	2,17	2,06	0,000***
Percepción sobre la mano de obra para SSP	Escala	0,82	0,77	0,049**
Percepción sobre el costo de EGR	Escala	2,16	2,35	0,000***
Percepción sobre el costo de SSP	Escala	1,32	1,35	0,275
Percepción sobre el impacto de EGR en la fertilidad del suelo	Escala	0,93	0,91	0,000***
Percepción sobre el impacto de SSP en la fertilidad del suelo	Escala	0,82	0,87	0,000***
Percepción sobre el impacto de EGR en las emisiones de GEI	Escala	0,69	0,75	0,000***
Percepción sobre el impacto de SSP en las emisiones de GEI	Escala	0,68	0,78	0,000***
Tasas de adopción				
Adopción de SSP	%	30,60	31,76	0,170
Adopción de EGR	%	38,88	30,43	0,000***
Adopción conjunta	%	12,03	12,53	0,482

Nota: Todas las medias y proporciones de esta tabla se calculan utilizando el diseño de la encuesta (estratificación y conglomeración) y los pesos muestrales correspondientes. Los errores estándar y los valores p se derivan de estimadores de varianza basados en el diseño.

A4. Elección de variables para el modelo

La información sobre la relación entre las variables independientes y dependientes se ha extraído de la bibliografía y se resume en la tabla A.6.4.

Tabla A.6.4 Hipótesis y literatura relacionada

Variable independiente	Hipótesis	Teoría
Tamaño del hato	Positiva	Los hatos más grandes suelen reflejar recursos suficientes y escala operativa para justificar inversiones innovadoras (Hyland et al., 2018; Jara-Rojas et al., 2020).
Tamaño de la finca	Positiva	Las explotaciones de mayor tamaño suelen permitir una mayor capacidad para asignar espacio a nuevas tecnologías, absorber costos iniciales y experimentar con prácticas complejas (Mujeyi et al., 2022a; Perosa et al., 2021a). El tamaño de la finca se ha asociado positivamente con la adopción de sistemas agroforestales, sistemas integrados de cultivo y ganadería (ICLS), pastoreo mejorado y otros sistemas sostenibles (Herrera et al., 2023a; Hyland et al., 2018; Owombo y Idumah, 2017).
Estado de producción	Sin expectativa direccional clara debido a la falta de evidencia	No hay evidencia empírica específica que vincule la etapa productiva o la fase del ciclo de vida de la finca con la adopción de SSP o EGR.
Ingreso de la finca¹⁹	Predominantemente positiva, pero potencialmente ambigua en contextos específicos debido a la falta de evidencia	Los ingresos más altos suelen aliviar las restricciones financieras para adoptar prácticas intensivas en recursos (Mujeyi et al., 2022a; Boz, 2016). No obstante, algunos estudios también informan casos contrastantes en los que las fincas de menores ingresos adoptaron sistemas silvopastoriles con cierto apoyo, como semillas o insumos donados (Zabala et al., 2022). En general, es probable que unos ingresos más altos faciliten la inversión en nuevas tecnologías.
Acceso a maquinaria	Positiva	La disponibilidad de insumos, financiamiento y mercados reduce los costos de transacción e información, lo que facilita la adopción de tecnologías (Mujeyi et al., 2022b; Vargas-De la Mora et al., 2021).
Edad	Negativa	Los productores más jóvenes suelen mostrar mayor apertura a técnicas novedosas; los productores de mayor edad pueden ser más adversos al riesgo o más reticentes ante proyectos de largo plazo (Gebrezgabher et al., 2015; Jara-Rojas et al., 2020; Perosa et al., 2021a). Sin embargo, algunos estudios no encuentran efectos significativos (Zabala et al., 2022).
Sexo	Positiva para mujeres	La investigación sobre agricultura climáticamente inteligente, agricultura de conservación e innovaciones similares ha mostrado que los hogares encabezados por mujeres pueden adoptar estas prácticas de forma más intensiva y frecuente (Mujeyi et al., 2022b; Turinawe et al., 2015).
Educación	Ambigua, con tendencias hacia efectos positivos cuando hay capacitación especializada	Una mayor educación formal puede mejorar la comprensión de prácticas complejas, aunque varios estudios documentan efectos mixtos o no significativos (Gebrezgabher et al., 2015; Ogunnlana, 2004b). La capacitación especializada, más que la educación general, ha demostrado ser más influyente (Fernández-Habas et al., 2022; Herrera et al., 2023b).

¹⁹ Trabajamos exclusivamente con los ingresos derivados de la cría de ganado. Por lo tanto, si no especificamos que se trata de ingresos de la explotación, el lector debe asumir que son ingresos procedentes únicamente de las actividades de cría de ganado.

Variable independiente	Hipótesis	Teoría
Organización	Positiva	La participación en asociaciones o redes de productores favorece el intercambio de información, la reducción del riesgo y el aprendizaje colectivo, lo que puede mejorar la adopción (Didier y Brunson, 2004; Ogunnlana, 2004b; Vargas-De la Mora et al., 2021).
Capacitación	Efecto positivo, condicionado por la calidad y pertinencia de la capacitación	El fortalecimiento efectivo de capacidades y el apoyo continuo son fundamentales para implementar prácticas intensivas en conocimiento o conocimiento implícito (Martin et al., 2004; Vargas-De la Mora et al., 2021). Aun así, algunos estudios observan una influencia limitada de la capacitación específica de libre acceso (de Mello Brandão Vinholis et al., 2021).
Acceso a asesoría	Positiva	La interacción frecuente con servicios de extensión o apoyo de asesoría puede reforzar la adopción al reducir las brechas de información (Mujeyi et al., 2022a), aunque los resultados no son universales (de Souza et al., 2021).
rla_expectation	Positiva	Las percepciones de los productores sobre las ventajas económicas y ambientales se correlacionan fuertemente con la adopción de tecnología (Borges, 2015; de Mello Brandão Vinholis et al., 2021). La escasa conciencia o visibilidad de los retornos de corto plazo suele obstaculizar la adopción.
sps_expectation	Positiva	Igual que la anterior.
rla_cost	Negativa	Los altos desembolsos iniciales en infraestructura, plantación de árboles o maquinaria, si se consideran prohibitivos, pueden desalentar la adopción (Abdul-Salam et al., 2022; Hyland et al., 2018). En cambio, las percepciones favorables sobre los costos pueden fomentar la inversión en prácticas sostenibles. Los sistemas sostenibles suelen requerir insumos de mano de obra adicionales para el manejo de pastos, el cuidado de árboles o el mantenimiento (Beshir et al., 2022; Martin et al., 2004). La percepción de que la mano de obra es escasa o costosa puede desalentar la adopción.
sps_cost	Negativa	Igual que la anterior.
Aversión al riesgo	Negativa	Los productores muy adversos al riesgo pueden verse disuadidos por las incertidumbres relacionadas con el desempeño del sistema, las fluctuaciones del mercado y los desafíos de implementación (Martin et al., 2004; Vargas-De la Mora et al., 2021).
Reconocimiento	Positiva	La conformidad con las normas locales y las preferencias culturales puede favorecer la adopción; por el contrario, la desaprobación o las prácticas en conflicto en la comunidad pueden obstaculizarla (Calle et al., 2009; Didier y Brunson, 2004).
Efecto de pares	El signo positivo o negativo depende de si los pares son un apoyo	Observar experiencias exitosas entre pares puede reducir la incertidumbre, mientras que el escepticismo dentro de las redes sociales puede impedir la adopción (Borges, 2015; Perosa et al., 2021b).
climate_change	Positiva	Los productores que priorizan la preservación ecológica son más proclives a adoptar sistemas que ofrecen beneficios ambientales. Una conciencia limitada de estos beneficios puede inhibir la adopción (Wang et al., 2020).
climate_effect	Positiva	Los productores convencidos de que sus acciones tienen consecuencias ambientales significativas muestran una mayor propensión a adoptar enfoques orientados ecológicamente (Herrera et al., 2023a; Wang et al., 2020).
soil_effect	Positiva	Igual que la anterior.

A4.1. Modelo SSP²⁰

Especificación del modelo y construcción de variables

El análisis comienza con la elaboración de un conjunto de datos detallado que incorpora variables demográficas, económicas, institucionales y de percepción. Las variables categóricas, como el nivel educativo, el tipo de ciclo de producción y el tipo de asistencia técnica, se codificaron en variables ficticias para facilitar su inclusión en los modelos logísticos. Concretamente, la educación se recodificó en cuatro categorías («≤8 años, Secundaria, Universidad, Posgrado»), el ciclo de producción en seis categorías tomando como referencia la cría y la asistencia técnica en cuatro variables ficticias tomando como base la ausencia de asistencia técnica. Además, se crearon variables ficticias regionales para Los Lagos y Los Ríos, tomando La Araucanía como grupo de referencia. Por último, se aplicaron el parámetro de estratificación, las ponderaciones y las correcciones de población finita para ajustar el diseño muestral.

Especificación secuencial del modelo

El proceso de modelización sigue un enfoque jerárquico, en el que cada modelo añade de forma incremental nuevos bloques de variables teóricamente justificadas.

