

DIMENSIÓN AMBIENTAL



Guía para la Gestión de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Predios Lecheros

ESTÁNDAR DE SUSTENTABILIDAD PARA PREDIOS LECHEROS

Se autoriza la reproducción parcial de la información aquí contenida, siempre y cuando se cite esta publicación como fuente.

Editores:

Natalie Jones, Consorcio Lechero

Fernando Barrera, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)

Galit Rodríguez, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)

María Paz Santibáñez, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)

María Belén Sepúlveda, Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura (IICA)

Agosto 2022



Guía para la Gestión de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en Predios Lecheros

Marta Alfaro Valenzuela

Ing., Agr., Ph.D.

INIA Remehue



Contenido

01. Introducción | pág. 5

02. Gases de Efecto Invernadero (GEI) y cambio climático en ganadería | pág. 7

03. Cómo se cuantifican las emisiones de GEI en sistemas ganaderos | pág. 11

04. Medidas de mitigación de GEI en predios lecheros | pág. 13

05. Consideraciones finales | pág. 25

Introducción

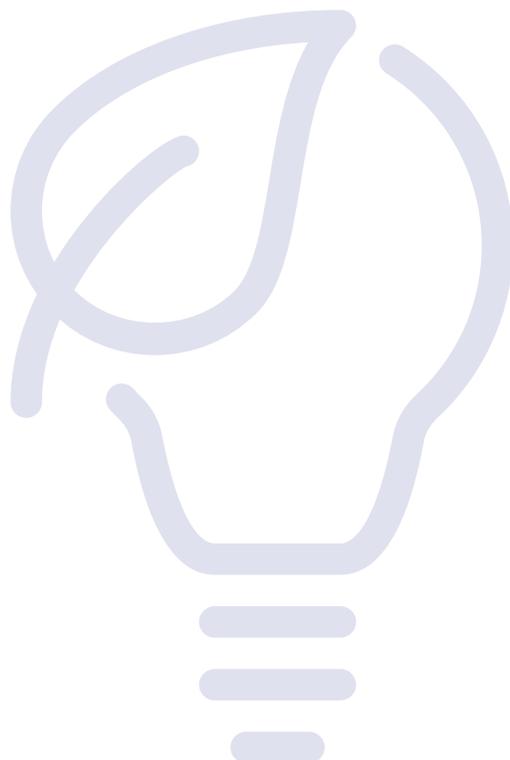
01.

Introducción

El aumento de la población mundial ha generado un incremento en la demanda de alimentos de origen animal que se incrementa en la medida que aumenta el ingreso per cápita de los países, y que conlleva a una intensificación de los sistemas productivos ganaderos. Cuando la intensificación productiva se realiza de manera inadecuada, puede acarrear impactos negativos sobre el medio ambiente. Para la producción ganadera, uno de los principales impactos asociados es la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), ligados al fenómeno de cambio climático.

La mitigación de las emisiones de GEI se refiere a las acciones, medidas o actividades que buscan reducir la fuente de emisión de GEI o potenciar sus sumideros. Esta guía entrega antecedentes sobre las emisiones de GEI por uso de fertilizantes orgánicos e inorgánicos y por fermentación entérica, en sistemas pastoriles del sur de Chile, y sobre el impacto de sus potenciales medidas de mitigación.

Dada la amplia variedad de sistemas de producción lechero existentes en el sur de Chile, cada sistema productivo deberá seleccionar y priorizar acciones que le permitan optimizar la producción animal, a la vez que reducir las emisiones de GEI. Así, no existe una única solución, y debe pensarse en una caja de soluciones o “toolbox” que otorgue la flexibilidad necesaria en la implementación, considerando las barreras a la adopción.



Gases de Efecto Invernadero (GEI) y cambio climático en ganadería

02.

Gases de Efecto Invernadero (GEI) y cambio climático en ganadería

El efecto invernadero es un proceso natural. De toda la energía solar que llega al planeta, el 30% se refleja como espejo hacia el espacio, la atmósfera retiene un 20%, y el 50% restante llega a la superficie terrestre, calentándola. La superficie terrestre absorbe una parte de la radiación que ha penetrado y desprende el resto enviándola al espacio en forma de radiación infrarroja. Este mecanismo otorga condiciones óptimas para la vida, ya que la temperatura media de la superficie terrestre se mantiene en torno a los 15°C, de lo contrario se estima que la temperatura del planeta bordearía los -6°C no permitiendo el desarrollo de la vida como la conocemos.



Figura 1. Gases de Efecto Invernadero (GEI) y calentamiento global. Fuente: Adaptado de WRI (2006)¹.

¹ World Research Institute (2006).

