



Foto: Lucía Betancor

GESTIÓN DEL NITRÓGENO EN LA LECHERÍA URUGUAYA: hacia una intensificación con bajo impacto ambiental local

DMV. PhD Sofía Stirling¹, Ing. Agr. PhD Alejandro La Manna¹, Ing. Agr. PhD Alejandro Mendoza¹, Ing. Agr. PhD Agustín Núñez², Ing. Agr. PhD Valentina Rubio², Ing. Agr. Jorge Artagaveytia³, Ing. Agr. Ana Pedemonte³, Ing. Agr. Gabriel Guidice⁴, Ing. Agr. PhD Pablo Chilibroste⁵, Ing. Agr. PhD Yoana Dini⁶, Ing. Agr. PhD Fernando Lattanzi⁷

¹Sistema Lechero - INIA, ²Área Recursos Naturales, Producción y Ambiente - INIA, Sistema Agrícola Ganadero - INIA, ³Área de Información y Estudios Económicos - INALE, ⁴Área de Innovación y Desarrollo - INALE, ⁵Red Tecnológica de la Cadena Láctea - RTCL, ⁶Área Calidad, Innovación y Sustentabilidad - CONAPROLE, ⁷Área Pasturas y Forrajes - INIA

El nitrógeno es fundamental para la producción lechera, pero su manejo inadecuado puede provocar pérdidas económicas y derivar en impactos no deseados en nuestros ecosistemas locales. A medida que el sector avanza hacia sistemas intensificados, gestionar adecuadamente el nitrógeno se convierte en una prioridad para equilibrar productividad y sostenibilidad ambiental. En INIA trabajamos de manera coordinada con actores clave del sector para ayudar a los productores a tomar decisiones que optimicen resultados en los sistemas lecheros.

EL NITRÓGENO EN LOS SISTEMAS LECHEROS PASTORILES

En términos de ciclado de nitrógeno, los sistemas lecheros implican integrar la producción animal, de cultivos y pasturas, y sus interacciones con el suelo (Figura 1). En un tambo, el nitrógeno ingresa como fertilizantes y alimentos comprados, mediante la fijación biológica por leguminosas y deposición atmosférica, y

es exportado como leche y animales. El nitrógeno no exportado puede acumularse en el suelo y/o perderse al aire y al agua. En un predio, el nitrógeno circula en diferentes flujos a través de varios compartimentos y múltiples formas químicas:

- **ANIMAL.** Las vacas consumen nitrógeno y lo destinan a funciones vitales, produciendo leche y peso corporal.

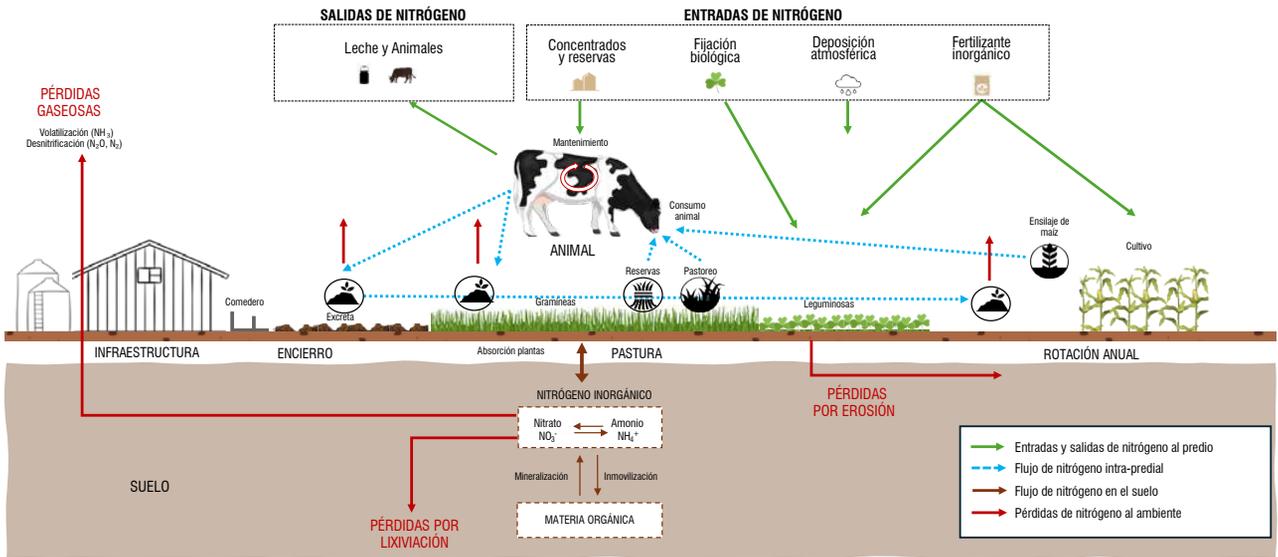


Figura 1 - Representación del ciclo del nitrógeno en un sistema lechero de Uruguay.

