



Trabajo Final Integrador

Aproximación de factores locales de emisión de  
CO<sub>2</sub> del suelo en pastizales naturales de  
Patagonia Norte bajo ganadería extensiva

Ingeniería Ambiental  
UNRN - Sede Andina

Junio de 2023



### **Información General**

- Título: Aproximación de factores locales de emisión de CO<sub>2</sub> del suelo en pastizales naturales de Patagonia Norte bajo ganadería extensiva.
- Alumna: Macarena Julieta Díaz Leviente
- Carrera: Ingeniería Ambiental
- Directora: Dra. Andrea Enriquez
- Co-directora: Dra. Marina Gonzalez Polo
- Lugar de trabajo: INTA, CRUB (S.C de Bariloche)

### **Dedicatoria**

Se lo dedico a mi familia que me apoya  
y acompaña en cada paso que doy.  
A quienes amo profundamente

## **Agradecimientos**

A la Universidad Nacional de Río Negro por darme la oportunidad de estudiar esta hermosa carrera.

A mi directora Andrea Enriquez por su apoyo, predisposición, paciencia y por ser una gran guía en este camino.

A mi Co-directora Marina Gonzalez Polo por su disposición y ayuda constante.

A Victoria Cremona por su amabilidad y su gran ayuda para iniciar este trabajo.

A los profesores de la carrera que nos han acompañado a lo largo de estos años.

A mis amigas Lu, Lau, Pili, Mili, Agus y Fio por su gran compañía, apoyo constante y aliento.

A mi familia José, Jovita, Fernanda, Benito, Helenita y Clarita porque sin ellos no hubiera sido posible.

A Mauricio por su amor, comprensión y ser mi pilar en esta última etapa.

Al laboratorio de agua y suelos de la Estación Experimental Agropecuaria. INTA Bariloche por permitirme el acceso a sus instalaciones.

Al laboratorio de suelos de la UNCo por permitirme utilizar sus instalaciones y a quienes trabajan allí por su predisposición.

A Clara Fariña y al grupo de MARAS por facilitar las muestras de suelo utilizadas en este trabajo.

## Índice

<b>Resumen</b>	<b>8</b>
<b>1.Introducción</b>	<b>9</b>
<b>2.Antecedentes</b>	<b>10</b>
2.1 Cambio climático	10
2.2 Contexto internacional	11
2.3 Situación Nacional	12
2.3.1 Inventario Nacional de GEI (INGEI)	13
2.3.2 Normativa nacional y provincial	15
2.4 Emisiones de CO <sub>2</sub> desde el suelo	15
2.4.1 Respiración del suelo y respiración microbiana	16
2.4.2 Técnicas de cuantificación de respiración microbiana potencial	19
2.5 Zonas áridas y semiáridas	22
2.5.1 Monitoreo Ambiental de Regiones Áridas y Semiáridas (MARAS)	23
<b>3. Objetivos</b>	<b>25</b>
3.1 Objetivo General	25
3.2 Objetivos específicos	25
<b>4. Hipótesis</b>	<b>25</b>
<b>5. Metodología</b>	<b>26</b>
5.1 Objetivo 1: Comparación de métodos analíticos	26
5.1.1 Sitio de estudio	26
5.1.2 Extracción y acondicionamiento de muestras de suelo	27
5.1.3 Determinación de parámetros para incubación del suelo	27
5.1.4 Determinación de la respiración potencial máxima (R <sub>max</sub> )	28
5.1.4.1 IRGA	28
5.1.4.1.1 Mediciones de Respiración Potencial	30
5.1.4.1.2 Cálculo de respiración	31
5.1.4.2 Trampas de NaOH	32
5.1.4.2.1 Mediciones de Respiración Potencial	32
5.1.4.2.2 Cálculo de respiración	33
5.1.5 Análisis de datos	34
5.2 Objetivo 2: Emisión potencial de CO <sub>2</sub> de suelos de estepa de Patagonia Norte	35
5.2.1 Región de estudio	35
5.2.2 Selección MARAS	38
5.2.3 Determinación de parámetros	39
5.2.4 Mediciones de Respiración Potencial	40
5.2.5 Cálculos de flujo	40
5.2.6 Análisis de datos	41
5.3 Objetivo 3: Análisis de factores de emisión potencial regionales	41

<b>6. Resultados y Discusión</b>	<b>42</b>
6.1 Objetivo 1	42
6.2 Objetivo 2	49
6.3 Objetivo 3	53
6.3.1 Comparación de estimaciones	53
6.3.2 Consideración del factor de emisión	54
6.3.3 Estrategias de gestión ambiental	55
<b>7. Conclusiones</b>	<b>57</b>
<b>8. Bibliografía</b>	<b>60</b>
<b>9. Anexo</b>	<b>67</b>

### Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Línea de tiempo de hitos nacionales e internacionales	13
<b>Figura 2.</b> Curva de crecimiento microbiano	17
<b>Figura 3.</b> Curva Gompertz. L: fase de latencia; $\mu$ : tasa máxima de crecimiento; A: Concentración final de bacterias; G: Inicio fase estacionaria.	19
<b>Figura 4.</b> Cámara cerrada utilizada para la técnica de Trampas de NaOH.	21
<b>Figura 5.</b> Medición de concentración instantánea de CO <sub>2</sub> con uso de IRGA.	21
<b>Figura 6.</b> Sitio de muestreo en el Campo Experimental Anexo de INTA, Pilcaniyeu.	26
<b>Figura 7.</b> Cámaras de incubación construidas para el ensayo.	29
<b>Figura 8.</b> Derecha: Toma de muestra desde cámara de incubación. Izquierda: muestra inmediatamente inyectada al analizador infrarrojo en modo estático	31
<b>Figura 9.</b> Aireación (derecha) y cierre de cámaras luego de la titulación (izquierda)	33
<b>Figura 10.</b> Ubicación geográfica de muestras a estudiar correspondientes al sistema MARAS.	36
<b>Figura 11.</b> Mapa de áreas ecológicas de la Patagonia Norte.	38
<b>Figura 12.</b> Determinación de CC en muestras de suelo	39
<b>Figura 13.</b> Cámaras de incubación previas a la medición y organizadas por tandas	40
<b>Figura 14.</b> Curvas de evolución del CO <sub>2</sub> para suelos muestreados en diferentes momentos y almacenados en distintas condiciones. Respiración acumulada de suelo (mg de C-CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> suelo seco) durante 112 días de incubación utilizando: A) IRGA (líneas amarillas representan el error asociado a las emisiones del año 2022), y B) Trampas de NaOH.	43
<b>Figura 15.</b> Curvas del modelo de Gompertz aplicado a mediciones realizadas con	44

Trampas de NaOH e IRGA

<b>Figura 16.</b> Emisión potencial máxima ( $R_{\max}$ ) promedio ( $\pm$ Desvío estándar) obtenidos en: A) Ensayo del IRGA entre los 4 y 6 días de incubación, y B) Ensayo de Trampas de NaOH entre los 11 y 12 días de incubación.	46
<b>Figura 17.</b> Emisión máxima potencial ( $R_{\max}$ ) estimada con el método IRGA en relación a $R_{\max}$ estimado con Trampas NaOH, considerando A) todas las muestras disponibles menos la fresca (2016, 2020 y 2021) y B) todas las muestras.	47
<b>Figura 18.</b> Emisión potencial de $CO_2$ en parches. Id: Número de identificación: $R_{\max}$ : Respiración potencial máxima en g de C- $CO_2$ $kg^{-1}$ año $^{-1}$ .	50
<b>Figura 19.</b> Emisión potencial de $CO_2$ en interparches. Id: Número de identificación; $R_{\max}$ : Respiración potencial máxima en g de C- $CO_2$ $kg^{-1}$ suelo seco año $^{-1}$ .	51
<b>Figura 20.</b> Emisiones potenciales máximas agrupadas según el área ecológica de pertenencia de la muestra de suelo. DC: Distrito Central Patagónico; MA: Monte Austral; SyM: Sierras y Mesetas Occidentales; PS: Pastizales Subandinos; MO: Monte Oriental.	52

### Índice de Tablas

<b>Tabla 1.</b> Factores de emisión establecidos por IPCC, en función de la complejidad metodológica para determinar en cada categoría del inventario.	14
<b>Tabla 2.</b> Resumen del tratamiento realizado a las muestras.	27
<b>Tabla 3.</b> Ajuste de las curvas obtenidas con el modelo de Gompertz (Figura 15).	45
<b>Tabla 4.</b> Día de medición en el cual se produce el cambio de fase exponencial a fase estacionaria en la técnica de Trampas de NaOH e IRGA, según el tiempo y tipo de almacenamiento.	45
<b>Tabla 5.</b> Comparación IRGA vs. Trampas de NaOH para el análisis de respiración potencial máxima ( $R_{\max}$ ) en laboratorio.	48
<b>Tabla 6.</b> Factores de emisión extraídos del IBA 4 y EFDB más próximos a ser comparado con el caso estudiado. Id para la búsqueda en la base de datos correspondiente.	53

## Índice de Ecuaciones

<b>Ecuación 2.2:</b> Función de Gompertz	18
<b>Ecuación 5.1:</b> Porcentaje de humedad	28
<b>Ecuación 5.2:</b> Cálculo de gramos de suelo en muestras	29
<b>Ecuación 5.3:</b> Volumen que ocupa el gas en el interior del frasco	31
<b>Ecuación 5.4:</b> Cálculo de respiración en mg de C-CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> de suelo seco para la técnica del IRGA	32
<b>Ecuación 5.5:</b> Cálculo de normalidad del ácido clorhídrico	33
<b>Ecuación 5.6:</b> Cálculo de respiración en mg de C-CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> de suelo seco para la técnica de Trampas de NaOH	34
<b>Ecuación 5.7:</b> Prueba de Q	34
<b>Ecuación 5.8:</b> Ecuación de la curva de Gompertz	41
<b>Ecuación 5.9:</b> Ecuación para ajuste de unidades	41

## Siglas

CC: Capacidad de Campo

CMNUCC: Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

EFDB: Base de datos de factores de emisión del IPCC

GEI: Gases de Efecto Invernadero

GUP: Grandes Unidades de Paisaje

IBA: Informe Bienal de Actualización

IBA 4: Cuarta presentación del Informe Bienal de Actualización

INGEI: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero

IPCC: Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático

IRGA: Analizador Infrarrojo de Gases

MARAS: Monitoreo Ambiental de Zonas Áridas y Semiáridas

MOS: Materia Orgánica del Suelo

R<sub>máx</sub>: Respiración potencial máxima/ Emisión máxima potencial

R<sub>s</sub>: Emisión acumulada

## Resumen

Al ratificar la República Argentina la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático a través de la Ley N° 24.295, nuestro país asumió una serie de obligaciones. Entre ellas, informar la emisión de gases de efecto invernadero a través de inventarios bienales, programas nacionales que contengan medidas para mitigar y facilitar la adecuada adaptación al cambio climático o cualquier información relevante para el logro de los compromisos asumidos. El estudio del ciclo global del carbono (C) es prioritario para entender las consecuencias del incremento acelerado de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, así como para diseñar estrategias a fin de reducir sus emisiones y mitigar el cambio climático global. En el presente Trabajo Final Integrador (TFI) se propone determinar la respiración potencial máxima de CO<sub>2</sub> (R<sub>máx</sub>) desde suelos de estepa Patagónica Norte en un contexto de ganadería extensiva por ser una actividad importante para la economía local y regional, con impacto en la dinámica del C del suelo. Para ello se ajustó la metodología de análisis a fin de medir este factor de manera precisa en muestras del sistema MARAS y obtener un panorama regional. Se validó el método propuesto, aumentando la capacidad y precisión de análisis de muestras heterogéneas en tiempo, espacio y método de almacenamiento. Aunque se observaron diferencias de R<sub>max</sub> en la estructura de la vegetación esteparia (parches:  $0,17 \pm 0,04$  t C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>; interparches  $0,08 \pm 0,03$  t C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>), pero en términos generales los resultados señalan una emisión potencial homogénea en todo el territorio estudiado, no hallando diferencias significativas entre regiones ecológicas. Comparado a otro flujo medido a campo producto de la interacción entre el suelo y la atmósfera, los valores hallados poseen el mismo orden de magnitud, lo cual sugiere que sería una fuente de emisión relevante, sobre todo dada su extensa superficie. Además, estos sistemas considerados frágiles son altamente susceptibles a la influencia de los factores climáticos y de las actividades humanas, lo que ocasiona la pérdida de recursos naturales y la capacidad productiva de los suelos. Arribar a un uso sustentable de los pastizales naturales de Patagonia Norte es fundamental para mantener el C almacenado en el suelo y los servicios ecosistémicos asociados a un suelo sano, incluida la compensación de las emisiones de metano entérico, asociadas a la actividad ganadera.

## **1.Introducción**

Desde la revolución industrial en adelante, las actividades humanas, principalmente la quema de combustibles fósiles, han ido aumentando sustancialmente la concentración de gases con capacidad de retener calor en la atmósfera, denominados gases de efecto invernadero (GEI). El efecto invernadero es un fenómeno natural que permite la vida en la tierra, definido como el calentamiento de la temperatura media de la atmósfera mediada por estos GEI. Sin embargo, el rápido incremento de la temperatura con señal antrópica genera un calentamiento adicional de la superficie y la atmósfera de la Tierra, con consecuencias sobre los ecosistemas naturales y la humanidad (NU, 1992).

En 1992 la Cumbre para la Tierra dio lugar a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) como primer paso para afrontar esta problemática, y con la finalidad de estabilizar la concentración de GEI a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático.

En el contexto de la CMNUCC, durante el 2016 entró en vigencia el Acuerdo de París donde se define un esquema de gobernanza y monitoreo global para lograr una reducción drástica de las emisiones de GEI. Argentina presentó como meta absoluta no exceder la emisión neta de 483 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente al 2030, la cual, en el año 2020 fue reducida en un 26% con respecto a la contribución anterior, aumentando de esta manera la ambición climática. Este acuerdo fue recientemente ratificado en la última Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático en Glasgow, 2021.

Dado el compromiso adoptado, resulta de gran relevancia definir niveles de emisión de GEI asociados a las actividades humanas, pero también a los ecosistemas naturales. Por un lado, discernir entre la señal antrópica y la natural colabora en ponderar de manera más acertada la contribución del ser humano al calentamiento global. Por el otro, conocer los flujos de emisión desde sistemas naturales bajo actividad productiva es indispensable para los cálculos de balance de GEI.

Particularmente, en Argentina las zonas áridas y semiáridas componen el 75% del territorio nacional (MAyDS, s.f). Actualmente, el sistema de Monitores Ambientales de Regiones Áridas y Semiáridas (MARAS) evalúa y realiza un seguimiento del estado de la vegetación y el suelo de estos sitios permitiendo generar una línea de base del estado de los pastizales después de más de un siglo de pastoreo, describiendo la estructura y funcionamiento de los

mismos (Oliva et al., 2019). Por tanto, el sistema de MARAS constituye una herramienta de monitoreo útil para una amplia variedad de estudios ambientales y de manejo.

En la actualidad, no existen datos específicos acerca de la capacidad de emisión potencial de CO<sub>2</sub> de suelos de la estepa gramínea-arbustiva que domina los paisajes áridos y semiáridos de Río Negro y Neuquén. Este dato, además de ser útil para los reportes de emisiones potenciales en inventarios de GEI o en cálculos de balance de C potenciales, constituye un parámetro de interés en el estudio de líneas de base para el monitoreo de estos pastizales seminaturales donde se desarrolla ganadería extensiva y cuya superficie comprende un gran porcentaje a nivel provincial y nacional. Si bien la emisión potencial se debería corresponder con aquellos flujos de CO<sub>2</sub> en condiciones ideales de humedad y temperatura, establecer una línea de base actual a nivel regional puede ser de gran utilidad para comparativas futuras, así como para establecer rangos máximos de emisión de CO<sub>2</sub> desde el suelo de estos ambientes. Este trabajo espera brindar una primera aproximación de datos que podrían considerarse en inventarios nacionales de GEI, a fin de contribuir con los compromisos asumidos en los tratados internacionales mencionados. A su vez, aportar información sobre el estado funcional del suelo en los sitios de estudio ya caracterizados desde lo estructural, que podrían utilizarse para la evaluación del manejo sustentable en la región en el marco del cambio climático y uso de las tierras, que modifican los factores que lo controlan.

## **2. Antecedentes**

### **2.1 Cambio climático**

El Sol emite energía en forma de radiación de onda corta (Infrarrojo cercano, visible y UV), de la cual solo cierto porcentaje llega a la Tierra. Del total que llega a la atmósfera, 30% es reflejado hacia el espacio, 20% de la energía solar es retenida por la atmósfera y el 50% restante alcanza la superficie terrestre, calentándola (Caballero et al., 2007). Al calentarse, la superficie de la Tierra transforma la luz solar de alta energía en radiación de baja energía (radiación térmica infrarroja) que se refleja nuevamente hacia la atmósfera. Por su parte, la atmósfera terrestre consta de una delgada capa de gases cuya composición química incluye 78,08% de nitrógeno (N), 20,9% de Oxígeno (O<sub>2</sub>) y 0,9% de argón (Ar) como los más abundantes; estos gases son transparentes a la radiación térmica infrarroja, por ello permiten

tanto el ingreso como la salida de energía. Mientras que gases presentes en menor cantidad, como dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), metano (CH<sub>4</sub>), óxido nitroso (N<sub>2</sub>O), ozono (O<sub>3</sub>) y vapor de agua (H<sub>2</sub>O) pueden absorber y reemitir esta radiación, reteniendo una parte de esta energía proporcionada por el Sol y produciendo lo que se conoce como efecto invernadero (Power Porto, 2009).

En períodos muy cortos, la concentración de gases en la atmósfera con propiedades para provocar efecto invernadero ha aumentado desproporcionadamente. A partir de la era industrial las actividades humanas aumentaron las emisiones de GEI generando que en los últimos cien años la temperatura media se incremente aproximadamente 0,1 °C por década (Power Porto, 2009), contribuyendo a una alteración climática global. Dicha alteración, conocida como cambio climático, se define como un cambio sostenido del clima, atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial y se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (NU, 1992).

El cambio climático es un fenómeno que tiene graves consecuencias para el ambiente, la economía y la sociedad en general, siendo uno de los mayores desafíos que enfrenta la humanidad en la actualidad. Para ello, se han desarrollado tratados internacionales a fin de abordar este tema crítico.

## 2.2 Contexto internacional

Los esfuerzos individuales de un país pueden no ser suficientes para abordar este problema global, por lo que se requiere una acción internacional coordinada y colaborativa. Es por ello que en 1992 se llevó a cabo la Cumbre de la Tierra de Río de Janeiro, donde se reunieron líderes mundiales para abordar los desafíos ambientales globales. Durante la cumbre, se estableció la CMNUCC como un marco legal y político internacional para la acción climática.

La CMNUCC fue adoptada y abierta para su firma en Nueva York en mayo de 1992 y entró en vigor en marzo de 1994, después de ser ratificada por un número suficiente de países.

