



EFECTO MITIGADOR DE LOS SISTEMAS DE ROTACIÓN CON PASTURAS SOBRE LAS EMISIONES DEL GAS DE EFECTO INVERNADERO ÓXIDO NITROSO (N₂O)

Ing. Agr. PhD Verónica Ciganda; Lic. Biol. MSc. Claudia Simón; Ing. Agr. Fabiano Alecrim; Bach. Julieta Mariotta; Téc. Agrop. Leonardo Silva; Téc. Agrop. Emiliano Barolin; Aux. Inv. Héctor Vergara; Op. Rural. Gualberto Soulier; Ing. Agr. PhD Andrés Quincke

Área de Recursos Naturales, Producción y Ambiente

Como aporte a la sustentabilidad ambiental de nuestros sistemas, INIA evalúa dos esquemas de rotación contrastantes, agricultura continua y rotación cultivo-pastura, establecidos sobre un mismo suelo, sobre las emisiones de óxido nitroso.

INTRODUCCIÓN

En Uruguay el 26 % del territorio se encuentra bajo uso agrícola, favorecido por la topografía predominantemente ondulada de nuestro país y por la presencia de suelos aptos para la agricultura. Hasta principios de este siglo, la rotación de cultivos agrícolas con pasturas permanentes solía ser una práctica muy extendida en nuestros sistemas de producción.

Esto favorecía a una sólida sustentabilidad ambiental del sistema, ya que, entre otros beneficios, las rotaciones con pasturas reducen las pérdidas de carbono por erosión en relación a la utilización de cultivos agrícolas continuos (Pravia *et al.*, 2020). Sin embargo, la tendencia alcista de precios de algunos cultivos agrícolas incentivó el desarrollo de sistemas de siembra continua de cultivos, la que modificó la dinámica del manejo general del sistema y alteró,

en general, algunas propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. A su vez, la degradación de las propiedades biológicas del suelo pueden afectar, entre otras propiedades, al ciclo de nutrientes y la estabilidad de los agregados resultando en un deterioro más amplio de la química del suelo, de los procesos físicos y los rendimientos de cultivos (Rubio *et al.*, 2021)

Las fragilidades observadas en estos sistemas motivaron la necesidad de repensar la rotación, lo que llevó a la inclusión de cultivos de cobertura, de praderas cortas y, en algunos casos, se ha vuelto a la alternancia con pradera permanente de tres o cuatro años de duración. Al mismo tiempo, la demanda internacional por una mejora en la calidad de los procesos productivos, con énfasis sobre la demanda de productos generados con una baja o muy baja huella de carbono, sumado a los compromisos internacionales de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) conducen a maximizar el cuidado ambiental durante todo el proceso de producción.

En este sentido, es relevante que los sistemas de producción agropecuaria busquen maximizar la eficiencia productiva y el cuidado y protección de los recursos naturales a través de la aplicación de prácticas de manejo sostenibles. Si bien algunas prácticas agrícolas, como la aplicación de nitrógeno al suelo o al cultivo, pueden conducir a un aumento de las emisiones de GEI (Strassburg *et al.* 2014), existen alternativas y prácticas de producción que favorecen su reducción.

Dentro de los GEI, el óxido nitroso (N_2O) tiene gran importancia para los sistemas agrícolas, ya que a nivel global el 70 % de sus emisiones totales se originan de la dinámica del nitrógeno (N) del suelo en los sistemas de producción (Ussiri y Lal 2013), ya sea por la descomposición microbiana de residuos vegetales o por la aplicación de fertilizantes nitrogenados o de estiércol. Además, el N_2O tiene un potencial de calentamiento global (GWP) 310 veces mayor que el CO_2 (Zaehle *et al.* 2011) y una vida media de aproximadamente 131 años en la atmósfera (Hartmann *et al.* 2013). La magnitud de las emisiones de este gas depende del N disponible en el suelo, así como las condiciones del suelo (temperatura, humedad y carbono orgánico, principalmente) que favorezcan los distintos procesos microbianos responsables de la formación y pérdida de N como gas N_2O .

