

Nitrógeno amoniacal total (TAN) como herramienta para estimar emisiones de NH₃ en el manejo de estiércol de rodeos lecheros

Total ammonia nitrogen (TAN) as a tool for estimating NH₃ emissions in manure management of dairy herds

Doctoranda:

Camila BELLOTTI

<https://orcid.org/0009-0007-2946-5214>

Grupo de Investigación y Desarrollo en Alimentos e Ingeniería Química, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Villa María, Argentina
camibellotti@hotmail.com

Director/a:

Roberto PEPINO MINETTI

Codirector/a:

María Paz TIERI

Resumen

La ganadería es una de las actividades antrópicas con mayor impacto sobre el medio ambiente debido al gran aporte de gases de efecto invernadero (GEI) a lo largo de toda su cadena de producción. A pesar de que los principales GEI emitidos son el dióxido de carbono, el metano y el óxido nitroso; el amoníaco (NH₃) tiene un papel crucial en el cambio climático por ser el principal gas que acidifica la precipitación y daña los distintos ecosistemas. Una de las principales fuentes de emisión de este gas es el estiércol del ganado bovino, razón por la cual se estimaron las emisiones anuales en cinco diferentes rodeos empleando la metodología de la European Environment Agency (EEA) y se calculó el aporte de amoníaco-nitrógeno (NH₃-N) en cada una de las etapas de manejo de estiércol evaluadas. Los resultados obtenidos muestran diferencias apreciables en las cantidades de NH₃ emitidas por rodeo, debiéndose principalmente a la cantidad de nitrógeno (N) brindado en las dietas suministradas. Por otro lado, la aplicación al suelo se identificó como la fuente más relevante de emisión de NH₃ dentro de las etapas de manejo de estiércol evaluadas, aportando valores superiores al 50% del total emitido en todos los rodeos analizados. En conclusión, estos valores brindan una noción sobre las emisiones de NH₃ en los distintos rodeos, su relación con el N de la alimentación y el aporte de las etapas de gestión del estiércol hacia la atmósfera.

Palabras clave: amoníaco; emisiones; ganado lechero; cambio climático.

Abstract

Livestock farming is one of the human activities with the greatest environmental impact due to the significant contribution of greenhouse gases (GHG) throughout its production chain. Although the main GHG emitted are carbon dioxide, methane, and nitrous oxide, ammonia (NH₃) plays a crucial role in climate change as the primary gas that acidifies precipitation and damages various ecosystems. One of the main sources of this gas is cattle manure, which is why annual emissions were estimated in five different herds using the European Environment Agency (EEA) methodology. The contribution of ammonia-nitrogen (NH₃-N) was calculated at each stage of manure management evaluated. The results show considerable differences in the amount of NH₃ emitted per herd, mainly due to the amount of nitrogen (N) provided in the feed. On the other hand, soil application was identified as the most significant source of NH₃ emissions among the evaluated manure management stages,

contributing over 50% of the total emissions across all analyzed herds. In conclusion, these values provide insight into NH_3 emissions in the different herds, their relationship to feed nitrogen, and the contribution of manure management stages to atmospheric emissions.

Keywords: ammonia; emissions; dairy cattle; climate change.

Introducción

La actividad ganadera, si bien desempeña un papel vital al proporcionar nutrición esencial y sustentar innumerables familias y comunidades en todo el mundo (Hernández-Tapia et al., 2019; FAO, 2023), se convirtió en una fuente mayoritaria de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) debido a una inadecuada gestión (Montes Valencia, 2025). Esto se debe principalmente a las contribuciones negativas que los sistemas ganaderos tienen a lo largo de la cadena de producción hacia el medio ambiente (FAO, 2023). Dentro de los principales gases emitidos a la atmósfera se encuentran el dióxido de carbono (CO_2), el metano (CH_4) y el óxido nitroso (N_2O). Sin embargo, el amoníaco (NH_3) juega un papel fundamental en el cambio climático, aunque no tiene una contribución directa, este gas genera un impacto ambiental relevante por su alta toxicidad y por ser precursor de la generación de N_2O (Hernández-Tapia et al., 2019; Flotats Ripoll, 2022). Además, su volatilización es una de las causas más importantes de las precipitaciones acidificantes y húmedas, debido a que el NH_3 reacciona con ácidos atmosféricos como el sulfúrico y el nítrico, representando una amenaza para la salud humana. Asimismo, es uno de los responsables de la eutrofización terrestre y acuática, lo que resulta en la pérdida de biodiversidad y acidificación del suelo (Allende et al., 2009; Hernández-Tapia et al., 2019; Lavery & Ferris, 2021).

