

**IMPACTO DEL CULTIVO DE COBERTURA AVENA-AVICIA COMO ANTECESOR DEL
MAÍZ SOBRE LA EMISIÓN DE ÓXIDO NITROSO**

Trabajo Final de Grado
del alumno



**Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales.
Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires.**

Pergamino, 11 de marzo del 2019.

**IMPACTO DEL CULTIVO DE COBERTURA AVENA-AVICIA COMO ANTECESOR DEL
MAÍZ SOBRE LA EMISIÓN DE ÓXIDO NITROSO**

Trabajo Final de Grado
del alumno

AZICH PABLO EDUARDO

Aprobada por el Tribunal Evaluador

Evaluador

Evaluador

Evaluador

Ing. Agr. (MSc) Alicia Beatriz Irizar
Co-Directora

Ing. Agr. (MSc) Silvina Beatriz Restovich
Directora

**Escuela de Ciencias Agrarias, Naturales y Ambientales.
Universidad Nacional del Noroeste de la Provincia de Buenos Aires.**

Pergamino, 11 de marzo del 2019.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar a mi directora y co-directora, Silvina Restovich y Alicia Irizar, por guiarme durante todo el proceso de este trabajo final. Gracias por su predisposición, generosidad y dedicación.

A Sebastian Vangeli y Gabriela Posse de INTA Castelar por compartir sus conocimientos sobre este tema y por sus sugerencias.

A Diego Colombini y Fabio Villalba del departamento de suelos de la EEA INTA Pergamino por su colaboración en las mediciones realizadas.

A EEA INTA Pergamino, por facilitar el espacio físico para llevar a cabo este trabajo.

A la UNNOBA por darme la oportunidad de estudiar esta carrera universitaria en la ciudad donde nací.

A mi hermano Franco, su novia Lucy y a mis tíos y primos por apoyarme en todo momento.

Por último, a mis padres por el apoyo incondicional durante todos estos años, y por hacer posible el estudio de esta carrera universitaria.

ÍNDICE

1. RESUMEN	1
2. INTRODUCCIÓN	3
2.1. Generalidades	3
2.2. El rol de la agricultura sobre las emisiones de GEI	4
2.3. Factores edáficos que regulan las emisiones de N ₂ O	5
2.4. Prácticas agrícolas que proveen múltiples beneficios al sistema	6
3. HIPÓTESIS.....	9
4. OBJETIVOS.....	9
4.1 Objetivo general.....	9
4.2 Objetivos específicos.....	9
5. MATERIALES Y MÉTODOS.....	11
5.1. Aspectos generales	11
5.2. Medición de la tasa de emisión de N ₂ O.....	12
5.3. Análisis de las muestras	13
5.4. Análisis estadístico	14
6. RESULTADOS.....	16
6.1 Variables del suelo	16
6.2. Emisión de N ₂ O en sistemas agrícolas con CC.....	17
6.3. Relaciones entre la emisión de N ₂ O y las variables del suelo	18
7. DISCUSIÓN.....	22
7.1. Emisión de N ₂ O y su relación con las variables de suelo	22
7.2. Pérdida de N en los sistemas agrícolas.....	23
7.3. Emisión de N ₂ O en sistemas de baja fertilización nitrogenada.....	24
8. CONCLUSIONES	27
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	29

1. RESUMEN

La reducción de las emisiones de gases con efecto invernadero es uno de los principales desafíos de la agricultura moderna para mitigar el cambio climático. La incorporación de mezclas de leguminosas y gramíneas como cultivo de cobertura en los sistemas agrícolas actuales permite reducir el uso de fertilizantes nitrogenados sintéticos y la lixiviación de nitratos, y reciclar nitrógeno. Sin embargo, la forma en que este manejo afecta las emisiones de óxido nitroso es incierta. El objetivo de este trabajo de tesis fue evaluar el impacto del uso de una mezcla de gramínea con leguminosa como cultivo de cobertura, previo al cultivo de maíz, sobre la emisión desde el suelo de óxido nitroso en sistemas agrícolas bajo siembra directa y con bajas dosis de fertilizantes nitrogenados. Para ello se trabajó en un experimento de larga duración ubicado en la EEA Pergamino seleccionando los tratamientos con avena+vicia y el control (sin cultivo de cobertura) como antecesores del cultivo de maíz fertilizado y no fertilizado con nitrógeno. Se midió la emisión de óxido nitroso, temperatura del suelo, humedad, nitratos y amonio durante diferentes momentos del crecimiento del maíz (emergencia, a V_{5-6} luego de la fertilización y a madurez fisiológica) y luego de la siembra de los cultivos de cobertura. Los resultados indican que las emisiones de óxido nitroso fueron mayores cuando se utilizó la avena+vicia como cultivo de cobertura (independientemente de la fertilización nitrogenada al maíz) con respecto al control. Además, la emisión de óxido nitroso fue diferente entre fechas, las cuales se asociaron a la presencia de nitratos y al nivel de humedad del suelo. La mezcla de leguminosas y gramíneas como cobertura aumenta las emisiones de óxido nitroso pero su adopción como alternativa de intensificación sustentable de los sistemas agrícolas debe considerarse en función de otros servicios ecosistémicos (ej secuestro de carbono) que también impactan sobre el cambio climático.

Palabras claves: gases de efecto invernadero, cultivos de cobertura, nitrato, humedad del suelo, fertilización nitrogenada, sustentabilidad

Introducción

2. INTRODUCCIÓN

2.1. Generalidades

En la actualidad, la mayoría de las prácticas agrícolas adoptadas están orientadas a incrementar la producción y la rentabilidad a corto plazo, simplificando el manejo, desconociendo los procesos inherentes a cada sistema de producción e ignorando los posibles efectos negativos sobre el ambiente y los servicios ecosistémicos (Andrade, 2016). Entre estos efectos se pueden señalar: la pérdida de biodiversidad, la contaminación de los recursos naturales con agroquímicos, la degradación de los suelos y el aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) (Andrade, 2016). Las emisiones de GEI provenientes de la agricultura y de otras actividades humanas, constituyen uno de los problemas ambientales más graves a los que debe enfrentarse la humanidad, debido a su íntima relación con el cambio climático (IPCC, 2014).

Los GEI son los componentes gaseosos de la atmósfera, de origen natural o antrópico, capaces de absorber y emitir eficazmente parte de la radiación infrarroja reflejada por la superficie terrestre, las nubes y la propia atmósfera. Esta propiedad de los GEI produce el denominado “efecto invernadero”, por el cual parte de la radiación infrarroja absorbida por los gases, es irradiada nuevamente a la superficie de la tierra suministrando una fuente de energía adicional a la radiación solar. El efecto neto de este fenómeno es un incremento de la temperatura media global. Sin este proceso la vida en el planeta tierra no sería posible, ya que la temperatura sería extremadamente baja (Benavides *et al.*, 2007).