En Uruguay, las emisiones de N_2O en el año 2019 fueron de 28,6 gigagramos (Gg), y el 96 % provino del sector AFOLU (agricultura, forestal y otros usos del suelo) (INGEI, 2021, Figura 1). Si bien más del 80 % de estas emisiones provienen de la deposición de orina y heces de los animales de la ganadería pastoril, también es relevante considerar las emisiones generadas en las etapas agrícolas de los sistemas, atendiendo a maximizar la eficiencia de uso del N, así como a la calidad de los procesos productivos.

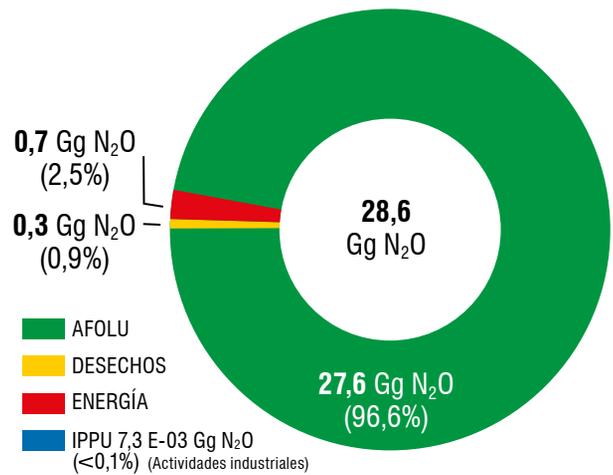


Figura 1 - Distribución de las emisiones de N_2O de Uruguay para los distintos sectores del inventario nacional de GEI (INGEI 2021).

En Uruguay hay pocos estudios relacionados a las emisiones de nitrógeno en cultivos de secano (Perdomo *et al.*, 2008), tomando en cuenta que la mayoría de los estudios publicados están centrados en plantaciones arroceras (Tarlera *et al.* 2006, Capurro *et al.* 2015, Illarze *et al.* 2017). Por lo tanto, se hace necesario conocer cuantitativamente las emisiones de los distintos sistemas de producción agrícola del país e identificar las mejores prácticas para su mitigación.

El objetivo propuesto para este trabajo fue evaluar el efecto de dos sistemas de rotación contrastantes: agricultura continua y rotación cultivo-pastura, establecidos sobre un mismo suelo, sobre las emisiones de óxido nitroso.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio experimental

El estudio se realizó en el experimento de largo plazo (ELP) "José Lavalleja Castro" de rotaciones agrícolas de INIA La Estanzuela (34°20'34.6"S 57°43'26.5"W), también conocido como "experimento de rotaciones viejas", perteneciente a la Plataforma Agroambiental de INIA. El mismo está ubicado sobre un suelo Brunosol eutrítico típico sobre la formación Libertad.

Este ELP fue instalado en 1963 y en él se evalúan siete tratamientos de sistemas de rotación, cada uno con tres repeticiones desfasadas en el tiempo, los que combinan distintas alternancias, en cuanto a tiempo y especies, de cultivos y pasturas en bloques de tiempo de seis años.

Los tratamientos de sistemas del ELP son aplicados sobre parcelas o franjas de 50 m de ancho y 200 m de largo (1 ha), completando un total de 21 parcelas.