Gran parte de las emisiones de NH_3 tienen su origen en las excretas del ganado, sólidas y líquidas, siendo responsable el sector pecuario del 64% del total de las emisiones a nivel mundial. Específicamente, el estiércol de ganado bovino es una fuente de emisión de CO_2 , CH_4 , N_2O y NH_3 , debido a que contiene nitrógeno, carbono, agua y sustratos esenciales que las bacterias metanogénicas y metanotróficas, así como las bacterias nitrificantes y desnitrificantes, transforman en formas orgánicas. Se calcula que el estiércol de sistemas ganaderos contribuye con el 30-50% de las emisiones de GEI a nivel global (Hernández-Tapia et al., 2019; FAO 2023). Las diferencias en las prácticas agrícolas, como el alojamiento y el manejo del estiércol, y las diferencias climáticas tienen un impacto significativo en las emisiones (FAO, 2023).

Según EEA (2019) la mayor proporción de las emisiones se originan en las instalaciones que albergan al ganado y tras la aplicación de estiércol a los terrenos, cada una de las cuales suele representar entre el 30 y el 40 % de las emisiones totales. Por otro lado, las procedentes del almacenamiento y del ganado al aire libre suelen representar entre el 10 y el 20 % del total.

La importancia de estudiar las emisiones radica principalmente en su impacto directo en la sostenibilidad ambiental, la gestión y la mitigación del cambio climático. Asimismo, se resalta la necesidad de abordar estas cuestiones de manera efectiva para promover un desarrollo sostenible y el bienestar humano (Martínez Salcedo et al., 2024). Si bien es posible que las estimaciones de la contribución de la ganadería al cambio climático continúen evolucionando, agregando nuevas fuentes de información y capas de complejidad, es necesario tener un entendimiento sólido del origen de los cálculos, su interpretación y significado (Motta y Di Pascua, 2023). Las metodologías para estimar las emisiones varían según el grado de complejidad y el nivel de detalle de los datos que requieren (Picado-Valenzuela et al., 2024).

Por tales motivos es que se propone la estimación de las emisiones NH_3 de rodeos lecheros con diferentes tipos de dietas alimentaria mediante la metodología propuesta por la EEA, evaluar cómo impacta el contenido de N brindado en las dietas sobre las emisiones y determinar las etapas del manejo de estiércol que más contribuyen negativamente sobre la atmósfera.

Desarrollo

Se llevaron a cabo las estimaciones de las emisiones de NH_3 anuales en cinco diferentes tipos de rodeos bovinos de la provincia de Santa Fe (Argentina) cuya variación entre los mismos radicó en los tipos de dietas suministradas, cantidad de proteína cruda brindada, cantidad de animales por rodeo, producción diaria de leche, entre otros. En la Tabla 1 se expresan aquellas características que fueron relevantes para llevar a cabo el análisis de las estimaciones.

La metodología utilizada fue la de la EEA (2019), la cual utiliza un enfoque de flujo másico basado en el concepto de flujo de nitrógeno amoniacal total (TAN, por sus siglas en inglés Total Ammonia Nitrogen) a través del sistema de gestión del estiércol, este tipo de método estima la mineralización del nitrógeno (N) y la inmovilización del TAN durante todas las etapas. La razón por la cual se prefiere un sistema basado en TAN a uno basado en N total, es debido a que las emisiones de NH_3 y otras formas de N gaseoso provienen del TAN. Además, esta metodología permite reflejar las consecuencias de los cambios en la alimentación del ganado sobre las emisiones.

Rodeo	Cantidad de animales	Proteína Cruda (kg/día)	Producción de leche (l/día)
Tambo VMS INTA RAF	64	3,59	31,18
Tambo CAMPO ROCA Holando	74	4,88	25,40
Tambo CAMPO ROCA Cruza	86	4,38	23,60
Tambo INTA RAF s/Se	10	4,21	18,74
Tambo INTA RAF c/Se	10	4,21	17,23

Tabla 1. Características de los rodeos.