- **El modelo 1** se centra en factores estructurales, incorporando edad, sexo, educación, ingresos (medidos en animales vendidos), densidad de ganado (ha/animal), región y ciclo de producción (con variables ficticias para categorías específicas).
- **El modelo 2** amplía esta base añadiendo factores institucionales: pertenencia a organizaciones, acceso a asesores, tipos de asistencia técnica y formación.
- **El modelo 3** incluye además factores actitudinales, tales como la preocupación por el Cambio climático, la preferencia por el statu quo, las normas sociales, los efectos de los pares, el reconocimiento, la aversión al riesgo y el acceso a la maquinaria.
- **El modelo 4** integra percepciones específicas de los sistemas de producción sostenible (SSP), incluyendo la disponibilidad de información, los efectos percibidos sobre la calidad del suelo, los beneficios climáticos, los requisitos de mano de obra y los costes.
- **El modelo 5** se ha diseñado para abordar la posible endogeneidad mediante la exclusión de `sps_labor` y `sps_cost`. Este modelo equilibra la amplitud explicativa y la solidez.

²⁰ Seguimos el mismo proceso de selección de variables para el SPS, el RLA y la adopción conjunta, y obtuvimos un modelo «parsimónico» para cada uno de ellos. A continuación, analizamos las diferencias y probamos un modelo utilizando las mismas variables en los tres casos para garantizar la solidez de los coeficientes. Todos los pasos que seguimos para el SPS se repitieron en los demás casos como prueba de solidez, lo que contribuyó a eliminar varias variables. Presentamos el análisis únicamente para el SPS.

La tabla A.6.5 recoge los coeficientes estimados, los errores estándar y los niveles de significación para cada variable en los modelos 1 a 5. Esta estrategia de inclusión progresiva permite evaluar las contribuciones marginales de diferentes grupos de variables al poder explicativo de los modelos.

Tabla A.6.5 Resultados de regresión: adopción de SSP (modelos 1-5)

Variable	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Edad	-0,004*** (0,002)	-0,006*** (0,002)	-0,006*** (0,002)	-0,037*** (0,003)	-0,003 (0,002)
Sexo (mujer)	0,016 (0,050)	0,067 (0,051)	0,072 (0,052)	0,009 (0,110)	-0,071 (0,055)
Tamaño del hato (categoría)	0,016 (0,019)	-0,005 (0,020)	-0,007 (0,021)	0,041 (0,041)	0,031 (0,021)
Educación: secundaria	0,311*** (0,051)	0,292*** (0,053)	0,261*** (0,055)	0,598*** (0,112)	0,375*** (0,056)
Educación: universitaria	0,071 (0,057)	0,089 (0,060)	0,115* (0,062)	0,491*** (0,112)	0,148** (0,062)
Educación: posgrado	0,717*** (0,096)	0,688*** (0,098)	0,765*** (0,104)	0,753*** (0,189)	0,895*** (0,110)
Ingreso (animales vendidos)	0,0003*** (0,0001)	0,0004*** (0,0001)	0,0004*** (0,0001)	-0,001*** (0,0001)	0,0003*** (0,0001)
Tasa de carga (ha/animal)	-0,076*** (0,010)	-0,070*** (0,011)	-0,068*** (0,011)	-0,075*** (0,026)	-0,061*** (0,011)
Los Lagos	0,596*** (0,052)	0,608*** (0,055)	0,561*** (0,055)	1,304*** (0,108)	0,564*** (0,055)
Los Ríos	0,420*** (0,062)	0,493*** (0,063)	0,397*** (0,064)	0,907*** (0,151)	0,349*** (0,066)
CP: cría-engorde	0,266** (0,109)	0,228** (0,111)	0,256** (0,111)	0,327 (0,239)	0,245** (0,110)
CP: cría	-0,659*** (0,076)	-0,714*** (0,074)	-0,696*** (0,075)	-0,732*** (0,185)	-0,426*** (0,071)
CP: recría-engorde	-0,207** (0,100)	-0,258*** (0,097)	-0,204** (0,100)	1,254*** (0,205)	-0,106 (0,099)
CP: recría	-0,684*** (0,109)	-0,834*** (0,113)	-0,909*** (0,115)	-2,405*** (0,264)	-0,903*** (0,113)
CP: engorde	-0,130 (0,087)	-0,267*** (0,086)	-0,248*** (0,088)	1,255*** (0,196)	-0,065 (0,087)
CP: ciclo completo	0,575*** (0,078)	0,532*** (0,077)	0,558*** (0,079)	1,825*** (0,163)	0,669*** (0,075)
Organización (asociación)		0,431*** (0,048)	0,431*** (0,049)	0,880*** (0,077)	0,422*** (0,052)

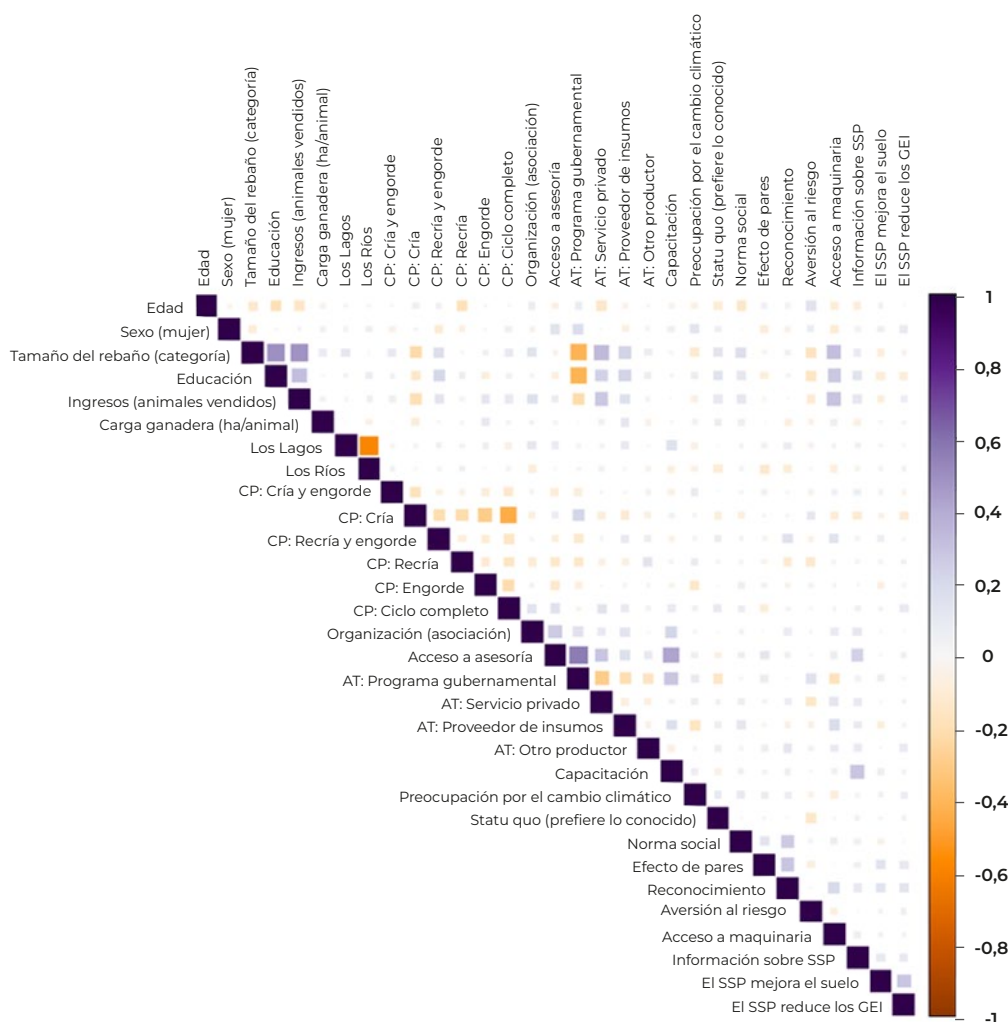
Variable	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Acceso a asesoría		-0,320*** (0,054)	-0,303*** (0,055)	0,474*** (0,120)	-0,472*** (0,059)
TA: programa gubernamental		0,100 (0,091)	0,072 (0,092)	-0,474** (0,222)	0,257*** (0,096)
TA: servicio privado		0,118 (0,107)	0,060 (0,109)	-1,686*** (0,232)	0,111 (0,113)
TA: proveedor de insumos		-0,240** (0,120)	-0,227* (0,121)	-1,333*** (0,226)	-0,134 (0,126)
TA: otro productor		0,664*** (0,111)	0,772*** (0,117)	-1,109*** (0,278)	0,589*** (0,125)
Capacitación		0,169*** (0,021)	0,165*** (0,022)	-0,288*** (0,059)	0,070*** (0,024)
Preocupación por el cambio climático			0,001 (0,018)	0,175*** (0,035)	0,014 (0,019)
Statu quo (prefiere lo familiar)			-0,295*** (0,042)	-0,611*** (0,089)	-0,379*** (0,044)
Norma social			0,113*** (0,034)	0,492*** (0,061)	0,144*** (0,036)
Efecto de pares			-0,084*** (0,029)	0,032 (0,046)	-0,157*** (0,031)
Reconocimiento			0,034 (0,029)	-0,148** (0,059)	-0,059* (0,032)
Aversión al riesgo			-0,115*** (0,018)	-0,196*** (0,037)	-0,161*** (0,018)
Acceso a maquinaria			-0,150*** (0,031)	-0,037 (0,065)	-0,164*** (0,031)
Información sobre SSP				0,464*** (0,166)	1,252*** (0,068)
SSP mejora el suelo				0,638***	0,014

Nota: *p<0,1; **p<0,05; ***p<0,01. CP = ciclo productivo. TA = tipo de asistencia.