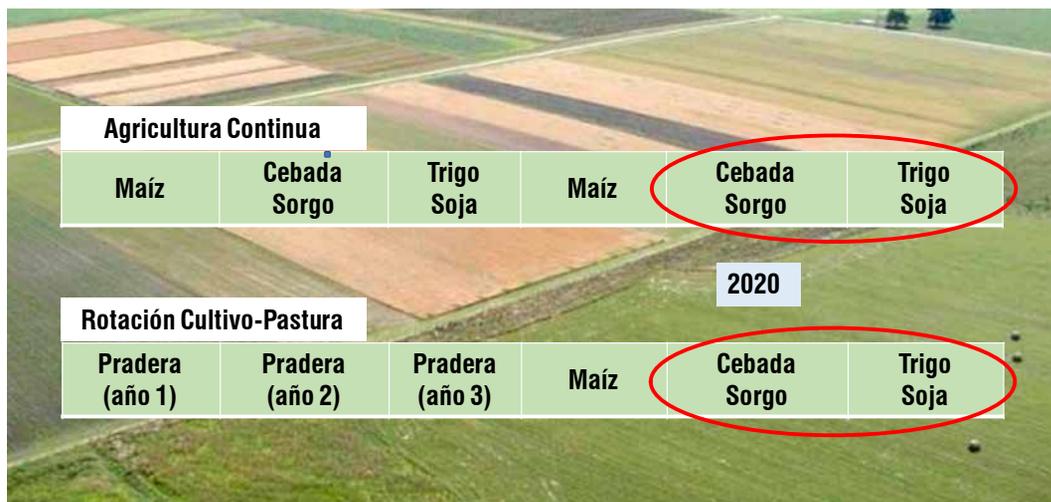


Figura 2 - Esquema de secuencia de cultivos y pasturas de los tratamientos del ELP “José Lavalleja Castro” seleccionados para evaluar el efecto del sistema sobre las emisiones de N₂O.

Desde el año 2020 se ha comenzado a cuantificar las emisiones de N₂O de dos de los sistemas evaluados en el ELP considerados contrastantes: i) Agricultura continua con aplicación de fertilizante nitrogenado (AgrC); y ii) Rotación de tres años de cultivos agrícolas con tres años de pastura permanente (RotCP). La secuencia de la fase agrícola del tratamiento RotCP, coincide con la secuencia del tratamiento AgrC, lo que ha permitido unificar la evaluación del efecto de ambos tratamientos en una única secuencia de cultivos: cebada-sorgo- trigo-soja (Figura 2).

¿Cómo realizamos las mediciones?

Las mediciones de N₂O se realizaron utilizando la técnica de cámaras estáticas de flujo cerrado. Las cámaras utilizadas para este estudio son rectangulares (40 cm x 50 cm), de acero inoxidable, y constan de dos partes: una base fija inserta en el suelo a 10 cm y una tapa móvil que se coloca cada día de medición. Esta tapa contiene un orificio con botón de goma, o septa, a través del cual se inserta la aguja de una jeringa para realizar muestreos del aire del espacio contenido en la cámara (Figura 3). En cada día de medición, se obtiene un total de tres muestras de aire por cámara en tres tiempos distintos: i) inmediatamente luego de colocar la tapa, ii) a los 20 minutos y iii) a los 40 minutos. Cada muestra se colecta en un vial, a los que luego se les analiza su concentración de N₂O por cromatografía gaseosa (Agilent 7890 A) (Figura 8). De esta forma, es posible calcular el flujo de emisión de N₂O de cada cámara. Estas mediciones se realizaron durante todo el período de crecimiento de cada cultivo, y también luego de la cosecha y en tiempo entre cultivos, siguiendo un protocolo establecido de frecuencia de muestreo.

En cada una de las franjas de los sistemas evaluados, e inmediatamente luego de la siembra de cada cultivo, se

instalamos ocho cámaras. Aleatoriamente en cuatro de estas cámaras se aplicó la dosis de fertilizante utilizada para todo el manejo de la franja y en las otras cuatro no se aplicó fertilizante. Además, en forma contigua a cada cámara, se instaló una parcela de 2 m² que recibió el mismo tratamiento de la cámara. Estas parcelas fueron utilizadas para los muestreos destructivos de suelo en los que se analizó nitrato, amonio, pH y PMN. Las plantas también fueron muestreadas y se analizó su contenido de nitrógeno. Los resultados fueron analizados estadísticamente y se calcularon las emisiones acumuladas obtenidas durante el período de crecimiento de cada cultivo.