El procedimiento consistió en seguir N desde la dieta del animal hasta la atmósfera aplicando diversos factores de emisión (FE) a cada etapa del manejo del estiércol. El primer paso fue la determinación del N excretado (N_{ex}), el cual se calculó por la diferencia entre el N ingerido y el N retenido en los productos (leche, ganancia de peso) (Ecuación 1).

$$N_{ex} = N_{ingerido} - N_{leche} - N_{corporal}$$

Ecuación 1. Cálculo de N excretado

Por un lado, el N ingerido se determinó a partir del contenido de proteína cruda (PC), el N leche a partir de la producción diaria de leche y el N corporal se omitió ya que, en vacas lecheras de producción estabilizada como las que se analizaron en este estudio, este valor representa menos del 1% del valor total.

Se debe tener en cuenta que sólo una fracción del N_{ex} es TAN, siendo éste el compuesto que puede volatilizarse luego como NH_3 y el resto es N orgánico que se mineraliza lentamente y no contribuye a la emisión de manera inmediata. Para ello se calculó el $TAN_{excretado}$ utilizando la Ecuación 2, donde f_{TAN} es la fracción entre el TAN y el N_{ex} según la categoría animal (EEA, 2023). En este caso, se utilizó el valor de 0,60 representativo de vacas en ordeño.

$$TAN_{excretado} = N_{ex} \times f_{TAN}$$

Ecuación 2. Cálculo de TAN

A partir de dicho valor de TAN se aplicaron diversos FE en función de la etapa de manejo de estiércol en la cual se estaba analizando ($TAN_{alojamiento}$, $TAN_{almacenamiento}$, $TAN_{aplicación}$) para así obtener las emisiones de NH_3 de cada una de ellas. En cada etapa se emitió una fracción del TAN disponible y el TAN restante pasó a la siguiente etapa sucesiva, siendo de vital importancia descontar el TAN ya emitido antes de calcular la etapa posterior.

$$NH_3 - N_{emitido} = TAN_{disponible} \times FE_{etapa}$$

Ecuación 3. Cálculo de la cantidad de NH_3 -N emitido a la atmósfera por etapa de manejo

$$TAN_{disponible\ siguiente} = TAN_{disponible} - (NH_3 - N)$$

Ecuación 4. Cálculo del TAN disponible para la etapa siguiente

Teniendo en cuenta que los tambos analizados se trataban de sistemas pastoriles, únicamente se analizaron las etapas de $TAN_{alojamiento}$ y $TAN_{aplicación}$. En la Figura 1 se pueden visualizar los valores obtenidos para cada una de las etapas en función de la vaca del rodeo analizado.