A partir del siglo XIX se incrementaron notablemente las emisiones de GEI hacia la atmósfera, principalmente dióxido de carbono (CO₂), óxido nitroso (N₂O) y metano (CH₄), como resultado de actividades antrópicas vinculadas mayormente a la generación de energía, el transporte, la industria, el manejo de los residuos y a los sistemas agropecuarios (SAyDS, 2015). Este incremento de GEI impactó sobre el efecto invernadero derivando en un aumento de la temperatura media global del planeta. Este aumento de la temperatura es conocido como “calentamiento global” y tiene efectos sobre las precipitaciones (mayor variabilidad y ocurrencia de fenómenos meteorológicos extremos) y sobre los ecosistemas terrestres y marinos poniendo en riesgo su biodiversidad; además de generar incertidumbre respecto a la producción de alimentos (Melillo *et al.*, 2014). Por lo tanto, se debe alentar al sector agropecuario a la

intensificación sostenible de la producción de alimentos, contribuyendo a la mitigación y el secuestro de gases de efecto invernadero.

2.2. El rol de la agricultura sobre las emisiones de GEI

A nivel mundial, diferentes sectores son responsables de la emisión de los GEI y el impacto que éstos tienen a nivel global. Así, el sector energético es señalado como el principal responsable de emitir CO_2 debido a la quema de combustibles fósiles. Por su parte, la agricultura contribuye con el 60% de las emisiones antropogénicas de N_2O , y los suelos agrícolas son la fuente dominante (IPCC, 2013; Montzka *et al.*, 2011). El N_2O posee un poder de calentamiento global 298 veces mayor al del CO_2 en un período de 100 años (IPCC, 2013). En función de esto, existe una necesidad de mejorar la gestión del nitrógeno (N) en los sistemas agrícolas con la finalidad de reducir las emisiones de N_2O debido a que su remoción de la atmósfera podría tener un impacto 300 veces mayor que remover la misma masa de CO_2 (Robertson, 2004). Por este motivo, con pequeños cambios en los flujos netos de este GEI, se puede contribuir significativamente en la mitigación del calentamiento global.

El N_2O proveniente de la agricultura, tiene su origen a partir de todo el N que ingresa anualmente a los suelos, cuyas fuentes más importantes son los fertilizantes sintéticos, la fijación biológica del N y los residuos aportados por los cultivos. La emisión de N_2O a partir de estas fuentes se produce luego en forma natural, mediante procesos microbianos involucrados en el ciclo del N. Los procesos microbianos como la mineralización, la nitrificación y la desnitrificación regulan la dinámica del N en el suelo. La nitrificación y, especialmente, la desnitrificación generan emisiones de N_2O . La nitrificación es un proceso llevado a cabo por bacterias aeróbicas que ocurre en dos etapas. En la primera, el amonio (NH_4^+) es oxidado a nitrito (NO_2^-) y en la segunda etapa el NO_2^- se oxida a nitrato (NO_3^-). El NH_4^+ interviniente en dicho proceso puede provenir tanto de la mineralización de la materia orgánica del suelo, de la descomposición de residuos vegetales, y de fertilizantes nitrogenados (Figura 1). La nitrificación es un proceso aerobio, pero cuando la provisión de oxígeno es limitada se genera N_2O como subproducto. Por otro lado, la desnitrificación se activa una vez que el oxígeno ha sido consumido y se han generado microambientes anaeróbicos dentro del perfil del suelo. Es un proceso llevado a cabo por bacterias anaeróbicas facultativas, que utilizan al carbono orgánico del suelo como fuente de energía y al NO_3^- como aceptor final de electrones,

cuando el oxígeno es limitante, reduciéndolo a nitrógeno atmosférico (N₂) y a otra forma gaseosa como el N₂O (Figura 2).

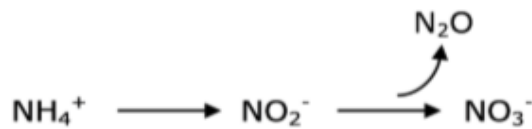


Figura 1. Esquema del proceso de nitrificación

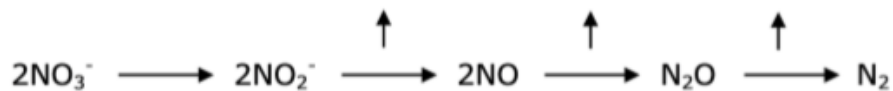


Figura 2. Esquema del proceso de desnitrificación

2.3. Factores edáficos que regulan las emisiones de N₂O

Los factores edáficos que más influyen sobre la actividad de los microorganismos involucrados en los procesos de nitrificación y desnitrificación son: la humedad, la temperatura y el nitrógeno disponible:

- **Humedad:** en condiciones de elevado contenido hídrico, predomina la actividad de las bacterias desnitrificadoras, las cuales requieren condiciones de anaerobiosis. Con un porcentaje de poros llenos de agua (WFPS, por sus siglas en inglés “Water Filled Pore Space”) de alrededor de 60% se maximiza la producción de N₂O (Gao *et al.*, 2014), aunque hay varios trabajos que reportan una mayor emisión con WFPS cercanos a 80% (Davidson, 1992; Dobbie y Smith, 2001). En condiciones de menor humedad, predomina la nitrificación. Si bien la emisión de N₂O por nitrificación es menos relevante, se registra un máximo de actividad con 20% de WFPS (Ludwig *et al.*, 2001).
- **Temperatura:** la temperatura del suelo influye fuertemente sobre la tasa de emisión de N₂O. Un aumento de temperatura, actúa de manera directa promoviendo una mayor actividad microbiana y, en consecuencia, favoreciendo los procesos biológicos que culminan en la emisión de N₂O. Además, la temperatura genera aumentos en la respiración, provocando el consumo de oxígeno del suelo. Esto

favorece la ocurrencia de condiciones de anaerobiosis requeridas para el proceso de desnitrificación (Butterbach-Bahl *et al.*, 2013).

- Nitrógeno disponible: el proceso de desnitrificación requiere que haya NO_3^- disponibles en el suelo. Cuanto mayor sea el nivel de NO_3^- , mayor es la factibilidad que ocurra desnitrificación. En los sistemas agrícolas de nuestro país, el principal ingreso de N proviene de la fertilización nitrogenada (exceptuando cultivos con fijación biológica) y las estimaciones le asignan a los fertilizantes sintéticos el 10-12% del N_2O emitido a la atmósfera (Taboada y Cosentino, 2011).

2.4. Prácticas agrícolas que proveen múltiples beneficios al sistema

Una de las prácticas que actualmente ha tomado importancia por los servicios que ofrece a los sistemas agrícolas es el uso de cultivos de cobertura (CC). Los CC invernales son aquellos que se establecen entre dos cultivos de verano, los mismos no son incorporados al suelo, pastoreados ni cosechados (Ruffo y Parsons, 2004), si no que suelen secarse mediante la aplicación de herbicidas con cierta anticipación a la siembra del cultivo de cosecha posterior (Scianca, 2010). De este modo, los residuos de los CC quedan en superficie, protegiendo al suelo y liberando los nutrientes contenidos en la biomasa vegetal como resultado de procesos de degradación de la misma (Ruffo, 2004).

