



## DINÁMICA DE LAS EMISIONES DE N<sub>2</sub>O, CH<sub>4</sub> Y CO<sub>2</sub> EN MALLINES DE PATAGONIA NORTE

Enriquez, A.S.<sup>1\*</sup>, S.Vangeli<sup>2</sup> & G. Posse<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Instituto Forestal Agropecuario Bariloche-IFAB (CONICET-INTA); <sup>2</sup>Instituto de Clima y Agua INTA Castelar; \*Modesta Victoria 4450, (CP: 8400), Prov. de Río Negro, enriquez.andrea@inta.gob.ar

**RESUMEN:** Actualmente crece el interés por conocer la contribución que los ecosistemas naturales y los manejados hacen al cambio climático. Las actividades humanas están modificando los ecosistemas dramáticamente y hoy, cerca del 40% de la superficie terrestre natural ha sido reemplazada por cultivos o pasturas. Este proceso, ha aumentado la concentración de ciertos gases con efecto invernadero (GEI), mayormente debido al uso de fertilizantes o al mismo cambio en el uso de la tierra. Sin embargo, la emisión basal de GEI desde ecosistemas naturales puede ser no despreciable y amerita ser estudiada. Esta perspectiva es utilizada a nivel mundial para generar inventarios, modelos predictivos o tomar decisiones de uso o conservación de ambientes. En esta oportunidad estudiamos la dinámica natural de emisión de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), metano (CH<sub>4</sub>) y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) desde mallines, humedales continentales de tipo semipermanente con relevancia para la región patagónica. Los gases fueron muestreados según protocolo de GRACEnet y analizados en cromatografía gaseosa. Los resultados muestran que los mallines tienen picos de emisión de estos gases en una ventana temporal pequeña asociada a la primavera tardía, relacionada a momentos de temperatura y humedad favorable para la actividad biológica del suelo. Para los tres GEI, los mallines de tipo húmedo (MH) manifestaron emisiones significativamente mayores que los mallines de tipo mésico (MM), asociado a la mayor humedad y contenido de precursores. La emisión anual acumulada expresada en CO<sub>2</sub> equivalente (C<sub>eq</sub>) para MH fue de 5600 kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> (relación C<sub>eq</sub>-CO<sub>2</sub>:CH<sub>4</sub>:N<sub>2</sub>O = 22:4:1) y de 3200 (20:2:1) para MM. En función de estudios previos de balance de CO<sub>2</sub> y estos nuevos resultados, el balance neto de C<sub>eq</sub> se estima positivo para los mallines de Patagonia norte. Esto puede tener implicancias sobre la estimación de la huella neta de C para la actividad ganadera extensiva de la región.

**PALABRAS CLAVE:** gases de efecto invernadero, humedales semiáridos, metanogénesis-denitrificación-respiración.

### INTRODUCCION

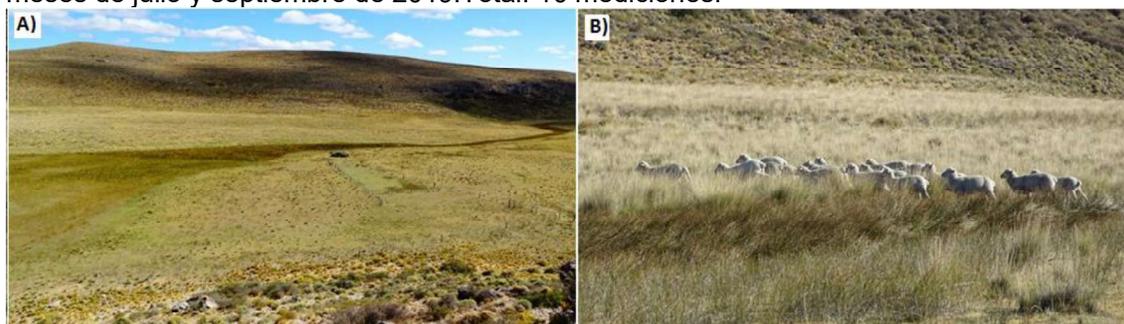
En el actual contexto de cambio climático, cada vez resulta más importante la cuantificación y el monitoreo de las emisiones de GEI desde ambientes naturales y antrópicos. El N<sub>2</sub>O, el CH<sub>4</sub> y el CO<sub>2</sub> son considerados los GEI más importantes en ambientes naturales y ganaderos. La disponibilidad de materia orgánica en el suelo (MOS), el porcentaje de poros llenos de agua y la temperatura edáfica son algunos de los reguladores de las emisiones de estos gases. A su vez, el CO<sub>2</sub> se produce en condiciones aeróbicas, el CH<sub>4</sub> en condiciones netamente reductoras y el N<sub>2</sub>O en ambas. Es por ello que a pesar de que los humedales son considerados ecosistemas secuestradores de carbono (C) atmosférico en el suelo, pueden ser también contribuyentes de otros importantes GEI a las emisiones globales.