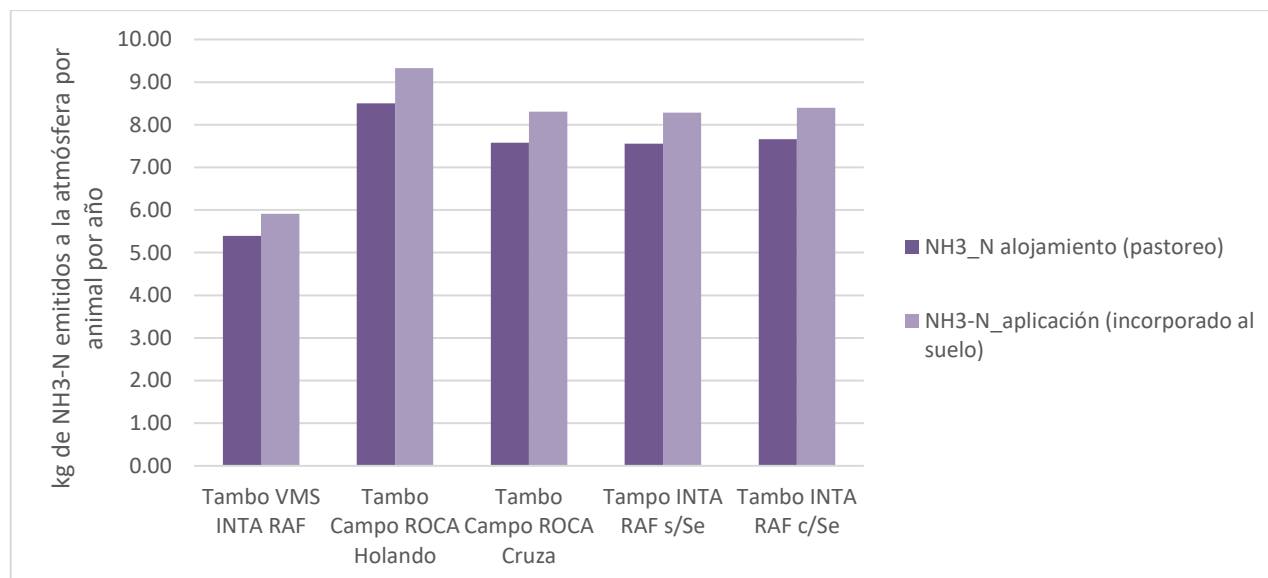


Figura 1. kg de NH₃-N emitidos por animal por año según las etapas de gestión del estiércol en los diferentes rodeos analizados.

Finalmente, para obtener los kg de NH₃ emitidos a la atmósfera por cada animal, se multiplicó el valor obtenido de NH₃-N por la relación de los pesos moleculares del N y el NH₃; y este valor por el número de animales de cada rodeo para determinar la emisión total anual del mismo (Tabla 2).

Rodeo	Cantidad de NH ₃ emitidos a la atmósfera (kg/año)
Tambo VMS INTA RAF	878
Tambo CAMPO ROCA Holando	1602
Tambo CAMPO ROCA Cruza	1659
Tambo INTA RAF s/Se	192
Tambo INTA RAF c/Se	195

Tabla 2. kg de NH₃ emitidos a la atmósfera por año por rodeo.

Resultados

Los resultados obtenidos evidencian una marcada variabilidad en las emisiones de NH₃ para cada rodeo evaluado. Esto podría deberse principalmente al aporte de N en las dietas, debido a que este valor osciló entre 0,57 y 0,78 kg N/día, donde los mayores aportes fueron en tambo CAMPO ROCA Holando (0,78 kg N/día) y CAMPO ROCA Cruza (0,70 kg N/día), seguidos de tambo INTA RAF con y sin aporte de selenio en las dietas (0,67 kg N/día, en ambos) y finalmente el tambo VMS INTA RAF (0,57 kg N/día).

Edouard et al. (2019) expresa que las mayores emisiones de NH₃-N en los tambos fue cuando las vacas lecheras recibieron dietas altas en N debido a que aumentan las excreciones del mismo y de TAN; sin embargo, esto no se cumplió estrictamente en este estudio, debido a que los tambos CAMPO ROCA Holando y CAMPO ROCA Cruza registraron las mayores emisiones anuales de NH₃, seguidos por el tambo VMS INTA RAF y finalmente, las menores proporciones de emisión fueron en los tambos INTA RAF con y sin aporte de selenio (Se) en sus dietas. Esto puede deberse a las prácticas de manejo seleccionadas, a la interacción entre el suministro de N y la gestión del estiércol, y la alimentación propiamente dicha (Edouard et al., 2019; Aguirre-Villegas et al., 2024).

Por otro lado, al analizar las etapas de gestión del estiércol en donde hubo una mayor emisión a la atmósfera, se puede observar que en todos los casos el mayor aporte fue en la etapa de aplicación al suelo, siendo estos valores superiores al 50% del total emitido. Estos resultados concuerdan con los expuesto por Aguirre-Villegas et al. (2024), donde expresa que el almacenamiento y la aplicación del suelo del estiércol son las principales fuentes de emisiones de NH₃.

A pesar de que estos resultados son, en general, consistentes con la literatura consultada debe tenerse en cuenta que las estimaciones son en base a datos brindados por EEA (2023) y no a datos experimentales propios. Si bien los modelos empíricos intentan crear una herramienta útil para estimar las emisiones de NH_3 del estiércol, utilizando FE y las relaciones más simples entre el manejo y las emisiones, no debe dejarse de lado que los modelos experimentales son más precisos que los empíricos, pero también requieren datos más específicos (Aguirre-Villegas et al., 2024).

Conclusiones

A partir de los resultados obtenidos de las estimaciones empíricas de las emisiones de NH_3 de los cinco rodeos lecheros evaluados, se puede observar que existen diferencias notables entre los mismos. Esto pudo estar asociado principalmente al aporte de N en las dietas suministradas, aunque otros factores como tipo de raza, cantidad de animales en el rodeo, producción de leche diaria, características del sistema de manejo de estiércol también podrían haber contribuido significativamente. Además, se registraron porcentajes similares entre los cinco rodeos de las emisiones de $\text{NH}_3\text{-N}$ durante la etapa de aplicación del suelo.