La inclusión de los CC en secuencias agrícolas influye sobre el ciclo de N (Di y Cameron, 2002; Portela *et al.*, 2016). La experiencia ha demostrado que distintas especies de ciclo otoño-invernal como CC reduce el N potencialmente lixiviable a través de su absorción, inmovilización (en los CC y en la materia orgánica lábil) y posterior suministro a los cultivos principales (Thorup-Kristensen *et al.*, 2003; Constantin *et al.*, 2010; Restovich *et al.*, 2012; Rimski-Korsakov *et al.*, 2015). Además, el N absorbido por los CC es liberado lentamente durante el ciclo del cultivo de verano siguiente (Alvarez *et al.*, 2017), aumentando su disponibilidad cuando proviene de una leguminosa, debido a que la descomposición del material vegetal con baja relación C/N aumenta el contenido de N en el suelo (Basche *et al.*, 2014; Sanz-Cobena *et al.*, 2014). Por otra parte, se ha observado, en el corto plazo, que la inclusión de CC incrementa el carbono orgánico del suelo (Irizar *et al.*, 2018) y que aumenta la macroporosidad y la estabilidad estructural del suelo en asociación con los momentos de mayor aporte de carbono (C) (Dube *et al.*, 2012; Restovich *et al.*, 2011; Rimski-Korsakov *et al.*, 2015).

Entre las opciones disponibles de CC, las leguminosas tienen capacidad para fijar N atmosférico a través de relaciones mutualistas, de manera que, manejadas

correctamente pueden reducir la necesidad de fertilizante nitrogenado de los cultivos siguientes debido a su aporte de N extra (Schipanski *et al.*, 2014). Las gramíneas dejan abundantes residuos en superficie con alta relación C/N, por lo que su descomposición es más lenta, lo que permite una mejor regulación de la temperatura y agua del suelo, brindándole además protección. La mezcla de especies permite complementar nichos mejorando el funcionamiento del suelo y la productividad del sistema de manera integral. Así, varios autores observaron mejoras en las reservas orgánicas edáficas, incrementos en la diversidad de microorganismos del suelo y mayores rendimientos en cultivos comerciales luego de incorporar mezclas de CC en secuencias agrícolas (Gregory *et al.*, 2013; Chavarria *et al.*, 2016; Restovich *et al.*, 2018).

La inclusión de leguminosas como CC en las rotaciones generó aumentos en las emisiones de GEI, pero dicho incremento no se verificó cuando se utilizaron mezclas de especies como CC (Basche *et al.*, 2014). Sin embargo, por el momento, no hay bibliografía disponible acerca del impacto de la inclusión de CC sobre la emisión de N₂O en Región Pampeana. Por otro lado, el efecto de utilizar mezclas de gramíneas y leguminosas sobre las emisiones tampoco fue estudiado en la región. Por lo antes expuesto, en el presente trabajo se propuso cuantificar las emisiones de N₂O desde el suelo en una rotación soja-maíz con inclusión de una mezcla de avena y vicia como CC. Se buscó comprender cómo esta práctica de manejo agrícola impacta sobre las emisiones de N₂O debido a que es un requisito previo fundamental para desarrollar protocolos de mitigación.

Hipótesis y objetivos

3. HIPÓTESIS

La inclusión de una gramínea (*Avena sativa*) con una leguminosa (*Vicia villosa*) como cultivo de cobertura previo al cultivo de maíz afecta la tasa de emisión de óxido nitroso proveniente del suelo por mayor disponibilidad de nitrógeno y por regular la dinámica del agua en comparación del control sin cultivos de cobertura.

4. OBJETIVOS

4.1 Objetivo general

Evaluar el impacto del uso de un cultivo de cobertura que combina una leguminosa con una gramínea, como antecesor de maíz, sobre la emisión desde el suelo de óxido nitroso en sistemas agrícolas bajo siembra directa y con bajas dosis de fertilizantes nitrogenados.

4.2 Objetivos específicos

- Determinar si la mezcla de una gramínea y una leguminosa como cultivo de cobertura influye sobre la disponibilidad de agua, nitrato y amonio durante el ciclo del crecimiento del maíz.
- Evaluar el efecto de una leguminosa en mezcla con una gramínea, como antecesores de maíz, sobre la emisión de óxido nitroso en relación a la secuencia de cultivos sin cultivo de cobertura.

Materiales y métodos

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1. Aspectos generales

Para cumplir con los objetivos propuestos se desarrollaron diferentes actividades durante el crecimiento del maíz utilizando el ensayo de larga duración de Cultivos de Cobertura de la EEA Pergamino de INTA, instalado en el año 2005. El ensayo presenta una secuencia soja-maíz con diferentes CC de ciclo otoño-invernal. El diseño experimental es en parcelas divididas en bloques completamente aleatorizados (BCA) con tres repeticiones. La parcela mayor (10x30m) corresponde al CC y la subparcela (5x30m) a la dosis de fertilizante nitrogenado el cual sólo se aplica al maíz (0 y 32 kg N ha⁻¹) cuando alcanza el estado fenológico de V₅₋₆ (quinta y sexta hoja desarrollada).

Los CC son sembrados en línea bajo siembra directa y fertilizados con 14,7 kg de P₂O₅ ha⁻¹ (70 kg de superfosfato simple ha⁻¹). Las especies utilizadas son: cebada forrajera (*Hordeum vulgare*), ryegrass (*Lolium multiflorum*), avena (*Avena sativa*), cebadilla criolla (*Bromus unioloides*), vicia (*Vicia villosa*), colza (*Brassica napus*) y nabo forrajero (*Raphanus sativus*), así como también una mezcla de avena y vicia. Las densidades de siembra son de 70, 20, 80, 25, 70, 5, 20 kg ha⁻¹, respectivamente. Para la consociación avena-vicia, se emplea una densidad de 20 kg ha⁻¹ para la gramínea y 40 kg ha⁻¹ para la leguminosa. El ensayo incluye también un control sin CC. La vicia se inocula con *Rhizobium leguminosarum biovarviceae* inmediatamente antes de la siembra.

Previo a la siembra del maíz, los CC fueron secados mediante la aplicación de glifosato (3 lts ha⁻¹, al 48%) y 2,4 D (0,5 lts ha⁻¹, al 100%) (éster isobutílico del ácido 2,4-dicloro fenoxibutírico). La siembra de maíz se llevó a cabo el 4 de octubre de 2017, el híbrido utilizado fue un Dk 7210 VT3P, con una densidad de 75.000 semillas ha⁻¹ y un distanciamiento de 70 cm entre hileras. En cuanto a la fertilización, al momento de la siembra se aplicó en la misma línea de siembra 32 kg P₂O₅ ha⁻¹ (152 kg de superfosfato simple ha⁻¹). Luego, en el estado fenológico de V₅₋₆ del maíz, se fertilizó al voleo con 32 kg N ha⁻¹ utilizando urea como fuente, sólo en las subparcelas a las que se le había asignado esa dosis de fertilizante nitrogenado.