Su objetivo principal es estabilizar las concentraciones de GEI en la atmósfera a un nivel que prevenga la interferencia humana peligrosa en el sistema climático (UNFCCC, s.f). También buscó fomentar la cooperación internacional para abordar el cambio climático y adaptarse a sus efectos. Con ese propósito se establecieron reuniones anuales de los países firmantes

donde se negocian los compromisos y las medidas a adoptar para alcanzar los objetivos establecidos.

Esta convención ha llevado a la adopción de otros acuerdos internacionales importantes sobre el cambio climático, como el Protocolo de Kyoto y el Acuerdo de París. Los cuales han sido cruciales para coordinar la acción global en la lucha contra el cambio climático y promover un futuro más sostenible.

### 2.3 Situación Nacional

La República Argentina ratificó la CMNUCC el 7 de diciembre de 1993, aprobada por la Ley N° 24.295. Asimismo, ha ratificado el Protocolo de Kyoto que pone en funcionamiento la CMNUCC, mediante la Ley N° 25.438.

En el año 2015, luego de firmar junto a las otras partes en París, la República Argentina adoptó el Acuerdo de París mediante la Ley N° 27.270 y en 2016 entró en vigencia. El acuerdo define un esquema de gobernanza y monitoreo global para lograr una reducción drástica de las emisiones de GEI durante las próximas décadas.

Para facilitar la adopción de políticas en materia de cambio climático y el cumplimiento de estos compromisos, el Poder Ejecutivo Nacional creó en 2016, el Gabinete Nacional de Cambio Climático, el cual se encuentra conformado por ministerios y secretarías de gobierno con competencia sobre las políticas sectoriales de mitigación y adaptación (SGAyDS, 2019).

Finalmente, en diciembre de 2019 fue aprobada la Ley Nacional N° 27.520 de Presupuestos Mínimos de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático Global, la cual establece los presupuestos mínimos de protección ambiental para garantizar acciones, instrumentos y estrategias adecuadas de mitigación y adaptación al cambio climático en todo el territorio nacional (Figura 1).

Esta normativa refleja el firme compromiso de nuestro país en la lucha contra el cambio climático y demuestra la determinación para tomar medidas concretas y efectivas.



**Figura 1.** Línea de tiempo de hitos nacionales e internacionales. Fuente: Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático (2019)

### 2.3.1 Inventario Nacional de GEI (INGEI)

Las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC por sus siglas en inglés) son el núcleo del Acuerdo de París (UNFCCC, s.f.). Estas contribuciones determinan los esfuerzos de nuestro país para reducir las emisiones nacionales y adaptarse a los efectos del cambio climático, de manera de establecer metas absolutas en torno a las emisiones a largo plazo. La meta absoluta asumida en 2020 es de no exceder la emisión neta de 359 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente (MtCO<sub>2</sub>e) al año 2030 (MAyDS, 2022). Para el seguimiento del avance de los compromisos asumidos, se realizan inventarios nacionales de GEI presentados en los Informes Bienales de Actualización (IBA) de la República Argentina a la CMNUCC .

En el año 2021 se presentó el IBA 4, la cuarta presentación nacional de actualización con información sobre los inventarios nacionales de GEI. Dentro de las metodologías implementadas para su elaboración, se encuentran las Directrices del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) de 2006 y el reciente “Perfeccionamiento de 2019 de las Directrices del IPCC de 2006” que incluyen nuevas incorporaciones de fuentes y gases, así como actualizaciones de la metodología de cálculo en base al avance alcanzado en el conocimiento científico y técnico desde la publicación de las primeras directrices.

Este documento se encuentra ordenado en volúmenes por actividad. En el volumen 4, correspondiente a la sección de Agricultura, silvicultura y otros usos de la tierra, se hallan seis categorías de uso de la tierra: tierras forestales, tierras de cultivo, pastizales, humedales, asentamientos y otras tierras. Estas categorías de tierras se subdividen en dos subcategorías: tierras que se mantienen en la misma categoría (e.g., pastizales que se mantienen como

pastizales) y tierras convertidas de una categoría a otra, contemplando el cambio de uso de suelo. En cada una de estas subcategorías se contabilizan los cambios producidos en las existencias de cinco depósitos de C: biomasa aérea, biomasa subterránea, madera muerta, hojarasca y materia orgánica del suelo (MOS) y las emisiones de gases no CO<sub>2</sub>. Todas las tierras consideradas en el inventario de GEI corresponden a tierras gestionadas, es decir, aquellas que presentan intervención humana donde se han aplicado prácticas para la realización de actividades productivas, ecológicas o sociales.

Para calcular las emisiones y absorciones de GEI de cada una de estas fuentes de emisión o absorción se determinan los datos de actividad (DA) y los factores de emisión (FE).

$$DA \times FE = \text{Emisiones/absorciones de GEI por fuente o sumidero} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Mientras que los datos de actividad se calculan considerando la magnitud de las actividades humanas que dan lugar a esas emisiones o absorciones, los factores de emisión se pueden determinar a través de 3 niveles de cálculo, donde a medida que se aumenta de nivel se mejora la exactitud del inventario y se reduce la incertidumbre, pero la complejidad y los recursos necesarios para realizar los inventarios también son mayores (Tabla 1).

**Tabla 1.** Factores de emisión establecidos por IPCC, en función de la complejidad metodológica para determinar en cada categoría del inventario. Fuente: IPCC (2006)

Nivel 1 (Tier 1)	Nivel 2 (Tier 2)	Nivel 3 (Tier 3)
Incluyen varias hipótesis para simplificar y se dispone de una base de datos del IPCC (EFDB) como fuente de estimaciones de datos de las diferentes actividades. Los datos son poco precisos a nivel de espacio.	Se aplican factores de emisión y de cambio en las existencias específicas del país o de la región. Siendo estos más apropiados para las regiones climáticas y las categorías del país en cuestión. Se utilizan datos de resolución temporal, espacial y de actividad más desagregada, de manera que se correspondan con los coeficientes definidos para el país por regiones específicas y por categorías de uso especializado de la tierra o de ganado.	Se utilizan métodos de orden superior, incluidos modelos y sistemas de medición de inventario hechos a medida, para satisfacer las circunstancias nacionales basados en datos de la actividad de alta resolución. Pueden incluir muestreos de campo exhaustivos realizados en intervalos regulares, datos sobre suelos y datos de la actividad de uso y gestión de la tierra que integran varios tipos de monitorización.

A través de la metodología descrita, la República Argentina hace uso de diferentes recursos y esfuerzos para actualizar cada dos años el estado de situación como contribuyentes al Cambio Climático Global. Por tanto, la comprensión del proceso de elaboración del IBA permite identificar cómo se puede contribuir en su desarrollo, las fuentes de información disponibles y otros aspectos relevantes para su presentación.

### 2.3.2 Normativa nacional y provincial

A partir de la reforma constitucional de 1994, Argentina comenzó a priorizar temáticas ambientales a través de la incorporación del artículo 41, el cual otorga el derecho a toda persona a gozar de un ambiente sano y equilibrado, así como el deber de preservarlo. Este mismo artículo además establece que le compete a la Nación dictar las normas de presupuestos mínimos de protección ambiental, mientras les reserva a las provincias la potestad de sancionar las normas complementarias y de extender el resguardo ambiental. En concordancia, la provincia de Río Negro, por medio de la Ley Provincial N° 5.140 sancionada en el año 2016, regula la intervención provincial dirigida a reducir la emisión de GEI y a adoptar medidas de adaptación frente al cambio climático.

En el caso de la provincia de Neuquén, se trabaja desde el 2021 en la elaboración del Plan provincial de respuesta de adaptación y mitigación al cambio climático y adhirió a la Ley Nacional N° 27.520.

### 2.4 Emisiones de CO<sub>2</sub> desde el suelo

Para avanzar en la reducción de los GEI, tal como lo establece la normativa, es imprescindible contar con datos precisos sobre las emisiones de GEI del país provenientes de diversas fuentes, entre las cuales se destacan las emisiones de CO<sub>2</sub> proveniente del suelo.

Los suelos representan la mayor reserva terrestre de C, albergando más del doble de C que la atmósfera (Raich & Potter, 1995; Davidson & Janssens, 2006), por lo que cualquier cambio en sus reservas puede transferir cantidades sustanciales de C hacia o desde la atmósfera (Reichstein et al., 2013; Rustad et al. al., 2000) en forma de CO<sub>2</sub>. De esta manera, la dinámica del CO<sub>2</sub> entre estos compartimentos adquiere una gran importancia para determinar el papel que desempeña el suelo como fuente o sumidero en los ecosistemas y, por ende, su influencia

en el equilibrio climático global. Este gas se produce como resultado de la descomposición de la MOS por las comunidades microbianas y fauna del suelo, así como por la respiración de las raíces de las plantas y micorrizas asociadas (Ayala Niño et al., 2018), siendo la descomposición microbiana de compuestos orgánicos el proceso más importante que lo genera (Pérez Batallón et al., 1998). Durante la descomposición, una parte del C es devuelto a la atmósfera en forma de CO<sub>2</sub>, mientras que otra se transforma en compuestos más sencillos o se almacena en las propias estructuras microbianas (C inmovilizado). Este proceso de emisión forma parte de la respiración del suelo, definida como una medida del CO<sub>2</sub> liberado de este sistema.

A nivel global, la respiración del suelo representa el segundo mayor flujo de CO<sub>2</sub> en el planeta después de la fotosíntesis y supera muchas veces al emitido por la quema de combustibles fósiles (INBIOP, 2022). Por ello, conocer la magnitud y dinámica de estas emisiones, y comprender los factores que las regulan, resulta fundamental para diseñar estrategias efectivas de mitigación y promover acciones concretas para combatir el cambio climático.

#### 2.4.1 Respiración del suelo y respiración microbiana

La respiración del suelo es un parámetro de suma importancia para determinar la salud de un ecosistema y una fracción de esta respiración es producto de la actividad de las comunidades microbianas. La respiración microbiana es un proceso que refleja la actividad biológica del suelo y se pone de manifiesto a través del desprendimiento de CO<sub>2</sub> o el consumo de O<sub>2</sub> resultante del metabolismo de los microorganismos. Constituye así un importante indicador de calidad del suelo, que puede ser involucrado en un sistema de indicadores de fácil manejo (Mora Delgado, 1999) y responder a los disturbios en una escala de tiempo menor en comparación a los parámetros físicos y químicos del suelo (Ferrerías et al., 2009).

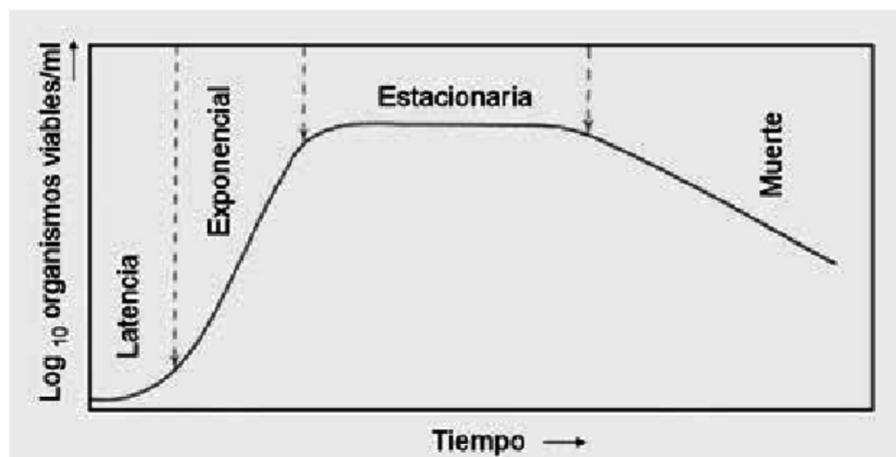
A su vez, las comunidades de estos microorganismos presentes en el suelo, juegan un rol central en los procesos que permiten mantener la disponibilidad de nutrientes, mineralización de la MOS, ciclado de nutrientes y humificación (Toledo, 2020). Además, favorecen la formación de agregados en el suelo, promueven el crecimiento vegetal y la resistencia a los procesos de erosión en los ecosistemas. Es por ello, que su actividad es un factor clave en la fertilidad del suelo, pero también en la estabilidad y funcionamiento de los ecosistemas.

Todos los microorganismos heterótrofos, por definición, tienen la propiedad de degradar la materia orgánica (MO), obteniendo la energía que necesitan para su desarrollo a través de la descomposición de compuestos orgánicos tales como celulosa, proteínas o nucleótidos (García Izquierdo et al., 2003). En estas reacciones de oxidación, de la MO el oxígeno funciona como aceptor final de electrones obteniéndose como producto final  $\text{CO}_2$  y agua.

La reacción general de descomposición de la MO por los microorganismos heterótrofos es:



Esta tasa de producción de  $\text{CO}_2$  indica la tasa de descomposición de la MOS y, en consecuencia, la cantidad de C que se pierde del suelo producto de la actividad de estos microorganismos. La misma varía en función de diferentes factores, como el uso del suelo, mineralogía, cobertura vegetal, prácticas de manejo, entre otros (Vásquez et al., 2013). Asimismo, se observan diferentes fases durante el crecimiento microbiano que se vinculan con la respiración microbiana por ser la forma en la cual obtienen la energía necesaria para llevar a cabo sus funciones biológicas (Figura 2).



**Figura 2.** Curva de crecimiento microbiano. Fuente: Cobas et al. (2007)

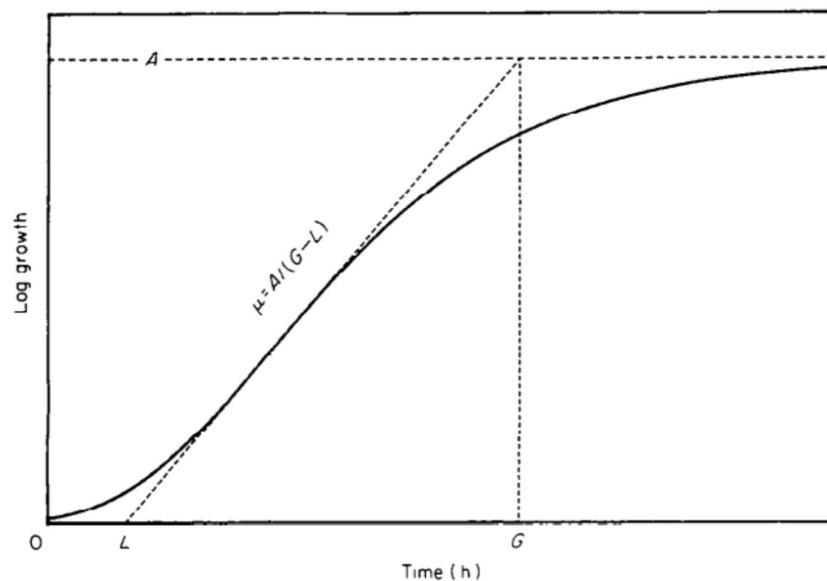
La fase de latencia es de adaptación, donde la tasa de respiración puede ser relativamente baja mientras los microorganismos se ajustan a su entorno y optimizan su metabolismo. El ingreso a la fase exponencial muestra que los microorganismos se han adaptado y la tasa de respiración aumenta rápidamente a medida que los microorganismos se multiplican, ya que se requiere una cantidad significativa de energía para el crecimiento y la reproducción microbiana. Cuando los recursos comienzan a agotarse o las condiciones ambientales se vuelven menos favorables, el crecimiento se limita y no se produce aumento ni disminución

netos del número de células (Madigan et al., 2004), la tasa de respiración se estabiliza y da comienzo a la fase estacionaria. Finalmente, en la fase de muerte la tasa de respiración disminuye drásticamente, ya que los microorganismos luchan por sobrevivir en un entorno hostil.

Por lo tanto, es factible utilizar modelos que expliquen el crecimiento microbiano para modelar la respiración microbiana en el suelo. Estos modelos matemáticos permiten comprender y predecir la tasa de respiración microbiana y, por ende, las emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas.

Existen diferentes modelos matemáticos utilizados para describir el comportamiento de los microorganismos. Los modelos primarios refieren a la evolución de concentraciones bacterianas en función del tiempo basados en parámetros cinéticos: velocidad específica de crecimiento, fase de latencia y concentración final de bacterias. Estos parámetros se pueden obtener al ajustar un modelo primario a los datos experimentales de crecimiento (Gonzales et al., 2022). Zwietering (1990), luego de realizar una comparación de modelos utilizados en crecimiento microbiano, estableció que el modelo de Gompertz (Figura 3) es el mejor de los modelos de primer orden para describir este comportamiento. Siendo un modelo primario, su objetivo es describir matemáticamente la curva de crecimiento generada por los microorganismos de interés bajo condiciones ambientales definidas, con el fin de estimar los parámetros cinéticos que conforman la Ecuación 2.2. Utilizando este modelo es posible determinar parámetros cinéticos a partir de datos experimentales de respiración microbiana mediante la aplicación de diferentes técnicas de respiración microbiana realizadas en laboratorio.

$$f(t) = Ae^{-Le^{\mu t}} \quad (\text{Ec. 2.2})$$



**Figura 3.** Curva Gompertz. L: fase de latencia;  $\mu$ : tasa máxima de crecimiento; A: Concentración final de bacterias; G: Inicio fase estacionaria. Fuente: Garthright (1991)

#### 2.4.2 Técnicas de cuantificación de respiración microbiana potencial

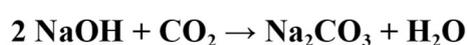
La respiración microbiana puede medirse en el laboratorio bajo condiciones controladas de humedad, temperatura y luz. Esto otorga una medición considerada “potencial”, es decir que muestran el escenario de mayor emisión posible. Por tanto, proporciona un límite superior por debajo del cual se espera encontrar el valor real de emisiones de  $\text{CO}_2$  en el ambiente. La determinación de la respiración microbiana potencial consiste en la cuantificación de la cantidad de  $\text{CO}_2$  emitido por los microorganismos del suelo durante un determinado periodo de incubación, en condiciones óptimas de humedad y temperatura en el laboratorio.

En la práctica, durante la incubación, la actividad microbiana se reduce considerablemente cuando el contenido de humedad cae por debajo del 30%, no obstante, el exceso de humedad origina un desplazamiento de aire, provocando condiciones de anaerobiosis. Se puede decir que el nivel óptimo de humedad es el comprendido entre 50% y 70% de la capacidad máxima de retención hídrica del suelo (capacidad de campo). Mientras que la temperatura aconsejable durante los ensayos de laboratorio se sitúa entre los 25 y 30°C, temperaturas excesivamente bajas o altas conducen a una ralentización de la actividad microbiana (García Izquierdo et al., 2003).

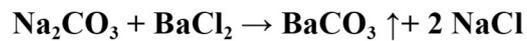
Con respecto al tiempo de medición escogido, el método no ha sido convenientemente estandarizado por la mayoría de los autores, lo que lleva a confusiones a la hora de realizar nuevos experimentos (Nguyens et al., 2014). Por ello, resulta aconsejable considerar algunos aspectos a la hora de escoger un tiempo óptimo de incubación para casos de estudio en particular, entre ellos, el tipo de suelo y su generación de CO<sub>2</sub> en relación al volumen de la cámara, con el objetivo de evitar la saturación del sistema. También es importante contemplar el número de muestras con la que se trabaja para garantizar que los tiempos de incubación de cada muestra se respeten adecuadamente.