El GEI natural más importante es el vapor de agua, mientras que los principales GEI generados por las actividades realizadas por el hombre son el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄), el óxido nitroso (N₂O), los gases hidrofluorocarbonos (HFCs), perfluorocarbonos (PFCs) y el hexafluoruro de azufre (SF₆). De estos, el CO₂, el CH₄ y el N₂O se generan en el ámbito agrícola y ganadero. Cada GEI posee un Potencial de Calentamiento Global (PCG) diferente, que representa el efecto de calentamiento relativo, en comparación con el CO₂. Para transformar las emisiones de gases a una expresión equivalente que permita sumarlos se utiliza el PCG de cada gas, lo que permite expresar todos los gases en una unidad común denominada CO₂ equivalente (CO₂ eq; Cuadro 1).

Cuadro 1. Principales Gases de Efecto Invernadero (GEI) generados por la agricultura y la ganadería, su vida media, potencial de calentamiento global y origen².

Gas	Fórmula	Vida media (años)	Potencial de calentamiento global (100 años)	Origen
Anhídrido carbónico	CO ₂	-	1	Respiración de suelos, plantas y animales, uso de combustibles
Metano	CH ₄	12	28	Cultivos de arroz, animales rumiantes, manejo del estiércol
Óxido nitroso	N ₂ O	121	265	Suelos bajo pastoreo o con fertilización nitrogenada, manejo del estiércol

El sector de agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra es responsable por un c. 24% de las emisiones de GEI de origen antropogénico a nivel mundial, mientras que la ganadería es responsable de un 14,5% de las emisiones globales de GEI. La ganadería lechera ocupa el segundo lugar en las emisiones globales asociadas a la producción animal, alcanzando a un 4,1% de las emisiones globales de GEI³.

Chile no es un emisor relevante de GEI en el contexto global, con un aporte que alcanza al 0,26% de las emisiones de GEI mundiales y que lo ubica en el lugar 62 a nivel global. Sin embargo, es un país altamente vulnerable a los efectos del cambio climático. En el

² Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). 2014. Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs.

³ Gerber, P.J., Steinfeld, H., Henderson, B., Mottet, A., Opio, C., Dijkman, J., Faluccci, A. Tempio, G. 2013. Tackling climate change through livestock – A global assessment of emissions and mitigation opportunities. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome.

año 2018, las emisiones de GEI totales del país alcanzaron a 112.312,6 kt CO₂ eq, mientras que el balance (emisiones-remociones) alcanzó a 48.321 kt CO₂ eq. En ese mismo año el principal GEI emitido por el país fue el CO₂ con un 78% de las emisiones totales, seguido por el CH₄ y el N₂O con un 13% y un 6% respectivamente, y por los gases fluorados, que contabilizaron colectivamente el 3% restante.

El mayor emisor de GEI en el país para el año 2018 correspondió al sector Energía, con un 77% de las emisiones totales, seguido por el sector Agrícola y Ganadero con un 11% (11.789 kt CO₂ eq), que disminuyó en un 0,8% desde 1990 y en un 0,4% desde 2016, principalmente debido a reducciones de la masa ganadera bovina y ovina⁴.

A nivel local, las principales fuentes de emisión a nivel predial son la fermentación entérica, el uso de fertilizantes nitrogenados aplicados al suelo y el manejo y uso de residuos orgánicos.

4 Ministerio del Medio Ambiente (MMA). 2020. Cuarto Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático. Ministerio de Medio Ambiente (MMA). Santiago, Chile. 445 p. ISBN:978-956-7204-88-5.

Cómo se cuantifican
las emisiones de GEI en
sistemas ganaderos

03.

Cómo se cuantifican las emisiones de GEI en sistemas ganaderos

Cuantificación de GEI

Existen diferentes métodos para la cuantificación de las emisiones de GEI en suelos bajo pradera, estos incluyen métodos de laboratorio, destinados a evaluaciones bajo condiciones controladas o semi-controladas que se emplean habitualmente para comprensión de los procesos de suelo asociados a las emisiones de GEI y las comparaciones entre tratamientos. Asimismo, existen metodologías de campo (Figura 2) que incluyen cámaras estáticas o dinámicas que se utilizan para cuantificar emisiones de suelo a nivel predial, y para la estimación de factores de emisión país específico; y, tecnologías infrarroja y láser, para cuantificación de emisiones a nivel de sistema productivo o ecosistema. Para la cuantificación de las emisiones por fermentación entérica bajo condiciones pastoriles se emplea un gas inerte (hexafluoruro de azufre, SF_6) como gas trazador, y equipamiento compuesto por collares de PVC que almacenan una muestra del aire exhalado y eructado por los animales (Figura 2). Tradicionalmente en otras partes del mundo, la medición de las emisiones de CH_4 en rumiantes se ha hecho con cámaras de respiración, las que son precisas y confiables, pero tienen un alto costo, reducen el movimiento de los animales al estar confinados y sus resultados no pueden aplicarse directamente a sistemas con animales en pastoreo. Existen asimismo modelos matemáticos, cuya principal limitación es la falta de disponibilidad de información básica para la estimación.