Las precipitaciones son escasas en la región este de Patagonia norte, pero a consecuencia de la topografía local se pueden encontrar mallines en los fondos de valle, que son humedales palustres continentales, no permanentes, con una marcada dinámica en el nivel del agua freática. Se ha encontrado una ganancia anual neta de CO<sub>2</sub> en estos ambientes (Enriquez,

2015; Enriquez et al., 2016), pero no se ha evaluado el balance de  $C_{eq}$  considerando también las emisiones de  $N_2O$  y  $CH_4$ . La dinámica del agua superficial y/o sub-superficial modula las condiciones de óxido-reducción y la temperatura edáfica de los mallines por lo que creemos que existen ventanas durante el año donde las condiciones ambientales del suelo favorecerán las emisiones de estos gases. El objetivo de este trabajo fue estudiar la emisión de  $N_2O$ ,  $CH_4$  y  $CO_2$  durante un año, para describir su dinámica en el tiempo y conocer las magnitudes anuales de emisión. Esperamos que las emisiones: a) sean máximas entre noviembre y enero, cuando el nivel de la freática en los mallines todavía es superficial y las temperaturas permiten la actividad microbiana; b) sean mayores en mallines húmedos centrales que en mallines méxicos periféricos, debido al mayor contenido de agua y de MOS; c) sean cero o negativas (balance neto de  $C_{eq}$  positivo = ganancia  $CO_2$  por fotosíntesis > pérdida de  $C_{eq}$  total).

## MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en tres sitios ubicados en la región ecológica de Sierras y Mesetas Occidentales (PMA: 260 mm; TMA: 8°C), que contaban con mallín de tipo húmedo (MH: central, con dominio de Junco) y de tipo méxico (MM: periférico, con dominio de Festuca) (Fig. 1). Los muestreos de gases se realizaron a lo largo de un año, con una frecuencia quincenal entre mediados de noviembre 2018 y mediados de marzo 2019 (Fig. 2). Luego, y a los efectos de registrar emisiones invernales y en primavera temprana, se realizaron muestreos en los meses de julio y septiembre de 2019. Total: 10 mediciones.



**Figura 1.** Sistemas de pastizal natural en Patagonia Norte, bajo uso ganadero ovino. A) Vista panorámica de un mallín de región ecológica de Sierras y Mesetas: Seccional Casa de Piedra. Se puede observar el cauce central (mallín húmedo) rodeado de un área clara y periférica más seca (mallín méxico). Foto: Dra. M.Reissig. B) Se aprecia al frente los Juncos del mallín húmedo y detrás las Festucas del mallín méxico.