En cuanto a las condiciones de almacenamiento de las muestras, estas pueden ser decisivas para los resultados de este tipo de ensayos. Idealmente los estudios se realizan en suelos recién recolectados procurando la presencia de microorganismos activos, pero no siempre es posible por el tiempo de transporte y procesamiento o la cantidad y variedad de ensayos que se realizan en tiempo y espacio. Dentro de los métodos más comúnmente utilizados para almacenar suelos para análisis microbiológicos se halla la refrigeración (4°) del suelo húmedo del campo. Sin embargo, hay estudios que advierten contra cualquier tipo de almacenamiento y otros no señalan ningún inconveniente en hacerlo (Stenberg et al., 1998). Por lo tanto, los efectos de la temperatura de incubación y el tiempo de almacenamiento del suelo a incubar en las mediciones de actividad biológica pueden variar de acuerdo al tipo de suelo (Lee et al., 2007). De esta manera, resulta útil conocer la representatividad de los resultados obtenidos si se analizan muestras almacenadas en diferentes condiciones.

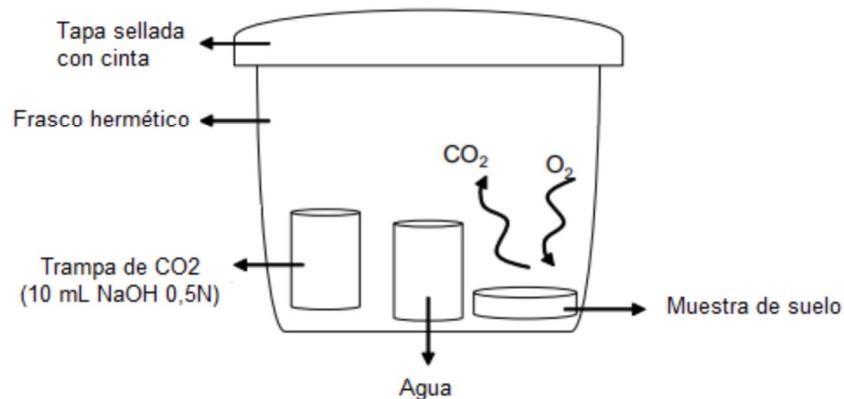
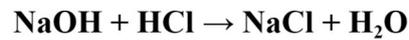
Dentro de las técnicas que pueden emplearse en laboratorio se encuentra la ampliamente utilizada técnica de las Trampas de hidróxido de sodio (NaOH). Esta técnica consiste en aislar una cantidad de atmósfera del medio ambiente, utilizando una cámara de incubación, para medir el CO<sub>2</sub> emitido por una muestra de suelo en un intervalo de tiempo determinado. La captura del CO<sub>2</sub> se realiza en una “trampa” alcalina, generalmente de NaOH (de allí su nombre), para luego cuantificar a través de una titulación el excedente que no reaccionó con el CO<sub>2</sub> a cuantificar (titulación reversa o retrotitulación), (Figura 4). La reacción química producida en las Trampas NaOH se muestra a continuación:



Se precipita el  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  con  $\text{BaCl}_2$ :

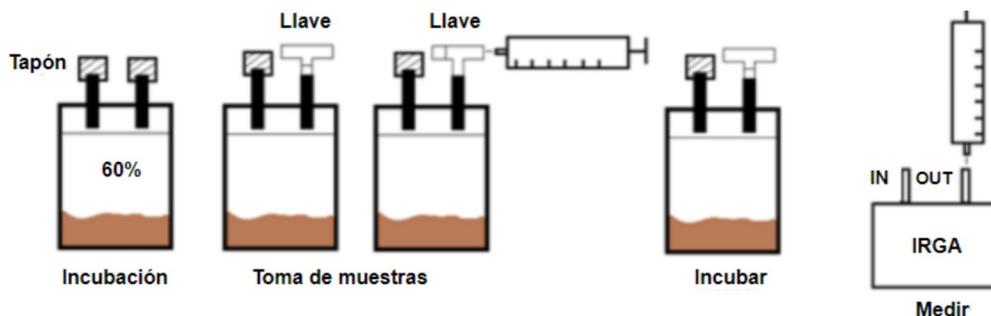


Finalmente, en la retrotitulación, se neutraliza el  $\text{NaOH}$  excedente:



**Figura 4.** Cámara cerrada utilizada para la técnica de Trampas de  $\text{NaOH}$ .

Más recientemente se han comenzado a emplear otras técnicas, que incluyen analizadores de gases con uso de un sensor infrarrojo (IRGA, del inglés *infrared gas analyzer*) para cuantificar la liberación de  $\text{CO}_2$  desde muestras de suelo, utilizando cámaras herméticas. En este enfoque, se toman muestras de aire de dichas cámaras en diferentes intervalos de tiempo durante la incubación y, mediante el uso de jeringas, se inyecta la muestra en el IRGA para analizar la concentración de  $\text{CO}_2$  en partes por millón (ppm) y calcular la tasa de emisión (Luo & Zhou, 2006), (Figura 5).



**Figura 5.** Medición de concentración instantánea de  $\text{CO}_2$  con uso de IRGA. Fuente: Protocolo interno Lab. Suelos y Aguas INTA Bariloche (2021).

Ambas técnicas han sido utilizadas de manera puntual en suelos de la Patagonia (e.g., Peri et al., 2015; Enriquez, 2015; Enriquez & Garcia Falabella, 2022) pero no se han utilizado para determinar la respiración potencial microbiana de suelos a nivel regional, como primera aproximación de datos en relación al CO<sub>2</sub> del suelo emitido en la zona. Tampoco se han hallado estudios que realicen una comparación directa entre ambos métodos, para evaluar cual proporciona resultados más precisos y fiables frente a las condiciones específicas que se plantean. Por esto, es importante conocer para cada técnica sus alcances y limitaciones en cuanto al tiempo necesario para obtener resultados deseados, los costos que conllevan las determinaciones en laboratorio, la capacidad de procesamiento de las muestras y la sensibilidad de medición. En este sentido, la elección de la técnica puede variar en su capacidad para obtener valores de emisión potencial neta de CO<sub>2</sub> precisos, sobre todo en suelos extremos, con muy bajos o muy altos contenidos de MOS, o con tiempos de muestreo heterogéneos. De esta manera, es posible seleccionar con mayor certeza la técnica más adecuada para el estudio que se desea llevar a cabo.

La adecuación de las técnicas a las particularidades de cada caso resulta fundamental para la generación de datos propios de calidad. No obstante, debido a la escasez de datos específicos sobre las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes del suelo, se recurre a valores de referencia internacionales para evaluar y monitorear la calidad ambiental. Sin embargo, estos valores probablemente no reflejen las características y particularidades locales, limitando la capacidad de comprender y abordar de manera precisa los desafíos ambientales en la región. Esta situación plantea la necesidad de contar con indicadores ambientales adaptados y relevantes para la región de Patagonia Norte. Por consiguiente, ajustar técnicas a las particularidades del caso, resulta relevante para construir datos propios de calidad.

### 2.5 Zonas áridas y semiáridas

A nivel nacional, el 75% del territorio está comprendido por zonas áridas y semiáridas (MAyDS, s.f). A nivel regional, el 87% de la Patagonia se clasifica como tierras secas (Gaitán et al., 2019), y se caracteriza por suelos con escasa MOS, un déficit hídrico anual moderado a fuerte y textura gruesa, siendo clasificados como Entisoles y Aridisoles (Mendez Casariego et al., 2005).

Los pastizales que prevalecen en estas regiones, dominados por gramíneas, arbustos, hierbas y graminoides, proveen múltiples servicios ecosistémicos como forraje para el ganado, fuente de calor en viviendas, flora ornamental y usos medicinales. Por otro lado, regulan el funcionamiento de cuencas hídricas y procesos de erosión de suelo (Mazzoni & Rabassa 2013), proporcionando hábitat a múltiples especies, muchas de ellas endémicas.

A su vez, los pastizales de Patagonia Norte constituyen superficies extensas, por lo cual son una importante reserva de C y controlan funciones clave como el ciclado de nutrientes e infiltración de la región (Easdale, 2021). Por este motivo, pequeños cambios en los procesos de captura (a través de la fotosíntesis) o de pérdida de CO<sub>2</sub> a través de la respiración en estos ecosistemas pueden tener grandes impactos sobre la concentración de CO<sub>2</sub> de la atmósfera, y por tanto contribuir al cambio climático (Carbonell-Sillette et al., 2022).

Durante más de un siglo se han producido modificaciones intensas en los ecosistemas patagónicos, sin tener en cuenta el uso sostenible de estos pastizales naturales, producto de la ganadería extensiva que se desarrolla como principal actividad. Estas prácticas han acentuado las condiciones de aridez al disminuir o eliminar la cobertura vegetal y se ha alterado el intercambio de CO<sub>2</sub> debido a cambios en las tasas de fotosíntesis y/o respiración del suelo, lo cual se intensifica significativamente en pastoreos de altas cargas instantáneas (Fariña, 2018) o históricos (Enriquez, 2015).

### 2.5.1 Monitoreo Ambiental de Regiones Áridas y Semiáridas (MARAS)

En la actualidad, se está desarrollando el Monitoreo Ambiental de Zonas Áridas y Semiáridas a través del sistema MARAS, por sus siglas. Se trata de una red de aproximadamente 400 monitores de terreno instalados en la Patagonia por el INTA entre 2008 y 2015; los sitios se revisitan cada cinco años y en ellos se describe la vegetación y la cobertura del suelo, se obtienen fotografías y se colectan muestras de suelo para analizar en laboratorio (SIPAS, s.f.). Estos monitores son una herramienta útil para entender el efecto de eventos de sequía y catástrofes naturales, así como también son adecuadas para orientar políticas de mitigación, implementar estrategias de rehabilitación de sistemas degradados por actividades como la ganadería y generar conocimiento de gran valor como, por ejemplo, proyecciones del efecto del cambio climático de aquí a 30-50 años (Oliva et al., 2019).

En el marco de este trabajo, se propone utilizar las muestras disponibles de suelo para medir la respiración microbiana potencial, a los efectos de evaluar su incorporación como un indicador adicional. Este indicador podría contribuir con información respecto de aspectos funcionales de la salud del suelo en el marco del proyecto MARAS, y en lo expuesto en los tratados internacionales adoptados por el país.

Por lo antes expuesto, antes de utilizar las muestras colectadas por el sistema MARAS en diferentes momentos y lugares, resulta fundamental determinar si los valores que se obtienen con muestras extraídas con varios años de antelación siguen siendo representativos. Este análisis permitirá determinar si todavía son apropiadas para informar la emisión potencial de CO<sub>2</sub> en la actualidad, así como evaluar la viabilidad de analizarlas en un momento posterior a su recolección. La importancia de esta evaluación radica en la gran cantidad de muestras con las que se opera y la diversidad de parámetros que se analizan en el marco del monitoreo.

En el contexto del presente estudio, la incorporación de este nuevo indicador al monitoreo ambiental MARAS se presenta como una oportunidad relevante, dado que los muestreos siguen una estructura determinada y ya definida, por tanto la adición de esta medición no involucra un esfuerzo significativo y, a su vez, contribuiría a obtener información precisa sobre las emisiones potenciales de CO<sub>2</sub> desde los suelos de la estepa norpatagónica, lo cual permitiría una caracterización específica de la zona y proporcionaría una fuente de información sólida y confiable para respaldar la toma de decisiones en relación a este aspecto. En última instancia, contar con datos más precisos y accesibles para los responsables de la gestión y toma de decisión en este ámbito aumentaría la efectividad y la confiabilidad de las medidas implementadas. Además, esta información puede ser utilizada para facilitar el diseño de estrategias de mitigación y adaptación al cambio climático, y para promover prácticas de manejo sostenibles que equilibren la conservación ambiental con las necesidades económicas y sociales de la región.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo General**

Evaluar la emisión potencial de CO<sub>2</sub> en suelos de estepa de Patagonia Norte para establecer líneas de base de factores de emisión específicos, que puedan utilizarse en la construcción de estrategias regionales de gestión ambiental de pastizales naturales bajo manejo ganadero extensivo.

#### **3.2 Objetivos específicos**

I. Comparar dos métodos analíticos de respiración potencial del suelo utilizando muestras recolectadas en diferentes momentos, con el fin de determinar sus respectivas precisiones y velocidades de respuesta e identificar el método más adecuado para el caso en estudio.

II. Evaluar la emisión potencial de CO<sub>2</sub> del suelo a nivel regional, utilizando el método seleccionado en el objetivo I para muestras del sistema MARAS.

III. Comparar factores de emisión de suelo estimados en el objetivo II desde pastizales naturales de Patagonia Norte con factores internacionales (IPCC) a fin de proporcionar datos para la construcción de estrategias regionales de gestión ambiental.

### **4. Hipótesis**

I. a) Existirá una correlación entre los valores de emisión potencial de CO<sub>2</sub> evaluados con el método del IRGA y el método de las Trampas de NaOH. El método de IRGA resultará más adecuado para utilizar en la determinación de las muestras correspondientes al sistema MARAS (Objetivo 2) debido a su mayor sensibilidad y velocidad de respuesta para suelos esteparios.

I. b) Dentro de la misma metodología, no existirán diferencias significativas entre muestras antiguas (2016, 2018, 2020) y muestras frescas (2022) recolectadas del mismo sitio, ni entre diferentes protocolos de almacenamiento de las muestras (secas a temperatura ambiente o almacenadas en frío).

II. Los bajos contenidos de MOS dados por las condiciones dominantes de aridez de la estepa darán como resultado una baja emisión potencial de CO<sub>2</sub> del suelo, siendo mayor en parches vegetados (islas de fertilidad) que en interpaches no vegetados, y variará entre regiones ecológicas debido a diferentes aspectos climáticos y ambientales.

III. a) El factor de emisión potencial medio de CO<sub>2</sub> en suelo de estepa será menor que el factor de emisión utilizado por default de tipo Nivel 1 (IPCC), en los informes de actualización del país como parte del CMNUCC para ambientes similares, dado que no se contemplan de manera específica los pastizales donde se desarrolla ganadería extensiva.

III. b) El uso del factor local ponderado por la superficie ocupada por la estepa en Patagonia Norte, en su expresión potencial, dará como resultado una menor emisión de CO<sub>2</sub> desde el suelo que si se aplicara el factor más próximo de IPCC.

## 5. Metodología

### 5.1 Objetivo 1: Comparación de métodos analíticos

#### 5.1.1 Sitio de estudio

Se trabajó en el Campo Experimental Anexo de INTA ubicado en Pilcaniyeu (41°02' 9.5" S;71°31' 21.5" O) a 1070 m s.n.m. (Figura 6), el cual contaba con muestras tomadas durante los años 2016, 2020 y 2021 en el mismo cuadro para trabajos previos. Durante 2022 se realizó una nueva campaña para recolectar muestras frescas del mismo sitio a los efectos de realizar la comparación de la respuesta entre muestras frescas y antiguas.



**Figura 6.** Sitio de muestreo en el Campo Experimental Anexo de INTA, Pilcaniyeu.

El paisaje en esta zona es dominado por estepas graminoso-arbustivas, con predominio de suelo clasificado como Aridisol. La zona cuenta con un régimen hídrico semiárido, con inviernos fríos y húmedos, veranos templados y secos, y fuertes vientos (Gaitán et al. 2019). La temperatura media anual es 7,7 °C y la precipitación media anual es 258 mm (período 1986-2013) concentrada 70 % en otoño e invierno (Fariña, 2018).

### 5.1.2 Extracción y acondicionamiento de muestras de suelo

Las muestras de suelo fueron compuestas de tres submuestras tomadas de manera aleatoria a 0-10 cm de profundidad tanto en parches como en interparches de vegetación esteparia . Posteriormente, se colocaron en bolsas de polietileno rotuladas para ser transportadas al laboratorio, donde se homogeneizaron y tamizaron en malla de 2 mm. En la Tabla 2 se detalla el tratamiento previo y la forma de almacenamiento de las muestras.

**Tabla 2.** Resumen del tratamiento realizado a las muestras.

Año de muestreo	Tratamiento previo	Forma de almacenamiento	Marco
2016	Secada a temperatura ambiente	Oscuridad a temperatura ambiente	Previo al TFI
2020	Secada a temperatura ambiente	Oscuridad a temperatura ambiente	Previo al TFI
2021	Secada a temperatura ambiente	Oscuridad y freezadas a -14 °C	Previo al TFI
2022	Sin secado previo. Mantuvieron la humedad de campo y se utilizaron antes de dos semanas desde su extracción	Oscuridad y refrigeradas a 4 °C	Realizado en el marco del TFI

### 5.1.3 Determinación de parámetros para incubación del suelo

A los efectos de establecer la humedad óptima para las incubaciones de los suelos utilizados, se determinó la capacidad de campo (CC), interpretada como el contenido de agua o humedad que un suelo es capaz de retener luego de la saturación y el drenaje libre por 48 hs,

sin pérdida por evaporación. Para ello, se pesaron 100 g de suelo en balanza granataria, y se colocaron en un envase perforado en la parte inferior. Luego se añadió lentamente agua desmineralizada hasta alcanzar el punto de saturación, registrando su peso saturado, y su peso a las 24 h y 48 h posteriores. A partir del cálculo de la Ecuación 5.1 se determinó la CC y se estimó el volumen necesario de agua para llegar al 60% de ese valor, considerado como la cantidad óptima de humedad para el buen desarrollo de los microorganismos del suelo (García Izquierdo et al., 2003)

$$\% \text{ humedad} = \frac{\text{Peso suelo humedo} - \text{Peso suelo seco}}{\text{Peso suelo seco}} \cdot 100$$

Ec. 5.1

En el caso de las muestras frescas, se calculó previamente el porcentaje de humedad a campo. Para ello, se pesaron las muestras antes y después de su secado en estufa a 105 °C y se calculó su contenido de humedad como indica la Ecuación 5.1. Seguidamente se añadieron los mL de agua desmineralizada para llegar al porcentaje de humedad requerido (60%).

Además, se determinó la densidad aparente en suelo disturbado para calcular los gramos de suelo a incubar según el volumen del frasco. Se estimó en el laboratorio considerando el peso del suelo tamizado presente en un vaso de precipitados de 100 cm<sup>3</sup> y dividiendo el peso sobre el volumen, lo cual dió como resultado una densidad aparente de 0,9 g cm<sup>-3</sup>.