Figura 2. Ejemplos de métodos empleados para la cuantificación de las emisiones de GEI en suelos bajo praderas: a) cámara dinámica para uso bajo condiciones semi-controladas, b) cámara dinámica para cuantificación bajo condiciones de campo; y, por fermentación entérica a través de la c) técnica de hexafluoruro de azufre o SF_6 (fotografía gentileza de Dra. Camila Muñoz, INIA Remehue).

Medidas de mitigación de GEI en predios lecheros

04.

Medidas de mitigación de GEI en predios lecheros

1. Emisiones de N₂O desde el suelo

Los resultados de los trabajos realizados por INIA en Chile indican que, bajo condiciones naturales, sin adición de fertilizantes o pastoreo, las emisiones de N₂O son bajas (<0,5 kg N- N₂O ha⁻¹ año⁻¹). Estas emisiones pueden incrementarse 2,5 a 5 veces por la incorporación de dosis crecientes de fertilizante nitrogenado en praderas o rotaciones de cultivos. Además, en praderas bajo pastoreo con vacunos, este valor puede incrementarse de 5 a 9 veces, dadas las altas concentraciones de N de la orina animal. Sin embargo, y dadas las características de los suelos volcánicos de la zona centro-sur y sur del país, la tasa de pérdida del N aplicado por esta vía es menor al 0,6%, siendo particularmente baja en años secos (Cuadro 2), lo que es menor que el 1% considerado como valor representativo a nivel global.

Cuadro 2. Emisión de óxido nitroso (N₂O) (%) para diferentes usos de suelo y distintas dosis de aplicación de N, en la zona centro-sur y sur de Chile. Promedios ± error estándar⁵.

Uso de suelo	Dosis de N (kg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Emisiones de N ₂ O (kg N-N ₂ O ha ⁻¹ año ⁻¹)
Pradera permanente	0	0,2 a 0,4
Pradera permanente, urea	41	0,6 ± 0,02
Pradera permanente, urea	200	1,0 ± 0,07
Rotación maíz forrajero-avena forrajera, urea ⁽¹⁾	300	0,10 ± 0,02
Rotación maíz forrajero-avena forrajera, urea ⁽¹⁾	200+NBPT ⁽²⁾	0,07 ± 0,04

⁽¹⁾ Cultivo de secano, temporada con sequía; ⁽²⁾ N-(n-butil) triamida tiosfórica

Existen tecnologías y prácticas de manejo que pueden emplearse para reducir las emisiones de N₂O, tales como:

1. Aumentar la eficiencia de uso del N aplicado como fertilizante, incorporando

⁵ Alfaro, M., Salazar, F., Mejías, J. 2021. Pérdidas de nutrientes y efectos ambientales por uso de fertilizantes y enmiendas orgánicas. En: Hirzel, J. (ed). Fertilización de cultivos en Chile, segunda edición aumentada y corregida. Colección de libros INIA n°44, Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Chillán, Chile. pp: 521-549.

el principio de las 4R (por su sigla en inglés). Esto es, aplicar la dosis óptima de nutriente (Right nutrient), usando la fuente adecuada de fertilizante (Right source), en el momento correcto (Right time) y en el lugar correcto (Right place). Para ello se recomienda que:

- La fertilización debe ser balanceada, incluyendo los principales nutrientes (nitrógeno, fósforo, potasio, magnesio, calcio y azufre). La fertilización nitrogenada es un componente más del manejo de fertilización de un predio por lo que no debe buscarse sostener la producción de una pradera o cultivo sólo en base a este nutriente.
- Ajustar la dosis de N a aplicar según la demanda esperada de la pradera, que varía de acuerdo a condiciones de fertilidad del suelo y clima sitio-específicas. Por ejemplo, una pradera permanente de rendimiento igual a 8.000 kg MS ha⁻¹ año⁻¹ posee una demanda de N la mitad de una de 15.000 kg MS ha⁻¹ año⁻¹.
- Parcializar las aplicaciones de N según la tasa de crecimiento de la pradera. En general, la mayor demanda de N se produce durante el periodo de mayor crecimiento de primavera (octubre-noviembre).
- Cuando se usa urea debe recordarse que este fertilizante (amida en su condición original) debe ser transformado en el suelo a NH₄⁺ y, posteriormente, a NO₃⁻ para ser absorbido por la planta. Bajo nuestras condiciones este proceso completo toma de 15 (primavera) a 25 días (invierno). Si se requiere obtener una respuesta de crecimiento rápido de las plantas, pueden emplearse fuentes tipo nitrato de amonio.
- Dado que la planta debe estar activa para hacer uso del N aplicado, el fertilizante debe aplicarse cuando existen hojas fotosintéticamente funcionales. Esto es de especial importancia en la aplicación de fertilizantes con posterioridad a cortes de limpieza, o para conservación de forraje.
- Para reducir las pérdidas de N por lixiviación, debe evitarse la aplicación de N en periodo invernal o de alta precipitación, tales como primaveras húmedas (agosto-octubre). Estudios locales indican que hasta el 65% del total de N perdido por lixiviación, se pierde en este periodo. Fertilizaciones muy tempranas (agosto), pueden aumentar el riesgo de pérdidas de N por lixiviación.
- Debido a que más del 90% de las pérdidas de N por lixiviación corresponde a la pérdida de N en la forma de nitrato, debe evitarse el uso de fertilizantes de composición nítrica (total o parcialmente) en los periodos críticos ya indicados.
- Para reducir las pérdidas por volatilización de amoniaco con aplicaciones de urea, se recomienda aplicar el fertilizante con algo de humedad, esto es, después de una lluvia suave (10 mm) o riego, dado que esto permitirá que el grano de fertilizante se disuelva y que el N ingrese al suelo, limitando las pérdidas por esta vía.
- Evitar las aplicaciones de N muy tempranas en otoño, dado que el aporte de N