5.2. Medición de la tasa de emisión de N₂O

Los muestreos se realizaron en diferentes momentos del ciclo ontogénico del maíz, sobre la consociación avena-vicia y el control como antecesores. Los tratamientos seleccionados en cada uno de los tres bloques fueron: avena-vicia no fertilizada (Avena-Vicia NF), avena-vicia fertilizada (Avena-Vicia F) y el control fertilizado (Control). En todos los casos la fertilización hace referencia a la efectuada en el estado fenológico V₅₋₆ del maíz.

Al momento de realizar las mediciones se tuvieron en cuenta las precipitaciones caídas durante el periodo de estudio (Figura 3), ya que las emisiones de N₂O dependen directamente de la humedad del suelo (Gao et al., 2014). Los momentos y las fechas en que se realizaron los muestreos se detallan a continuación:

- Luego de la emergencia del maíz:
 - 17/10/2017- suelo seco
 - 20/10/2017- suelo húmedo
- Posterior a la fertilización nitrogenada, cuando el cultivo se encontraba en V₅₋₆,
 - 29/11/2017- suelo muy seco
 - 04/12/2017- suelo muy húmedo
 - 06/12/2017- humedad intermedia
- A madurez fisiológica del cultivo (19/03/2018)
- Siembra CC posterior cosecha de maíz (03/05/2018)

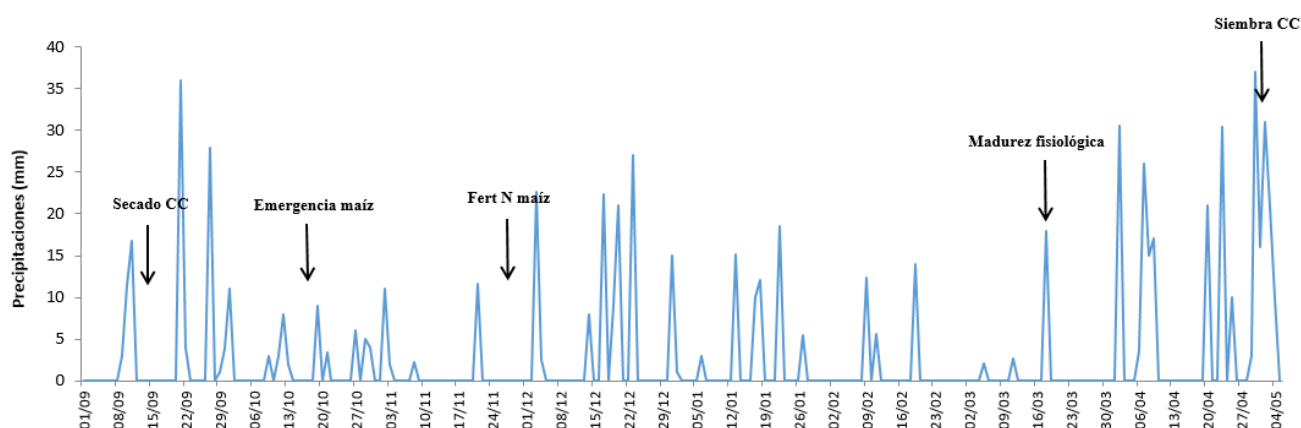


Figura 3. Precipitaciones registradas durante el periodo de estudio

Las emisiones de N₂O se determinaron utilizando cámaras estáticas ventiladas (Livingston y Hutchinson, 1995) que fueron colocadas de manera aleatoria dentro de cada parcela (2 cámaras por parcela). Cada cámara consta de dos partes: una base permanente hecha de hierro de pared delgada, que se insertó hasta 10 cm en el suelo, y una tapa de cámara de PVC que contiene el punto de muestreo y el tubo de ventilación. Las cámaras, cubiertas con un aislante reflectante, son de 37 cm de largo, 25,5 cm de ancho y 14 cm de alto, con un volumen de 0,0132 m³. Para la medición, la tapa de la cámara se colocó sobre la base, sellando con agua la unión entre la base y la tapa. Cuando la altura de la planta de maíz excedió la de las cámaras, los tallos se cortaron a menos de 2 cm por encima del suelo minutos antes de la medición. Se tomaron tres muestras de 10 ml de aire por cámara con intervalos de 15 min (0,15 y 30 minutos) entre las 9 am y las 12 pm (cuando la temperatura del aire ambiental era similar a la temperatura media diaria). Los gases contenidos en cada cámara fueron transferidos con una bomba de vacío manual, a viales de vidrio de 10 ml sellados con septum de caucho butilo.

En cada fecha de muestreo, adicionalmente, se tomaron muestras de suelo a 0-10 cm de profundidad en la zona cercana a las cámaras. Estas muestras se utilizaron para determinar el contenido de NO₃⁻ por el método del fenoldisulfónico (Mulvaney, 1996), el contenido de NH₄⁺ por el método de destilación con vapor (Bremner, 1996), humedad del suelo por gravimetría (Hillel, 1980) y la temperatura del suelo, del aire (a la sombra) y dentro de la cámara a través de un termómetro. Además, en la primera fecha de muestreo se midió la densidad aparente mediante el método del cilindro (Blake y Hartge, 1986). Utilizando el valor de la humedad gravimétrica y la densidad aparente se expresó el valor de humedad en porcentaje de volumen de poros del suelo llenos de agua (%WFPS):

WFPS= (Hum grav , (%) x DAP (g cm⁻³)) / Porosidad total. Porosidad total = 1-(DAP/2,65), siendo 2,65 g cm⁻³ la densidad de partícula del suelo (mg m⁻³).

5.3. Análisis de las muestras

Los viales fueron enviados a la cátedra de bioquímica de la Facultad de Agronomía de Buenos Aires (UBA) para la medición de la concentración de N₂O por cromatografía gaseosa con un cromatógrafo de gases marca AGILENT (Agilent Technologies 6890N). Con los valores medidos por el cromatógrafo, se determinó la tasa de emisión a partir de la variación de la concentración de N₂O en el espacio libre de la cámara entre los 0

(concentración ambiental) y los 30 minutos (d N₂O/d t) (Parkin y Venterea, 2010). Los valores de concentración fueron convertidos en flujo ($\mu\text{g m}^{-2} \text{h}^{-1}$) utilizando el método de regresión lineal (Venterea, 2010).

5.4. Análisis estadístico

Se aplicó un modelo lineal mixto con medidas repetidas en el tiempo, con la fecha, el tratamiento y su interacción (fecha*tratamiento) como efectos fijos y el bloque como efecto aleatorio. Las 2 subréplicas dentro de cada parcela fueron promediadas para obtener un valor único de emisión por bloque. Se utilizó una estructura de correlación temporal auto regresiva continua de orden 1, que se utiliza cuando los tiempos entre mediciones no son equidistantes (como en este caso). Debido a que no se cumplían los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianza se modeló la varianza para el factor fecha. Los valores medios se compararon mediante la prueba de diferencia mínima significativa (LSD) protegida por Fisher ($p < 0,05$). Se realizaron correlaciones entre la emisión de N₂O y las variables edáficas a través del método de Spearman. Los análisis estadísticos se realizaron utilizando Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2011).