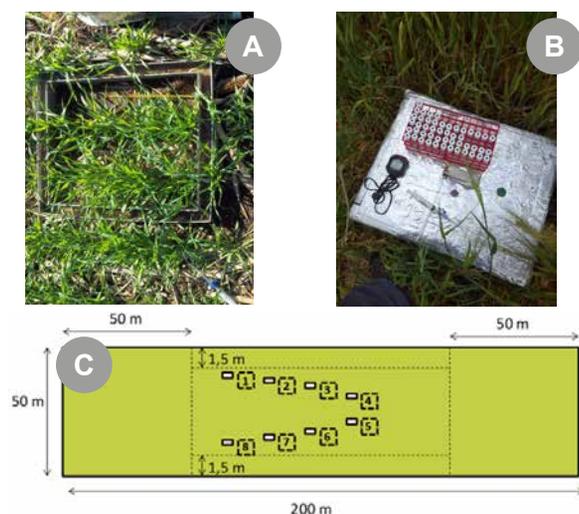


Figura 3 - Detalles de las cámaras estáticas utilizadas: (a) base inserta en el suelo; (b) tapa de la cámara forrada con membrana térmica aluminizada y viales utilizados para el muestreo de aire; y (C) disposición de cámaras y parcelas dentro de cada franja de tratamiento.

Las mediciones de N_2O se realizaron durante todo el período de crecimiento de cada cultivo, luego de la cosecha y en el intervalo entre cultivos.

RESULTADOS

Evolución de las formas de nitrógeno en el suelo

Los resultados que se muestran en esta publicación se limitan a las mediciones realizadas durante el cultivo de cebada en el año 2020. La aplicación de fertilizante nitrogenado a la siembra fue inferior a 5 kg N/ha, lo que no mostró ningún efecto en los niveles de NH_4^+ ni de NO_3^- del suelo (Figura 4 A). Sin embargo, las siguientes dosis de fertilizante ureico, aplicado según las recomendaciones de re-fertilización (~ 50 kg N/ha),

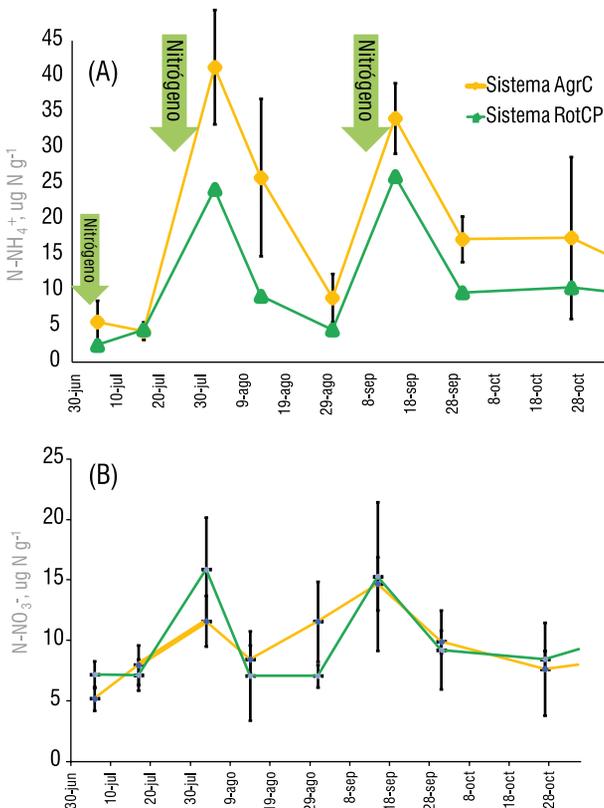


Figura 4 - Evolución del contenido de $N-NH_4^+$ (A) y de $N-NO_3^-$ (B) del suelo durante el período de crecimiento del cultivo de cebada en el sistema de Agricultura continua y en el sistema de Rotaciones Cultivo Pastura. Las flechas verdes indican los momentos de aplicación de fertilizante nitrogenado.

generaron un claro pico de concentración de NH_4^+ en ambos sistemas. Esto es esperable ya que la urea se transforma en NH_4^+ a través del proceso de hidrólisis dado por la presencia de ureasas microbianas en el suelo. Este proceso ocurre más o menos rápido dependiendo de las condiciones de temperatura y humedad del suelo. Es importante destacar que, si bien la aplicación de la cantidad de fertilizante-N fue la misma en ambos sistemas, el aumento de la concentración de NH_4^+ fue claramente mayor en el sistema AgrC, probablemente debido a que las condiciones del suelo favorecieron el proceso de hidrólisis.