Diagnóstico de multicolinealidad y correlación

Antes de proceder a la interpretación, evaluamos la multicolinealidad utilizando los factores de inflación de la varianza generalizados (GVIF). Los resultados indican que ninguna variable superó el umbral habitualmente utilizado de un GVIF escalado > 5 , lo que sugiere unos niveles aceptables de colinealidad. Las matrices de correlación de las variables del Modelo 5 (Figura A.6.1) no revelan ningún par de variables con correlaciones absolutas superiores a 0,7, lo que respalda aún más la estabilidad de las estimaciones del modelo. Este análisis garantiza que la inclusión de múltiples predictores, incluidas las percepciones específicas del SSP, no compromete la integridad de las estimaciones debido a la colinealidad.

Figura A.6.1. Matriz de correlación de las variables del Modelo 5



Comparación de modelos y estadísticas de ajuste

A continuación, evaluamos el rendimiento comparativo de los modelos utilizando el criterio de información de Akaike (AIC), el criterio de información bayesiano (BIC) y el pseudo- R^2 . Como se muestra en la tabla A.6.6 (de `sps_logit_models_1to6_combined.html`), el Modelo 4 completo presenta un pseudo- R^2 inusualmente alto (0,702), pero también suscita preocupaciones de sobreajuste y endogeneidad debido a la inclusión de `sps_labor` y `sps_cost`. El Modelo 5 ofrece una especificación más equilibrada, con un pseudo- R^2 de 0,13, un AIC de 476,86 y un BIC de 607,14, lo que indica un equilibrio razonable entre el poder explicativo y la parsimonia del modelo.

Tabla A.6.6 Estadísticas del modelo (AIC, BIC, pseudo- R^2)

	Modelo 1	Modelo 2	Modelo 3	Modelo 4 (completo)	Modelo 5 (sin costo ni mano de obra)
AIC	472,83	484,91	495,58	213,85	480,19
BIC	535,99	583,61	621,92	359,93	618,37
Seudo-R^2	0,067	0,079	0,086	0,704	0,131

Selección de modelos y especificación parsimoniosa

Se estimó un modelo final que incorporaba las interacciones seleccionadas, lo que dio lugar a un mejor ajuste del modelo (pseudo- R^2 de 0,16, AIC de 472,56, BIC de 622,59), tal y como se recoge en la tabla A.6.7. Posteriormente, se aplicó un procedimiento de selección escalonada automatizado (stepAIC) para refinar el modelo, conservando las variables estadísticamente y sustantivamente significativas. Este procedimiento dio lugar a un modelo compacto con menor complejidad y un poder explicativo comparable. Además, especificamos manualmente un modelo parsimonioso eliminando variables con justificación teórica o respaldo estadístico limitados, tales como el ciclo de producción (PC): engorde, el tipo de asistencia (TA): servicio privado, el reconocimiento y los ingresos: formación. Este modelo parsimonioso (Modelo 4 en la tabla A.6.7) alcanzó un AIC de 459,4, un BIC de 577,85 y un pseudo- R^2 de 0,153, lo que indica un equilibrio superior entre ajuste y simplicidad.

Tabla A.6.7 Resultados de la regresión con términos de interacción

Variable	Modelo 5 (1)	Con interacciones (2)	Por pasos (3)	Parsimonia (4)
Edad	-0,003 (0,002)	-0,005*** (0,002)	-0,005*** (0,002)	-0,005*** (0,002)
Sexo (mujer)	-0,071 (0,055)	0,312*** (0,067)	0,318*** (0,066)	0,329*** (0,066)
Tamaño del hato (categoría)	0,031 (0,021)	0,059** (0,023)		
Educación: secundaria	0,375*** (0,056)	0,382*** (0,058)	0,400*** (0,058)	0,301*** (0,056)
Educación: universitaria	0,148** (0,062)	0,088 (0,063)	0,145** (0,061)	0,062 (0,060)
Educación: posgrado	0,895*** (0,110)	0,958*** (0,115)	1,011*** (0,113)	0,795*** (0,103)
Ingreso (animales vendidos)	0,0003*** (0,0001)	0,0003*** (0,0001)	0,0004*** (0,0001)	0,0004*** (0,0001)
Tasa de carga (ha/animal)	-0,061*** (0,011)	-0,055*** (0,013)	-0,054*** (0,013)	-0,057*** (0,012)
Los Lagos	0,564*** (0,055)	0,622*** (0,056)	0,615*** (0,055)	0,594*** (0,055)
Los Ríos	0,349*** (0,066)	0,303*** (0,067)	0,296*** (0,067)	0,332*** (0,065)
CP: cría-engorde	0,245** (0,110)	0,399*** (0,115)	0,413*** (0,115)	0,323*** (0,097)
CP: cría	-0,426*** (0,071)	-0,224*** (0,072)	-0,245*** (0,073)	
CP: recría-engorde	-0,106 (0,099)	0,209** (0,101)	0,215** (0,101)	-0,292*** (0,054)
CP: recría	-0,903*** (0,113)	-0,952*** (0,113)	-0,958*** (0,112)	-1,033*** (0,098)
CP: engorde	-0,065 (0,087)	0,038 (0,091)	0,008 (0,091)	
CP: ciclo completo	0,669*** (0,075)	0,791*** (0,077)	0,779*** (0,077)	0,708*** (0,057)
Organización (asociación)	0,422*** (0,052)	-0,072 (0,107)	-0,024 (0,108)	0,017 (0,105)
Acceso a asesoría	-0,472*** (0,059)	-0,649*** (0,064)	-0,654*** (0,064)	-0,435*** (0,034)

Variable	Modelo 5 (1)	Con interacciones (2)	Por pasos (3)	Parsimonia (4)
TA: programa gubernamental	0,257*** (0,096)	0,549*** (0,102)	0,533*** (0,101)	
TA: servicio privado	0,111 (0,113)	0,109 (0,120)	0,151 (0,121)	
TA: proveedor de insumos	-0,134 (0,126)	-0,197 (0,136)	-0,193 (0,137)	
TA: otro productor	0,589*** (0,125)	0,759*** (0,133)	0,776*** (0,132)	0,523*** (0,111)
Capacitación	0,070*** (0,024)	0,073** (0,030)	0,074** (0,030)	0,152*** (0,027)
Preocupación por el cambio climático	0,014 (0,019)	0,047** (0,020)		
Statu quo (prefiere lo familiar)	-0,379*** (0,044)	-1,139*** (0,074)	-1,101*** (0,073)	-1,069*** (0,070)
Norma social	0,144*** (0,036)	0,165*** (0,037)	0,184*** (0,037)	0,171*** (0,035)
Efecto de pares	-0,157*** (0,031)	-0,288*** (0,036)	-0,280*** (0,036)	-0,273*** (0,035)
Reconocimiento	-0,059* (0,032)	-0,166*** (0,033)	-0,163*** (0,033)	-0,129*** (0,032)
Aversión al riesgo	-0,161*** (0,018)	-0,395*** (0,025)	-0,393*** (0,025)	-0,371*** (0,024)
Acceso a maquinaria	-0,164*** (0,031)	-0,168*** (0,033)	-0,163*** (0,033)	-0,166*** (0,033)
Información sobre SSP	1,252*** (0,068)	1,272*** (0,069)	1,259*** (0,069)	1,180*** (0,068)
SSP mejora el suelo	0,014 (0,061)	-0,024 (0,065)		
SSP reduce GEI	0,998*** (0,051)	1,129*** (0,054)	1,115*** (0,054)	1,074*** (0,053)
Statu quo × aversión al riesgo		0,481*** (0,038)	0,468*** (0,037)	0,456*** (0,036)
Sexo × organización		1,159*** (0,140)	-1,192*** (0,139)	-1,233*** (0,137)
Organización × efecto de pares		0,598*** (0,068)	0,586*** (0,068)	0,543*** (0,066)
Sexo × capacitación		-0,435*** (0,054)	-0,426*** (0,054)	-0,365*** (0,052)