#### 5.1.4 Determinación de la respiración potencial máxima (R<sub>max</sub>)

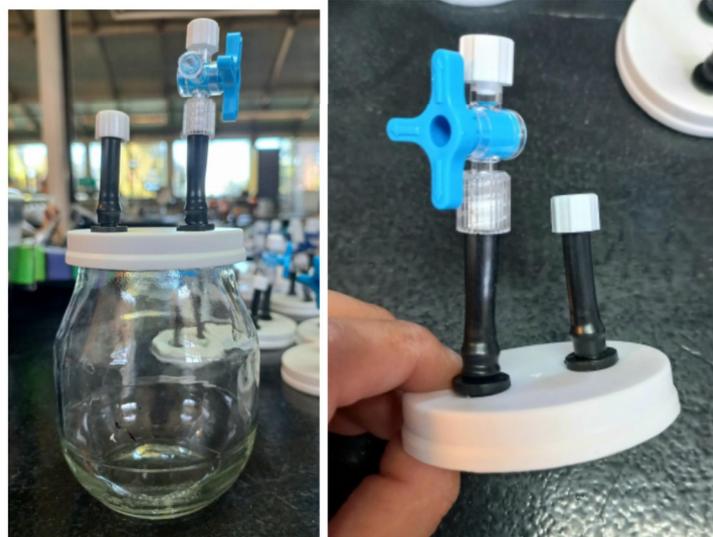
Para evaluar R<sub>máx</sub> de los suelos en estudio se utilizaron dos técnicas de laboratorio:

- Técnica del IRGA: Se desarrolló como indica Nguyen, D. H et al. (2014) y García Izquierdo et al. (2003), utilizando protocolos preelaborados del Lab. Suelos y Agua de INTA Bariloche (Enriquez & Cremona, 2020).
- Técnica de Trampas de NaOH: Se desarrolló como se describe en Kowaljow & Mazzarino (2007) y García Izquierdo et al. (2003).

##### 5.1.4.1 IRGA

Se fabricaron cámaras para realizar los ensayos de respiración potencial con el método del IRGA. Se utilizaron frascos de vidrio de 6,5 cm de diámetro y 8,8 cm de alto con tapas de

plástico removibles, a las cuales se le realizaron dos perforaciones para colocar microtubos de PVC de 6,00 x 4,00 mm. En el extremo de un microtubo se colocó una llave de tres vías, para permitir la extracción de las muestras de aire y, en el otro, una tapa de plástico para que al removerla se permitiera la aireación controlada (venteó) durante algunos momentos de la incubación (Figura 7).



**Figura 7.** Cámaras de incubación construidas para el ensayo.

El espacio entre los tubos de PVC y la tapa eran zonas susceptibles a perder CO<sub>2</sub> durante el ensayo, por ello se tuvo especial cuidado en la colocación del sellador de silicona en las juntas y se agregó plastilina para reforzar en los casos que se consideró necesario.

Al inicio del ensayo se pesó en balanza granataria 30 g de suelo. Este valor fue calculado a partir de la Ecuación 5.2 para lograr, según protocolo, 1 cm de altura de suelo en los frascos utilizados.

$$g \text{ de suelo} = D \cdot A \cdot h \quad \text{Ec. 5.2}$$

D: densidad aparente: 0,9 g cm<sup>-3</sup>

A: área de la base del frasco: 33,2 cm<sup>2</sup>

H: altura del suelo: 1 cm

Se añadió agua desmineralizada de manera homogénea hasta alcanzar el 60% de la CC del suelo. Para 30 g fueron necesarios 7,2 mL de agua en todas las muestras.

En una primera instancia (período de activación o latencia), los suelos fueron incubados a 25 °C durante 5 días en oscuridad, con la válvula de ventilación abierta para permitir la renovación de aire, corroborando cada 24 h que el peso registrado no variara. En los casos que se notó una variación de peso, se añadió agua para ajustarlo. Transcurridos los 5 días, las cámaras se cerraron herméticamente y en simultáneo, para iniciar la acumulación del CO<sub>2</sub> producto de la respiración aeróbica de los microorganismos activados presentes en el suelo. A su vez, junto a las cámaras con muestras, se incluyó una cámara vacía como blanco.

#### 5.1.4.1.1 Mediciones de Respiración Potencial

En todo momento se registró la temperatura ambiente del laboratorio y el tiempo de inicio y fin de las mediciones.

Dado que la velocidad de emisión desde la fase de latencia hasta la tasa máxima es mayor (fase estacionaria), inicialmente se estipularon mediciones a intervalos muy cortos de tiempo: 2:30 h, 5 h, 7 h, 23 h, 48 h, 72 h. Luego, y a los efectos de comparar con la técnica de las Trampas de NaOH el punto de inicio de la fase estacionaria de la curva de respiración, la incubación permaneció activa hasta la semana 16, repitiendo el protocolo de medición todas las semanas para evitar que las cámaras se saturen y registrando un nuevo punto de la curva, cada vez.

La muestra de CO<sub>2</sub> se tomó desde el sistema cerrado mediante una jeringa de polipropileno de 30 mL equipada con una válvula de 3 vías en su extremo. Luego de succionar la muestra, la válvula se cerró y se inyectó de inmediato a razón de 5 mL/s (flujo sugerido por manual) en el equipo Infra Red Gas Analyzer (IRGA), EGM-4 de PP-systems, dando como resultado una lectura instantánea de la concentración de CO<sub>2</sub> en ppm (Figura 8). De esta manera, se registraron tres valores al verificar estabilidad en cada medición.



**Figura 8.** Derecha: Toma de muestra desde cámara de incubación. Izquierda: muestra inmediatamente inyectada al analizador infrarrojo en modo estático.

Finalizada la etapa de medición secuencial, la tanda de cámaras fue destapada en bloque unos minutos para la renovación del aire, compensación de presiones parciales internas y externas y para comenzar el nuevo ciclo de incubación.

Al momento del cierre de todas las muestras, se midió la concentración de CO<sub>2</sub> en el laboratorio, y se volvió a iniciar el proceso de acumulación de CO<sub>2</sub> en la incubadora, registrando el tiempo cero. Se consideró como blanco al promedio de la concentración de CO<sub>2</sub> en el laboratorio al momento de cierre y a la concentración de los frascos vacíos utilizados como blanco, los cuales fueron cerrados al mismo tiempo que las muestras.

Se continuó realizando el mismo procedimiento respetando el cronograma de medición.

#### 5.1.4.1.2 Cálculo de respiración

Se emplearon los siguientes cálculos (Ecuación 5.3 y Ecuación 5.4) para determinar los mg de C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de suelo seco obtenidos en las cámaras de incubación:

$$V = \frac{v \cdot a}{10^6} \quad \text{Ec. 5.3}$$

$$R = \frac{P \cdot V}{R \cdot T} \cdot \frac{p}{G} \quad \text{Ec. 5.4}$$

**R:** Respiración en mg de C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de suelo seco

**P:** Presión [atm]

**V:** Volumen que ocupa el gas en el interior del frasco calculado como indica la Ec. 5.3:

(**a:** medición del IRGA en ppm; **v:** 0,2132 L correspondientes al volumen del frasco)

**T:** Temperatura [K]

**R:** Constante de gases ideales [0,082 atm • m<sup>3</sup> • mol<sup>-1</sup> K<sup>-1</sup>]

**p:** 12.000 mg equivalentes a 1 mol de CO<sub>2</sub>

**G:** Factor relativo a la cantidad de suelo seco utilizado en el ensayo [kg]

#### 5.1.4.2 Trampas de NaOH

Se colocaron 100 g de suelo en recipientes de plástico y se añadió agua hasta alcanzar el 60 % de la CC (24 mL). Las muestras se incubaron en un cuarto en ausencia de luz a 25 °C durante 5 días.

Pasado el tiempo, se verificó que las muestras no hayan perdido humedad mediante el pesaje del envase y se colocaron en frascos herméticos de 1,5 L que contenían un recipiente con 10 mL de NaOH 0,5 N y otro con aproximadamente 10 mL agua para mantener la humedad ambiente y del suelo constantes. Se realizaron blancos por triplicado, que constaron de recipientes con agua y la solución de álcali.

Las cámaras se sellaron con cinta y se incubaron a 25 °C por 1, 2, 4, 8, 12 y 16 semanas. Finalizada cada incubación, se retiró el recipiente con NaOH para someterlo a la retrotitulación.

##### 5.1.4.2.1 Mediciones de Respiración Potencial

Según cronograma, se retiraron los recipientes con NaOH y se procedió a valorar el NaOH remanente, es decir, aquel que no reaccionó con el CO<sub>2</sub> producido. Para ello, se utilizó una bureta con ácido clorhídrico 0,5 N y se colocó el NaOH en un erlenmeyer junto con 5 mL de cloruro de bario y 3 gotas de fenolftaleína como indicador ácido-base. Se inició la titulación con la presencia de un color fucsia, propio del indicador, hasta su viraje a transparente. Se registraron los mL de HCl utilizados para realizar el cálculo.

Cada frasco-cámara permaneció sin tapa durante la titulación de todas las muestras para permitir el intercambio de aire y lograr compensación de presiones parciales internas y externas antes de iniciar el nuevo ciclo de incubación. Luego, se volvió a colocar 10 mL de NaOH en cada cámara, cerrando con la misma metodología mencionada (Figura 9).



**Figura 9.** Aireación (derecha) y cierre de cámaras luego de la titulación (izquierda).

La solución valorante de HCl se tituló para contar con su valor exacto de molaridad y considerarlo posteriormente en los cálculos. Para ello, se secó carbonato de sodio en estufa a 105 °C durante 24 h. Pasado el tiempo se dejó enfriar en desecador hasta alcanzar temperatura ambiente. Seguidamente se pesó 1,3250 g del mismo mediante la utilización de balanza analítica y se llevó a volumen final de 50 mL con agua destilada. Se tomaron alícuotas de 10 mL de la solución preparada, adicionando naranja de metilo como indicador. Se inició la titulación hasta alcanzar el viraje de naranja a rojo.

A partir de los mL utilizados se obtuvo la normalidad exacta utilizando la Ecuación 5.5:

$$\text{Normalidad del ácido} = \frac{\text{ml de HCl gastados} \cdot 0,5}{10 \text{ ml}} \quad \text{Ec. 5.5}$$

#### 5.1.4.2.2 Cálculo de respiración

Se utilizó la Ecuación 5.6 para determinar los mg de C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de suelo seco obtenidos en las cámaras de incubación.

$$R = \frac{(B - S) \cdot M \cdot e \cdot p}{G}$$

Ec. 5.6

**R:** Respiración en mg de C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de suelo seco

**B:** Volumen medio de HCl empleado en la valoración de los blancos [mL]

**S:** Volumen de HCl empleado en la valoración de las muestras de suelo [mL]

**M:** Molaridad exacta del HCl utilizado en la valoración.

**e:** Peso equivalente de CO<sub>2</sub> considerando la relación estequiométrica [22 mg meq<sup>-1</sup>]

**p:** Factor de conversión para considerar únicamente el peso del C presente en la molécula de CO<sub>2</sub> [12 mg 44 mg<sup>-1</sup>]

**G:** Factor relativo a la cantidad de suelo seco utilizado en el ensayo [kg]

### 5.1.5 Análisis de datos

En el ensayo de Trampas de NaOH se descartaron datos anómalos utilizando la Prueba de Q, un test estadístico utilizado cuando el número de repeticiones es menor a 10 (Ecuación 5.7).

$$Q_{calc} = \frac{|x_{anormalo} - x_{cercano}|}{|Rango|}$$

Ec. 5.7

Para un valor de confianza del 95 % se contrastó el valor obtenido con el establecido por la tabla correspondiente. Para aquellos casos en los que  $Q_{calc} > Q_{tabla}$  el dato se descartó.

Luego de realizar los cálculos para expresar los datos obtenidos en mg de C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de suelo seco para ambas técnicas, se construyeron gráficas de la media de cada año con su correspondiente desvío estándar.

Con el fin de determinar el valor de Rmax y el tiempo aproximado para llegar a dicho valor con los datos obtenidos, se modelizaron las curvas graficadas mediante el modelo Gompertz.

Se determinó el punto de inicio de la fase estacionaria mediante el ajuste de los datos acumulados de respiración microbiana al modelo, transformando los datos de emisión acumulada (Rs) promedio a logaritmo en base 10 e incorporándolos al programa estadístico R. La relación entre el log<sub>10</sub>(Rs) vs tiempo fue modelada considerando dos segmentos asociados al crecimiento microbiano: fase exponencial y fase estacionaria.

El valor de la asíntota horizontal obtenida se definió como la máxima emisión potencial, y se registró el rango de días necesarios para alcanzar este punto de acuerdo a cada técnica.

La diferencia en el comportamiento de las curvas de emisión modeladas se evaluó con el programa Prism4 (GraphPad, San Diego, CA, USA), utilizando el ajuste global (Motulsky y Christopoulos, 2004) y se realizaron los siguientes análisis:

- Comparación entre las curvas de los diferentes años para cada técnica con un análisis de varianza (ANOVA) y  $p < 0.05$ : Se utilizó para comparar la media de dos o más grupos y determinar si existen diferencias significativas entre ellos.
- Prueba de rango múltiple de Tukey con un nivel de significancia de  $p < 0.05$ : De encontrarse alguna diferencia significativa con el análisis ANOVA, este indicó cuáles de los grupos son diferentes entre sí.
- Aproximación lineal entre los valores de  $R_{max}$  según año y técnica: La aproximación lineal permitió determinar si hay una relación lineal entre los resultados de ambos métodos, a pesar de las diferencias en las magnitudes absolutas.

Tanto el análisis de varianza ANOVA y la Prueba de Tukey ayudaron a verificar si los valores de  $R_{max}$  en muestras frescas y muestras antiguas difieren significativamente, dando a conocer si podrían o no utilizarse muestras antiguas para obtener valores certeros de  $R_{max}$  actuales.

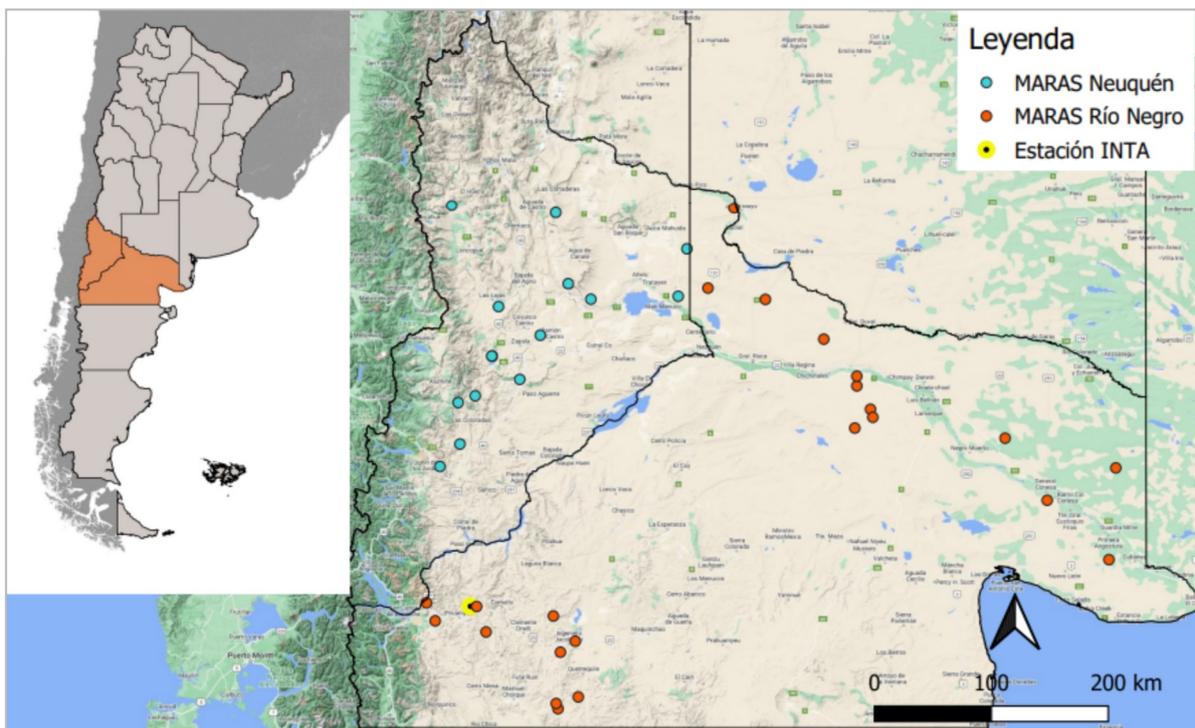
Con respecto a la aproximación lineal, se graficaron los datos de  $R_{max}$  obtenidos para cada técnica, según su año de muestreo y se trazó una recta a través de los puntos. Una distribución de datos con tendencia lineal, indica que existe una relación lineal entre los métodos y que los resultados son comparables en términos de la relación entre ellos, a pesar de las diferencias en las magnitudes absolutas. Si la ecuación de regresión lineal posee un ajuste alto de  $R^2$ , entonces se podrá concluir que ambas técnicas son comparables.

## 5.2 Objetivo 2: Emisión potencial de $CO_2$ de suelos de estepa de Patagonia Norte

### 5.2.1 Región de estudio

En un trabajo en conjunto entre la dirección del presente PFI y la red MARAS, se pudo acceder a muestras de MARAS provenientes de Río Negro y Neuquén. Se analizaron un total de 78 muestras correspondientes a diferentes locaciones geográficas dentro de ambas

provincias, distribuidas en las distintas áreas ecológicas descritas y se tomaron desde parches e interparches (Figura 10). Los parches se refieren a áreas con una cobertura vegetal dominada principalmente por vegetación arbustiva o herbáceo-arbustiva. Estos parches presentan una acumulación significativa de nutrientes bajo la canopia de los arbustos por lo que suelen denominarse islas de fertilidad, mientras que los interparches son áreas de suelo de baja cobertura y relativamente infértil que se encuentran dispersas entre los parches (Vega Ávila et al., 2010).



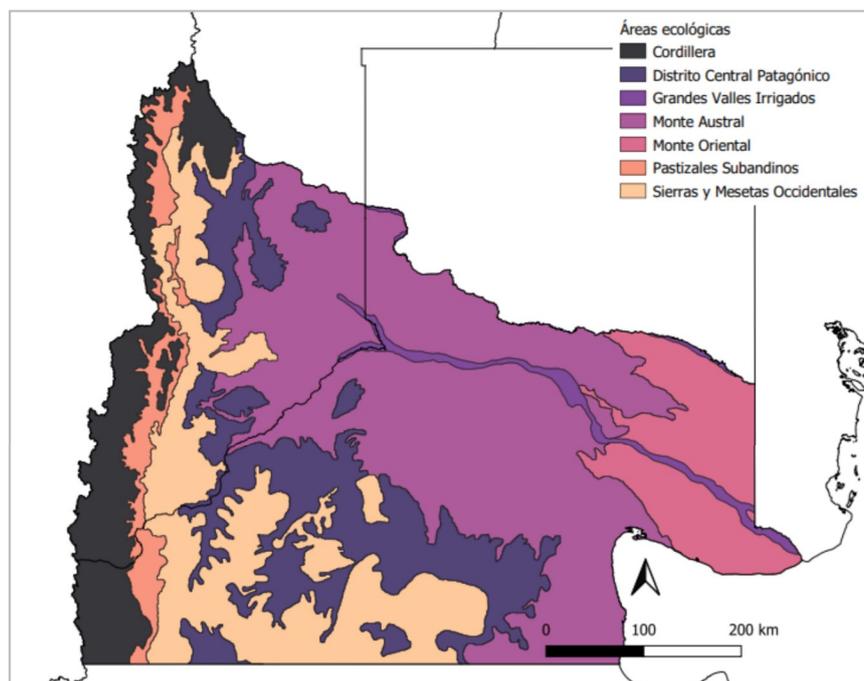
**Figura 10.** Ubicación geográfica de muestras a estudiar correspondientes al sistema MARAS

Estas provincias comprenden la región Patagonia Norte y abarcan una superficie de 297.091 km<sup>2</sup>. Presentan una importante heterogeneidad natural dada por dos gradientes ambientales, uno de precipitación (longitudinal) y otro de temperaturas (latitudinal). Así, se observa una rápida disminución de las precipitaciones en sentido oeste-este, lo que genera una amplia región con un régimen hídrico árido y semiárido. El gradiente de temperaturas disminuye con la altimetría y aumenta con la latitud. A estos gradientes se suma la complejidad geomorfológica que determina diferentes tipos de suelos y sistemas de drenaje (Mendez Casariego et al., 2005).