El nitrógeno no utilizado es excretado en orina (urea) y heces (formas orgánicas), depositándose en diferentes zonas del predio.

• **PLANTA.** Las pasturas y cultivos absorben nitrógeno disponible en el suelo, mayormente en formas inorgánicas (nitrato y amonio) y lo destinan a producir biomasa, que es consumida por los animales mediante pastoreo o reservas, o que muere y vuelve a ser parte de la materia orgánica del suelo.

• **SUELO.** El nitrógeno está disponible para las plantas en formas inorgánicas (nitrato y amonio), que constituyen una pequeña fracción del nitrógeno del suelo, mientras que la mayor parte se encuentra en formas orgánicas. La transformación de nitrógeno orgánico a inorgánico está determinada por las condiciones ambientales (humedad, temperatura, pH). Aunque esta transformación es esencial para la disponibilidad de nitrógeno para las plantas, genera riesgos ambientales por posibles pérdidas hacia el ambiente.

El nitrógeno puede perderse al ambiente por diferentes vías:

- Las pérdidas de nitratos en profundidad, por lixiviación, pueden contaminar acuíferos, generando riesgos ambientales locales.

- La volatilización de amoníaco a partir del amonio presente en efluentes, excretas y fertilizantes sintéticos deviene en deposición de nitrógeno en la superficie, aumentando riesgos de acidificación y eutrofización de ecosistemas vecinos.

- Las pérdidas gaseosas de nitrógeno por desnitrificación generan óxido nítrico, un gas de efecto invernadero que contribuye al calentamiento global.

El nitrógeno es el nutriente más intensamente ciclado y con mayor impacto productivo en sistemas lecheros pastoriles. La eficiencia con que animales y plantas transforman nitrógeno es limitada, por lo que parte del nitrógeno ciclado se pierde al ambiente. Si no se gestiona adecuadamente, algunas de estas pérdidas generan riesgo de contaminación ambiental.

BALANCE DE NITRÓGENO EN TAMBOS DE URUGUAY

El balance predial es una herramienta que permite calcular dos indicadores claves del desempeño del nitrógeno en un tambo: (1) el excedente, es decir, la diferencia entre el nitrógeno que ingresa a un predio y el que es exportado como producto; y (2) la eficiencia de utilización del nitrógeno (EUN), que es la relación entre esas dos variables (exportado/ingresado).

Para evaluar el impacto de la intensificación sobre estos indicadores, analizamos el balance de nitrógeno de sistemas que representan la lechería nacional, usando las tipificaciones de las Encuestas Lecheras de 2014 y 2019, basadas en una clasificación por producción y productividad y sistemas experimentales de Facultad