Resultados

6. RESULTADOS

6.1 Variables del suelo

Se observó una interacción significativa entre la fecha de muestreo y el tratamiento para las variables %WFPS ($p=0,04$) y contenido de NO_3^- del suelo ($p= 0,028$) (Tabla 1). La interacción para ambas variables se analizó por fecha de muestreo. Al momento de la emergencia del maíz, en ambas fechas analizadas (17/10/17 y 20/10/17), el %WFPS en el control fue menor que en la rotación con CC (48% vs 63%, respectivamente). Luego de la fertilización nitrogenada de maíz, en la fecha 29/11/17, el control presentó mayor %WFPS con respecto a avena-vicia F y NF, sin diferencias entre estas últimas. Para el resto de las fechas evaluadas luego de la fertilización (04/12/2017 y 06/12/2017) no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos. A madurez fisiológica del maíz (19/03/2018), el %WFPS del control fue mayor respecto al tratamiento avena-vicia F. Avena-vicia NF no presentó diferencias significativas con estos tratamientos. Por último, a la siembra de los CC (03/05/18) no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos.

El contenido de NO_3^- del suelo sólo difirió entre tratamientos en la primera medición realizada en emergencia del maíz y en madurez fisiológica ($p<0,05$). En estas fechas, la rotación con avena+vicia NF presentó los mayores contenidos de NO_3^- , el control sin CC los menores valores y la rotación con avena+vicia F no presentaron diferencias significativa.

El contenido de NH_4^+ y la temperatura de suelo presentaron diferencias significativas entre fechas ($p<0,05$; Tabla 1). El mayor contenido de NH_4^+ se observó a los 6 días de la aplicación del fertilizante (04/12/2017). Los menores contenidos correspondieron a la madurez fisiológica del cultivo de maíz y a la siembra de los cultivos de CC. Luego de la emergencia del cultivo de maíz, los contenidos de NH_4^+ fueron intermedios y sin diferencias con dos de las fechas posteriores a la fertilización (29/11/2017 y 06/12/2017). Con respecto a la temperatura del suelo, las más altas se observaron luego de la fertilización, periodo que coinciden con los meses más cálidos del año, y las más bajas a la emergencia del maíz y a la siembra de los CC.

Tabla 1. Valores medios de contenido de humedad en porcentaje de volumen de poros del suelo llenos de agua (WFPS), nitrato (NO₃⁻), amonio (NH₄⁺), y temperatura (T) del suelo en diferentes momentos durante el ciclo evaluado del cultivo de maíz (posterior a la emergencia y fertilización y en madurez fisiológica) y posterior a la siembra de CC.

	Emergencia		Post-Fertilización			Madurez fisiológica	Siembra CC
Fecha	17/10/17	20/10/17	29/11/17	04/12/17	06/12/17	19/03/18	03/05/18
WFPS %^(*)							
Av-V F	61,2 A	67,4 A	34,9 B	50,6 A	42,3 A	33,1 B	67,6 A
Av-V NF	62,7 A	62,5 A	38,1 B	53,2 A	42,3 A	34,2 AB	69,3 A
Control	46,5 B	51,2 B	48,8 A	53,3 A	41,7 A	40,3 A	71,8 A
NO₃⁻ (mg kg⁻¹)^(*)							
Av-V F	9,5 AB	14,0 A	5,4 A	24,3 A	28,7 A	10,3 AB	5,0 A
Av-V NF	11,2 A	14,6 A	4,1 A	16,8 A	25,4 A	12,8 A	4,5 A
Control	7,0 B	10,3 A	8,4 A	22,9 A	39,1 A	8,2 B	3,4 A
NH₄⁺(mg kg⁻¹)^(**)							
Av-V F	26,1 B [†]	28,4 B	21,7 BC	62,2 A	24,1 BC	14,6 C	12,7 C
Av-V NF							
Control							
T (°C)^(**)							
Av-V F	17,2 CD	16,2 E	23,9 A	20,9 B	20,9 B	16,9 DE	17,8 C
Av-V NF							
Control							

*interacción significativa entre fecha de muestreo y tratamiento. Letras diferentes indican diferencias significativas dentro de una misma fecha.

** Interacción no significativa entre fecha de muestreo y tratamiento. Letras diferentes indican diferencias significativas entre fechas de muestreo.

6.2. Emisión de N₂O en sistemas agrícolas con CC

La emisión de N₂O presentó diferencias significativas entre tratamientos ($p=0,038$) y entre fechas ($p<0,001$), sin interacción entre las mismas. Durante todo el período evaluado, el tratamiento con avena+vicia presentó mayores emisiones de N₂O que el control: 213 vs 43 $\mu\text{g N-N}_2\text{O m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (Figura 4). La mezcla de avena+vicia como antecesora de maíz fertilizado con N presentó igual emisión de N₂O que la mezcla en parcelas no fertilizadas.

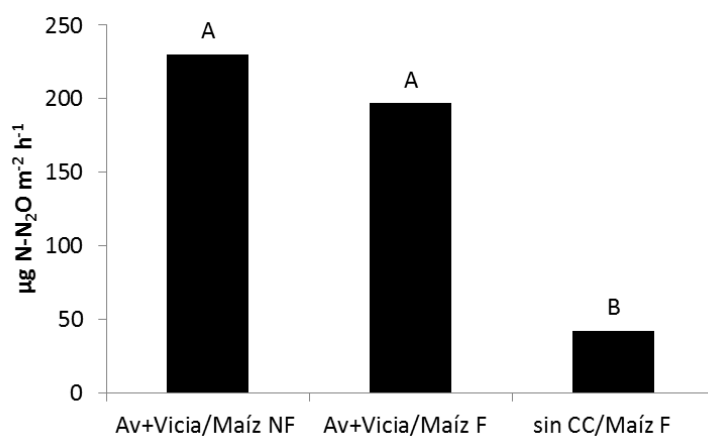


Figura 4. Promedio de las emisiones de N₂O en todas las fechas evaluadas durante el cultivo de maíz con antecesor avena+vicia y el control sin CC

Las fechas en las que se registraron mayores emisiones de N₂O fueron luego de la emergencia del maíz, con suelo húmedo, y a la siembra de los CC luego de la cosecha del maíz (Figura 5). En estos momentos, la diferencia entre parcelas con y sin CC fueron máximas (799 vs. 84 y 383 vs. 66 µgN-N₂O m⁻² h⁻¹ para emergencia y cosecha, respectivamente). Los momentos con menores niveles de emisión fueron luego de la fertilización nitrogenada de maíz pero con suelo muy seco (25,8 µgN-N₂O m⁻² h⁻¹) y a madurez fisiológica (2,97 µgN-N₂O m⁻² h⁻¹).