Los flujos de  $N_2O$ ,  $CH_4$  y  $CO_2$  se determinaron mediante el método de cámara estática utilizando cámaras ventiladas (Rochette y Bertrand, 2008), siguiendo las recomendaciones de la GRACEnet (Parkin y Venterea, 2010) (Fig. 2). Para estimar la concentración de los GEI se utilizó un cromatógrafo de gases (Agilent Technologies 6890N) equipado con un detector de captura de electrones de 63 Ni (HP-PlotMolesieve, 30 m 9 530 lm 9 25 lm). En cada muestreo se registraron datos de temperatura edáfica y ambiente con termómetro de termocupla y humedad edáfica con sensor portátil Hydrosense®. Se realizó una caracterización del suelo de cada sitio, a 0-5 cm de profundidad: N inorgánico (amonio y nitrato) por destilación por arrastre de vapor (método de Bremner); pH y conductividad eléctrica (CE), en relación suelo-agua 1:2,5 y MOS (Walkley y Black). Todas las metodologías siguieron los protocolos de análisis descritos en Sparks et al. (1996). También se evaluó la productividad primaria neta aérea anual, mediante corte de superficie conocida al final de la temporada de crecimiento y secado del material en estufa de 60 °C, hasta peso constante.

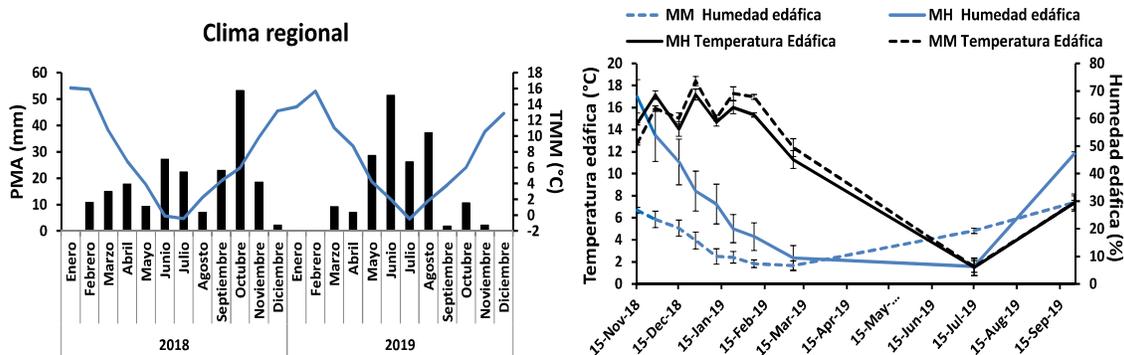


**Figura 2.** Cámara estática cerrada (alto: 20cm y  $\varnothing$ : 35cm) con base fija (10cm, con 5cm enterrados). Forrada en aluminio reflectante. Se muestra termómetro en suelo, ambiente y cámara. Llave de tres vías conectando cámara con jeringa (60 mL) para generación de vacío (-25 psi) y extracción de muestra y vial de tipo Agilent (10 mL). Muestreo de aire pasivo, para calcular flujo de gases de efecto invernadero (GEI) por cromatografía gaseosa.

Los datos se analizaron utilizando un modelo mixto con el tipo de mallín (húmedo/mésico) y las fechas de muestreo como factores fijos y el sitio como factor aleatorio. Se utilizaron medidas repetidas en el tiempo. Para los casos de  $N_2O$  y  $CH_4$  no se cumplió el supuesto de normalidad, por lo que se realizó una transformación logarítmica de los datos. Las emisiones anuales acumuladas fueron analizadas con ANOVAs. El nivel de significación se estableció en 0,05. Se utilizaron los softwares Infostat y RStudio (RStudioTeam, 2020).