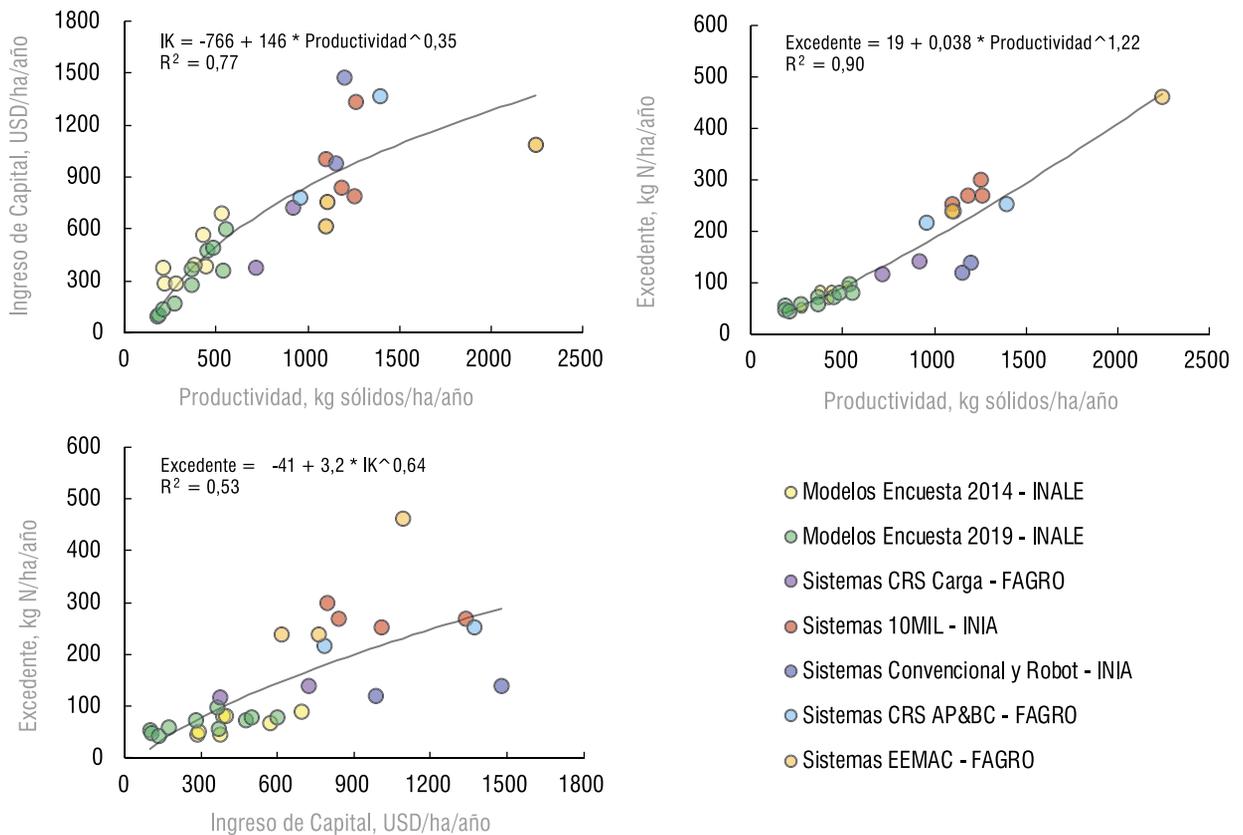


Figura 2 - Relación entre productividad de sólidos, ingreso de capital (IK) y excedente de nitrógeno. Datos de tambos comerciales y sistemas experimentales intensificados.

de Agronomía e INIA que representan modelos de intensificación con aumento de carga animal¹.

Intensificar la producción mediante el aumento de carga animal es factible y mejora el resultado productivo y económico, pero también incrementa el excedente de nitrógeno debido al mayor uso de fertilizantes y concentrados para sostener la mayor demanda de alimentos (Figura 2). Entre 2014 y 2019, el excedente de nitrógeno promedio de la lechería de Uruguay fue estable y bajo (71 kg N/ha), menor al excedente de tambos “extensivos” europeos². En comparación, la mayor parte de los sistemas experimentales alcanzaron excedentes de entre 120 y 300 kg N/ha, similares a los de sistemas intensivos del mundo¹.

RECIRCULACIÓN: UNA GRAN OPORTUNIDAD PARA INCREMENTAR LA EFICIENCIA DE UTILIZACIÓN DEL NITRÓGENO

La EUN de un sistema lechero engloba EUN parciales de sus componentes. Actualmente, estamos analizando la recirculación de nitrógeno en los sistemas lecheros uruguayos (Stirling *et al.*, inédito). Los resultados preliminares indican que el rodeo es el eslabón de menor eficiencia y el determinante de la EUN predial:

La intensificación de los sistemas lecheros genera, simultáneamente, un mayor ingreso de capital y un mayor excedente de nitrógeno. Desacoplar esta relación es el gran desafío que tenemos quienes, desde la Red Tecnológica de la Cadena Láctea, buscamos diseñar sistemas lecheros pastoriles que combinen alta sostenibilidad económica y ambiental.

Los resultados preliminares indican que el rodeo es el eslabón de menor eficiencia y el determinante de la EUN predial: solo se convierte en producto entre el 11 y el 26 % del nitrógeno consumido.