por mineralización de la materia orgánica del suelo, sumado a la fertilización nitrogenada, puede generar aumentos significativos del contenido de N en la pradera, en particular de NO_3^- en el forraje, generando problemas para la nutrición animal.

- Los inhibidores del ciclo del N han sido diseñados para ser usados en condiciones climáticas específicas, dependiendo del proceso que afectan. Por tanto, su selección debe considerar la época de utilización. Así, los fertilizantes con inhibidores de la volatilización pueden ser empleados en condiciones predominantes cálidas y secas, mientras que los fertilizantes con inhibidores de la nitrificación pueden ser empleados en condiciones predominantes lluviosas y frías.
 - el manejo de fertilización debe estar integrado al manejo general del predio, de manera de obtener el mayor beneficio productivo, económico y ambiental posible. Todo el esfuerzo destinado a la correcta elección de la fuente y dosis de fertilizante nitrogenado se pierde cuando el manejo del pastoreo o el corte para conservación de forraje no se realiza de manera adecuada.
2. Optimizar la producción animal, incluyendo la combinación del manejo del rebaño y de la alimentación animal, de manera de reducir la excreción de N en orina y heces durante el pastoreo,
 3. Optimizar el manejo de los residuos orgánicos, incluyendo su colecta y acumulación, y su posterior uso como fertilizantes a nivel predial, y
 4. Optimizar la utilización de los alimentos producidos, se estima que globalmente entre un 20% y un 40% de los alimentos producidos son desperdiciados o perdidos. Reducir estas pérdidas podría disminuir proporcionalmente las necesidades de alimento en el mundo, y por tanto las emisiones de N_2O asociadas con su producción.
- *Fertilizantes nitrogenados de liberación controlada*

Una alternativa al uso de fertilizantes tradicionales es el uso de formulaciones de liberación controlada (FLC) que, al hacer aportes de nutrientes para las plantas por un período de tiempo más prolongado (1-18 meses), contribuirían a una mayor eficiencia del uso de los nutrientes por el cultivo, disminuyendo las pérdidas al ambiente.

Los FLC corresponden a i) un fertilizante granular que contiene un fertilizante soluble en agua en el interior, el cual es recubierto por un material insoluble en agua, o ii) la mezcla de un material que actúa como soporte sobre cuya superficie se adsorbe un nutriente, matriz que luego es encapsulada en un polímero.

Una desventaja potencial del uso de estos productos es el mayor costo por unidad de nutriente debido al uso de materiales encapsulantes de alto costo, y la contaminación potencial que su acumulación puede generar en el suelo una vez terminada la liberación del nutriente.

→ **Inhibidores del ciclo del nitrógeno**

Existen diferentes tipos de inhibidores del ciclo del N, siendo los más ampliamente utilizados los inhibidores de la ureasa (IUs) y los inhibidores de la nitrificación (INs) (Cuadro 3).

Los IUs retardan la hidrólisis de urea, y reducen la acumulación y volatilización de NH_3 proveniente del fertilizante o de la orina de ganado aplicada al suelo durante el pastoreo. Entre los IUs que han sido estudiados a nivel mundial, el más eficiente es el N-(n-butil) triamida tiofosfórica (NBPT). Estos inhibidores son más eficaces cuando se aplican en condiciones predisponentes a las pérdidas de NH_3 , como alta temperatura, baja humedad en el suelo y viento.

Los INs inhiben la primera etapa de la nitrificación, es decir, la oxidación de NH_4^+ a NO_2^- , manteniendo en el suelo durante más tiempo la forma amoniacal, reduciendo las emisiones de N_2O y la lixiviación de NO_3^- . Entre los INs, el 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP®) y la diciandiamida (DCD®) han sido los más utilizados.

Cuadro 3. Ejemplos de inhibidores del ciclo del N utilizados en la agricultura y ganadería a nivel mundial⁵.