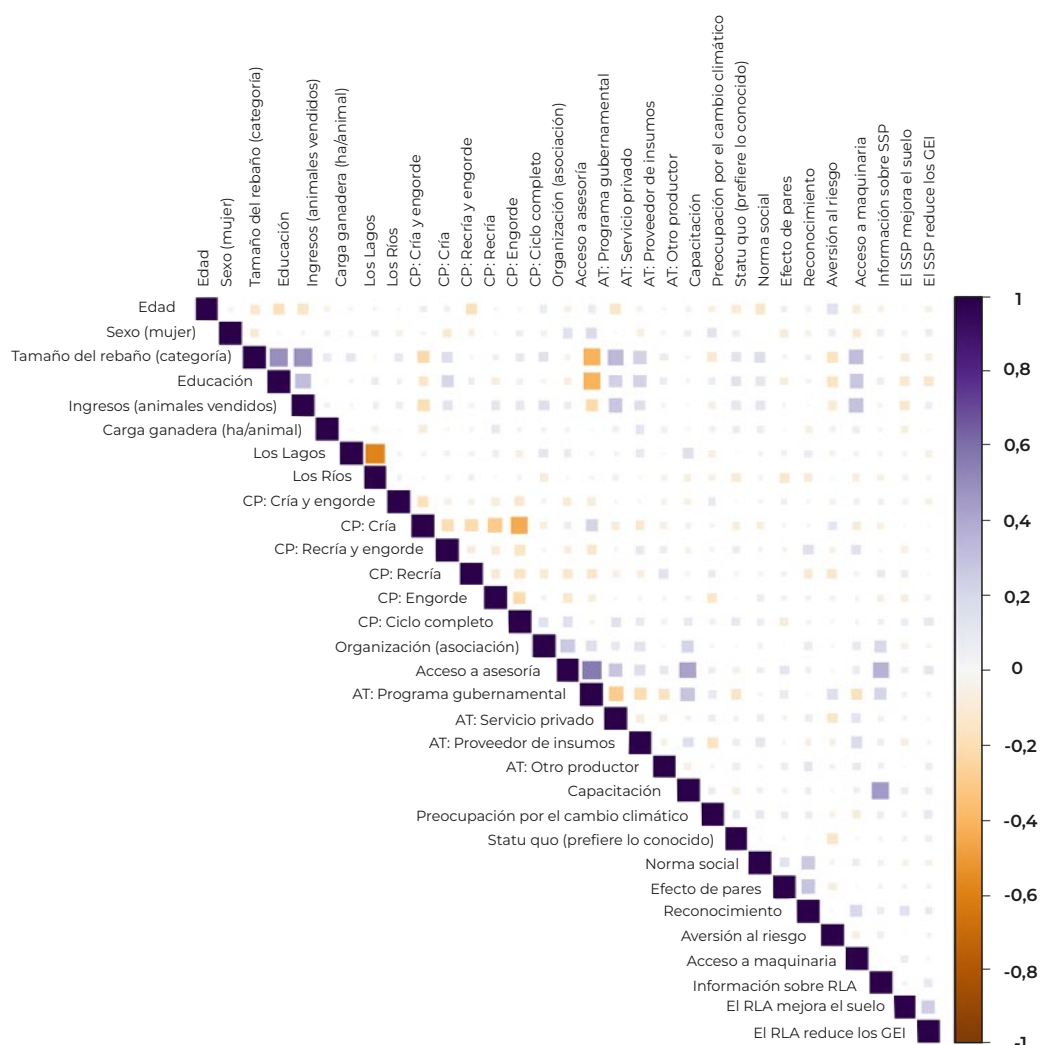
Variable	Modelo 5 (1)	Con interacciones (2)	Por pasos (3)	Parsimonia (4)
Ingreso * capacitación		0,001*** (0,0001)	0,001*** (0,0001)	
Constante	-1,378*** (0,165)	-1,075*** (0,175)	-0,877*** (0,159)	-0,692*** (0,147)
Seudo-R ²	0,13	0,161	0,16	0,153
AIC	478,8	474,36	468,67	459,97
BIC	613,03	628,33	610,8	578,42
Observaciones	383	383	383	383

Nota: *p<0,1; **p<0,05; ***p<0,01. CP = ciclo productivo. TA = tipo de asistencia.

A4.2. Modelo EGR

La matriz de correlación de las variables para el modelo EGR es la siguiente,²⁰ lo que, una vez más, muestra bajas correlaciones entre las variables:

Figura A.6.2 Matriz de correlación de las variables del Modelo 5 en la especificación EGR



²⁰ Tal y como se explica en la nota al pie 3, seguimos el mismo proceso de selección de variables para el SPS, el RLA y la adopción conjunta, y obtuvimos un modelo «parsimonioso» para cada uno de ellos. A continuación, analizamos las diferencias y probamos un modelo utilizando las mismas variables en los tres para garantizar que los coeficientes fueran robustos. Así pues, todos los pasos que seguimos para el SPS se repitieron para los demás como prueba de robustez, lo que ayudó a eliminar varias variables. Presentamos el análisis únicamente para el SPS.

A4.3. Razonamiento y criterios para la selección final de variables

En esta sección se exponen los fundamentos, los criterios técnicos y la evidencia empírica que han guiado el perfeccionamiento y la selección final de las variables independientes en los modelos logit que analizan la adopción de prácticas productivas —concretamente, SSP, EGR y la adopción conjunta—. El objetivo principal era garantizar la comparabilidad entre modelos, la solidez estadística y la relevancia para las políticas, al tiempo que se minimizaban el sobreajuste, el ruido y la inestabilidad de las estimaciones.

A4.3.1. Variables de ajuste

Se incluyeron las siguientes variables de manera uniforme en los tres modelos:

- Edad. La edad del productor mostró un signo y una significación estables ($p < 0,01$) en todos los modelos (SSP, EGR y adopción conjunta).
- Sexo (mujer). Se mantuvo, en aras de la coherencia, una variable ficticia que indicaba que la cabeza de familia era una mujer —significativa y negativa en el modelo EGR ($p < 0,01$)—, a pesar de su menor significación en otros modelos.
- Tamaño del hato. Aunque positiva en EGR y negativa en SSP (ambas $p < 0,01$ – $0,05$), proporciona información relevante para las políticas en función de la escala. Se incluyó en el modelo conjunto a pesar de su exclusión en la selección por pasos.
- Pertenencia a organizaciones. Una variable ficticia relativa a la pertenencia a asociaciones resultó significativa en el análisis EGR y en la adopción conjunta ($p < 0,01$), y se mantuvo con fines exploratorios en el análisis SSP a pesar de su frecuente insignificancia.
- Variables ficticias de nivel educativo (bachillerato, universidad, posgrado). Las tres resultaron estadísticamente significativas ($p < 0,05$ – $0,01$) con efectos positivos consistentes en todos los modelos.
- Ingresos (venta de animales). Positivos y significativos ($p < 0,01$) en SSP y EGR; se mantuvieron por su interpretabilidad económica en el modelo conjunto.
- Densidad de ganado (ha/animal). Negativa en el SSP y positiva en el EGR (ambas $p < 0,01$); incluida en el modelo conjunto para evaluar su papel como indicador de la presión productiva.

- Variables ficticias regionales (Los Lagos, Los Ríos). Significativas en todos los modelos ($p < 0,01$), lo que refleja una heterogeneidad espacial crítica.
- Categorías de regímenes de producción). Seis variables ficticias (cría-engorde, cría, recría-engorde, recría, engorde, ciclo completo) resultaron significativas ($p < 0,01$) en todos los modelos. El ciclo completo, aunque no fue significativo en la adopción conjunta, se mantuvo para completar la clasificación y como referencia para los productores integrados.
- Acceso a asesores. Un predictor negativo y significativo en SSP y EGR ($p < 0,01$), y también significativo en la adopción conjunta, lo que indica el papel del aprendizaje institucional.
- AT (servicio privado). Significativo en todos los modelos ($p < 0,01$); se descartaron otros subtipos de AT debido a la colinealidad y a coeficientes extremos.
- Formación. La formación práctica fue significativa en todos los modelos ($p < 0,01$), con signo negativo en SSP y positivo en EGR y en los modelos conjuntos, lo que sugiere efectos diferenciados según el tipo de tecnología.
- Orientación al statu quo. Un predictor negativo y significativo ($p < 0,01$) en todos los modelos, lo que refleja la resistencia a la innovación basada en actitudes tradicionalistas.
- Efecto de grupo. Una influencia negativa y significativa ($p < 0,01$) en todos los modelos, que refleja la presión social en las decisiones de adopción.
- Aversión al riesgo. Asociada negativamente con la adopción en todos los modelos ($p < 0,01$), lo que indica que una mayor aversión al riesgo puede reducir la adopción de determinadas tecnologías o paquetes.
- Acceso a maquinaria. Negativo en SSP y EGR, positivo en la adopción conjunta (todos $p < 0,01$); incluido para evaluar las disparidades en el acceso al capital.

A4.3.2. Variables descartadas

- Subtipos de asistencia técnica (GovProgram, InputSupplier, OtherFarmer). Se eliminaron debido a coeficientes extremos (p. ej., «OtherFarmer»), escasa presencia de categorías y alta intercorrelación. Se prefirió la variable agregada «Acceso a la asistencia» por motivos de parsimonia y claridad.
- Normas sociales y reconocimiento. Se han descartado debido a su inestabilidad y a su escasa significación entre modelos, ya que ofrecen un valor explicativo limitado y aumentan el riesgo de sobreajuste.

- Preocupación por el cambio climático. Excluida por su insignificancia estadística sistemática y su relevancia teórica limitada a la hora de explicar el comportamiento de adopción en este contexto.

A4.3.3. Variables específicas del modelo

Las variables de percepción y conocimiento específicas de tecnologías concretas (p. ej., _info, SPS_info, RLA_improves_soil, SPS_reduces_GHG) se excluyeron del conjunto de modelos común. Estas variables se incluirán únicamente en regresiones específicas cuando sea conceptualmente apropiado

A4.3.4. Selección de términos de interacción

Los términos de interacción se seleccionaron basándose principalmente en su mejora constante del ajuste del modelo —medida por los cambios positivos en el pseudo- R^2 — en los tres modelos de adopción (SSP, EGR y adopción conjunta), así como en su coherencia teórica dentro de cada contexto. Entre las interacciones candidatas, la de sexo $\times$ acceso_al_asesor destacó por su contribución constante y significativa al rendimiento del modelo: aumentó el pseudo- R^2 en 0,027 en el SSP, en 0,005 en el EGR y 0,015 en el modelo conjunto. Esta interacción capta un efecto teóricamente plausible, a saber, que la combinación de ser mujer cabeza de familia y tener acceso a asesoramiento técnico ejerce una influencia diferencial, pero consistentemente positiva, en las decisiones de adopción.