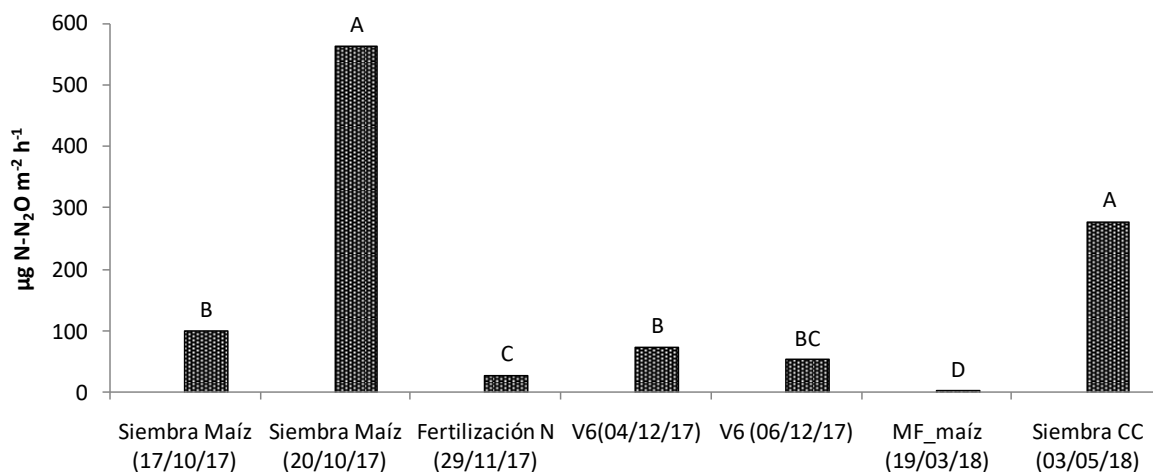


Figura 5. Emisión promedio de N₂O por fecha de medición durante el ciclo de muestreo.

6.3. Relaciones entre la emisión de N₂O y las variables del suelo

La tasa de emisión de N₂O correlacionó positivamente con el %WFPS ($r= 0.68$; $p=0,00015$) y no hubo correlación con el contenido de NO₃⁻, NH₄⁺ y temperatura del suelo

(Figura 6). Al analizar separadamente las distintas etapas del ciclo de maíz (siembra de maíz, fertilización nitrogenada y madurez fisiológica) y la siembra del CC, la tasa de emisión de N_2O se correlacionó positivamente con el contenido NO_3^- ($r= 0,98$ $p= 0,004$) sólo en los momentos medidos luego de la siembra del maíz (Figura 7).