Nombre químico	Nombre comercial	Acción de inhibición	Reduce
2-cloro-6-(triclorometil-piridina)	Nitrapyrin	Nitrificación	Emisiones de N_2O ; Lixiviación NO_3^-
Diciandiamida	DCD	Nitrificación	Emisiones de N_2O ; Lixiviación NO_3^-
3,4-dimetilpirazol fosfato	DMPP	Nitrificación	Emisiones de N_2O ; Lixiviación NO_3^-
2-amino-4-cloro-6-metil-piramidina	AM	Nitrificación	Emisiones de N_2O ; Lixiviación NO_3^-
N-(n-Butil) tiofosfórico triamida	NBPT Agrotain	Ureasa	Volatilización de NH_3
Fenilfosfordiamidato	PPD/PPDA	Ureasa	Volatilización de NH_3

Estudios realizados en Chile muestran hasta un 71% en la efectividad del IU en las pérdidas de N por volatilización de NH_3 y de hasta un 30% en las emisiones de N_2O con el uso de IN e IU, aunque sin aumentos de eficiencia en producción de cultivos o praderas, o la calidad de forraje, asociado al uso de estos productos, lo que constituye una barrera para la adopción de esta tecnología.

Aunque son efectivos, los inhibidores pueden considerarse como parte de una estrategia de manejo de fertilización a nivel de productor, debido a los desafíos de la aplicación en el momento exacto, el alza en los costos de producción, la escasa o ausencia de respuesta productiva en algunos casos, y temas de contaminación asociados a la presencia de residuos de estos productos en suelo, agua y productos de consumo humano.

→ **Nuevas alternativas de fertilización empleando nanotecnología**

Los nanofertilizantes parecen ser un avance significativo porque se pueden aplicar en cantidades más pequeñas que los fertilizantes tradicionales, reduciendo la lixiviación, la escorrentía y las emisiones de gases a la atmósfera. Los nanofertilizantes se definen como materiales en escala nanométrica, generalmente en forma de nanopartículas, que contienen macro y micronutrientes que se entregan a los cultivos de forma controlada. En la actualidad existe incertidumbre sobre los costos de producción de los nanofertilizantes en comparación con los fertilizantes convencionales, así como la magnitud de la posible disrupción en la industria de fertilizantes convencionales existente, debido a su alto costo en comparación con los fertilizantes convencionales. Adicionalmente, el desarrollo de estrategias de fertilización en base a este tipo de productos requiere una mayor validación de la tecnología bajo condiciones de campo, incluyendo sus impactos en emisiones al medio ambiente⁶.

INIA Remehue se encuentra desarrollando estudios con la finalidad de validar el uso de esta tecnología para las condiciones del país y generar un nanofertilizante de aplicación foliar adaptado a las condiciones nacionales, considerando la dependencia e interrelación entre las emisiones de N_2O y NH_3 .

→ **Incorporación de leguminosas en pasturas**

La sustitución de monocultivos de gramíneas en praderas por mezclas que incorporen leguminosas y gramíneas es una estrategia que contribuye a mitigar las emisiones de N_2O a la vez que podría contribuir a la adaptación de sistemas ganaderos. Las leguminosas pueden aumentar el N del suelo a través de su simbiosis de fijación de nitrógeno (N_2) con *Rhizobium* (32 y 115 kg $ha^{-1} año^{-1}$). Esto puede traducirse en una disminución en el uso de fertilizantes nitrogenados para la posterior siembra de forraje.

Estudios realizados en Chile sobre la incorporación de *Lotus corniculatus* (Lotería), en asociación con *Bromus valdivianus*, redujo las emisiones de $N-N_2O$ por medio de una disminución de los requerimientos de fertilización nitrogenada, en comparación a una pastura de gramíneas, favoreciendo además la adaptación

⁶ Mejías, J.H., Salazar, F., Pérez, L., Hube, S., Rodríguez, M., and Alfaro, M. 2021. Nanofertilizers: a cutting-edge approach to increase nitrogen use efficiency in grasslands. *Frontiers in Environmental Sciences* 9:635114.

de la pradera a periodos críticos de baja disponibilidad de agua. Sin embargo, los resultados sugieren que se deben considerar suplementos bajos en proteína cruda y altos en energía para la alimentación animal de los animales que consuman este forraje, para reducir el riesgo de una alta excreción de N al medio ambiente por animales en pastoreo.⁷

→ Otras alternativas

La industria de los fertilizantes ha evolucionado rápidamente en la búsqueda de alternativas y tecnologías que permitan aumentar la sostenibilidad de los sistemas productivos agroalimentarios. Existen hoy en día alternativas que incluyen el uso de bacterias endófitas fijadoras de N ambiental, que, aplicadas de manera foliar, permitan la fijación simbiótica de N. Asimismo, existen otros fertilizantes de naturaleza biológica u origen marino. Estas opciones requieren aún validación y análisis de costo-beneficio bajo las condiciones edafoclimáticas locales. Estudios preliminares desarrollados por INIA Remehue sugieren que su uso no constituye una medida de mitigación efectiva por aplicación de fertilizantes nitrogenados.