Por el contrario, aunque la interacción «statu_quo $\times$ aversión_al_riesgo» también mejoró el ajuste del modelo en las tres especificaciones, su contribución en SSP y EGR fue marginal (Δ Pseudo- $R^2 < 0,005$). Por lo tanto, se dio prioridad a la interacción «sexo $\times$ acceso_al_asesor» como la interacción más robusta entre modelos.

Para evitar el sobreajuste y la sobrecarga de especificación, en los modelos finales solo se incluyó la interacción «sexo $\times$ acceso_al_asesor». Opcionalmente, la interacción «statu_quo $\times$ aversión_al_riesgo» podría considerarse como una interacción secundaria en el modelo de adopción conjunta, donde su contribución es más sustancial. Al exigir un efecto positivo constante sobre el pseudo- R^2 y un signo estable en todos los modelos, nos aseguramos de que la inclusión de términos de interacción mejorara el poder explicativo sin introducir ruido ni multicolinealidad. En particular, la interacción sexo $\times$ acceso_al_asesor capta un mecanismo relevante para las políticas —las disparidades de género en el acceso a la asistencia técnica— al tiempo que mejora el ajuste del modelo de manera uniforme e interpretable.

A4.3.5. Resultados comparativos de regresión (SSP, EGR, adopción conjunta), modelo completo

La tabla A.6.8 presenta los efectos marginales medios (AME) de las regresiones logísticas ponderadas por la encuesta que predicen la adopción de SSP, EGR y ambas conjuntamente. Todos los modelos controlan la región de producción y el ciclo. Los resultados son correlacionales, no causales.

Tabla A.6.8 Efectos marginales promedio (AME) de los mejores modelos, por variable dependiente

Variable	AME SSP	AME EGR	AME conjunta
Edad	-0,001*** (0,0003)	0.003*** -0.0003	0,000*** (0,0002)
Sexo (mujer)	0,163*** (0,010)	-0.279*** -0.022	-0,117*** (0,012)
Tamaño del hato (categoría)	-0,015*** (0,003)	0.021*** -0.003	0,015*** (0,002)
Educación: secundaria	0,018** (0,009)	0.058*** -0.009	0,023*** (0,006)
Educación: universitaria	-0,029*** (0,010)	0.044*** -0.01	0,040*** (0,007)
Educación: posgrado	-0,087*** (0,019)	0.117*** -0.018	0,155*** (0,015)
Ingreso (animales vendidos)	0,000*** (0,00001)	0.000*** -0.00001	-0,000*** (0,00001)
Tasa de carga (ha/animal)	-0,017*** (0,002)	0.049*** -0.002	0,004*** (0,001)
Los Lagos	0,068*** (0,008)	0.158*** -0.011	0,031*** (0,008)
Los Ríos	-0,035*** (0,010)	0.172*** -0.012	0,093*** (0,008)
CP: cría-engorde	0,187*** (0,020)	0.311*** -0.021	-0,050*** (0,012)
CP: cría	0,024 (0,016)	0.220*** -0.016	-0,035*** (0,010)
CP: recria-engorde	0,120*** (0,022)	0.171*** -0.02	-0,062*** (0,012)
CP: ciclo completo	0,167*** (0,017)	0.184*** -0.019	0,017* (0,010)

Variable	AME SSP	AME EGR	AME conjunta
Organización (asociación)	0,002 (0,009)	0.172*** -0.018	0,083*** (0,006)
Acceso a asesoría	0,034*** (0,005)	0,004 (0,006)	-0,084*** (0,005)
Capacitación	-0,041*** (0,004)	0,072*** (0,004)	0,034*** (0,002)
Statu quo (prefiere lo familiar)	-0,021*** (0,007)	0,026*** (0,007)	-0,044*** (0,005)
Efecto de pares	-0,057*** (0,005)	-0,101*** (0,004)	0,033*** (0,004)
Aversión al riesgo	-0,024*** (0,003)	0,032*** (0,003)	-0,005* (0,002)
Acceso a maquinaria	-0,066*** (0,005)	-0,033*** (0,005)	0,019*** (0,004)
Información sobre SSP	0,050*** (0,010)		0,146*** (0,009)
SSP mejora el suelo	-0,036*** (0,008)		0,088*** (0,011)
SSP reduce GEI	0,089*** (0,008)		0,171*** (0,009)
Información sobre EGR		-0,090*** (0,009)	-0,007 (0,009)
EGR mejora el suelo		0,218*** (0,018)	0,059*** (0,014)
EGR reduce GEI		-0,041*** (0,008)	-0,098*** (0,007)
Sexo × acceso a asesoría	-0,219*** (0,010)	0,120*** (0,016)	0,119*** (0,007)
Seudo-R ²	0,305	0,264	0,338
AIC	407,41	270,38	368,55
BIC	517,95	392,77	479,09
Observaciones	383	383	383

A4.3.6. Análisis bivariado

Para examinar si los factores no observados influyen conjuntamente en la adopción de SSP y EGR, hemos estimado un modelo logit bivariado que permite términos de error correlacionados entre ambas decisiones. Esta especificación complementa los modelos univariados independientes al comprobar si los factores latentes o no medidos omitidos en las regresiones principales afectan sistemáticamente a ambos resultados de adopción. La tabla A.6.9 presenta el conjunto completo de coeficientes estimados.

El único parámetro de la ecuación de asociación residual —la intersección— tiene una log-odds estimada de 0,0133 ($p = 0,842$), lo que corresponde a una odds ratio de aproximadamente 1,01, prácticamente igual a 1. De manera coherente, cuando se extraen los residuos de Pearson de los modelos logit independientes para SSP y EGR y se calcula su correlación, el resultado es $r = 0,0132$ ($p = 0,7966$; IC del 95 % $[-0,0871, 0,1133]$). Esto confirma la ausencia de covariación no observada significativa entre las dos decisiones de adopción más allá de lo que captan las co-variables incluidas en el modelo.

Los indicadores de ajuste del modelo bivariado arrojaron un pseudo- R^2 de 0,16, un AIC de 14 651,96 y un BIC de 14 876,99. Estos valores indican un rendimiento comparable al de los modelos logit univariantes independientes (AIC ≈ 407 para el SSP solo, 270 para el EGR solo), sin mejoras notables en las tasas de clasificación ni en el área bajo la curva, ni para el SSP ni para el EGR. Por lo tanto, a efectos de predicción o interpretación de los efectos marginales, las especificaciones logit separadas —o incluso una simple variable ficticia para la adopción conjunta— son funcionalmente equivalentes al modelo bivariado, sin pérdida de información.

Tabla A.6.9 Conjunto completo de coeficientes para el modelo de adopción bivariado SSP-EGR

Variable	Coef.	Std. Error	Signif.
(Intercept):1	(Intercept):1	-0.24	***
(Intercept):2	(Intercept):2	-0.26	***
(Intercept):3	(Intercept):3	-0.07	
age:1	age:1	0	
age:2	age:2	0	***
sex:1	sex:1	-0.12	***
sex:2	sex:2	-0.16	***
stratum:1	stratum:1	-0.03	
stratum:2	stratum:2	-0.03	***
factor(educ)High School:1	factor(educ)High School:1	-0.08	***
factor(educ)High School:2	factor(educ)High School:2	-0.08	***
factor(educ)College:1	factor(educ)College:1	-0.09	
factor(educ)College:2	factor(educ)College:2	-0.09	***
factor(educ)Graduate:1	factor(educ)Graduate:1	-0.15	***
factor(educ)Graduate:2	factor(educ)Graduate:2	-0.16	***
income:1	income:1	0	***
income:2	income:2	0	
stock_rate:1	stock_rate:1	-0.02	***
stock_rate:2	stock_rate:2	-0.02	***
Los_Lagos:1	Los_Lagos:1	-0.08	***
Los_Lagos:2	Los_Lagos:2	-0.08	***
Los_Rios:1	Los_Rios:1	-0.09	***
Los_Rios:2	Los_Rios:2	-0.09	***
pc_Breeding_Fattening:1	pc_Breeding_Fattening:1	-0.17	
pc_Breeding_Fattening:2	pc_Breeding_Fattening:2	-0.18	***
pc_Breeding:1	pc_Breeding:1	-0.12	**
pc_Breeding:2	pc_Breeding:2	-0.13	**
pc_Rearing:1	pc_Rearing:1	-0.16	***
pc_Rearing:2	pc_Rearing:2	-0.17	
pc_Rearing_Fattening:1	pc_Rearing_Fattening:1	-0.16	
pc_Rearing_Fattening:2	pc_Rearing_Fattening:2	-0.17	
pc_Fattening:1	pc_Fattening:1	-0.14	
pc_Fattening:2	pc_Fattening:2	-0.15	
pc_Complete_Cycle:1	pc_Complete_Cycle:1	-0.12	***
pc_Complete_Cycle:2	pc_Complete_Cycle:2	-0.14	
org:1	org:1	-0.07	***
org:2	org:2	-0.07	
advisor_access:1	advisor_access:1	-0.05	***
advisor_access:2	advisor_access:2	-0.05	***
training:1	training:1	-0.03	
training:2	training:2	-0.03	***
status_quo:1	status_quo:1	-0.06	***
status_quo:2	status_quo:2	-0.06	
peer_effect:1	peer_effect:1	-0.04	**
peer_effect:2	peer_effect:2	-0.04	***
risk_aversion:1	risk_aversion:1	-0.02	***
risk_aversion:2	risk_aversion:2	-0.03	***
machine_access:1	machine_access:1	-0.04	***
machine_access:2	machine_access:2	-0.04	
sps_info:1	sps_info:1	-0.1	***
sps_info:2	sps_info:2	-0.11	*
sps_soil:1	sps_soil:1	-0.09	
sps_soil:2	sps_soil:2	-0.09	***
sps_climate:1	sps_climate:1	-0.07	***
sps_climate:2	sps_climate:2	-0.07	*
sex_advisor_access:1	sex_advisor_access:1	-0.1	***
sex_advisor_access:2	sex_advisor_access:2	-0.12	***
LogLik	LogLik		
AIC	AIC		
BIC	BIC		
Pseudo-R2	Pseudo-R2		