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

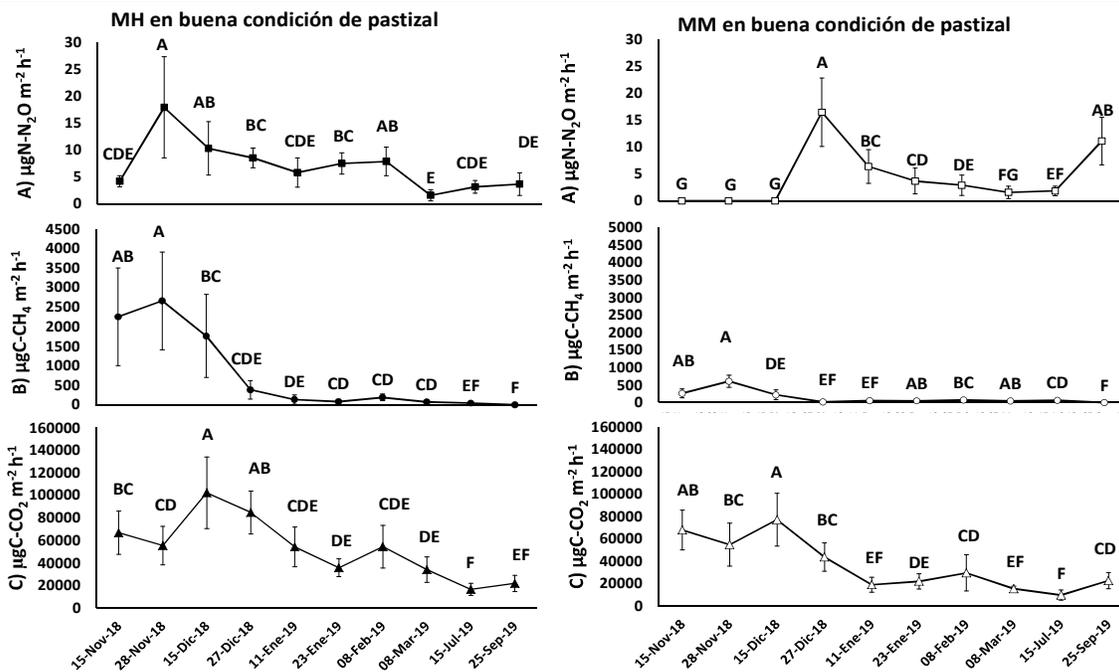
Las condiciones ambientales en los mallines varían a lo largo del tiempo, en función de la dinámica de la humedad edáfica y de la temperatura (Fig. 3 A y B): en invierno, los suelos de mallín están fríos ( $0-8^{\circ}C$ ) y saturados/húmedos (MH: 50-80% y MM: 20-30% de humedad), lo que genera micrositios fríos y con falta de oxígeno. En verano, el suelo se drena favoreciendo la oxigenación del perfil (MH: 10-50% y MM: 5-20% de humedad), y la temperatura edáfica aumenta ( $14-18^{\circ}C$ ). Relacionado a esta dinámica temporal, fue posible detectar variaciones significativas en las emisiones de GEI, sobre todo de  $N_2O$  y  $CH_4$  (Fig. 4AB), con excepción de MH  $N-N_2O$  (Fig. 4A). Las mayores emisiones de  $N_2O$  y  $CH_4$  se producen durante una ventana de tiempo que coincide con el paso de la primavera al verano (aproximadamente 1 mes), cuando el suelo aún está húmedo pero las temperaturas ya serían lo suficientemente elevadas como para que el metabolismo microbiano se active (Fig. 4). Durante el verano, las temperaturas son benignas pero las lluvias son escasas y erráticas, por lo que entonces se encontraron emisiones bajas o nulas debido probablemente a la falta de humedad (Fig. 3B). No obstante, la ocurrencia de eventos importantes de lluvias estivales podrían desencadenar pulsos de emisión desacoplados de la influencia de la freática (Fig. 3A y B). Para el caso del  $CO_2$  (Fig. 4C), la respiración aeróbica mediada por microorganismos del suelo requiere de humedad para ocurrir, pero no necesita de poros del suelo saturados con agua y en anaerobiosis. Por lo tanto, la emisión de  $CO_2$  no cae de manera tan marcada como la de los otros GEI al disminuir la humedad durante el verano. Durante el invierno se registran las emisiones más bajas del año para los tres GEI analizados, probablemente relacionado a las bajas temperaturas que condicionan o inhiben la actividad microbiana (Fig. 4).



**Figura 3.** Caracterización ambiental. A) Las barras indican la precipitación mensual acumulada (PMA) y la línea muestra la temperatura media mensual (TMM) para el período en estudio. B) Variación de la temperatura y la humedad del suelo, a lo largo del período de estudio, para mallín húmedo (MH) en línea entera, y mallín méxico (MM) en línea punteada.