El NH_4^+ en el suelo se transforma rápidamente a NO_3^- a través del proceso de nitrificación, resultando tanto el NH_4^+ como el NO_3^- las formas de N mayoritariamente absorbidas por las plantas. En este estudio se observó un mínimo desfase entre la aparición de los picos de NH_4^+ y los picos de NO_3^- (Figura 4B), lo que era esperable debido a los tiempos de ocurrencia de la nitrificación.

El potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) es una variable que puede ser utilizada como un indicador de la calidad de la materia orgánica del suelo. A esta variable se la asocia frecuentemente con la fracción de carbono más lábil del suelo y por lo tanto con su capacidad de aportar nutrientes por la mineralización de la materia orgánica. Además, los suelos con mayor PMN están también asociados a suelos de mejor estructura, mayor porosidad y aireación, lo que favorece, entre otras cosas, las condiciones de drenaje del suelo. En el presente estudio, el sistema de Rotación Cultivo-Pastura mostró niveles de PMN significativamente mayores al sistema Agricultura Continua, lo que estaría relacionado con los períodos más largos de crecimiento de plantas asociados a la inclusión de pasturas en el sistema de rotación y su efecto beneficioso en las propiedades del suelo (Figura 5).

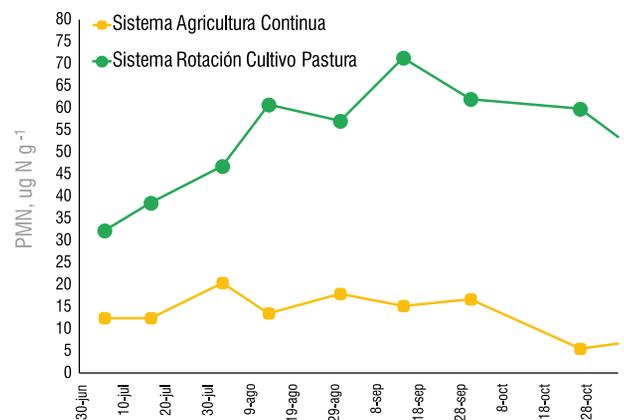


Figura 5 - Evolución del potencial de mineralización de nitrógeno (PMN) de los suelos del sistema Agricultura Continua y Rotaciones Cultivo-Pastura durante el período de cultivo de cebada en el año 2020.

El sistema de Rotación Cultivo-Pastura tuvo niveles de Potencial de Mineralización de Nitrógeno mayores al sistema Agricultura Continua, lo que estaría explicado por el aporte de las pasturas.

Emisiones de N₂O

En general, tanto en el sistema AgrC como en RotCP, los picos de emisión de pérdidas de N como N₂O se observaron inmediatamente luego de la aplicación del fertilizante nitrogenado (Figura 6). Además, la ocurrencia de precipitaciones en esos días favoreció aún más las condiciones para pérdida de N como N₂O. Excepto por la ocurrencia de dos picos similares entre ambos sistemas, en el resto del período la magnitud de las emisiones fueron mayores en el sistema AgrC respecto a RotCP.