Para sintetizar esta heterogeneidad, se ha dividido a la región en siete diferentes Regiones Ecológicas Homogéneas (REH), donde se interrelacionan los diferentes elementos del medio

natural -relieve, clima, hidrografía y bioma- en una superficie determinada (Figura 11). Las REH relevantes para este estudio se mencionan a continuación:

- **Pastizales Subandinos:** El paisaje está formado por cordones montañosos, sierras y colinas, atravesado por numerosos ríos y arroyos. El clima es frío, con una temperatura media que no supera los 10 °C, y subhúmedo, con precipitaciones que oscilan de 300 a 700 mm anuales concentradas en la estación fría.  
Los suelos dominantes son moderadamente profundos a profundos, de texturas franco arenosas y arcillosas, moderadamente provistos de MO, de pH levemente ácidos a neutro y moderado déficit hídrico estival.
- **Sierras y Mesetas Occidentales:** El clima es predominantemente árido y frío, con precipitaciones entre 200 - 300 mm. anuales concentradas en otoño e invierno y una temperatura anual media entre 8 y 10 °C. Dominan los suelos moderadamente profundos a profundos, de texturas francoarenosas y arcillosas. En las áreas serranas y colinas altas los suelos son poco profundos y se encuentran asociados a afloramientos rocosos.
- **Distrito Central Patagónico:** Se corresponde con los sectores más áridos (con precipitaciones por debajo de 200 mm anuales) de la Provincia Fitogeográfica Patagónica
- **Monte Austral:** La precipitación anual media es menor a 200 mm, y la temperatura media de 13 a 14 °C. Predominan los suelos moderadamente profundos a someros, de texturas francoarenosa, arenosa y arcillosa, comúnmente con presencia de carbonato de calcio, concentración muy escasa de MOS, pH moderadamente alcalino y fuerte déficit hídrico anual. En las áreas relativamente bajas de las planicies aluviales y cuencas endorreicas dominan suelos salinos-alcalinos.
- **Monte Oriental:** El clima es semiárido, con precipitaciones de 300 a 400 mm anuales (Bustos, C. Inédito) y una temperatura media de aproximadamente 15 °C. Predominan los suelos areno-limosos, moderadamente alcalinos y de escasa cantidad de MO.



**Figura 11.** Mapa de áreas ecológicas de la Patagonia Norte.

### 5.2.2 Selección MARAS

De acuerdo al protocolo de MARAS (Oliva et al., 2011), las muestras de suelo se tomaron de la siguiente manera:

Se identificaron las regiones ecológicas presentes, dado que las superficies que ocupan poseen diferentes dimensiones, y se distribuyeron de manera proporcional al área que ocupa cada región. A su vez, en cada área ecológica se diferencian Grandes Unidades de Paisaje (GUP) que varían en sus características de suelos, vegetación y respuestas a la degradación (Oliva et al., 2011). Por lo cual, se seleccionó un área ecológica de interés, se superpuso con las GUP y el mapa de catastro provincial para la identificación de las estancias que presentaron una proporción importante de estas GUP. Se eligió el establecimiento y se realizó una entrevista con el responsable del campo para seleccionar un lugar de uso cotidiano, respetando una distancia mínima de 35 km entre monitores. De esta manera, el sistema logró una representatividad territorial.

Una vez instalados los monitores, se tomaron 2 muestras compuestas de 1 kg de suelo. Una de ellas estaba conformada por 5 submuestras tomadas del centro del canopeo<sup>1</sup> de 5 individuos de la especie dominante que se encuentren a lo largo de la transecta marcada. La

<sup>1</sup> Parte de la planta por sobre el nivel del suelo que absorbe y/o intercepta luz.

otra muestra se constituyó con 5 submuestras extraídas del centro de 5 interparches. Ambas muestras fueron tomadas hasta los 10 cm de profundidad y la extracción se realizó con un muestreador adecuado a cada tipo de suelo (Oliva et al., 2011). Las mismas fueron almacenadas para su posterior estudio.

### 5.2.3 Determinación de parámetros

Para establecer la CC, se seleccionaron tres muestras de suelo representativas de cada zona de estudio: Valle inferior, Línea sur y Neuquén. Las mismas corresponden a las ecorregiones de Monte Oriental, Sierras y Mesetas Occidentales, y Monte Austral respectivamente. (Figura 12).



**Figura 12.** Determinación de CC en muestras de suelo.

y se realizó el mismo procedimiento especificado en la sección 5.1.3. A partir de estos valores, se pudo constatar nuevamente que 7,2 mL eran necesarios para obtener una humedad del 60% de CC para 30 g de suelo.

Por lo descrito, se estimó que las muestras restantes no presentarían mayores variaciones en cuanto al volumen de agua requerido para llegar al porcentaje mencionado y se utilizó la misma dosificación para arribar al 60% de la CC en la totalidad de las muestras.

Las únicas muestras que se trataron en forma diferente fueron las muestras 50 y 60 a las cuales se añadieron 3,6 mL. Este volumen particular para estas dos muestras surge de una nueva determinación de la CC como se describe en la Sección 5.1.3, dado que se notó saturación con 7,2 mL.

Para determinar la densidad aparente se realizó el mismo procedimiento descrito en el apartado 5.1.3 y se obtuvo un valor de  $0,9 \text{ g cm}^{-3}$ .

#### 5.2.4 Mediciones de Respiración Potencial

En función de los resultados del objetivo 1, se utilizó la técnica del IRGA descrita en la sección 5.1.4.1.1 a fin de obtener los parámetros de la curva de Gompertz para las muestras de MARAS (Figura 13).

Se destaca que para evitar variaciones considerables en los tiempos de incubación entre muestras, se armaron 4 tandas de 20 muestras cada una. Cada tanda fue colocada a incubar con 30 minutos de diferencia entre una y otra, de manera de contar con el tiempo suficiente para realizar las mediciones y añadir el porcentaje de humedad necesario. En este caso no se realizaron repeticiones por muestra.



**Figura 13.** Cámaras de incubación previas a la medición y organizadas por tandas.

#### 5.2.5 Cálculos de flujo

A través de la ecuación de la curva de Gompertz, mediante la utilización del programa estadístico R como se detalla en la sección 5.1.5, se determinó para las 78 muestras el valor de emisión máxima potencial (A) y el tiempo de inicio de fase estacionaria (G) el cual fue

calculado a partir de la Ecuación 5.8, donde  $\mu$  representa la pendiente de la fase exponencial y L el inicio de la misma.

$$G = L + \frac{A}{\mu} \quad \text{Ec. 5.8}$$

Se calculó el flujo a partir del cociente entre A y G y se expresó el Rmax en g de C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> suelo seco año<sup>-1</sup>

Se confeccionó una capa de información geográfica con los puntos de MARAS (formato shp. en QGIS 3) asociado a su Rmax, la que se contrastó con el mapa de áreas ecológicas para buscar macro-patrones regionales en función de su variabilidad en el territorio.

### 5.2.6 Análisis de datos

Los valores de Rmax fueron agrupados por áreas ecológicas, diferenciando entre parches e interparches, a fin de agrupar los datos de muestras con características similares en términos de suelo, vegetación y condiciones ambientales. Se realizó un análisis de varianza ANOVA con  $p < 0.05$  en el programa Prism4 (GraphPad, San Diego, CA, USA) para evaluar la existencia de diferencias significativas entre la media de los grupos. También se utilizó este análisis para evaluar las diferencias entre muestras provenientes de parches e interparches.

### 5.3 Objetivo 3: Análisis de factores de emisión potencial regionales

Para realizar la comparación de los resultados obtenidos a nivel local con los factores de emisión de la base de datos del IPCC, se calculó el promedio de la emisión potencial de las muestras provenientes de parches e interparches evaluadas en el objetivo 2 y se realizó una conversión de unidades (Ecuación. 5.9).

$$FE = A \cdot h \cdot \rho \cdot Rmp \quad \text{Ec. 5.9}$$

**FE:** Factor de emisión [t C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>]

**A:** Hectárea [10.000 m<sup>2</sup>]

**h:** Altura de suelo incubado en el laboratorio [0,01 m]

$\rho$ : Densidad Aparente promedio del suelo [ $0,9 \text{ t m}^{-3}$ ]

**Rmp**: Promedio de respiración potencial máxima de muestras. [ $1,9 \cdot 10^{-3} \text{ t C-CO}_2 \text{ t}^{-1} \text{ suelo seco año}^{-1}$ / $0,9 \cdot 10^{-3} \text{ t C-CO}_2 \text{ t}^{-1} \text{ suelo seco año}^{-1}$ ]

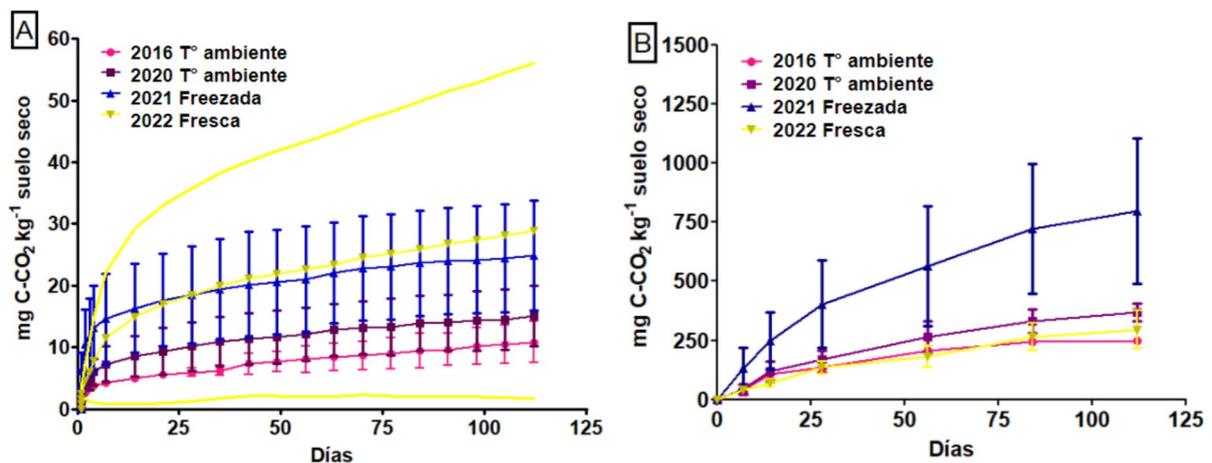
Se realizó una nueva conversión, para comparar con las unidades que expresa el IBA 4, multiplicando el FE obtenido por la superficie evaluada, siendo esta la suma de las áreas ecológicas estudiadas (26.213.955 ha), y así obtener el dato en términos de Gg.

Seguidamente, se evaluó la viabilidad e importancia del empleo de los valores hallados como fuente de información en la construcción, planeación e implementación de estrategias regionales de gestión ambiental de este tipo de sitios, teniendo en cuenta el desarrollo de la actividad ganadera, y a su vez, en los Inventarios Nacionales de GEI.

## 6. Resultados y Discusión

### 6.1 Objetivo 1

En las curvas de  $\text{CO}_2$  acumulado para cada una de las técnicas utilizadas (IRGA y Trampas NaOH) se observan diferencias de magnitud y de variabilidad en los datos (Figura 14).

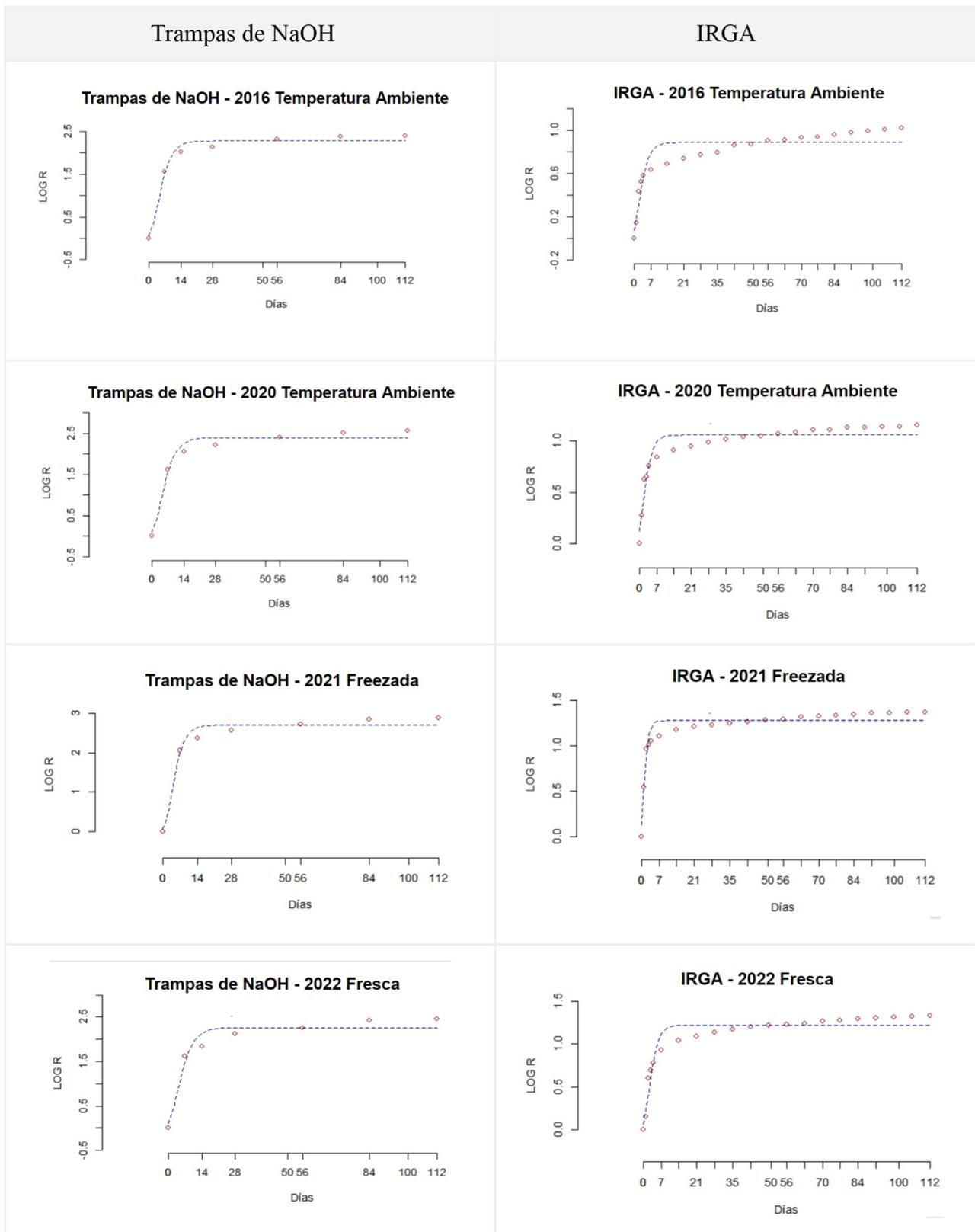


**Figura 14.** Curvas de evolución del  $\text{CO}_2$  para suelos muestreados en diferentes momentos y almacenados en distintas condiciones. Respiración acumulada de suelo ( $\text{mg de C-CO}_2 \text{ kg}^{-1} \text{ suelo seco}$ ) durante 112 días de incubación utilizando: A) IRGA (líneas amarillas representan el error asociado a las emisiones del año 2022), y B) Trampas de NaOH.

La técnica de las Trampas de NaOH presentó una magnitud aproximadamente 10 veces mayor con respecto a la técnica del IRGA, por lo que se repitió el ensayo del IRGA con las muestras del objetivo 1 por triplicado y durante una semana, duplicando el peso de algunas muestras (60 g) para controlar si la cantidad de suelo podría influenciar el resultado. Al obtener los mismos resultados e incluso verificar que al utilizar el doble de peso de suelo, se obtuvo exactamente el doble de respiración potencial, se descartó la posibilidad de haber cometido un error "grosero" en alguna de las etapas previas.

Otro punto relevante a mencionar es que el cambio de fase exponencial a estacionaria no se pudo determinar con certeza y fue necesario establecer un criterio para establecerlo.

Se utilizó el modelo de Gompertz, a fin de obtener los parámetros de la ecuación correspondiente, y se estableció el punto de cambio de fase como  $R_{max}$  (Figura 15) evaluando el ajuste al modelo (Tabla 3).



**Figura 15.** Curvas del modelo de Gompertz aplicado a mediciones realizadas con Trampas de NaOH e IRGA.

**Tabla 3.** Ajuste de las curvas obtenidas con el modelo de Gompertz (Figura 15).

Año de Muestra	Trampas de NaOH	IRGA
2016	$R^2 = 0,9821$	$R^2 = 0,887$
2020	$R^2 = 0,974$	$R^2 = 0,918$
2021	$R^2 = 0,9759$	$R^2 = 0,922$
2022	$R^2 = 0,9545$	$R^2 = 0,934$

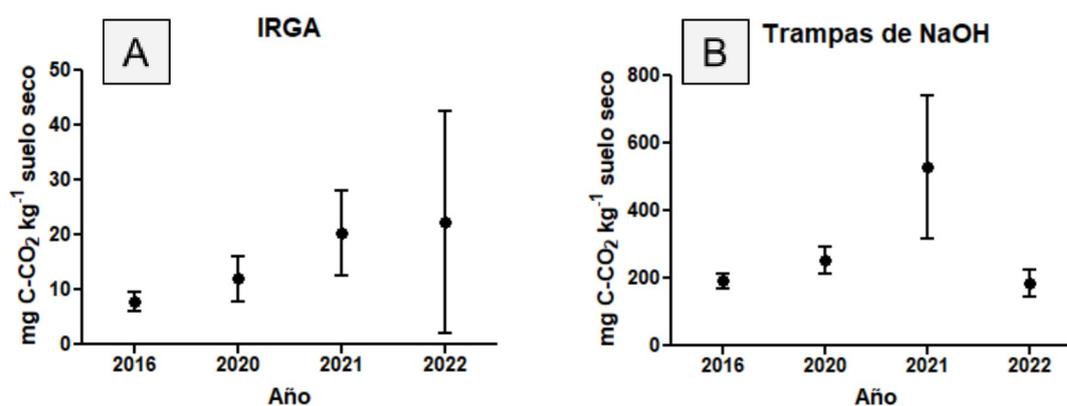
Se observó en todas las curvas un ajuste mayor a  $R^2 = 0,887$ . Se calculó que el tiempo necesario para obtener el punto en el cual se produce el cambio de la fase exponencial a la fase estacionaria es diferente para las técnicas utilizadas, siendo significativamente menor para el IRGA (Tabla 4).