Variable	Coef.	Std. Error	Signif.
(Intercept):1	(Intercept):1	-0.24	***
(Intercept):2	(Intercept):2	-0.26	***
(Intercept):3	(Intercept):3	-0.07	
age:1	age:1	0	
age:2	age:2	0	***
sex:1	sex:1	-0.12	***
sex:2	sex:2	-0.16	***
stratum:1	stratum:1	-0.03	
stratum:2	stratum:2	-0.03	***
factor(educ)High School:1	factor(educ)High School:1	-0.08	***
factor(educ)High School:2	factor(educ)High School:2	-0.08	***
factor(educ)College:1	factor(educ)College:1	-0.09	
factor(educ)College:2	factor(educ)College:2	-0.09	***
factor(educ)Graduate:1	factor(educ)Graduate:1	-0.15	***
factor(educ)Graduate:2	factor(educ)Graduate:2	-0.16	***
income:1	income:1	0	***
income:2	income:2	0	
stock_rate:1	stock_rate:1	-0.02	***
stock_rate:2	stock_rate:2	-0.02	***
Los_Lagos:1	Los_Lagos:1	-0.08	***
Los_Lagos:2	Los_Lagos:2	-0.08	***
Los_Rios:1	Los_Rios:1	-0.09	***
Los_Rios:2	Los_Rios:2	-0.09	***
pc_Breeding_Fattening:1	pc_Breeding_Fattening:1	-0.17	
pc_Breeding_Fattening:2	pc_Breeding_Fattening:2	-0.18	***
pc_Breeding:1	pc_Breeding:1	-0.12	**
pc_Breeding:2	pc_Breeding:2	-0.13	**
pc_Rearing:1	pc_Rearing:1	-0.16	***
pc_Rearing:2	pc_Rearing:2	-0.17	
pc_Rearing_Fattening:1	pc_Rearing_Fattening:1	-0.16	
pc_Rearing_Fattening:2	pc_Rearing_Fattening:2	-0.17	
pc_Fattening:1	pc_Fattening:1	-0.14	
pc_Fattening:2	pc_Fattening:2	-0.15	
pc_Complete_Cycle:1	pc_Complete_Cycle:1	-0.12	***
pc_Complete_Cycle:2	pc_Complete_Cycle:2	-0.14	
org:1	org:1	-0.07	***
org:2	org:2	-0.07	
advisor_access:1	advisor_access:1	-0.05	***
advisor_access:2	advisor_access:2	-0.05	***
training:1	training:1	-0.03	
training:2	training:2	-0.03	***
status_quo:1	status_quo:1	-0.06	***
status_quo:2	status_quo:2	-0.06	
peer_effect:1	peer_effect:1	-0.04	**
peer_effect:2	peer_effect:2	-0.04	***
risk_aversion:1	risk_aversion:1	-0.02	***
risk_aversion:2	risk_aversion:2	-0.03	***
machine_access:1	machine_access:1	-0.04	***
machine_access:2	machine_access:2	-0.04	
sps_info:1	sps_info:1	-0.1	***
sps_info:2	sps_info:2	-0.11	*
sps_soil:1	sps_soil:1	-0.09	
sps_soil:2	sps_soil:2	-0.09	***
sps_climate:1	sps_climate:1	-0.07	***
sps_climate:2	sps_climate:2	-0.07	*
sex_advisor_access:1	sex_advisor_access:1	-0.1	***
sex_advisor_access:2	sex_advisor_access:2	-0.12	***
LogLik	LogLik		
AIC	AIC		
BIC	BIC		
Pseudo-R2	Pseudo-R2		

A5. Análisis de encuestas²¹

Las unidades de muestreo primarias en este análisis son las observaciones. Dados los cinco estratos definidos en este estudio, utilizamos ponderaciones de muestra definidas como la inversa de la probabilidad de selección de cada estrato. Asimismo, aplicamos la corrección de población finita (FPC) para tener en cuenta la reducción de la varianza que se produce al realizar un muestreo sin reposición a partir de una población finita, en comparación con un muestreo con reposición a partir de la misma población.²² Calculamos la FPC para cada estrato utilizando esta fórmula:

$$FPC_h = \sqrt{\frac{N_h - n_h}{N_h - 1}}$$

donde h es el estrato h , n_h es el número de elementos de la muestra del estrato h , y N_h es el número de elementos de la población del estrato h . Utilizamos el método linealizado de Taylor para estimar la varianza.

²¹ Referencia: <https://stats.oarc.ucla.edu/stata/seminars/svy-stata-intro/>.

²² StataCorp. (2021). svyset — Declarar el diseño de encuesta para un conjunto de datos. En Manual de referencia de datos de encuesta de Stata: Versión 17 (pág. 10). Stata Press. <https://www.stata.com/manuals/svysvyset.pdf>.

A6. Modelos completos de referencia

Figura de bosque de coeficientes del modelo completo para SSP, EGR y adopción conjunta



A7. Cuestionario de la encuesta

7.1. Invitación a participar en la encuesta

Estamos realizando un estudio para conocer mejor cómo los productores ganaderos toman decisiones sobre su producción. Usted ha sido seleccionado de la base de datos del SAG para participar en esta encuesta.

Quisiera recordarle que la participación es completamente voluntaria. Puede decidir no responder cualquier pregunta o finalizar la entrevista en cualquier momento, sin dar ninguna explicación ni que ello tenga consecuencias de ningún tipo.

Su información será tratada con absoluta confidencialidad. Sus datos personales no se asociarán con sus respuestas, por lo que estas permanecerán anónimas.

La información recopilada se utilizará para preparar un informe con recomendaciones y se compartirá con la comunidad científica. Además, nos ayudará a comprender mejor qué factores facilitan u obstaculizan la adopción de determinadas prácticas ganaderas.

Con esta información, ¿le gustaría participar en la encuesta? Si tiene alguna pregunta o necesita más tiempo para decidir, no dude en decírmelo.

[Si acepta, agradézcale nuevamente y continúe con la encuesta.]

- Dar consentimiento → Continuar
- No dar consentimiento → Agradecer y finalizar la encuesta.

7.2 Descripción de las prácticas en la encuesta

Ahora quisiera hablar sobre el uso de ciertas prácticas en su producción ganadera. Describiré brevemente dos enfoques de manejo ganadero para asegurar que tengamos la misma comprensión. Si usted ya está familiarizado con estas prácticas, por favor hágamelo saber.

El primer enfoque se denomina “manejo mejorado de pastos”. Esta estrategia se centra en implementar métodos planificados de pastoreo. Consiste en rotar el ganado entre distintas áreas de pastoreo o potreros de forma organizada, mantener una alta densidad de animales durante períodos cortos y luego permitir que los pastos se recuperen. Entre los ejemplos específicos se

incluyen el pastoreo holístico planificado, el pastoreo adaptativo multipotrero, el pastoreo rotacional intensivo, el pastoreo regenerativo o el pastoreo racional Voisin, entre otros.

El segundo enfoque se refiere a los “sistemas silvopastoriles”, que integran la ganadería con el mantenimiento de árboles en el mismo espacio. Esta práctica consiste en plantar árboles y arbustos en las áreas de pastoreo y permite obtener productos adicionales, como madera, leña y frutas.

¿Tiene alguna pregunta al respecto? (Aclare según sea necesario).

7.3. Verificación de la información de estratificación

(Classification must be carried out by the interviewer before starting the survey)

a. Región

- Los Lagos
- Los Ríos
- La Araucanía

b. Sexo

- Hombre
- Mujer

Introduction: Thank you very much for your willingness to participate in this survey. Your collaboration is very valuable to us.