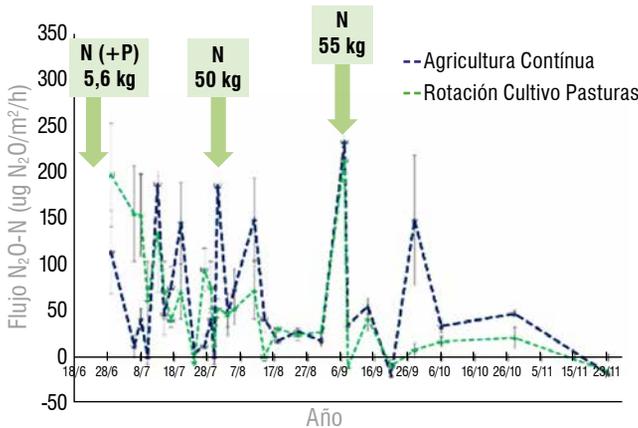


Figura 6 - Flujo de emisión de óxido nitroso en los sistemas de Agricultura Continua (azul) y de Rotaciones Cultivo-Pastura (verde).

La emisión de N₂O acumulada para todo el período del cultivo de cebada fue significativamente mayor para el sistema de AgrC respecto al RotCP (Figura 7). Sin embargo, cuando no se aplicó fertilizante, las emisiones fueron mayores en el Sistema RotCP.

Estos resultados muestran que, cuando los sistemas recibieron fertilización, las condiciones del suelo del sistema AgrC favorecen la desnitrificación y por lo tanto las emisiones como N₂O, mientras que los suelos

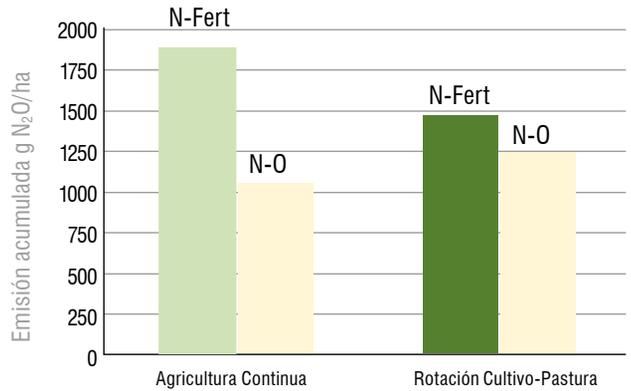


Figura 7 - Emisión acumulada de N-N₂O para los sistemas de Agricultura Continua y de Rotación Cultivo-Pastura con y sin aplicación de fertilizante-N.

del sistema RotCP de mayor PMN, y por lo tanto asociado a mejores propiedades del suelo (aireación, mejor estructura) que le permiten hacer un muy buen aprovechamiento del N aplicado y mantener las emisiones en valores bajos.

Por el contrario, en condiciones de no fertilización, el suelo del sistema de RotCP presenta condiciones favorables para la pérdida de N por desnitrificación respecto a AgrC lo que estaría explicado también por su mayor PMN.

El factor de emisión (FE) de N₂O calculado para ambos sistemas fue mayor para el sistema AgrC (0,75 %) respecto al sistema RotCP (<0,2 %). Esto significa que por cada kg de N de fertilizante que se aplica al suelo, el 0,75 % del N aplicado se pierde como N₂O en sistemas de agricultura continua, mientras que esto se reduce al 0,2 % en suelos de rotaciones con praderas. En ambos sistemas, el FE obtenido es inferior al publicado por el IPCC, el que varía entre 1,3 % y 1,9 %.



Figura 8 - Equipo de cromatografía de gases para el análisis de la concentración del gas óxido nitroso (A). Detalle de las bandejas del cromatógrafo con los viales con muestras del campo que serán analizadas (B).

La emisión de N₂O acumulada fue significativamente mayor para el sistema de Agricultura Continua respecto a la Rotación Cultivo-Pastura.

CONCLUSIONES

Este estudio se centró en la evaluación de sistemas de rotación bien contrastantes. El sistema de rotación con pasturas mostró menores emisiones de óxido nítrico en la fase agrícola respecto a la agricultura continua. A su vez, el factor de emisión de N₂O para este sistema fue inferior al sistema de agricultura continua indicando menores pérdidas de N₂O por cada kg de N aplicado al suelo. Los mayores niveles de PMN del sistema de rotación con pasturas estarían indicando mejores propiedades del suelo en cuanto a estructura y aireación, principalmente, lo que favorece la interacción carbono-nitrógeno contribuyendo a las menores emisiones de N₂O. Se resalta, de todas formas que, en ambos sistemas, los factores de emisión calculados mostraron valores inferiores a los reportados por el IPCC.