**Tabla 4.** Día de medición en el cual se produce el cambio de fase exponencial a fase estacionaria en la técnica de Trampas de NaOH e IRGA, según el tiempo y tipo de almacenamiento.

	Trampas de NaOH	IRGA
2016 Temperatura Ambiente	11 días	5 días
2020 Temperatura Ambiente	12 días	5 días
2021 Freezada	12 días	4 días
2022 Fresca	12 días	6 días

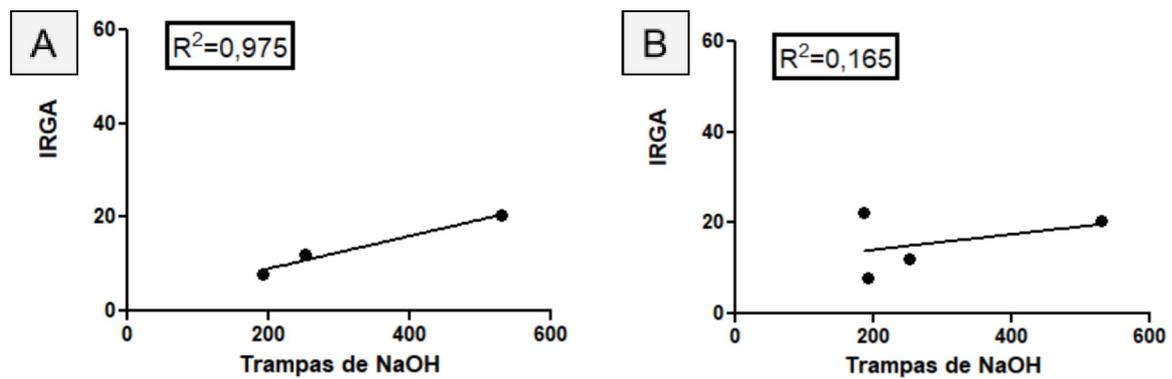
Asimismo, y haciendo hincapié en que el interés de este estudio fue el inicio de la fase estacionaria, para precisar la incidencia de la antigüedad de las muestras con respecto a sus valores de emisión, se consideraron los datos tomados hasta el día 7 en el ensayo del IRGA, y el día 14 en el caso de las Trampas de NaOH, siendo los días de medición más próximos a los días obtenidos en la Tabla 4. No se hallaron diferencias significativas entre 2016, 2020 y 2021 con respecto al año 2022 para ninguna de las técnicas. Si bien se observa una tendencia de disminución de emisión en las muestras antiguas y almacenadas secas, no fue significativa. Este resultado indica que se podrían utilizar las muestras de MARAS extraídas en el periodo 2016 - 2021 para la realización de la evaluación de emisión potencial de CO<sub>2</sub>, y suponer que pueden utilizarse muestras secas con una antigüedad de hasta 6 años. Así mismo, podría incorporarse como indicador para seguimientos a mediano o largo plazo.

La modelización permitió obtener la respiración potencial máxima para cada muestra analizada del sistema MARAS, en términos de  $\text{mg C-CO}_2 \text{ kg}^{-1}$  suelo seco (Figura 16). Se observó un desvío estándar considerable en la muestra fresca del año 2022 para el IRGA y un  $R_{\text{max}}$  por debajo de la muestra más antigua (2016) para el caso de las Trampas de NaOH. Esta disparidad podría deberse a la falta de tratamiento previo (secado a temperatura ambiente) a las mediciones, procedimiento muchas veces recomendado para reducir la variabilidad de la respuesta de los microorganismos del suelo y que se estaría manifestando fuertemente en la técnica con más sensibilidad (IRGA). Este resultado sugiere que es más recomendable emplear muestras de suelo secas al aire y almacenadas, como las utilizadas en el sistema MARAS o en laboratorios convencionales de suelos, en lugar de muestras frescas y húmedas. Esto permitiría disminuir la variabilidad en los datos y facilitar la detección de diferencias entre los tratamientos evaluados.



**Figura 16.** Emisión potencial máxima ( $R_{\text{max}}$ ) promedio ( $\pm$  Desvío estándar) obtenidos en: A) Ensayo del IRGA entre los 4 y 6 días de incubación, y B) Ensayo de Trampas de NaOH entre los 11 y 12 días de incubación.

Al analizar la relación entre técnicas mediante una regresión lineal, utilizando los valores  $R_{\text{max}}$  (Figura 17), se observó una correlación muy alta ( $R^2 = 0,975$ , 95 % de confianza) cuando no se consideraron los valores del año 2022 (Figura 17 A), pero la relación disminuyó notablemente al sumar al análisis dicha muestra (Figura 17 B).



**Figura 17.** Emisión máxima potencial ( $R_{max}$ ) estimada con el método IRGA en relación a  $R_{max}$  estimado con Trampas NaOH, considerando A) todas las muestras disponibles menos la fresca (2016, 2020 y 2021) y B) todas las muestras.

Frente a los resultados expuestos, se construyó una tabla comparativa con las características halladas para ambas técnicas (Tabla 5).

**Tabla 5.** Comparación IRGA vs. Trampas de NaOH para el análisis de Rmax en laboratorio.

	IRGA	Trampas de NaOH
Límite de detección*	695 ppm 2,4 mg C-CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> suelo seco	9774 ppm 72 mg C-CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> suelo seco
Precisión	1ppm 0,0035 mg C-CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> suelo seco	0,1 mL 3 mg C-CO <sub>2</sub> kg <sup>-1</sup> suelo seco
Resolución/ Sensibilidad	Mayor	Menor
Ventajas	Mediciones instantáneas de la concentración de CO <sub>2</sub> que permiten mayor rapidez, agilidad y capacidad de réplica	Método fácil y ampliamente utilizado
Desventajas	Algunos estudios sugieren que las cámaras estáticas cerradas pueden sobrestimar o subestimar las tasas de respiración del suelo (Cueva-Rodríguez et al., 2012).	Podría presentar subestimación de la medida de CO <sub>2</sub> cuando este es elevado y sobreestimación cuando es baja (Luo & Zhou, 2010).
Tiempo para obtener Rmax	4 días - 6 días	11 días - 12 días
Tiempo de ejecución	80 muestras h <sup>-1</sup>	18 muestras h <sup>-1</sup>
Costo	Analizador de gases infrarrojo costoso	Económico

\*Calculado como la media de los blancos sumado a 3 veces el desvío estándar.

Los resultados indican una menor resolución en las Trampas de NaOH respecto del IRGA dado los límites de detección y la precisión determinada. Esto podría cambiar ajustando las concentraciones del ácido para realizar la titulación. Por ejemplo, en el caso que se optara por titular con una concentración de HCl 0,1 N o menor, la sensibilidad en la medición con las Trampas de NaOH aumentaría y podría ser suficiente para este tipo de suelo, dada su baja tasa de emisión de CO<sub>2</sub>. La sensibilidad de la técnica de Trampas NaOH tal como se empleó, sería baja para la evaluación de emisiones netas de CO<sub>2</sub> desde suelos Aridisoles de la estepa de Patagonia Norte, con bajo contenido de MOS, baja disponibilidad hídrica y textura gruesa. No obstante, el método ha sido utilizado exitosamente para estudios comparativos, entre tratamientos, donde la tasa de emisión no es un aspecto relevante.

Esta falta de precisión en la técnica utilizada para cuantificar la emisión de CO<sub>2</sub> en suelos de estepa puede ser un factor de relevancia a la hora de realizar cálculos ponderados por superficie. Por ejemplo, se ha encontrado que la emisión anual acumulada de CO<sub>2</sub> en estepas de Patagonia Sur utilizando Trampas de NaOH a campo y sin informar normalidad del álcali (Peri et al., 2015) es un orden de magnitud superior a la hallada en estepas similares de Patagonia Norte utilizando IRGA (Enriquez y Garcia Falabella, 2022). Además de los factores ambientales elementales que puedan generar dichas diferencias en las emisiones, los ensayos de laboratorio de este PFI, contrastando el método de las Trampas de NaOH con el IRGA, muestran que el primero subestima en 10 veces las emisiones potenciales en suelos de estepa incubados en condiciones óptimas, si no se utiliza la concentración de álcali adecuada. Claramente, estas diferencias metodológicas pueden derivar en grandes errores en cálculos de grandes extensiones, generando incertidumbre.

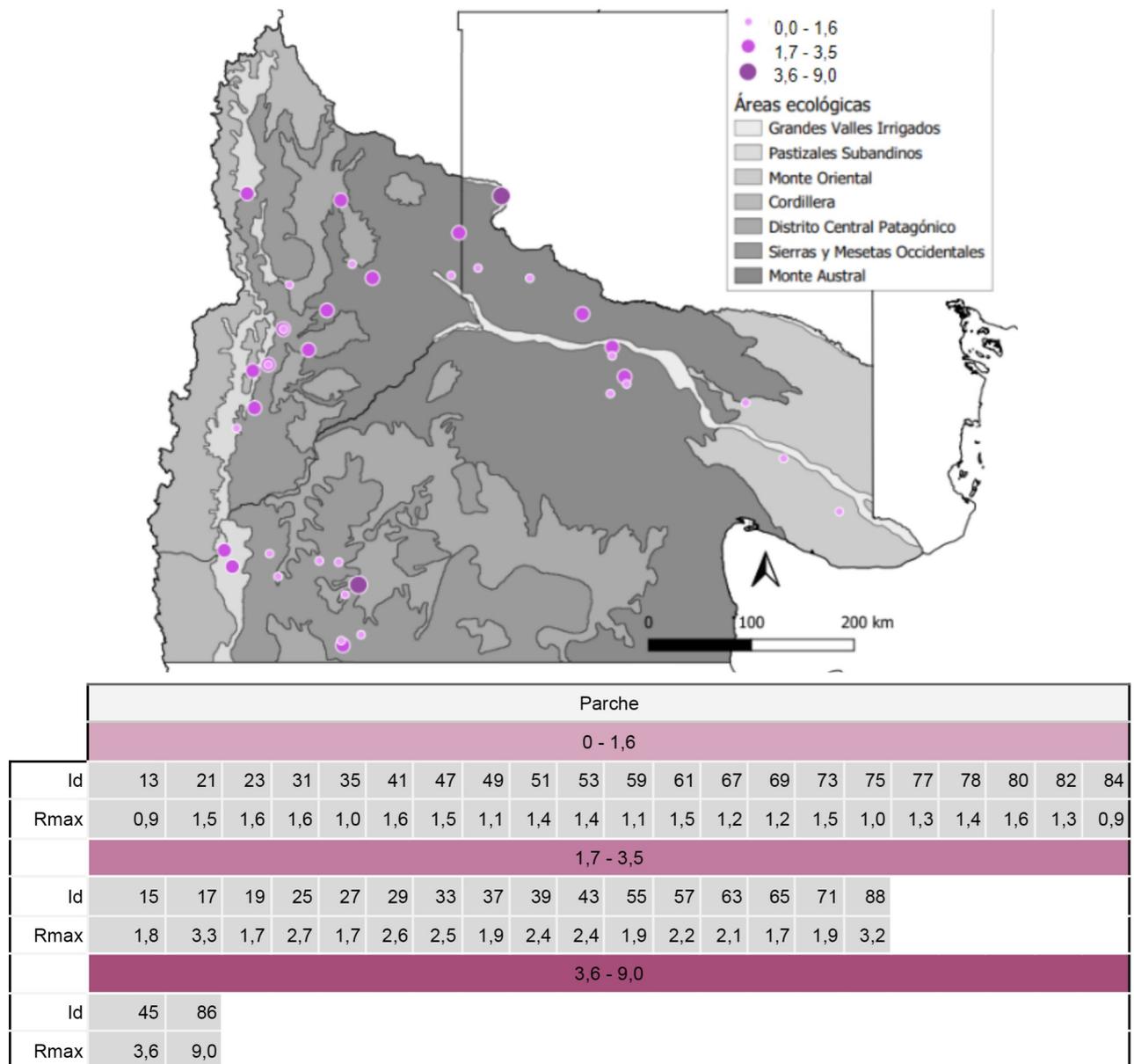
Por lo expuesto, se confirmó parcialmente la hipótesis I, dado que efectivamente se encontró una correlación positiva entre ambos métodos de determinación, pero el IRGA presentó una respuesta más rápida para hallar la curva de emisión potencial, además se encontraron diferencias en las magnitudes detectadas entre técnicas.

## 6.2 Objetivo 2

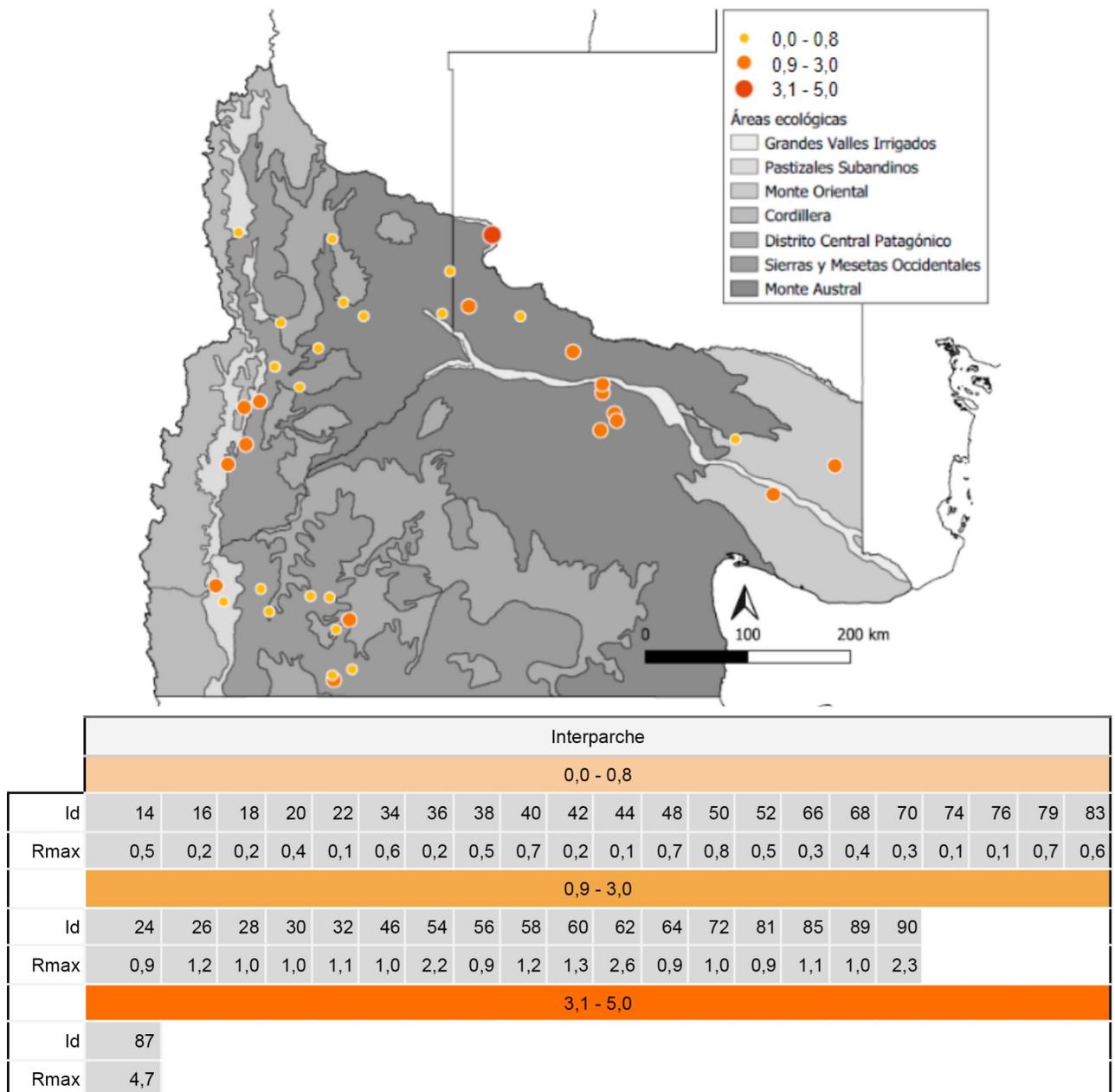
En primer lugar, se destaca que para evaluar la emisión potencial de CO<sub>2</sub> de las muestras de MARAS se utilizó la totalidad de los datos generados (112 días de incubación), modelizando al igual que en el Objetivo 1. Es probable que si el ensayo del IRGA del objetivo 1 se hubiera realizado antes del ensayo del IRGA del objetivo 2 y no en simultáneo, se podría haber tomado el promedio de días que se necesitó para obtener el punto de cambio fase. De esta manera, se podría haber medido únicamente hasta el día 5 y calculado la emisión máxima potencial para la totalidad de las muestras de MARAS.

Se presenta la emisión potencial máxima de CO<sub>2</sub> desde el suelo en términos de g de C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>, asociado a los puntos MARAS y superpuesto con el mapa de áreas ecológicas (Figura 18 y 19). Se discriminaron las muestras correspondientes a parches de aquellas de interparches, encontrando que en la mayoría de los casos los parches presentaron valores más

elevados que los interparches para el mismo punto de muestreo. A través del análisis estadístico se corroboró que efectivamente existen diferencias significativas entre ambos grupos. Esta tendencia se debe, probablemente, al mayor nivel de MO presente en los parches vegetados (Rodríguez et al., 2015). Este resultado apoya los protocolos de MARAS (Oliva et al., 2011) y la idea de seguir muestreando considerando la estructura de vegetación de la estepa, e insta a interpretar los resultados de emisiones de CO<sub>2</sub> del suelo de manera ponderada al porcentaje de parches, en cada punto del territorio.