En conclusión, los valores obtenidos permiten dimensionar la contribución de las distintas etapas de gestión del estiércol en cuanto a las emisiones de NH_3 en sistemas de producción lechera, teniendo en cuenta la diferencia de los aportes de N en las dietas. No obstante, contemplando que las estimaciones se basaron en FE provenientes de metodologías empíricas, sería recomendable comprar los resultados con mediciones experimentales, a fin de evaluar la representatividad de los FE seleccionados y mejorar la precisión de las estimaciones calculadas.

Referencias

- Aguirre-Villegas, H. A., Besson, C., & Larson, R. A. (2024). Modeling ammonia emissions from manure in conventional, organic, and grazing dairy systems and practices to mitigate emissions. *Journal of Dairy Science*, 107(1), 359-382. doi:<https://doi.org/10.3168/jds.2023-23782>
- Allende, D., Castro, F., & Puliafito, E. (2009). INVENTARIO DE EMISIONES DE COMPUESTOS NITROGENADOS DERIVADOS DE ACTIVIDADES AGROPECUARIAS EN EL OASIS NORTE DE LA PROVINCIA DE MENDOZA. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 9.
- Edouard, N., Charpiot, A., Robin, P., Lorinquer, E., Dollé, J. B., & Faverdin, P. (2019). Influence of diet and manure management on ammonia and greenhouse gas emissions from dairy barns. *Animals*, 13(12), 2903-2912. doi:<https://doi.org/10.1017/S1751731119001368>
- European Environment Agency. (2023). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023 - Technical guidance to prepare national emission inventories*. Copenhagen (Denmark): Publications Office of the European Union.
- European Environmental Agency. (2019). Manure management. En *EMEP/EEA air pollutant emission inventory Guidebook*.
- Flotats Ripoll, X. (2022). Gestión de purines y emisiones de gases contaminantes. *SUIS*, 193, 8-14. Obtenido de <http://hdl.handle.net/2117/386464>
- Food and Agriculture Organization. (2023). *Pathways towards lower emissions - A global assessment of the greenhouse gas emissions and mitigation options from livestock agrifood systems*. Rome. doi:<https://doi.org/10.4060/cc9029en>
- Hernández-Tapia, N., Salinas-Ruiz, J., Saynes-Santillán, V., Ayala-Rodríguez, J. M., Hernández-Rosas, F., & Velasco-Velasco, J. (2019). Emisión de N_2O , CO_2 y NH_3 a partir de estiércol de bovinos con diferente porcentaje de proteína cruda en la dieta. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 597-608. doi:10.20937/RICA.2019.35.03.07
- Lavery, A., & Ferris, C. P. (2021). Proxy Measures and Novel Strategies for Estimating Nitrogen Utilisation Efficiency in Dairy Cattle. *Animals*, 11(2). doi:<https://doi.org/10.3390/ani11020343>

Martínez Salcedo, C. A., Valencia, J. R., & Pedroza Rojas, Á. (2024). Estimación de emisiones y modelización del comportamiento ambiental de los gases de efecto invernadero para un relleno sanitario. *Revista Ingenio - "Journal of Engineering Sciences"*, 21(1), 36-44. doi:<https://doi.org/10.22463/2011642X.4172>

Montes Valencia, J. A. (2025). INNOVACIONES PARA UNA GANADERÍA CLIMÁTICAMENTE INTELIGENTE: IMPACTO DE SUPLEMENTOS, GENÉTICA Y MANEJO DEL ESTIÉRCOL EN LAS EMISIONES DE GEI. *Ibero Ciencias - Revista Científica y Académica*, 4(2). doi:doi.org/10.63371/ic.v4.n2.a89

Motta, G., & Di Pascua, I. (2023). *Evolución histórica de la contribución de la ganadería al cambio climático. Un análisis de las estimaciones de FAO entreo 2006 y 2023*. ANUARIO OPYPA.

Picado-Valenzuela, P., Rodríguez-Yañez, J. E., & Sibaja-Brenes, J. P. (2024). Comparación de dos metodologías de cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero para vehículos en Costa Rica, 2014. *Tecnología en marcha*, 37(4), 89-99.