7.4. Variables y preguntas correspondientes

Variable	Explicación	Opciones en inglés	Opciones	Opciones en inglés
StartDate	start date			
EndDate	end date			
Status	response type			
IPAddress	IP address			
Progress	progress			
Duration (in seconds)	Duration (in seconds)			
Finished	Finished			
RecordedDate	Recorded Date			
Responseld	Response ID			
RecipientLastName	Recipient Last Name			
RecipientFirstName	Recipient First Name			
RecipientEmail	Recipient Email			
ExternalReference	External Data Reference			
LocationLatitude	Location Latitude			
LocationLongitude	Location Longitude			
DistributionChannel	Distribution Channel			
UserLanguage	User Language			
Q_RecaptchaScore	Q_RecaptchaScore			
encuestador	Identificación del encuestador o encuestadora.	Identification of the interviewer.		
ID	Ingrese ID productor (según planilla de contactos)	Enter producer ID (according to contact sheet)		
Q2	Certifico que he leído el consentimiento, y el productor ha aceptado participar	I certify that I have read the consent, and the producer has agreed to participate		
CARACTERIZACIÓN ECONÓMICA Y PRODUCTIVA				
Para comenzar, quisiera hacerle algunas preguntas sobre su actividad ganadera.				

Variable	Explicación	Opciones en inglés	Opciones	Opciones en inglés
CARACTERIZACIÓN ECONÓMICA Y PRODUCTIVA				
Para comenzar, quisiera hacerle algunas preguntas sobre su actividad ganadera.				
Q1- educ	¿Cuál es el nivel más alto de educación que ha completado?	What is the highest level of education you have completed?	- Sin educación formal [0] - Educación básica o preparatoria (1° a 8° básico) [1] - Educación media o humanidades (1° a 4° medio) [2] - Educación Superior (técnico o universitaria) [3] - Educación de postgrado (magíster, doctorado) [4] - Prefiero no responder. [99]	- No formal education [0] - Basic or preparatory education (1st to 8th grade) [1] - Secondary education or humanities (1st to 4th year of high school) [2] - Higher education (technical or university) [3] - Postgraduate education (master's, doctorate) [4] - I prefer not to answer. [99]
Q2- type_production	¿En qué parte del ciclo de producción de carne bovina se enfoca? (Si aplica, puede marcar más de una)	What part of the beef production cycle do you focus on? (If applicable, you may check more than one)	- Cría (producción de terneros) [1] - Recría [2] - Engorda (crecimiento y engorda de terneros) [3] - Ciclo Completo (desde la cría hasta la engorda) [4]	- Breeding (production of calves) [1] - Rearing [2] - Fattening (growth and fattening of calves) [3] - Complete cycle (from breeding to fattening) [4]
Q3- farm_size	¿Cuántas hectáreas tiene destinadas exclusivamente al manejo de sus bovinos? Si no sabe el número exacto, una estimación cercana está bien.	How many hectares do you have dedicated exclusively to the management of your cattle? If you do not know the exact number, a close estimate is fine.		
Q4- num_animal	¿Cuántos bovinos de carne tiene actualmente en su explotación? Si no sabe el número exacto, una estimación cercana está bien	How many beef cattle do you currently have on your farm? If you don't know the exact number, a close estimate is fine.		
Q5- income	¿Cuántos animales comercializó en los últimos 12 meses? Si no recuerda con precisión, una estimación cercana está bien	How many animals did you trade in the last 12 months? If you don't remember precisely, a close estimate is fine.		

Variable	Explicación	Opciones en inglés	Opciones	Opciones en inglés
Q6- org	¿Es usted miembro de alguna asociación, cooperativa o grupo de productores ganaderos?	Are you a member of any association, cooperative or group of livestock producers?	- No [0] - Si, una vez [1] - Si, dos veces [2] - Si, más de dos veces [3]	- No [0] - Yes, once [1] - Yes, twice [2] - Yes, more than twice [3]
Q7- training	En los últimos 12 meses, ¿ha participado en algún taller, capacitación o programa de desarrollo relacionado con la producción ganadera o el manejo de pastizales?	In the last 12 months, have you participated in any workshops, training or development programs related to livestock production or rangeland management?	- No [0] - Si, una vez [1] - Si, dos veces [2] - Si, más de dos veces [3]	- No [0] - Yes, once [1] - Yes, twice [2] - Yes, more than twice [3]
Q8- climate_change	¿Cuánto le preocupan los posibles efectos del cambio climático en su producción ganadera?	How concerned are you about the potential effects of climate change on your livestock production?	- Nada [0] - Poco [1] - Algo [2] - Bastante [3] - Mucho [4]	- Nothing [0] - A little [1] - Somewhat [2] - Quite a bit [3] - A lot [4]

Ahora me gustaría hablar sobre la aplicación de algunas prácticas en su producción ganadera.

USO DE TECNOLOGÍAS

Describiré brevemente dos técnicas de manejo ganadero para asegurar que tengamos la misma comprensión. Si usted ya está familiarizado con estas prácticas, por favor hágamelo saber.

El primer enfoque se denomina “manejo mejorado de pastizales”. Esta estrategia se centra en aplicar métodos planificados de pastoreo. Consiste en rotar el ganado entre distintas áreas de pastoreo o potreros de forma organizada, mantener una alta densidad de animales durante períodos cortos y luego permitir que los pastos se recuperen. Entre los ejemplos específicos se incluyen el llamado pastoreo holístico planificado, el pastoreo adaptativo multipotrero, el pastoreo rotacional intensivo, el pastoreo regenerativo o el pastoreo racional Voisin, entre otros.

El segundo enfoque se refiere a los “sistemas silvopastoriles”, que integran la ganadería con el mantenimiento de árboles en el mismo espacio. Esta práctica consiste en plantar árboles y arbustos en las áreas de pastoreo y permite obtener productos adicionales, como madera, leña y frutas.

¿Tiene alguna pregunta al respecto? (Aclare según sea necesario).

Q9- Adoption	¿Utiliza alguno de estos enfoques de prácticas en su explotación ganadera? (Seleccione todas las que apliquen)	Do you use any of these practice approaches on your livestock farm? (Select all that apply)	- Sistemas Mejorados de Manejo de Pastizales (SMMP) [1] - Sistemas Silvopastoriles (SSP) [2] - Ninguna [0]	- Improved Grassland Management Systems (IGMS) [1] - Silvopastoral Systems (SPS) [2] - None [0]
--------------	--	---	--	---

Variable	Explicación	Opciones en inglés	Opciones	Opciones en inglés
Q10- rotate	Si realiza pastoreo ¿Cada cuántos días rota a sus animales? - Selected Choice	If you are grazing, how often do you rotate your animals? - Selected Choice	-Más de una vez al día [3] -Todos los días [2] -Cada ___ días [1] -No realizo rotación / Pastoreo [0]	-More than once a day [3] -Every day [2] -Every ___ days [1] -I do not rotate / graze [0]
Q10- rotate_1_ TEXT	Si realiza pastoreo ¿Cada cuántos días rota a sus animales? - Cada___ días - Text	If you do grazing, how often do you rotate your animals? - Every___ days - Text		
Q11- comparerotate	¿Cómo cree que serían los resultados productivos al implementar estas prácticas en comparación a sus prácticas actuales?	How do you think the productive results would be by implementing these practices compared to your current practices?	- Peores que con mis prácticas actuales - Igual que con mis prácticas actuales - Mejores que con mis prácticas actuales	- Worse than my current practices - Same as my current practices - Better than my current practices
Q12- expected_ SMMP	¿Qué tan importantes cree que serían los beneficios económicos a largo plazo, luego de implementar estas prácticas? - Manejo Mejorado de Pastizales	How significant do you think the long-term economic benefits would be after implementing these practices? - Improved Grassland Management	- Poco importante [0] - Moderadamente importante [1] - Muy importante [2]	- Not very important [0] - Moderately important [1] - Very important [2]
Q12- expected_ SSP	¿Qué tan importantes cree que serían los beneficios económicos a largo plazo, luego de implementar estas prácticas? - Sistemas Silvopastoriles	How significant do you think the long-term economic benefits would be after implementing these practices? - Silvopastoral Systems	- Poco importante [0] - Moderadamente importante [1] - Muy importante [2]	- Not very important [0] - Moderately important [1] - Very important [2]
Q12- expected_ SMMP	¿Qué tan importantes cree que serán los beneficios económicos a largo plazo, luego de haber implementado estas prácticas? - Manejo Mejorado de Pastizales	How significant do you think the long-term economic benefits will be after implementing these practices? - Improved Grassland Management	- Poco importante [0] - Moderadamente importante [1] - Muy importante [2]	- Not very important [0] - Moderately important [1] - Very important [2]
Q12- expected_ SSP	¿Qué tan importantes cree que serán los beneficios económicos a largo plazo, luego de haber implementado estas prácticas? - Sistemas Silvopastoriles	How significant do you think the long-term economic benefits will be after implementing these practices? - Silvopastoral Systems	- Poco importante [0] - Moderadamente importante [1] - Muy importante [2]	- Not very important [0] - Moderately important [1] - Very important [2]