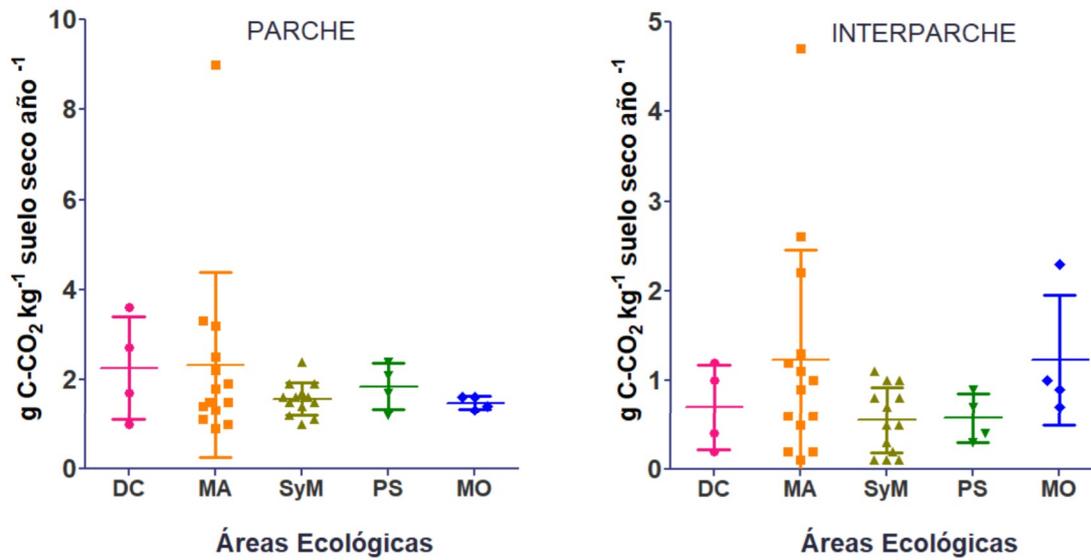


**Figura 18.** Emisión potencial de CO<sub>2</sub> en parches. Id: Número de identificación; Rmax: Respiración potencial máxima en g de C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup>.



**Figura 19.** Emisión potencial de CO<sub>2</sub> en interparches. Id: Número de identificación; Rmax: Respiración potencial máxima en g de C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> suelo seco año<sup>-1</sup>.

Tras el agrupamiento de Rmax por área ecológica se determinó que no existen diferencias significativas entre medias de los grupos (Figura 20).



**Figura 20.** Emisiones potenciales máximas agrupadas según el área ecológica de pertenencia de la muestra de suelo. DC: Distrito Central Patagónico; MA: Monte Austral; SyM: Sierras y Mesetas Occidentales; PS: Pastizales Subandinos; MO: Monte Oriental.

En consecuencia, se realizó un promedio de emisiones potenciales en la región dando como resultado  $1,9 \pm 0,4$  g C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> suelo seco año<sup>-1</sup> para parches y  $0,9 \pm 0,3$  g C-CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> suelo seco año<sup>-1</sup> para interparche.

En función de estos resultados, se constató parcialmente la veracidad de la hipótesis II, dado que existen diferencias en la emisión potencial de CO<sub>2</sub> entre muestras provenientes de parches e interparches debido a las diferencias en su cobertura vegetal, disponibilidad de nutrientes y dinámica en general (Oliva et al., 2020). Pero no se encuentran diferencias significativas en las emisiones de muestras correspondientes a diferentes áreas ecológicas.

Se destaca que se podría profundizar el análisis tomando en consideración el régimen de precipitaciones, las temperaturas o los tipos de suelo de cada muestra para evaluar si se presenta una dinámica en torno a estas variables, e incluso comparar con las emisiones potenciales desde la actividad entérica animal según Censo Nacional Agropecuario (INDEC, 2021). No obstante, dichos análisis exceden los objetivos de este PFI.

### 6.3 Objetivo 3

#### 6.3.1 Comparación de estimaciones

El valor extraído de la EFDB más próximo a ser comparado con el caso estudiado, se muestra en la Tabla 6, junto con la emisión registrada para la variación de MOS en el IBA 4. Como se indicó en la hipótesis, los valores no se compararon con otro ambiente similar por la falta de registros de la región estudiada.

A partir del cálculo de emisiones potenciales de las muestras del objetivo 2 y la conversión a unidades adecuadas para su comparación, se obtuvo como resultado  $0,17 \pm 0,04$  t C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup> en parches y  $0,08 \pm 0,03$  t C-CO<sub>2</sub> ha<sup>-1</sup> año<sup>-1</sup> en interparches. En términos de Gg la emisión fue de  $4626 \pm 1088$  Gg C-CO<sub>2</sub> año<sup>-1</sup> para parches y  $2177 \pm 816$  Gg C-CO<sub>2</sub> año<sup>-1</sup>.para interparches.

**Tabla 6.** Factores de emisión extraídos del IBA 4 y EFDB más próximos a ser comparado con el caso estudiado. Id para la búsqueda en la base de datos correspondiente.

Id	Valor	Unidad	Características
511037 (EFDB)	$0,25 \pm 0,23$	t C ha <sup>-1</sup> año <sup>-1</sup>	Factor de emisión anual para suelos orgánicos de pastizales gestionados Régimen de temperatura: Templado frío Pérdida de C debido al drenaje y otras perturbaciones de manejo en la adaptación de estos suelos al manejo de pastizales
3B7 (IBA 4)	-6.216,54	Gg año <sup>-1</sup>	Variación de MOS (Carbono) que comprende todas las categorías del uso de la tierra y corresponde a la superficie del país que se encuentra incluida dentro de las categorías de usos de la tierra.

En el IBA 4 se observó que numerosas categorías no se encuentran estimadas, el único valor que se informa con respecto a la variación de MOS es el mencionado en la Tabla 6 y corresponde al CO<sub>2</sub> neto calculado y unificado para todos los usos de tierra mencionados en el informe, donde el signo negativo indica que se presenta absorción neta. En las directrices

del IPCC y en consecuencia en el IBA 4, no se considera un factor de emisión que contemple la respiración microbiana/ respiración del suelo, al ser este considerado un factor natural y no antrópico.

Por su parte, se notó que el valor potencial estimado en este trabajo (que probablemente sea menor al emitido en condiciones reales de temperatura y humedad) es aproximadamente la mitad del que se informa en el EFDB para el factor de emisión de un pastizal gestionado, donde las condiciones de porcentaje de MOS y humedad son mayores a la estudiada. Cabe destacar que este valor es el único informado debido a que no se encontraron valores para ambientes semejantes al que se ha investigado.

A diferencia de lo descrito en la hipótesis, se detectó que el caso tabulado presenta el mismo orden de magnitud que los estimados en el presente PFI. Sin embargo, se destaca que el valor aquí reportado es el valor de emisión potencial, hallado a partir de incubaciones en condiciones óptimas de humedad y temperatura para los microorganismos, que difieren de las condiciones reales de los ambientes evaluados. Por lo tanto, se estaría comparando el máximo nivel de emisiones desde las estepas de Patagonia Norte con valores promedio de evaluaciones puntuales a campo (que en muchas ocasiones incluye a la respiración de raíces), para ambientes de referencia similares. Se demuestra que no se trata de un valor despreciable.

### 6.3.2 Consideración del factor de emisión

Los informes que ha presentado el país periódicamente han ido aumentando su complejidad metodológica, incluyendo aumentos en la cantidad de categorías de emisión/absorción estimadas y reportadas, en la calidad y el nivel de desagregación de los datos de actividad y en el uso de factores de emisión locales que incrementan la precisión y la robustez de los resultados. En relación a esto, el IBA 4 menciona dentro de las mejoras sectoriales planificadas, la necesidad de perfeccionar la estimación de C en suelos mediante la evaluación de datos locales de C y evaluación de modelos de cálculo adecuados a las circunstancias nacionales, como pasos a seguir en el siguiente informe bienal del año 2023. De esta forma, se plantean medidas de avance en la categoría mencionada.

En este contexto, es posible contribuir en estas mejoras con una primera aproximación de valores potenciales de emisión de suelos como se expone a lo largo del presente trabajo, generando un incentivo para la consideración de este parámetro en futuras estimaciones. Sumado a ello, se observa la relevancia de sus valores potenciales a través de los cálculos

realizados, aun cuando la respiración microbiana es una fracción de la emisión total del suelo. Si bien estos valores no son directamente comparables con el mencionado en la Tabla 6, es posible observar que esta fracción contribuye con una emisión significativa en términos de magnitud. Por lo tanto, resulta interesante considerarla al evaluar las emisiones de CO<sub>2</sub> de la zona.

El aporte de datos como los obtenidos en este trabajo enriquecen y benefician al proceso de construcción del inventario general del país, cuyo objetivo final es conocer la cantidad de GEI que emite efectivamente nuestro país al año y saber con mayor exactitud si se están logrando alcanzar, total o parcialmente, los compromisos adoptados a nivel internacional.

### 6.3.3 Estrategias de gestión ambiental

Actualmente en Patagonia Norte, los pastizales presentarían un delicado equilibrio entre la emisión y la captura de C, es decir, tendrían stocks estables en el suelo, al menos en la superficie muestreada (INTA, 2021). Sin embargo, un porcentaje importante de sus ambientes se ven afectados por un manejo inadecuado de los mismos, rompiendo este equilibrio hacia la liberación de C de sus suelos (e.g., Oñatibia et al., 2015; Oñatibia & Aguiar, 2019; Enriquez, 2015). En este sentido, se muestran signos de degradación y se señala al pastoreo como la principal causa (Tittonell et al., 2021 ; Oñatibia & Aguiar, 2019 ; Verón et al., 2011).

Dado el contexto, las estrategias de gestión ambiental son fundamentales para generar acciones concretas a fin de proteger y conservar los pastizales, asegurar la viabilidad económica y social de las actividades ganaderas extensivas. Las mismas, implican la participación de diversos actores, como productores ganaderos, investigadores, autoridades, organizaciones no gubernamentales y otros sectores relevantes. A lo largo de los párrafos que siguen, se mencionan algunas de las estrategias actuales en torno a esta problemática.

A nivel nacional existen Guías de Prácticas de Manejo Sustentable de Tierras (PMST) para cada región del país, las cuales recopilan una síntesis de las principales prácticas recomendadas y aplicadas por diversas instituciones. Este documento elaborado por la Dirección Nacional de Planificación y Ordenamiento Ambiental del Territorio (DNPYOAT) de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable (SAyDS) se continúa ampliando y actualizando, también avanza en la identificación cuantitativa y cualitativa de los resultados e impactos de la implementación de las PMST.

En la región se implementan diversas prácticas de manejo con el objetivo de fomentar la sustentabilidad de las actividades ganaderas en desarrollo. En Río Negro, el INTA junto con el Programa Ganadero provincial promueven la implementación de un manejo integral llamado “ganadería regenerativa”: un sistema que al imitar los ciclos de la naturaleza permite restablecer y potenciar el funcionamiento de los ecosistemas, reducir los efectos del cambio climático, mejorar la rentabilidad, el bienestar animal y el de las personas que trabajan en el campo (Devesa & Cali, 2021). Se presenta como una solución al cambio climático, ya que permite obtener grandes cantidades de CO<sub>2</sub> y capturarlo en el suelo de manera segura a través de prácticas ecológicas. Es decir, este tipo de modelo podría reposicionar al productor ganadero como parte de la solución al cambio climático, y no como parte del problema. Este proyecto, cuya duración es de dos años (julio de 2021 a julio de 2023), se implementó en nueve establecimientos dedicados a la cría bovina en Río Colorado, Luis Beltrán y Choele Choele, para posteriormente formular planes de mejora en los diferentes predios involucrados.

Por otra parte, en Neuquén se desarrolla el Plan Ganadero Bovino Provincial (PGBP) cuyo propósito general es el de fortalecer la competitividad de la cadena de valor de la carne bovina, considerando la totalidad de los eslabones productivos y favoreciendo la ocupación territorial y la generación de empleo, en un marco de sustentabilidad ambiental. En este sentido se elaboró un manual de buenas prácticas ganaderas, adaptadas a la realidad de la ganadería neuquina, como eje rector del PGBP (Sapag et al., 2021).

Las estrategias mencionadas poseen como factor común, la importancia del monitoreo de estos pastizales para evaluar el efecto de las prácticas realizadas. Frente a esto, los valores de respiración microbiana potencial hallados y analizados a nivel regional en este PFI pueden servir como una línea base para evaluar y monitorear acciones de mejora en el manejo del suelo, dado que este tipo de indicadores biológicos suelen dar una rápida respuesta a los cambios en el manejo del suelo, es sensible al estrés ambiental y fáciles de medir (Segueda et al., 2011). Las altas intensidades de pastoreo producen un efecto negativo sobre la actividad, diversidad y la biomasa de las comunidades de microorganismos del suelo producido de forma indirecta por la reducción en el crecimiento y cobertura de las plantas, y disminución

de aportes de restos vegetales de la parte aérea y radical (Roper & Gupta, 1995; Stark & Grellmann, 2002).

A su vez, los resultados indican que la respiración potencial puede ser considerada un indicador a incluir en las mediciones de las muestras que forman parte del sistema MARAS, ya que puede integrarse fácilmente a la estructura de trabajo y logística de muestreo. Esto permitiría medir la respiración microbiana en diferentes momentos, lo que facilita el seguimiento y la evaluación de la efectividad de las acciones implementadas para mejorar la sustentabilidad de esta actividad. Por lo tanto, este indicador biológico constituye una señal temprana y sensible de utilidad para estimar la calidad funcional edáfica (Ferrerías et al., 2009), incluso antes que las propiedades físicas y químicas, que en este caso ya son medidas en el marco del proyecto.

Finalmente, en el contexto de los inventarios nacionales de GEI, el uso de la respiración microbiana puede brindar valores para una evaluación más precisa de las emisiones y absorciones de C asociadas con el cambio de uso de suelo, puesto que permite cuantificar y evaluar el impacto de las actividades al proporcionar una estimación del valor inicial del CO<sub>2</sub> emitido en ese entorno antes de que ocurra el cambio.

## **7. Conclusiones**

La necesidad de monitorear los cambios lentos y graduales de cobertura y diversidad en los pastizales naturales áridos de la Patagonia se hizo evidente después de terminar los primeros mapas regionales que mostraban que alrededor de un tercio de la región estaba afectada por la desertificación (Oliva et al., 2019). Frente a esta problemática se desarrolló el sistema de monitoreo ambiental MARAS en zonas con déficit hídrico mayormente dedicada a ganadería extensiva, sujetas a erosión, procesos lentos e irreversibles de desertificación y vulnerables al cambio climático global. De esta manera se acordaron métodos comunes para el monitoreo con técnicas unificadas, reduciendo los esfuerzos de muestreo y a su vez pudiendo compartir la información generada.

En el marco del sistema de monitoreo ambiental, los resultados de este trabajo consideran factible incorporar la medición de respiración potencial al sistema MARAS, con el uso del sistema IRGA en laboratorio. Este parámetro complementaría las mediciones que se han

estado realizando, contribuyendo al seguimiento y monitoreo de esta zona, permitiendo evaluar la efectividad de los sistemas de manejo implementados en busca de la sustentabilidad de las actividades ganaderas que se desarrollan. Asimismo, los parámetros determinados en el sistema MARAS, en conjunto con el indicador aquí expuesto, permitirían generar conocimiento de gran valor como, por ejemplo, proyecciones del efecto del cambio climático de aquí a 30-50 años o de algún cambio abrupto en el uso de las tierras. Estas proyecciones pueden contribuir con acciones dispuestas en la normativa internacional, nacional y regional en relación con los desafíos ambientales que se presentan en nuestro país. De igual manera, información como la generada en este trabajo contribuye a superar la falta de información regional y a promover iniciativas para mitigar los impactos negativos del cambio climático en los ecosistemas.

No obstante, utilizar este indicador para evaluar cambios graduales causados por los efectos del cambio climático, no sea tan sencillo. Según lo investigado, no se detectaron diferencias significativas en el rango evaluado (6 años), por lo tanto sería de utilidad evaluar en periodos de tiempos más amplios para detectar cambios significativos en los valores medidos, por ejemplo cada dos campañas MARAS (10 años) o más, con un gasto de recursos asociados, válido.

En cuanto a lo metodológico, los valores obtenidos de la respiración microbiana en suelos de estepa de Patagonia Norte indican que no se vería significativamente afectada por el tiempo de almacenamiento de la muestra, aunque hay una tendencia leve hacia una reducción de actividad con el paso del tiempo. Por tanto, podrían utilizarse muestras extraídas con hasta 6 años de antelación y almacenadas a temperatura ambiente o refrigeradas, para estimar los valores de respiración potencial en laboratorio, brindando una mayor flexibilidad para realizar las determinaciones.

La técnica del IRGA se ha mostrado como una buena alternativa para la medición de este indicador biológico en suelos provenientes de zonas áridas y semiáridas, considerando el protocolo utilizado, debido a su practicidad, capacidad para procesar un alto volumen de muestras de manera eficiente, mayor sensibilidad respecto del método de las Trampas de NaOH y menor tiempo empleado para obtener resultados. Con respecto a esto último, el promedio de días de incubación entre las 88 muestras analizadas fue de 5 con un desvío estándar de 2 días, por tanto, se podrían llevar a cabo mediciones durante periodos de tiempo

cortos para realizar el cálculo de flujo potencial. Dado que se trata de una primera aproximación, se pueden tomar como referencia para futuras determinaciones los puntos a favor y en contra mencionados en la metodología, como los tiempos para realizar las mediciones, recursos necesarios, limitaciones de las técnicas, entre otros.

En el contexto del Inventario Nacional para la emisión de GEI, donde existen incertidumbres debido a la falta de factores de emisión propios, la incorporación de los valores de respiración potencial obtenidos en este estudio puede contribuir a mejorar la precisión y solidez de las estimaciones. Estos datos regionales evitan la dependencia de bases de datos internacionales como la del IPCC y permite establecer líneas base para comparar a futuro las emisiones iniciales de CO<sub>2</sub> en suelos que aún no han experimentado cambios marcados de uso de suelo, pero que podrían ocurrir debido a la expansión urbana y/o de la frontera agrícola a través de avances biotecnológicos en este tipo de entornos. Un ejemplo de esto podría ser el desarrollo de especies cultivables tolerantes a ambientes secos, como es el caso del trigo transgénico tolerante a sequía en Argentina (Patrone & Targovnik, 2019).

A su vez, los datos que conforman esta base pueden ser una guía para evaluar la actividad biológica del suelo e indirectamente para el monitoreo de la degradación de los pastizales, generando de esta manera, la apertura a posibles líneas de investigación en torno a esta temática, como por ejemplo el estudio de balances de C o huella de C de productos ganaderos (e.g., kg de carne o de lana). Todos estos son aspectos interesantes para desarrollar en potenciales trabajos complementarios.

Por lo expuesto, siendo el suelo un macrosistema fundamental para la vida desde el punto de vista ambiental, económico, social y cultural. Resulta relevante comenzar a explorar factores de emisión desde los sistemas naturales ya que los distintos usos que se le dan al suelo pueden alterar la actividad de los mismos, y con esto, su calidad. El manejo de las actividades que en él se desarrollan y su monitoreo a través del tiempo permite evaluar el panorama y facilita la toma de decisiones y la implementación de acciones que contribuyan a mitigar los impactos negativos que se producen. En este sentido, el papel de los Ingenieros Ambientales es fundamental para el abordaje de estos desafíos, mediante la aplicación de conocimientos y

tecnologías para promover la sostenibilidad, la resiliencia y la adaptación al cambio climático.