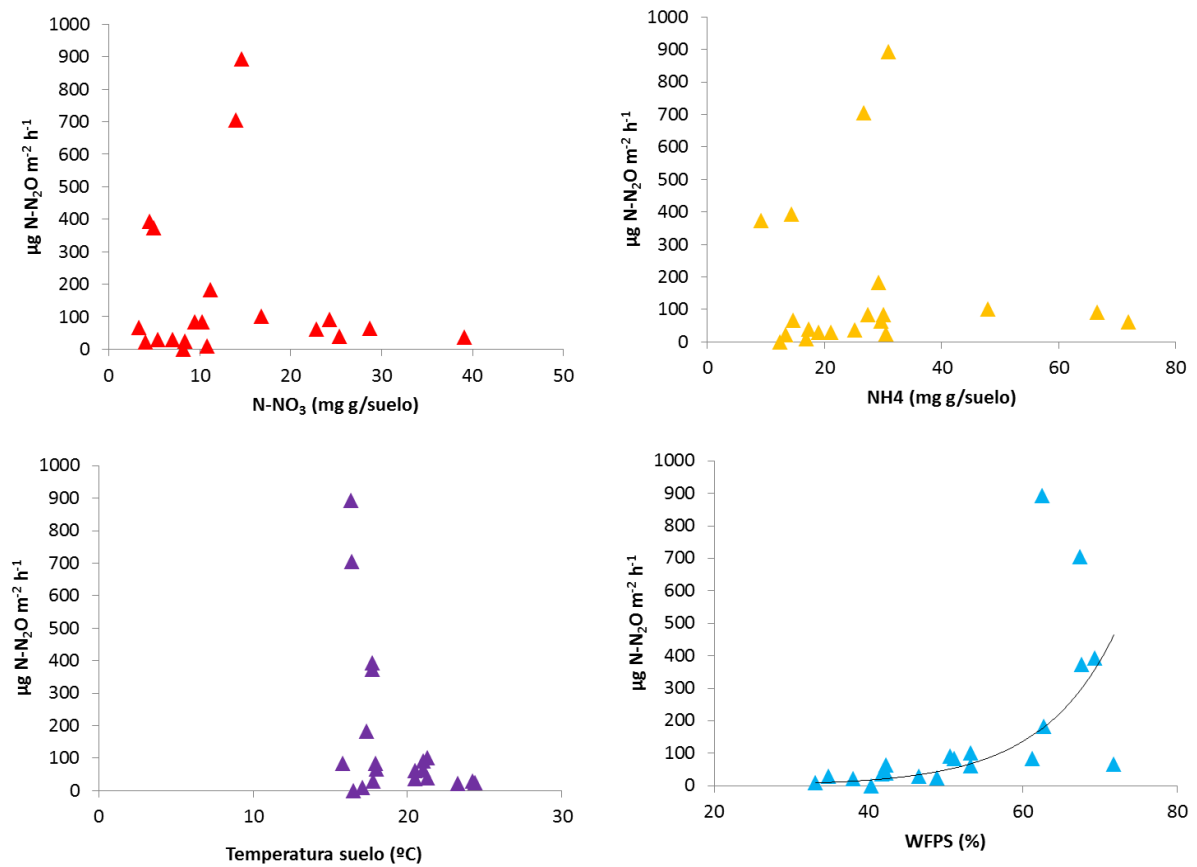


Figura 6. Relación entre las emisiones de N_2O y diferentes variables del suelo

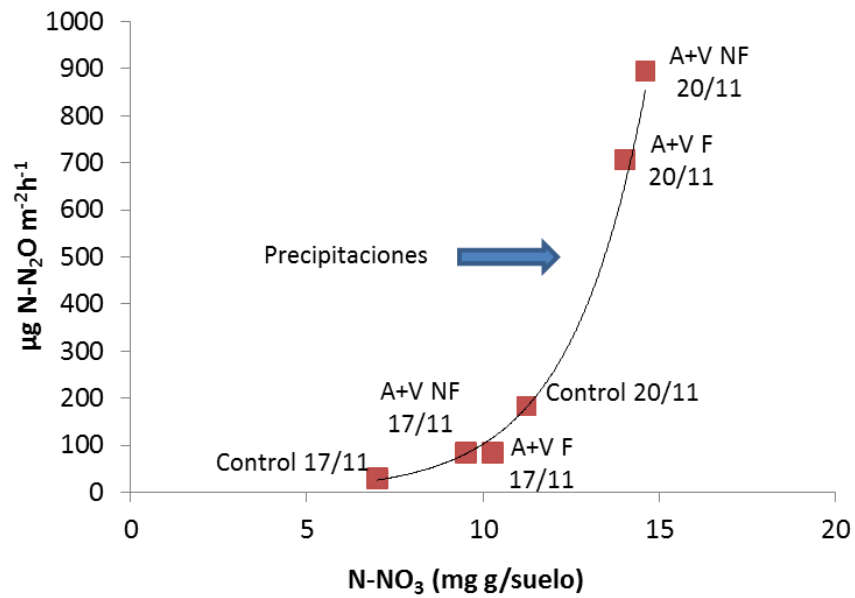


Figura 7. Relación entre las emisiones de N₂O y el contenido de nitratos (N-NO₃⁻) en los primeros 10 cm de suelo durante las fechas de medición posterior a la emergencia del maíz

Discusión

7. DISCUSIÓN

7.1. Emisión de N₂O y su relación con las variables de suelo

La inclusión de CC en la rotación genera cambios en algunos parámetros edáficos bióticos y abióticos (Guardia *et al.*, 2016), incluyendo aquellos que regulan la emisión de N₂O, como la humedad, temperatura y disponibilidad de N. Durante el periodo evaluado la introducción de la mezcla avena+vicia como antecesora de maíz aumentó la emisión de N₂O hacia la atmósfera. Estos resultados no están en concordancia con lo observado por Han *et al.* (2017), quienes no encontraron un efecto significativo de los CC en las emisiones de N₂O debido a las altas dosis de fertilizantes nitrogenados utilizados durante la temporada de crecimiento del cultivo comercial.

A la emergencia del maíz, la avena+vicia produjo mayor emisión, especialmente luego de la precipitación ocurrida entre la primera y la segunda medición. Este resultado se debe principalmente a la mayor disponibilidad de N, producto de la descomposición de los residuos del CC y al efecto de la humedad sobre la emisión. La mezcla evaluada tiene un 65% de leguminosa, lo que resulta en un enriquecimiento mayor del perfil del suelo con N (Restovich *et al.*, 2012) con respecto a mezclas con menor proporción de leguminosas; si este N no es absorbido por algún cultivo puede perderse del sistema por lixiviación o desnitrificación (Constantin *et al.*, 2010). En relación a esto, Peyrard *et al.* (2016) observaron a corto plazo un aumento en los flujos de N₂O después del secado de la vicia como CC en momentos de mayor humedad.

Entre V₅₋₆ del cultivo de maíz se fertilizó con N debido a que comienza una mayor demanda por parte del cultivo. Luego de la fertilización nitrogenada llovieron 25 mm, triplicando las emisiones independientemente de los tratamientos con y sin CC (29/11/2017= 25,9 µg N-N₂O m² h⁻¹ vs 04/12/2017= 84,3 µg N-N₂O m² h⁻¹), aunque la cantidad total emitida durante estos días fue menor en comparación con otros momentos evaluados. Las precipitaciones durante este periodo fueron bajas por lo que la humedad en el suelo fue el factor condicionante de lo emitido, ya que si bien la fertilización nitrogenada enriqueció el suelo con NO₃⁻ no hubo un fuerte impacto sobre las emisiones totales de N₂O comparado con otros momentos del ciclo del cultivo. Además, de la baja humedad, la absorción de N por parte del cultivo de maíz es otro factor que podría estar afectando la emisión de N₂O.

El contenido de agua en los poros fue uno de los factores más importantes que influyó sobre las emisiones de N₂O. Gao *et al.* (2014) y Davidson *et al.* (1992) reportaron

que entre el 60-80% de poros llenos de agua aumentan la emisión de N_2O , lo que está en concordancia con los momentos de mayor emisión registrados en esta tesis. Luego de la emergencia del maíz se observó que el %WFPS estaban alrededor de 63% y 48% para las parcelas con CC y el control, respectivamente, para los dos momentos de muestreo. Estos resultados podrían relacionarse con lo que informaron Álvarez *et al.* (2017) donde si bien la inclusión de CC en la rotación aumenta el consumo de agua en comparación al barbecho tradicional, el efecto sobre la humedad de los primeros centímetros del suelo es variable. Además, los residuos muertos en superficie controlan las pérdidas de agua por evaporación. Esta mayor humedad en los primeros centímetros del suelo junto con un ambiente edáfico más rico en N predispone a mayores pérdidas de N_2O del sistema hacia la atmósfera lo que se ve estimulado por la ocurrencia de precipitaciones. Por otro lado, como se mencionó anteriormente luego de la fertilización del maíz aumentó el N en el suelo y, si bien se registraron precipitaciones, éstas no tuvieron un fuerte impacto sobre la emisión, evidenciando cómo la falta de humedad (WFPS= 45%) restringió las emisiones. La medición del %WFPS realizada inmediatamente después de la fertilización nitrogenada mostró que el control tenía un mayor porcentaje de poros llenos de agua que las parcelas con CC (49% vs 35-38%, respectivamente). Este resultado posiblemente esté asociado a que, como las parcelas con CC aportan más N al cultivo de maíz desde el momento de secado (Rimski-Korsakov *et al.*, 2015) y el N representa un estímulo a la absorción de agua, posiblemente el maíz haya absorbido más agua hasta este momento secando en mayor medida el suelo en comparación con el control.

La temperatura del suelo es otro de los factores que condiciona la emisión de N_2O debido a su influencia sobre la actividad de los microorganismos. En general, una mayor cobertura se asocia a una menor amplitud térmica (Larney *et al.*, 2003). En este trabajo no se observaron diferencias de temperatura entre tratamientos pero sí entre momentos asociado a la estación anual. En los resultados obtenidos en esta tesis no se encuentra una relación entre la temperatura y la emisión de N_2O como sí se observa con el %WFPS. Fang y Moncrieff (2001) observaron que en condiciones de campo, los efectos de la humedad y de la temperatura se superponen, lo cual podría dificultar observar correlaciones claras entre las emisiones y las temperaturas del suelo.

7.2. Pérdida de N en los sistemas agrícolas

El N en forma de NO_3^- es móvil en el suelo y por lo tanto, está sujeto a perderse a través de dos vías principales: por lixiviación y por liberación de formas gaseosas,

principalmente N_2 y N_2O (Galloway *et al.*, 2003). En los sistemas agrícolas de la región pampeana, los momentos de mayores pérdidas de N por lixiviación coinciden con la concentración de precipitaciones y con cultivos con baja capacidad de absorción, ya sea porque están recién implantados o porque están finalizando su ciclo (cosecha) (Portela *et al.*, 2006). El uso de CC de ciclo otoño-invernal es una opción para capturar ese N edáfico, mitigando su pérdida por lixiviación (Thorup-Kristensen *et al.*, 2003; Restovich *et al.*, 2012). Los CC reciclan el N en el sistema provocando pulsos de enriquecimiento de N en determinados momentos, los cuales pueden estar sujetos a otras pérdidas como la de emisión de N_2O . Según lo observado en esta tesis las pérdidas de N por emisión de N_2O coinciden con los momentos de mayores pérdidas por lixiviación observados en la región (Portela *et al.*, 2006, 2009). Así, los resultados obtenidos resultan útiles para complementar la información y poder establecer estrategias de mitigación.