2. Emisiones de N_2O y CH_4 por manejo de purines y estiércol

Los purines y residuos orgánicos son una fuente de GEI a nivel predial, durante su producción, almacenamiento y manejo de aplicación. Los residuos orgánicos generan CH_4 , debido al proceso de metanogénesis, y N_2O asociado a la concentración de N total y disponible presente en estos materiales.

Las emisiones dependen de las características del material, las condiciones imperantes del clima, atributos del sistema productivo como la composición de la dieta, por ejemplo, entre otros.

→ Reducción de las emisiones de residuos líquidos

El tapado de los pozos purines fue diseñado para limitar las emisiones de amoníaco, y no afecta las emisiones de N_2O dado que estas son muy bajas durante el almacenamiento del purín a menos que en el pozo purinero se haya formado una costra que resulte en condiciones de almacenamiento anaeróbico, que aumenta las emisiones de CH_4 y N_2O .

⁷ Alfaro, M.; Hube, S.; Salazar, F.; Beltrán, I.; Rodríguez, M.; Ramírez, L.; and Saggar, S. 2022. Soil Greenhouse Gas Emissions in Different Pastures Implemented as a Management Strategy for Climate Change. *Agronomy* 12: 1097. <https://doi.org/10.3390/agronomy12051097>

En tal caso, se recomienda revolver el pozo para destruir esta costra.

La separación de las fracciones sólidas y líquidas del purín resulta en menores emisiones de CH_4 y en menores emisiones de N_2O en la fracción líquida, pero potencialmente aumenta las emisiones de este gas desde la fracción sólida, si este manejo no es complementado con el tapado de la fracción sólida (ver 4.2.2). Para que la cubierta de paja sea efectiva al ser empleada con la fracción líquida, se requiere que tenga al menos 15 cm de altura.

La biodigestión contribuye a reducir la materia orgánica y por tanto, el carbono disponible en el material, resultando en emisiones de CH_4 hasta un 60% más bajas durante el proceso de obtención.

La adición de aditivos a los purines, representa una oportunidad para la mitigación de GEI. Estos productos incluyen el uso de acidificantes, cuya inclusión para llevar el pH del purín a 6,0, reduce las emisiones de CH_4 en hasta 87% cuando es aplicado al inicio del almacenamiento. Esta opción ha sido previamente evaluada en el sur de Chile contribuyendo a reducir la carga de patógenos existente naturalmente en estos materiales⁸. El uso de biochar también ha sido recomendado internacionalmente, aunque el costo ambiental y económico de su obtención representa una fuerte limitante para su adopción.

Los inhibidores de la nitrificación y/o volatilización de amoníaco pueden también ser empleados en purines. Su adición debe realizarse previo a la aplicación de estos materiales a campo, y su efectividad depende de la concentración y fraccionamiento inicial de N y de las condiciones climáticas imperantes (pluviometría, temperatura ambiental y de suelo). Estudios realizados en el sur de Chile sugieren que la mayor efectividad de los inhibidores de la nitrificación se observa en condiciones de otoño-invierno ya que a temperaturas de suelo $>10^\circ\text{C}$ se reduce su efectividad. Asimismo, los inhibidores de la volatilización reducen las emisiones de amoníaco, pero esto puede resultar en mayores emisiones de N_2O debido al mayor contenido de N que se conserva en el material.

Durante la aplicación de purines, las emisiones de CH_4 son bajas. Sin embargo, las emisiones de N_2O pueden ser exacerbadas si no se consideran buenas prácticas de manejo (para mayor detalle ver guía manejo de purines).

Finalmente, el vaciado y la limpieza anual de los pozos purineros permite eliminar el purín viejo y, con ello, el inóculo asociado a las emisiones de CH_4 , permitiendo reducir estas emisiones en hasta un 40%.

⁸ Alfaro, M. y Salazar, F. 2015. Buenas prácticas ganaderas para reducir la carga de patógenos en purines. Boletín INIA n°313, Osorno, Chile. <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/6454>

→ Reducción de las emisiones de residuos sólidos

Cubrir las pilas de residuos sólidos o compost con una capa de paja o cubierta plástica reduce la emisión de CH₄ y N₂O. Asimismo, el aireado frecuente de las pilas de compost reduce las emisiones de ambos gases.

3. Emisiones de CH₄ por fermentación entérica⁹

Existe diversidad de manejos y tecnologías que han sido evaluados a nivel internacional para reducir las emisiones de CH₄ por fermentación entérica. A nivel local se ha priorizado la evaluación de manejos asociados a optimizar la dieta animal en sistemas pastoriles, con resultados variables (Cuadro 4).

Cuadro 4. Efectividad de diferentes estrategias de mitigación para las emisiones de CH₄ por fermentación entérica¹⁰.