Para finalizar, el presente trabajo brindó la oportunidad de aplicar herramientas y conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, permitiendo ponerlos en práctica y adquirir experiencia en su aplicación, enfrentando los imprevistos y desafíos propios de la práctica profesional. Estos imprevistos han brindado la oportunidad de profundizar en la búsqueda de soluciones y explorar nuevas líneas de acción para obtener resultados más confiables y precisos. También permitió tener una conciencia profunda acerca de los procesos de desarrollo de parámetros e indicadores de uso cotidiano del profesional y acerca de lo que representan, en cuanto a sus bondades y debilidades. En este sentido, este TFI ha generado un espacio de aprendizaje que ha contribuido a fortalecer las habilidades y competencias necesarias para enfrentar los desafíos y exigencias de la vida profesional de un Ingeniero Ambiental.

## **8. Bibliografía**

- Ayala Niño, F., Maya Delgado, Y., & Troyo Diéguez, E. (2018). Almacenamiento y flujo de carbono en suelos áridos como servicio ambiental: Un ejemplo en el noroeste de México. *Terra Latinoamericana*, 36(2), 93-104.
- Brangari, A., Singh, A., Ramachandran, A., Chandra, S., & Raghubanshi, A. S. (2020). Carbon dioxide emissions from soil: A review. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(25), 31609-31626. doi: 10.1007/s11356-020-09654-4.
- Burbano-Orjuela, H. (2018). El carbono orgánico del suelo y su papel frente al cambio climático. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 35(1), 82-96. doi: <http://dx.doi.org/10.22267/rcia.183501.85>.
- Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista digital universitaria*, 8(10), 1-12. Recuperado de: [https://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct\\_art78.pdf](https://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct_art78.pdf)
- Carbonell-Silletta, L., Cavallaro, A., Pereyra, D. A., Askenazi, J. O., Goldstein, G., Scholz, F. G., & Bucci, S. J. (2022). Soil respiration and N-mineralization processes in the Patagonian steppe are more responsive to fertilization than to experimental precipitation increase. *Plant Soil*, 479, 405–422. doi: <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05531-0>

- Cobas, H., Pavoni, S., Zayas, A., Rodríguez, F., Álvarez, E., & Contreras, R. (2007). Aplicación de la voltametría es el análisis del crecimiento microbológico. VII Congreso de la Sociedad Cubana de Bioingeniería, La Habana, Cuba
- Cueva-Rodríguez, A., Yépez, E. A., Garatuza-Payán, J., Watts, C. J., & Rodríguez, J. C. (2012). Diseño y uso de un sistema portátil para medir la respiración de suelo en ecosistemas. *Terra Latinoamericana*, 30(4), 327-336.
- Davidson, E.A., & Janssens, I.A. (2006). Sensibilidad a la temperatura de la descomposición del carbono del suelo y reacciones al cambio climático. *Naturaleza*, 440, 165-173. doi: <https://doi.org/10.1038/nature04514>
- Devesa, A., & Calí, M. J. (2021). Ganadería regenerativa en Río Negro. EEA Alto Valle, INTA. *Fruticultura & Diversificación*, 27 (88), 8-11. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/20.500.12123/11077>
- Easdale, M. (2021). Bases para una ley de pastizales de regiones áridas y semiáridas de la Argentina. *Ecología Austral*, 31, 316-327. doi: <https://doi.org/10.25260/EA.21.31.2.0.1234>
- Enriquez, A.S. (2015). Dinámica de Carbono y Nitrógeno en suelo y agua de mallines de Patagonia Norte y su relación por la degradación por pastoreo histórico intenso. Tesis doctoral en Biología. Centro Regional Universitario Bariloche. Universidad Nacional del Comahue. 309 pp
- Enriquez, A.S., & Cremona, M.V. (2020). Protocolo determinación de respiración potencial de suelo en laboratorio utilizando IRGA. Lab. Suelos y Aguas INTA Bariloche
- Enriquez, A.S., & García Falabella, B.M. (2022). Respiración ecosistémica del suelo en pastizales semiáridos patagónicos bajo condiciones ambientales contrastantes. *Actas XXVIII Congreso Argentino de las Ciencias del Suelo*, 4, 1531-1536.
- Fariña, C. (2018). Pastoreo intensivo en distintas estaciones del año: efectos a escala de planta y de comunidad en una estepa de Patagonia Norte. Tesis de Maestría en Recursos Naturales, Escuela para Graduados Alberto Soriano -Facultad de Agronomía - Universidad de Buenos Aires
- Ferreras, L., Toresani, S., Bonel, B., Fernández, E., Bacigaluppo, S., Faggioli, V., & Beltrán, C. (2009). Parámetros químicos y biológicos como indicadores de calidad del suelo en diferentes manejos. *Ciencia del suelo*, 27(1), 103-114.
- Gaitán, J. J., Bran, D. E., Oliva, G. E., & Stressors, P. A. (2019). Patagonian desert. *Encyclopedia of the World's Biomes*. Elsevier, Amsterdam, Netherlands, 163-180.

- García Izquierdo, C., Gil Sotres, F, Hernández Fernández, T., & Trasar Cepeda, C. (2003). Técnicas de Análisis de Parámetros bioquímicos en suelos: Medida de actividades enzimáticas y biomasa microbiana. Ediciones Mundi-Prensa (Ed. Española).
- Garthright, W. E. (1991). Refinements in the prediction of microbial growth curves. *Food Microbiology*, 8(3), 239–248. doi:10.1016/0740-0020(91)90056-8
- INBIOP. (2022). Emisiones de gases de efecto invernadero desde los suelos de la estepa patagónica. Recuperado de: <https://inbiop.conicet.gov.ar/emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-desde-los-suelos-de-la-estepa-patagonica/>
- INDEC. (2021). Censo Nacional Agropecuario 2018. Resultados definitivos. Ciudad Autónoma de Buenos Aires. Recuperado de: [https://www.indec.gov.ar/ftp/cuadros/economia/cna2018\\_resultados\\_definitivos.pdf](https://www.indec.gov.ar/ftp/cuadros/economia/cna2018_resultados_definitivos.pdf)
- INTA. (2021). Pastizales del futuro: ganadería con servicios ambientales. Gestión Ambiental. Recuperado de: <https://intainforma.inta.gov.ar/pastizales-del-futuro-ganaderia-con-servicios-ambientales/#:~:text=Las%20exigencias%20planteadas%20al%20sector,la%20provisi%C3%B3n%20de%20servicios%20ecosist%C3%A9micos.>
- IPCC. (2006). Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. Recuperado de: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/index.html>
- IPCC. (2013). Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press.
- IPCC. (2019). 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Recuperado de: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html>
- IPCC. (s.f). Emission Factor database . Recuperado de: [https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find\\_ef.php?reset=](https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/EFDB/find_ef.php?reset=)
- IPCC. (2006). Agricultura, Silvicultura y Otros usos de la tierra. En H.S.Eggleston, L.Buendia, K. Miwa, T. Ngara & K. Tanabe. (Eds). IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. National Greenhouse Gas Inventories Programme. IGES, Japón.

- Kowaljew, E., & Mazzarino, M. J. (2007). Soil restoration in semiarid Patagonia: Chemical and biological response to different compost quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 39(7), 1580-1588.
- Lee, Y. B., Lorenz, N., Dick, L. K., & Dick, R. P. (2007). Cold storage and pretreatment incubation effects on soil microbial properties. *Soil Science Society of America Journal*, 71(4), 1299-1305. doi: <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0245>
- Luo, Y., & Zhou, X. (2006). Chapter 8: Methods of Measurements and Estimations. *Soil Respiration and the Environment*, 161-185. doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-088782-8.X5000-1>
- Madigan, M. T., Martinko, J. M., & Parker, J. (2004). *Biología de los microorganismos*: Brock. Pearson Educación.
- Mazzoni, E., & Rabassa, J. (2013). Types and internal hydro-geomorphologic variability of mallines (wet-meadows) of Patagonia: Emphasis on volcanic plateaus. *Journal of South American Earth Sciences*, 46, 170-182. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2011.08.004>
- Mendez Casariego, H., Bran, D. E., Peralta, C. R., Madariaga, M. C., Huerta, G. J., Villarreal, P. & Elissalde, N. O. (2005). Programa Nacional de Ecorregiones. La región Patagonia: Centros Regionales Patagonia Norte y Patagonia Sur. EEA Bariloche, INTA.
- MAyDS. (s.f.). Resolución 250/2003. Capítulo IV - Recursos bióticos - Disposiciones generales. Recuperado de <https://www.argentina.gob.ar/normativa/recurso/84725/res250-5-5-2003-cap4/htm>
- MAyDS. (2019). Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático. Recuperado de: <http://servicios.infoleg.gob.ar/infolegInternet/anexos/330000-334999/332234/res447-1.pdf>
- MAyDS. (2022). Plan Nacional de Adaptación y Mitigación al Cambio Climático. Recuperado de: [https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/pnaymcc\\_2022\\_-\\_vf\\_resol.pdf](https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/pnaymcc_2022_-_vf_resol.pdf)
- Mora Delgado, J. R. (1999). La actividad microbiana: un indicador integral de la calidad del suelo. *Luna Azul*, 5(6), 1-6. Recuperado de <https://revistasoj.s.ucaldas.edu.co/index.php/lunazul/article/view/1503>
- Nguyen, D. H., Grace, P. R., Scheer, C., & Rowlings, D. (2014). Determining gas sampling timelines for estimating emissions in small chamber incubation experiments. *IOSR-JEN*, 4, 14-16.

- NU. (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Recuperado de: [https://unfccc.int/files/essential\\_background/background\\_publications\\_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf](https://unfccc.int/files/essential_background/background_publications_htmlpdf/application/pdf/convsp.pdf)
- Oliva, G., Gaitán, J., Bran, D., Nakamatsu, V., Salomone, J., Buono, G., Escobar, J., Ferrante, D., Humano, G., Ciari, G., Sauerez, D., Opazo, W., Adema, E., & Celdrán, D. (2011). Manual para la Instalación y Lectura de Monitores MARAS. PNUD, Buenos Aires, Argentina. Recuperado de: [http://gefpat.cagonia.ambiente.gob.ar/archivos/web/MSEAySACDP/file/MARAS\\_Manual\\_mayo\\_2010.pdf](http://gefpat.cagonia.ambiente.gob.ar/archivos/web/MSEAySACDP/file/MARAS_Manual_mayo_2010.pdf)
- Oliva, G., Bran, D., Gaitán, J., Ferrante, D., Massara, V., García Martínez, G., Adema, E., Enrique, M., Domínguez, M., & Paredes, P. (2019). Monitoring drylands: The MARAS system. *Journal of Arid Environments*, 161, 55-63.
- Oliva, G., Dos Santos, E., Sofia, O., Umaña, F., Massara, V., García Martínez, G., Caruso, C., Alemana, C., Echevarría, D., Fantozzi, A., Butti, L., Bran, D., Gaitán, J., Ferrante, D., Paredes, P., Domínguez, E., & Maestre, F. T. (2020). The MARAS dataset, vegetation and soil characteristics of dryland rangelands across Patagonia. *Scientific Data*, 7(1), 327. doi: <https://doi.org/10.1038/s41597-020-00658-0>
- Oñatibia, G. R., Aguiar, M. R., & Semmartin, M. (2015). ¿Existen compensaciones entre la provisión de forraje y el servicio ecosistémico de almacenamiento de C y N en pastizales áridos?. *Ingeniería Ecológica*, 77, 26-32.
- Oñatibia, G. R., & Aguiar, M. R. (2019). Grasses and grazers in arid rangelands: Impact of sheep management on forage and non-forage grass populations. *Journal of Environmental Management*, 235, 42-50.
- Patrone, S., & Targovnik, D. (2019) Tecnología contra la sequía trasciende fronteras. Recuperado de: <https://www.conicet.gov.ar/una-tecnologia-contra-la-sequia-que-trasciende-fronteras/>
- Pérez Batallón, P., Ouro, G., Merino, A., & Macías, F. (1998). Descomposición de materia orgánica, biomasa microbiana y emisión de CO<sub>2</sub> en un suelo forestal bajo diferentes manejos selvícolas. *Edafología*, 5, 83-93. Recuperado de: <http://edafologia.ugr.es/revista/tomo5/a83t.htm>

- Peri, P. L., Bahamonde, H., & Christiansen, R. (2015). Soil respiration in Patagonian semiarid grasslands under contrasting environmental and use conditions. *Journal of Arid Environments*, 119, 1-8.
- Power Porto, G. (2009). El calentamiento global y las emisiones de carbono. *Ingeniería industrial*, 27, 101-122.
- Raich, J. W., & Potter, C. S. (1995). Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochemical Cycles*, 9(1), 23-36.
- Reichstein, M., Bahn, M., Ciais, P., Frank, D., Mahecha, M. D., Seneviratne, S. I., Zscheischler, J., Beer, C., Buchmann, N., Frank, D. C., Papale, D., Rammig, A., Smith, P., Thonicke, K., Van der Velde, M., Vicca, S., Walz, A., & Wattenbach, M. (2013). Climate extremes and the carbon cycle. *Nature*, 500(7462), 287-295. doi: <https://doi.org/10.1038/nature12350>
- Rodríguez, D. G. T., de Andreu, A. F., Ospina, A., Parra, L. M. M., Guevara, N. J. R., & Colina, H. J. Y. (2015). Acumulación de nutrientes en islas de fertilidad bajo cobertura de costra biológica de suelo. *Suelos Ecuatoriales*, 45(1), 16-23.
- Roper, M. M., & Gupta, V. V. S. R. (1995). Management practices and soil biota. *Australian Journal Soil Research*, 33, 321-339.
- Rustad, L. E., Huntington, T. G., & Boone, R. D. (2000). Controls on soil respiration: implications for climate change. *Biogeochemistry*, 48, 1-6.
- Sapag, A., Campos Salva, S., & Lauge, M. (2021). Plan Ganadero Bovino de la Provincia del Neuquén. EEA Alto Valle, INTA. *Fruticultura & Diversificación*, 27 (88), 26-30.
- SGAYDS. (2019). Tercer Informe Bienal de Actualización de Argentina a la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático (CMNUCC). Recuperado de: <https://unfccc.int/sites/default/files/resource/3er%20Informe%20Bial%20de%20la%20República%20Argentina.pdf>
- Segueda, A. N., Correa, G. V., Blanco, J. L., & Gamino, M. D. L. R. (2011). Naturaleza y utilidad de los indicadores de calidad del suelo. *Contacto S*, 80, 29-37.
- SIPAS. (s.f.). MARAS . Recuperado de: [https://sipas.inta.gob.ar/?q=maras\\_inicio](https://sipas.inta.gob.ar/?q=maras_inicio)
- Stenberg, B., Johansson, M., Pell, M., Sjö Dahl-Svensson, K., Stenström, J., & Torstensson, L. (1998). Microbial biomass and activities in soil as affected by frozen and cold storage. *Soil Biology and Biochemistry*, 30(3), 393-402.

- Stark, S., & Grellmann, D. (2002). Soil microbial responses to herbivory in an arctic tundra heath at two levels of nutrient availability. *Ecology*, 83(10), 2736-2744.
- Tiftonell, P., Hara S. M., Álvarez, V. E., Aramayo, V. M., Bruzzone, O. A., Easdale, M. H., Enriquez, A. S., Laborda, L., Trinco, F. D., Villagra, S. E., & El Mujtar, V. A. (2021). Ecosystem services and disservices associated with pastoral systems from Patagonia, Argentina – A review. *Cahiers Agricultures*, 30, 43. doi: <https://doi.org/10.1051/cagri/2021029>
- Toledo, S. (2020). Influencia de diferentes intensidades de pastoreo, estrés hídrico y contenido de nutrientes sobre los microorganismos del suelo en Patagonia sur. Doctoral dissertation, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad Nacional de La Plata.
- UNFCCC. (s.f.). ¿Qué es la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático? Recuperado de <https://unfccc.int/es/process-and-meetings/que-es-la-convencion-marco-de-las-naciones-unidas-sobre-el-cambio-climatico>
- UNFCCC. (s.f.). Contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC). Recuperado de: <https://unfccc.int/es/acerca-de-las-ndc/contribuciones-determinadas-a-nivel-nacional-ndc>
- Vásquez, J. R., Macías, F., & Menjivar, J. C. (2013). Respiración del suelo según su uso y su relación con algunas formas de carbono en el Departamento del Magdalena, Colombia. *Bioagro*, 25(3), 175-180.
- Vega Ávila, Á. D., Toro, M. E., Baigori, M., Fernández, L., & Vázquez, F. (2010). Influencia de la vegetación en la variación espacial de la abundancia de microorganismos en el desierto del Monte, San Juan, Argentina. *Ecología austral*, 20(3), 247-256.
- Verón, S. R., Paruelo, J. M., & Oesterheld, M. (2011). Grazing-induced losses of biodiversity affect the transpiration of an arid ecosystem. *Oecologia*, 165, 501–510. doi: 10.1007/s00442-010-1780-4
- Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., & Van't Riet, K. (1990). Modeling of the Bacterial Growth Curve. *Applied and environmental microbiology*, 56(6), 1875-1881. doi: <https://doi.org/10.1128/aem.56.6.1875-1881.1990>

**9. Anexo**

Tabla valores Rmax utilizados en mapas de Patagonia Norte.

	Rmax segun Áreas ecológicas de Rio Negro y Neuquén				
	DISTRITO CENTRAL	MONTE AUSTRAL	SIERRAS Y MESETAS OCCIDENTALES	PASTIZALES SUBANDINOS	MONTE ORIENTAL
	g C-CO2 /kg suelo seco/ año				
Parche	3,6	1,4	1,5	2,1	1,3
	1,7	1,9	1,1	1,7	1,4
	2,7	2,2	1,4	1,2	1,6
	1,0	1,1	1,2	2,4	1,6
		1,5	1,9		
		1,3	1,5		
		0,9	1,0		
		9,0	1,6		
		3,2	1,7		
		1,0	1,6		
		1,8	1,9		
		3,3	1,6		
		1,5	2,4		
	2,5				
Interparche	1,0	2,2	0,7	0,9	2,3
	0,4	0,9	0,8	0,3	0,7
	1,2	1,2	0,5	0,4	0,9
	0,2	1,3	0,3	0,7	1,0
		2,6	1,0		
		0,6	0,1		
		1,1	0,1		
		4,7	0,8		
		1,0	1,0		
		0,5	1,1		
		0,2	0,5		
		0,2	0,2		
		0,1	0,1		
	0,6				

Comandos utilizados en R Studio para implementar el modelo de Gompertz

```
1 library(nlstools)
2 library(nlsmicrobio)
3 library(easynls)
4
5 #Buscar archivo
6 file.choose()
7
8 #Cargar datos
9 ruta_csv <- "C:\\Users\\54294\\Desktop\\Trampas1.txt"
10 trampas <- read.csv(ruta_csv)
11
12 #Mostrar datos
13 head(trampas)
14
15 #Aplicar modelo de Gompertz
16 model2 = nlsfit(trampas, model = 10, start = c(a = 200, b = 2, c = .1))
17 model2
18
19 #Graficar datos
20 nlsplot(trampas, model = 10, start = c(a = 200, b = 2, c = .1),
21         xlab = "Días", ylab = "LOG R", position = 1)
22 title(main="Trampas de NaOH - 2016 Temperatura ambiente")
23 axis(1, at = c(0,14,28,56,84,100,112), cex.axis=.9)
24
25
```