La aplicación del fertilizante nitrogenado según análisis de suelo, en dosis y momento recomendados, contribuye a la mitigación de las emisiones de óxido nítrico, y esto es más notorio en sistemas de rotación que favorecen las buenas propiedades y condiciones del suelo.

Se continuará trabajando en el análisis de las emisiones de tres años (tres repeticiones) en fase agrícola para disponer del comportamiento completo de cada sistema y factores de emisión más robustos. Además, se espera poder profundizar en el efecto sobre las emisiones de otros sistemas de rotación que no incluyen pasturas pero sí, por ejemplo, cultivos de cobertura, sobre los que también se han reportado efectos muy beneficiosos en las propiedades de salud del suelo (e.g. Rubio *et al.*, 2021).

REFERENCIAS

Irrigation Management and Greenhouse Gas Emissions in Uruguayan Rice Production Systems. *Agrociencia Uruguay*, 19(3), 60-60.

Hartmann, D. L., Tank, A. M. K., Rusticucci, M., Alexander, L. V., Brönnimann, S., Charabi, Y. A. R., ... & Zhai, P. (2013). Observations: atmosphere and surface. In *Climate change 2013 the physical science basis: Working group I contribution to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change* (pp. 159-254). Cambridge University Press.

Illarze, G., Del Pino, A., Riccetto, S., & Irisarri, P. (2017). Nitrous oxide emission, nitrification, denitrification and nitrogen mineralization during rice growing season in 2 soils from Uruguay. *Revista Argentina de Microbiología*, 50(1), 97-104.

INGEI (2021) inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero 1990-2019. A la conferencia de las partes en la Convención Marco De Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático. República Oriental Del Uruguay

Perdomo, C., Irisarri, P., & Ernst, O. (2009). Nitrous oxide emissions from an Uruguayan argiudoll under different tillage and rotation treatments. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 84(2), 119-128.

Pravia, V.; Quincke, A.; Ciganda, V.; Oyhantçabal, W.; Lattanzi, F. Secuestro de carbono en suelos de Uruguay. *Revista INIA Uruguay*, 2020, no. 61, p. 103-107. (Revista INIA; 61)

Rubio, V., Sawchik, J., & van Es, H. (2022). Soil health benefits from sequence intensification, fertilization, and no-tillage in annual cropping systems. *Soil Security*, 9, 100074.

Strassburg, B. B., Latawiec, A. E., Barioni, L. G., Nobre, C. A., Da Silva, V. P., Valentim, J. F., ... & Assad, E. D. (2014). When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. *Global Environmental Change*, 28, 84-97.

Tarlera, S., Gonnet, S., Irisarri, P., Menes, J., Fernández, A., Paolino, G., ... & Deambrosi, E. (2006). Nitrification and Denitrification Associated with N₂O Production in a Temperate N Fertilized Irrigated Uruguayan Rice Field. *Modern Multidisciplinary Applied Microbiology: Exploiting Microbes and their Interactions*, 416-420.

Ussiri, D., & Lal, R. (2013). The role of nitrous oxide on climate change. In *Soil Emission of Nitrous Oxide and its Mitigation* (pp. 1-28). Springer, Dordrecht.

Zaehele S, Ciaís P, Friend AD, Prieur V (2011) Carbon benefits of anthropogenic reactive nitrogen offset by nitrous oxide emissions. *Nat Geosci* 4:601–605. doi:10.1038/ngeo1207



Figura 9 - Las mediciones de las emisiones de óxido nítrico (N₂O) se realizaron instalando ocho cámaras estáticas de flujo cerrado en cada parcela de los tratamientos medidos en el experimento de Largo Plazo de Rotaciones de La Estanzuela.