Estrategia de mitigación	Efectividad
Suplementación con concentrado en pastoreo (1 vs. 5 kg)	No
Mejoramiento del manejo de pastoreo para disminuir la madurez de la pradera	✓
Suplementación con concentrado en lactancia tardía (4 vs. 8 kg)	No
Suplementación con semillas oleaginosas con dieta TMR	✓ (algodón)
Suplementación con semillas oleaginosas a pastoreo por un periodo extendido de tiempo	No
Inhibidor de metanogénesis (Bovaer [®]) usando dos fuentes de nitrógeno	✓
Combinación de tipo de concentrado (trigo/maíz) y manejo de pastoreo	Parcial
Infusión intraruminal de acetato	No

⁹ Adaptado de Alfaro, M.A., Muñoz, C., Ungerfeld, E.M., Escobar-Bahamondes, P., Salazar, F., Martínez-Lagos, J. 2022. La lechería bovina y el cambio climático. En Libro Leche, INIA, en edición.

¹⁰ Dra. Camila Muñoz. 2022. Comunicación personal.

Los resultados de las evaluaciones realizadas en Chile, muestran que los valores de CH_4 expresado por unidad de energía bruta ingerida son similares al valor de referencia empleados internacionalmente, variando entre 5,6 y 7,2 %.

La suplementación de las vacas a pastoreo con concentrado en la sala de ordeña es una práctica común en los sistemas de producción de leche del sur de Chile. En primavera, cuando no existe restricción en disponibilidad o calidad de la pradera, los niveles de suplementación son moderados, fluctuando entre 1 y 5 kg d^{-1} . Cuando se emplea el mayor nivel de suplementación (5 kg concentrado) se reduce el consumo de pradera (-17%), e incrementa la producción de leche (9%) y de CH_4 total (13%), comparado con el menor nivel de suplementación (1 kg concentrado), resultando en emisiones similares entre los tratamientos. Estos resultados sugieren que la suplementación moderada con concentrado de vacas que pastorean praderas de alta digestibilidad no es suficiente para reducir las emisiones entéricas de CH_4 , y que la suplementación con concentrado se recomienda sólo si existe una respuesta en producción de leche y si los otros componentes de la dieta tienen baja digestibilidad.

El mejoramiento de la calidad del forraje podría reducir las emisiones de metano entérico. Los carbohidratos estructurales presentes en forrajes maduros con mayor lignificación son más metanogénicos que los carbohidratos solubles (CHOs). Al evaluar calidades contrastantes con masas forrajeras pre-pastoreo de 2.200 kg MS ha^{-1} (pradera en estado vegetativo, rezago promedio de 24 días) y 5.000 kg MS ha^{-1} (pradera en estado reproductivo, rezago promedio de 43 días), la pradera de menor masa forrajera tuvo mejor calidad nutricional con menor contenido de fibra y mayor digestibilidad, que la pradera de mayor masa forrajera. El forraje de mejor calidad incrementó el consumo de pradera (+13%) y la producción de leche (+13%), reduciendo las emisiones de CH_4 entérico por kg de leche (-11%). Por tanto, un manejo de pastoreo que favorezca la mantención de praderas de alta calidad en primavera constituye una estrategia de mitigación disponible, que tiene posibilidades de ser adoptada por los agricultores debido a que no requiere de inversión para su implementación y que además aumenta la productividad de las vacas.

Adicionalmente a nivel global, se han evaluado inhibidores del proceso de metanogénesis, que incluyen agentes químicos y de origen biológico. En el primer grupo destaca el 3-Nitrooxypropanol (3-NOP), mientras que en el segundo grupo se encuentran los taninos, de origen vegetal, y el bromoformo y bromoclorometano, de origen marino. Estudios realizados en el sur de Chile sugieren que, en dietas con limitación de N, la suplementación con 3-NOP (100 mg kg^{-1} MS) redujo las emisiones de CH_4 en un 53%, sin afectar la producción de leche, tanto con una dieta de proteína vegetal como con una dieta que contiene urea, alta en fibra y presumiblemente más metanogénicas. Respecto del uso de algas marinas en alimentación animal, aunque los resultados son prometedores a nivel global en estudios de laboratorio, aún se requiere su evaluación bajo condiciones de campo y a nivel local. INIA Remehue se encuentra trabajando en el uso de algas de origen marino como aditivos alimenticios que permitan mitigar las emisiones de CH_4 entérico, a la vez que optimizar la eficiencia de uso de N en el animal.

4. Mitigación y secuestro de carbono en sistemas ganaderos

Dado que las praderas no son sumideros de carbono, se requiere su gestión explícita para favorecer su capacidad de almacenamiento.

En general, mejores prácticas de manejo y la conversión de suelos bajo praderas y cultivos aumenta el contenido de C del suelo. En forma inversa, prácticas que lleven a la degradación de la pradera como el sobrepastoreo, resultarán en pérdidas de C (Cuadro 5).