**Tabla 1.** Caracterización de los mallines estudiados (abril 2019). Vegetación: productividad primaria neta aérea (PPNA: Kg materia seca ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>). Suelo 0-5 cm: materia orgánica del suelo (MOS); conductividad eléctrica (CE); N inorgánico. Los datos son el promedio de tres muestras compuestas para cada sitio y tipo de mallín (n=6). Media ± error estándar.

Tipo mallín	Condición del pastizal	PPNA	MOS(g kg <sup>-1</sup> )	pH	CE (dS m <sup>-1</sup> )	Amonio (ppm)	Nitrato (ppm)
MH	Buena	3183±520	53,0±17,7	7,9±0,7	0,8±0,2	13,5±3,2	5,0±0,8
MM	Buena	2663±452	43,0±17,6	8,5±0,4	0,6±0,1	5,0±1,0	2,1±0,7



**Figura 4.** Dinámica de la emisión de gases con efecto invernadero ( $\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) en mallín húmedo (MH) y mallín méxico (MM) durante el período de estudio: A) emisión de óxido nítrico ( $\text{N}_2\text{O}$ ), B) emisión de metano ( $\text{CH}_4$ ) y C) emisión de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Letras distintas indican diferencias significativas ( $p < 0,05$ ). Media ± error estándar.

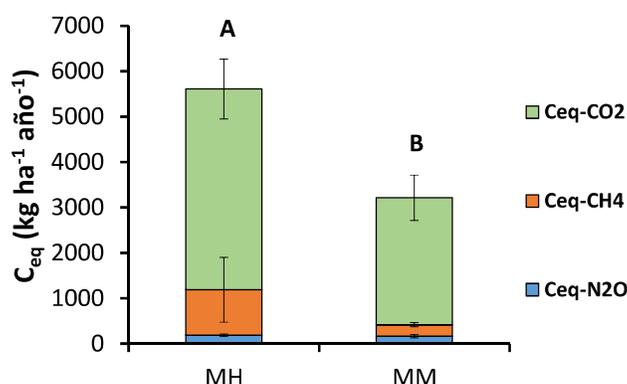
En promedio, las emisiones anuales acumuladas para mallines fueron estimadas en 0,35N- $\text{N}_2\text{O}$  Kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, en 18,8C- $\text{CH}_4$  Kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> y en 2700C- $\text{CO}_2$  Kg ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, magnitudes coherentes con las reportadas para sistemas naturales. Para el caso de  $\text{N}_2\text{O}$ , la bibliografía

reporta valores entre 1 y 4 Kg N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> para pastizales húmedos (van Beek et al., 2011) y entre 0,22 (Luo et al., 2013) y 0,28 Kg N-N<sub>2</sub>O ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> (Wolf et al., 2010) para pastizales semiáridos no pastoreados. Para el caso del CH<sub>4</sub>, muchos de los reportes para ambientes naturales con suelos minerales reflejan flujos de KgC-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> negativos y significativamente menores que los aquí hallados, ej. -3,39 para pastizales semiáridos (Luo et al. 2013) o entre -3,6 y -5,8 en pastizales no fertilizados (Mosier et al., 1991). Sin embargo, los humedales se reportan como fuente de CH<sub>4</sub>, con emisiones de, por ejemplo, 250a 320Kg C-CH<sub>4</sub> ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>(Gómez Casanovas et al., 2020), humedales subtropicales encontrados como reservorios de CO<sub>2</sub>(~ -4200Kg C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>).

Se encontraron mayores emisiones de N<sub>2</sub>O (p=0,0115), de CH<sub>4</sub> (p=0,0316) y de CO<sub>2</sub> (p=0,0008) en MH respecto de MM, a lo largo del tiempo. La humedad en el MH es mayor que la del MM y disminuye de manera más lenta hacia el verano (Fig. 3B) lo que, sumado a la mayor concentración de MOS, amonio y nitratos (precursores) (Tabla 1) favorecería las mayores emisiones (Tabla 2). No obstante, la emisión anual acumulada solo se encontró mayor en MH respecto de MM para C-CO<sub>2</sub> (p=0,0090), aunque se observa la misma tendencia para C-CH<sub>4</sub>(Tabla 2; Fig. 5). La emisión anual acumulada de C<sub>eq</sub> (C<sub>eq</sub>= N<sub>2</sub>O+CH<sub>4</sub>+CO<sub>2</sub>) desde MH duplicó significativamente(p=0,0442) a las de MM (Fig. 5).