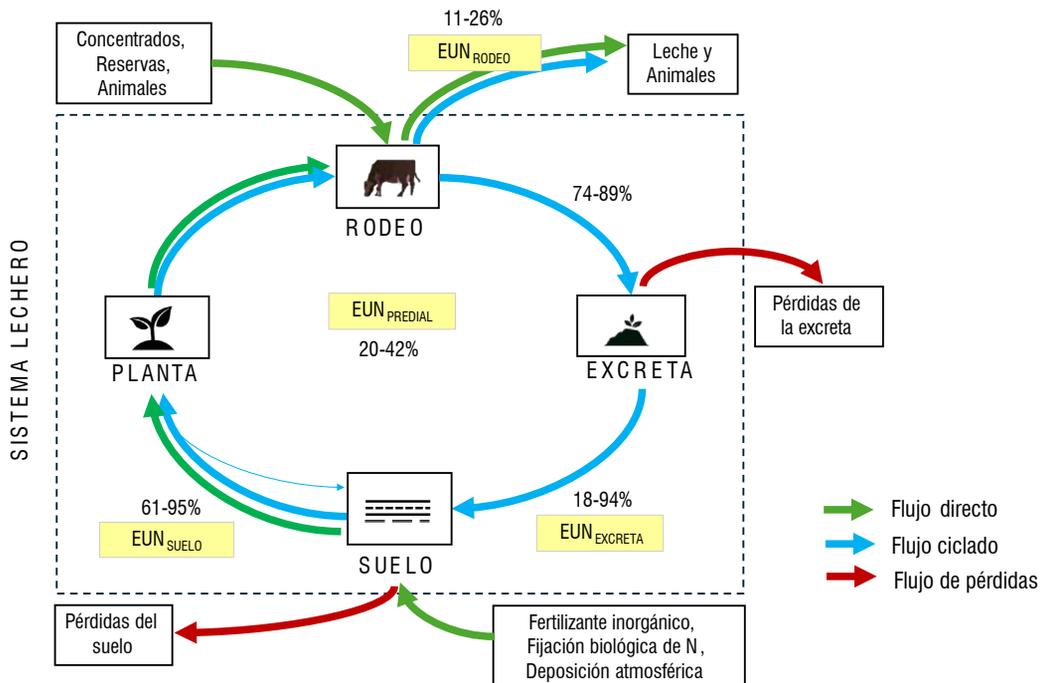


Figura 3 - Ciclado de nitrógeno en un tambo. Rango de valores encontrados en tambos comerciales y sistemas experimentales intensificados.

solo se convierte en producto entre el 11 y el 26 % del nitrógeno consumido (Figura 3). En contraste, entre el 60 y el 95 % del nitrógeno que ingresa al suelo es convertido en forraje. Recircular ese 74-89% de nitrógeno excretado por los animales, para que vuelva a ser convertido en forraje y consumido por el animal, es la clave para mejorar la EUN global de sistemas lecheros.

Infraestructura que permita capturar, manejar y recircular excretas en salas de ordeño y encierros resulta esencial para intensificar sosteniblemente los sistemas lecheros.

LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

De manera conjunta con actores del sector estamos trabajando en diversas líneas de acción para mejorar la gestión del nitrógeno en sistemas lecheros que incluyen:

A - Estimar cómo ocurren las pérdidas de nitrógeno al ambiente. Es decir, cuantificar en qué áreas del predio, momentos y formas químicas, el nitrógeno sale del sistema y qué riesgo conllevan de contaminación de agua y aire. Modelando con Overseer-Science® los sistemas 10MIL identificamos³: 1) que el 60 % de las pérdidas ocurrirían en áreas de encierro, por la frecuente presencia de animales y limitada infraestructura de reciclaje de excreta; 2) que las pérdidas de nitrógeno se producen en similar proporción por lixiviación (43 %)

y volatilización (41 %); y 3) que el barbecho previo a cultivos anuales puede contribuir significativamente a la lixiviación. Este último hallazgo orientó un experimento instalado en la Unidad de Lechería de INIA La Estanzuela para evaluar el destino del nitrógeno en secuencias que incluyen raigrás anual y cultivos de maíz temprano o tardío para ensilaje sobre pasturas en base a alfalfa o festuca.

B - En la Estación Experimental Mario A Cassinoni se desarrollará un proyecto (FPTA 571) que pondrá énfasis en los puntos de captura de nutrientes (cama caliente y cama a cielo abierto) y posterior recirculación, sustituyendo la fertilización química.

C - Compilar bases de datos de tambos nacionales para establecer puntos de referencia objetivos y estandarizados en la gestión del nitrógeno, orientando mejoras que reduzcan excedentes, aumenten la EUN y mitiguen pérdidas de nitrógeno sin comprometer la rentabilidad.

Recircular el nitrógeno excretado por los animales, para que vuelva a ser convertido en forraje y consumido por el animal, es la clave para mejorar la EUN global de sistemas lecheros.