Cuadro 5. Factores que favorecen (+) o disminuyen (-) el secuestro de carbono en sistemas ganaderos, a escala predial.¹¹

Ámbito	Práctica	Efecto
Suelo	Contenido de arcilla	+
	Fertilización balanceada	+
	Fertilización con fuentes orgánicas	+
	Uso intensivo de nitrógeno	-
	Disminución de la compactación	+
	Control de la erosión	+
	Pastura	Conversión de cultivo a pastura
Pastura	Recuperación de pasturas degradadas	+
	Pastura permanente	+
	Incorporación de leguminosas	+
	Corte frecuente	-
	Corte intenso	-
	Riego	+/-
	Drenaje	-
Animal	Pastoreo intensivo	-
	Sobrepastoreo	--
	Silvopastoreo	+
	Extensificación	+
Sistema	Aforestación (cortinas cortavientos)	+
	Sistemas integrados	+
	Manejo del fuego	+

¹¹ Alfaro, M. y Mejías, J. 2022. El secuestro de carbono en los sistemas ganaderos, sus oportunidades y desafíos. En: Sostenibilidad en la producción ganadera, Lainez, M., Calvet, S., Estellés, F. (eds), Editorial Cajamar Caja Rural, España, ISBN-13: 978-84-95531-63-6, pp:97-116. https://publicacionescajamar.es/publicacionescajamar/public/pdf/series-tematicas/informes-coyuntura-monografias/monimograf-43-sostenibilidad_ganadera_w.pdf

→ Cómo favorecer el secuestro de carbono en sistemas ganaderos

No existe una opción única para favorecer el secuestro de carbono en sistemas productivos ganaderos, y cada sistema deberá adoptar las estrategias que mejor se adapten a sus características productivas. Las prácticas de manejo que reducen las pérdidas de C y aumentan su secuestro en sistemas ganaderos incluyen:

- evitar la labranza del suelo y la conversión de pastizales a usos arables,
- en praderas de menor producción reducir la intensificación del pastoreo y favorecer la fertilización balanceada, e intensificar moderadamente los pastizales permanentes pobres en nutrientes
- usar pastoreo ligero en lugar de pastoreo intensivo, el uso intensivo de la biomasa producida en los pastizales les impide convertirse en sumideros de C,
- aumentar la duración de las praderas, alargar el ciclo de rotación y propender a pasturas permanentes, limitando el uso de fertilizante nitrogenado,
- conversión de pastizales en mezclas de gramíneas y leguminosas o en pastizales permanentes, evitar pasturas de baja diversidad. Esto representa además una estrategia que favorece la adaptación de sistemas pastoriles a los nuevos escenarios de cambio climático,
- incorporar materia orgánica periódicamente, por ejemplo, de residuos de cosecha, estiércol o materia orgánica estabilizada,
- combinar la producción ganadera con la incorporación de árboles y arbustos (silvopastoreo), aprovechando beneficios en sombreado y/o protección del viento.

Estudios localmente además indican que los suelos volcánicos del sur de Chile son capaces de capturar C en la forma de CH_4 . Esta capacidad depende fuertemente de la temperatura y contenido de humedad del suelo, siendo independiente del tipo de pradera y la fertilización nitrogenada aplicada. Su estudio y manejo, en asociación con la evaluación de la contribución de los árboles presentes en el predio, ya sea individuales o como bosque, puede contribuir al desarrollo de sistemas prateros (suelo-planta) de emisión de carbono reducida y a la valoración de servicios ecosistémicos en predios ganaderos con producción basada en el pastoreo.

Consideraciones finales

05.

Consideraciones finales

Los sistemas productivos ganaderos son, por su naturaleza, sistemas que emiten GEI y deben tomar acciones que permitan reducir o neutralizar dichas emisiones.

Para mitigar las emisiones de GEI en sistemas ganaderos no existe una solución única, y cada sistema productivo debe seleccionar y priorizar acciones que le permitan optimizar la producción a la vez que reducir las emisiones de GEI. Así, más que en una solución, debe pensarse en una caja de soluciones o “toolbox” que otorgue la flexibilidad necesaria en la implementación.

Las medidas de mitigación de GEI que pueden implementarse a nivel predial, habitualmente tienen efectos sobre más de un gas, pudiendo afectar distintos compartimentos del sistema productivo (suelo, estiércol, animal). Así, pueden existir externalidades y beneficios positivos entre medidas o compartimentos, por ejemplo, optimizar el balance energía/proteína en la dieta reduce las emisiones de CH_4 de origen entérico a la vez que resulta en residuos orgánicos de menor concentración de N y, por tanto, de menor riesgo para las emisiones de N_2O durante el pastoreo o por aplicación de purines, o externalidades negativas, como el uso de costras protectoras en purines, que por un lado puede contribuir a reducir las emisiones de CH_4 pero puede incrementar las emisiones de N_2O . Es por ello que debe evaluarse cada medida en su impacto global predial, en periodos de mediano y largo plazo.

La adopción de medidas de mitigación debe realizarse de manera paulatina y escalonada, favoreciendo aquellas que en primera instancia sean de mayor costo-efectividad, esto es, que sean de bajo costo (como optimizar el manejo del pastoreo animal) y que ofrezcan un adecuado beneficio ambiental.