**Tabla 2.** Emisión de N<sub>2</sub>O y CH<sub>4</sub>(μg m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>) para mallín húmedo (MH) y mallín méxico (MM), ponderadas para las diferentes estaciones del año. Emisión media anual (EMA) ponderada (μg m<sup>-2</sup>h<sup>-1</sup>) y emisión anual acumulada(EAA)integrada (kg ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>). Letras distintas indican diferencias significativas (p<0,05). Media ± error estándar.

GEI	Tipo	Prim 18	Verano 18-19	Otoño 19	Invierno 19	Prim 19	EMA	EAA
N <sub>2</sub> O	MH	12	7	2	3	4	5±1	0,4±0,1
	MM	0	6	2	2	10	4±1	0,3±0,1
C-CH <sub>4</sub>	MH	2372	263	72	50	3	342±243	29,9±21,3
	MM	426	63	48	61	5	87±16	7,6±1,4
C-CO <sub>2</sub>	MH	66973	56330	34066	21126	21412	37758±5629	3308±493 A
	MM	63132	30502	16549	11614	21781	23876±4269	2092±734 B



**Figura 5.** Emisión anual acumulada, integrada y transformada a carbono equivalente (C<sub>eq</sub>). Letras distintas indican diferencias significativas (p<0,05). Barras: error estándar.

En trabajos previos (Enriquez et al., 2014; Jaramillo, 2019) hemos encontrado en mallines que el amonio se concentra en momentos de reducción del suelo (puede llegar a 80 ppm en campo y a 180 en laboratorio), por detenerse la nitrificación por anoxia; en verano el suelo se oxigena y el amonio puede transformarse en nitrato. Como en laboratorio el nitrato se detectó y en el campo prácticamente no, se infirió que gran parte del nitrato es consumido por la vegetación

en activo crecimiento. Sin embargo, en este trabajo hemos detectado caminos alternativos a la nitrificación, a través de emisiones de  $N_2O$  como producto colateral de la nitrificación (aeróbica) y/o como producto de la denitrificación (anaeróbica).

Finalmente, en trabajos anteriores hemos encontrado un intercambio neto del ecosistema positivo para una diversidad de mallines, medido en el campo con el uso de un IRGA EGM-4 PP-system con cámara (Enriquez 2015; Enriquez y Cremona, 2016). Eso implica que la ganancia anual de  $CO_2$  por actividad fotosintética sobre compensa la pérdida de  $CO_2$  por respiración del ecosistema de humedal. En este trabajo se observa que el aporte más significativo al  $C_{eq}$  total está dado por el  $CO_2$  y, en una muy menor medida, por el  $CH_4$  y el  $N_2O$  (Fig. 5). Entendemos con esto que los mallines serían secuestradores netos de  $C_{eq}$ , lo que justifica la presencia de suelos intrazonales con perfiles profundos y con elevados contenidos de MOS y nutrientes, respecto de la matriz de estepa semiárida donde están inmersos (Enriquez et al., 2014, 2015).

## CONCLUSIONES

El estudio informa sobre las emisiones de GEI desde sistemas naturales en América del Sur, donde los datos de campo son muy escasos o, en el caso de Patagonia Norte, inexistentes hasta la fecha. Caracterizar la magnitud de las emisiones de GEI en ecosistemas naturales bajo manejo ganadero es importante para generar valores de referencia, comprender los factores que las regulan y desarrollar modelos de simulación que las estimen. Esto permitirá simular escenarios de uso/manejo o climáticos, aportando a los mapas de emisiones de GEI del país. La estequiometría del  $C_{eq}$  se manifestaría con un balance neto positivo, dada la capacidad de secuestro de C y las bajas emisiones de GEI detectadas en suelos de mallín. Esto podría tener implicancias sobre la huella neta de C para sistemas ganaderos extensivos de Patagonia Norte, considerando las bajas cargas de animales por unidad de superficie. No obstante, como los factores ambientales (humedad y temperatura) tienen efecto sobre estos ciclos biogeoquímicos, el cambio climático o el deterioro por sobreuso de la tierra podrían afectar estos patrones de manera significativa.