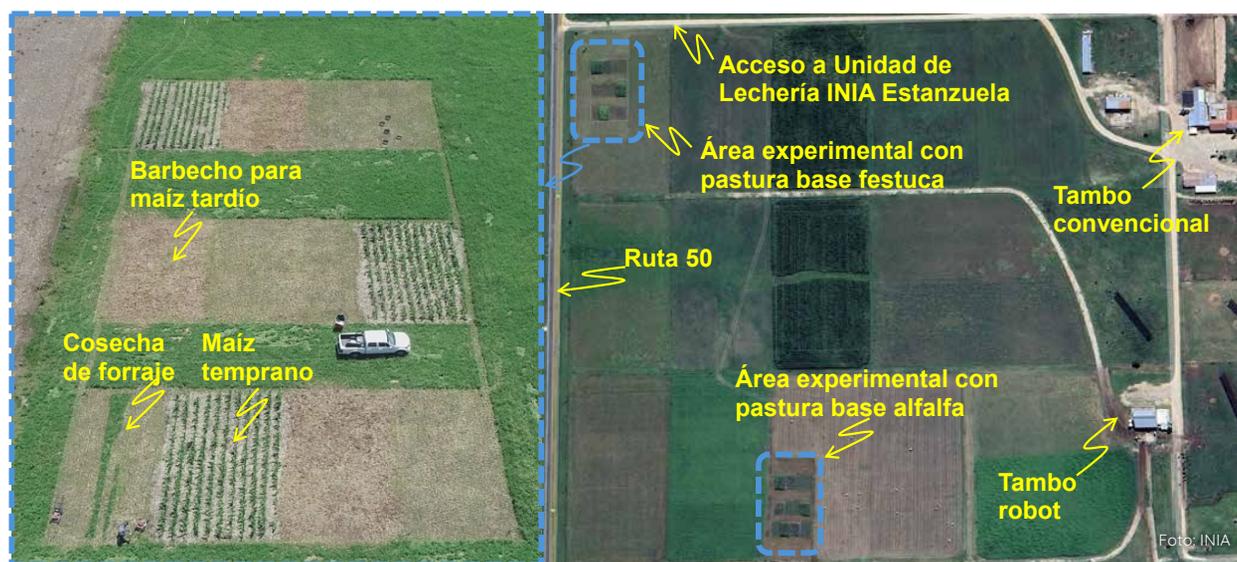


Figura 4 - Experimento instalado en la Unidad de Lechería, INIA.

COMENTARIOS FINALES

La comprensión detallada de la dinámica de circulación de nitrógeno es clave para proyectar los efectos de la intensificación de la lechería en Uruguay. El excedente de nitrógeno comparativamente bajo que muestra la lechería nacional indica que tenemos la oportunidad de desarrollar un proceso de intensificación que no incremente el impacto ambiental local.

¿Qué podemos hacer hoy para mejorar el desempeño de nuestros tambos? 1) formular dietas de forma periódica para ajustar la proteína acorde a la etapa productiva del rodeo, 2) pensar cómo recolectar excretas y reutilizarlas aplicándolas como fertilizante orgánico y 3) aplicar fertilizantes nitrogenados en el lugar y forma adecuados, ajustando dosis a los momentos de alta demanda de pasturas y cultivos.

Desde INIA, en el marco de la Red Tecnológica de la Cadena Láctea, pensamos que acciones orientadas a optimizar el uso de nitrógeno promoverán sistemas

La comprensión detallada de la dinámica de circulación de nitrógeno es clave para proyectar los efectos de la intensificación de la lechería en Uruguay.

lecheros sostenibles económica y ambientalmente, y proyectarán una imagen de genuina responsabilidad del sector ante la sociedad local y los consumidores externos.

REFERENCIAS

¹Stirling *et al.* (2024a) Balancing nitrogen at the farm gate: Economic-environmental sustainability trade-off in pastoral dairy systems of Uruguay. *Agrociencia* 28:e1243.

²van Loon *et al.* (2024) Nutrient cycling on dairy farms in the Netherlands: The role of farm structure, management and trade-offs. *Res, Conserv Recycl* 211:107875.

³Stirling *et al.* (2024b) Nitrogen loss partitioning and emissions in intensive subtropical hybrid dairy systems. *Nut Cycl Agroecosyst* 129:73-91.



Figura 5 - Zona de alimentación y encierro de la Unidad de Lechería de INIA La Estanzuela, donde se acumula una alta proporción de las excretas con potencial de gestión y re-circulación.