Variable	Explicación	Opciones en inglés	Opciones	Opciones en inglés
13-1-satisfaction_SMMP	¿Qué tan satisfecho está con el resultado de la implementación del Manejo Mejorado de Pastizales (MMP)?	How satisfied are you with the results of the implementation of Improved Range Management (MMP)?	- Poco satisfecho [0] - Moderadamente satisfecho [1] - Bastante satisfecho [2]	- Slightly satisfied [0] - Moderately satisfied [1] - Quite satisfied [2]
Q14- labor_smmp	¿Qué tan diferente sería la cantidad de trabajo o dedicación que necesitaría para implementar estas prácticas, en comparación con sus prácticas actuales? - Manejo Mejorado de Pastizales	How different would the amount of work or dedication you would need to implement these practices be compared to your current practices? - Improved Grassland Management	- Menos trabajo [0] - Similar cantidad de trabajo [1] - Más trabajo [2]	- Less work [0] - Similar amount of work [1] - More work [2]
Q14- labor_ss	¿Qué tan diferente sería la cantidad de trabajo o dedicación que necesitaría para implementar estas prácticas, en comparación con sus prácticas actuales? - Sistemas Silvopastoriles	How different would the amount of work or dedication you would need to implement these practices be, compared to your current practices? - Silvopastoral Systems	- Menos trabajo [0] - Similar cantidad de trabajo [1] - Más trabajo [2]	- Less work [0] - Similar amount of work [1] - More work [2]
Q14- labor_smmp	¿Qué tan diferente es la cantidad de trabajo o dedicación que necesita para implementar estas prácticas, en comparación con sus prácticas previas? - Manejo Mejorado de Pastizales	How different is the amount of work or dedication you need to implement these practices, compared to your previous practices? - Improved Grassland Management	- Menos trabajo [0] - Similar cantidad de trabajo [1] - Más trabajo [2]	- Menos trabajo [0] - Similar cantidad de trabajo [1] - Más trabajo [2] - Less work [0] - Similar amount of work [1] - More work [2]
Q15- machine_access	¿Qué tan fácil le resulta acceder a los insumos y la maquinaria necesarios para implementar estas prácticas?	How easy is it for you to access the supplies and machinery needed to implement these practices?	- Fácil [2] - Moderado [1] - Difícil [0]	- Easy [2] - Moderate [1] - Difficult [0]
Q16- cost_SMMP1	En relación a los costos de implementar un Manejo Mejorado de Pastizales (MMP). ¿Cómo cree que serían estos costos?	Regarding the costs of implementing Improved Range Management (IGM), what do you think these costs would be?	- No lo sé [99] - Bajos [0] - Moderados [1] - Altos [2]	- I don't know [99] - Low [0] - Moderate [1] - High [2]

Variable	Explicación	Opciones en inglés	Opciones	Opciones en inglés
Q16- cost_ SMMP2	En relación a los costos de implementar un Manejo Mejorado de Pastizales (MMP). ¿Cómo fueron estos costos?	Regarding the costs of implementing Improved Range Management (IGM), what were these costs?	- No lo sé [99] - Bajos [0] - Moderados [1] - Altos [2]	- I don't know [99] - Low [0] - Moderate [1] - High [2]
Q17- cost_ SSP1	En relación a los costos de implementar Sistemas Silvopastoriles (SSP). ¿Cómo cree que serían estos costos?	Regarding the costs of implementing Silvopastoral Systems (SSP), what do you think these costs would be?	- No lo sé [99] - Bajos [0] - Moderados [1] - Altos [2]	- I don't know [99] - Low [0] - Moderate [1] - High [2]
Q17- cost_ SSP1	En relación a los costos de implementar Sistemas Silvopastoriles (SSP). ¿Cómo cree que serían estos costos?	Regarding the costs of implementing Silvopastoral Systems (SSP), what do you think these costs would be?	- No lo sé [99] - Bajos [0] - Moderados [1] - Altos [2]	- I don't know [99] - Low [0] - Moderate [1] - High [2]
Q17- cost_ SSP2	En relación a los costos de implementar Sistemas Silvopastoriles (SSP). ¿Cómo fueron estos costos?	Regarding the costs of implementing Silvopastoral Systems (SSP), what were these costs?	- No lo sé [99] - Bajos [0] - Moderados [1] - Altos [2]	- I don't know [99] - Low [0] - Moderate [1] - High [2]
Q18 - info_ access	En los últimos 12 meses, ¿ha recibido información sobre alguna de estas prácticas?	In the last 12 months, have you received information about any of these practices?	- No, sobre ninguna de ellas [0] - Si, sobre el manejo mejorado de pastizales [1] - Si, sobre los sistemas silvopastoriles [2] - Si, sobre ambas [3]	- No, on none of them [0] - Yes, on improved grassland management [1] - Yes, on silvopastoral systems [2] - Yes, on both [3]
Q19- advisor_ access	¿Con qué frecuencia tiene acceso a algún tipo de asistencia técnica para su producción ganadera?	How often do you have access to some type of technical assistance for your livestock production?	- Nunca [0] - Ocasionalmente [1] - Frecuentemente [2]	- Never [0] - Occasionally [1] - Frequently [2]
Q19- type_ assistance	¿De dónde proviene principalmente la asistencia técnica que recibe?	Where does your technical support primarily come from?	- Asociada a un programa gubernamental (INDAP, SAG, otro) [1] - De un profesional/ técnico al que le pago por su servicio [2] - De un profesional/ técnico de la empresa donde obtengo insumos agrícolas [3] - De otro ganadero con conocimientos del tema [4].	- Associated with a government program (INDAP, SAG, other) [1] - From a professional/ technician whom I pay for his/her service [2] - From a professional/ technician from the company where I obtain agricultural supplies [3] - From another rancher with knowledge of the subject [4].

Variable	Explicación	Opciones en inglés	Opciones	Opciones en inglés
Q20- status_quo	¿Está acuerdo con la siguiente afirmación? "Prefiero estar seguro y usar las prácticas ganaderas que conozco bien, en vez de intentar usar prácticas nuevas"	Do you agree with the following statement? "I prefer to be safe and use the farming practices I know well, rather than trying to use new ones."	- En desacuerdo [1] - De acuerdo [0]	- Disagree [1] - Agree [0]
Q21- social_norm	¿Qué tan aceptadas cree que son estas prácticas (manejo mejorado de pastizales y sistemas silvopastoriles) por los otros ganaderos de su comunidad?	How accepted do you think these practices (improved grassland management and silvopastoral systems) are by other ranchers in your community?	- Poco aceptadas [0] - Moderadamente aceptadas [1] - Muy aceptadas [2]	- Little accepted [0] - Moderately accepted [1] - Highly accepted [2]
Q22- peer_effect	¿Qué tan importante es la opinión de otros productores que conoce, a la hora de decidir si utiliza estas nuevas prácticas en su predio?	How important is the opinion of other producers you know when deciding whether to use these new practices on your farm?	- Poco importante [0] - Moderadamente importante [1] - Muy importante [2]	- Not very important [0] - Moderately important [1] - Very important [2]
Q23- recognition	¿Cree que las personas valoran y reconocen el esfuerzo por implementar estas prácticas sostenibles?	Do you think people value and recognize the effort to implement these sustainable practices?	- Poco [0] - Medianamente [1] - Mucho [2]	- Little [0] - Moderately [1] - A lot [2]
Q24- impact_smp	¿Cree que estas prácticas de pastoreo mejorado y los sistemas silvopastoriles realmente mejoran la fertilidad del suelo?	Do you think that these improved grazing practices and silvopastoral systems really improve soil fertility?	- Si, ambas [1] - Sólo el pastoreo mejorado [2] - Sólo los sistemas silvopastoriles [3] - No, ninguno [0]	- Yes, both [1] - Only improved grazing [2] - Only silvopastoral systems [3] - No, neither [0]
Q25- impact_ssp	¿Cree que estas prácticas de pastoreo mejorado y los sistemas silvopastoriles realmente ayudan a reducir los gases contaminantes que causan el cambio climático?	Do you think that these improved grazing practices and silvopastoral systems really help to reduce the polluting gases that cause climate change?	- Si, ambas [1] - Sólo el pastoreo mejorado [2] - Sólo los sistemas silvopastoriles [3] - No, ninguno [0]	- Yes, both [1] - Only improved grazing [2] - Only silvopastoral systems [3] - No, neither [0]

Let's end this survey with a little imaginary game, to understand how comfortable you are with taking risks. Imagine that you can choose between the following bets, which involve flipping a coin. If you guess the result (heads or tails), you receive an amount of money, if you guess wrong, you receive a smaller amount. I remind you that this is just an imaginary exercise and does not involve real money.

Variable	Explicación	Opciones en inglés	Opciones	Opciones en inglés
26. risk_ aversion	Le explicaré cuatro opciones y usted me dice cuál preferiría jugar. Las opciones son:	I will explain four options to you and you tell me which one you would prefer to play. The options are:	- Opción A. Si acierta, recibe \$40.000, si falla, recibe \$40.000 (Siempre obtiene \$40.000.- independientemente del resultado) [3] - Opción B. Si acierta, recibe \$60.000; si falla, recibe \$20.000.- [2] - Opción C. Si acierta, recibe \$80.000; si falla, recibe \$10.000.- [1] - Opción D. Si acierta, gana \$100.000; si falla, no recibe nada.- (Todo o nada) [0]	- Option A. If you guess correctly, you receive \$40 USD; if you guess incorrectly, you receive \$40 USD (You always get \$40 USD regardless of the result) [3] - Option B. If you guess correctly, you receive \$60 USD; if you guess incorrectly, you receive \$20 USD. [2] - Option C: If you guess correctly, you receive \$80 USD; if you guess incorrectly, you receive \$10 USD. [1] - Option D: If you guess correctly, you win \$100 USD; if you guess incorrectly, you receive nothing. (All or nothing) [0]