**FINANCIAMIENTO:** Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT 2016-1909)-75%. PNNAT- 1128023 de 2013-2019-10%. FONTAGRO (ATN/RF-16680-RG)-15%.

## BIBLIOGRAFIA

- Enriquez, AS & MV Cremona. 2016. Mecanismos implicados en el secuestro de carbono en suelos de mallines de Patagonia norte. Actas Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo (CAACS). Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
- Enriquez, AS; R Chimner; P Diehl; MV Cremona & GL Bonvissuto. 2015. Grazing intensity levels influence C reservoirs of wet and mesic meadows along a precipitation gradient in Northern Patagonia. *Wetland Ecology and Management*. 23:439-451.
- Enriquez, AS. 2015. Dinámica de carbono y nitrógeno en suelo y agua de mallines de Patagonia Norte y su relación con la degradación por pastoreo histórico. Tesis doctoral. Universidad Nacional del Comahue. Centro Regional Universitario Bariloche. 309 pp.
- Enriquez, AS; R Chimner & MV Cremona. 2014. Long-term grazing negatively affects nitrogen dynamics in Northern Patagonian wet meadows. *Journal of Arid Environment* 109:1-5.
- Gomez-Casanovas, N; DeLucia, NJ; DeLucia, EH; Blanc-Betes, E; Boughton EH; Sparks J; & Bernacchi, CJ. 2020. Seasonal controls of  $CO_2$  and  $CH_4$  dynamics in a temporarily flooded subtropical wetland. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 125: 3
- Jaramillo, ME. 2019. Características funcionales de mallines del Noroeste de Patagonia: adaptaciones de dos especies vegetales a la absorción preferencial de formas de nitrógeno inorgánico. Tesis de grado. Universidad Nacional del Comahue. Centro Regional Universitario Bariloche. 65 pp.
- Parkin, TB & RT Venterea. 2010. Chamber-Based Trace Gas Flux Measurements. In: Follet, R.F., Ed., *Sampling Protocols*, USDA-ARS, Washington DC, 3:1–3.39.

RStudio Team (2020). RStudio: Integrated Development for R. RStudio, PBC, Boston, MA. URL <http://www.rstudio.com/>

Rochette, P; N Bertrand; M Carter & EG Gregorich. 2008. Soil-surface gas emissions. Soil sampling and methods of analysis. CRC Press, Boca Raton, FL 851-861.

Sparks, DL; AL Page; PA Helmke; RH Loeppert; PN Soltanpour; MA Tabatabai; CT Johnson & ME Sumner (Eds.). 1996. Methods of Soil Analysis. Part 3. Chemical Methods. SSSA Book Series N° 5. SSSA, ASA, Madison, Wisconsin, EEUU.

Luo, GJ; R Kiese; B Wolf & K Butterbach-Bahl. 2013. Effects of soil temperature and moisture on methane uptakes and nitrous oxide emissions across three different ecosystem types. *Biogeosciences Discussions*, 10(1).

Mosier, A; D Schimel; D Valentine; K Bronson & W Parton. 1991. Methane and nitrous oxide fluxes in native, fertilized and cultivated grasslands. *Nature*, 350(6316):330-332.

Van Beek, CL; M Pleijter & PJ Kuikman. 2011. Nitrous oxide emissions from fertilized and unfertilized grasslands on peat soil. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 89(3):453-461.

Wolf, B; X Zheng; N Brüggemann; W Chen; M Dannenmann; X Han; MA Sutton; H Wu; Z Yao & K Butterbach-Bahl. 2010. Grazing-induced reduction of natural nitrous oxide release from continental steppe. *Nature*, 464(7290):881-884.

Wang, Z; D Zeng & WH Patrick. 1996. Methane emissions from natural wetlands. *Environ Monit Assess* 42: 143–161.