Una alternativa que podría contribuir a disminuir la pérdida de N por emisión, sería incrementar la proporción de gramíneas en la mezcla con leguminosas como CC, con el objetivo de lograr residuos con una relación C/N más alta, favoreciendo aún más el proceso de inmovilización. Sin embargo, una mayor proporción de gramíneas podría afectar el rendimiento de maíz. Restovich *et al.* (2012) informaron que los rendimientos de maíz disminuían cuando las relaciones C/N de los CC aumentaban, asociado posiblemente a la inmovilización de N en el suelo. En este contexto, se debe seguir estudiando los sistemas con mezclas de CC para poder aplicar algún manejo de mitigación de las emisiones de N_2O sin afectar el rendimiento del maíz.

Por otro lado, se debe destacar que este estudio se realizó luego del secado del CC, indicando que resultados diferentes se podrían obtener durante el crecimiento del CC. En este sentido, Thorup-Kristensen *et al.* (2003) observó que cuando se utilizó un CC durante los períodos de barbecho se redujeron significativamente las emisiones de N_2O , asociado, posiblemente, a que los CC absorben el N edáfico y llevan a una disminución de la emisión de N_2O al reducir la cantidad de NO_3^- del suelo.

7.3. Emisión de N_2O en sistemas de baja fertilización nitrogenada

El sistema bajo estudio utiliza baja dosis de fertilizantes nitrogenados, probablemente por esto no se encontraron diferencias entre tratamiento en avena+vicia F y NF como así tampoco una alta tasa de emisión luego de la fertilización nitrogenada. Han *et al.* (2017) mostraron que altas dosis de fertilización nitrogenada tuvieron un fuerte impacto sobre la emisión de N_2O . Por otro lado, cuando las dosis de fertilizantes aplicadas

al maíz no se reducen en función del N residual proveniente de leguminosas como CC, las emisiones de N₂O aumentan durante el crecimiento del maíz (Halvorson *et al.*, 2010). En otros estudios en los que se redujeron las tasas de fertilizantes para los cultivos comerciales no leguminosos, no hubo un aumento en la emisión de N₂O después del uso de leguminosas como CC y la emisión acumulada fue menor en comparación con los monocultivos (Adviento-Borbe *et al.*, 2007). La aplicación de fertilizantes nitrogenados en combinación con la biomasa de leguminosas ricas en N generalmente da como resultado una sobre aplicación de N al suelo (Komatsuzaki *et al.*, 2008), por lo que se debe tener en cuenta el aporte de la leguminosa y complementar con el fertilizante para no generar más pérdidas de N del sistema.

Conclusiones

8. CONCLUSIONES

La inclusión de la mezcla avena+vicia como antecesora del cultivo de maíz aumento la emisión de N_2O del sistema agrícola. Los factores que regularon las emisiones fueron la humedad del suelo, la cual estuvo vinculada con las precipitaciones caídas durante el ciclo bajo estudio y la absorción por parte del cultivo y el contenido de NO_3^- edáfico producto de la descomposición de los residuos de la mezcla de CC y el fertilizante. Los picos de emisión de N_2O coincidieron con los momentos más vulnerables de pérdida de N del sistema: primavera y otoño. En estos momentos se concentran las precipitaciones y el cultivo tiene baja capacidad de absorción de agua y N. Si bien en este estudio la inclusión de avena-vicia como CC parece no ser una alternativa viable para la mitigación de los GEI, está demostrado que esta práctica aporta otros beneficios al sistema. Por lo tanto, es necesario realizar un balance entre las ventajas y desventajas del uso de mezclas de CC para evaluar su capacidad de mitigación del cambio climático en el largo plazo. Además, se debería ampliar el periodo de estudio que incorpore el ciclo de crecimiento de los CC como así también considerar años con precipitaciones variables que permitan sacar conclusiones más integrales.

Referencias bibliográficas

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adviento-Borbe, M. A. A.; Haqddix, M. L., Binder, D. L., Walters, D. T. y Dobermann, A. (2007). Soil greenhouse gas fluxes and global warming potential in four high-yielding maize systems. *Global Change Biology*, 13: 1972-1988.
- Alvarez, R., Steinbach, H. S. y De Paepe, J. L. (2017). Cover crops effects on soils and subsequent crops in the pampas: a meta-analysis. *Soil and Tillage Research*, 170: 53-65.
- Andrade, F. H. (2016). Los desafíos de la agricultura. 1a ed. Acassuso: International Plant Nutrition Institute. 136 p.
- Basche, A., Miguez, F. E., Kaspar, T. y Castellano, M. J. (2014). Do cover crops increase or decrease nitrous oxide emissions. A meta-analysis. *Journal of Soil and Water Conservation*, 69 (6): 471-482.
- Benavides, H. y León, G. (2007). Información técnica sobre gases de efecto invernadero y el cambio climático. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales-IDEAM.
- Blake, G. R. y Hartge, K. H. (1986). Bulk Density. En: Klute, A. (ed.). *Methods of soil analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Methods*. Pp. 363-375. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA.
- Bremner, J. M. (1996). Nitrogen-total. En: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T., Sumner, M.E. (eds.), *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods. Part 3*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA, pp. 1085-1121.
- Butterbach-Bahl, K., Baggs, E. M., Dannenmann, M., Kiese, R. y Zechmeister-Boltenstern, S. (2013). Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls. *Philosophical Transactions of the Royal Society : Biological Sciences*, 368(1621), 20130122.
- Chavarría, D. N., Verdenelli, R. A., Muñoz, E. J., Conforto, C., Restovich, S. B., Andriulo, A. E., Meriles, J. M. y Vargas-Gil, S. (2016). Soil microbial functionality in response to the inclusion of cover crop mixtures in agricultural systems. *Spanish Journal of Agricultural Research*, 14(2): 0304.
- Constantin, J., Mary, B., Laurent, F., Aubrion, G., Fontaine, A., Kerveillant, P. y Beaudoin, N. (2010). Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 135(4): 268-278.
- Davidson, E. A. (1992). Sources of nitric oxide and nitrous oxide following wetting of dry soil. *Soil Science Society of America Journal*, 56(1): 95-102.
- Di, H. J. y Cameron, K. C. (2002). Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 64(3): 237-256.

- Di Rienzo, J. A., Macchiavelli, R. E., y Casanoves, F. (2011). Modelos lineales mixtos: Aplicaciones en InfoStat. Grupo Infostat, Córdoba, 193.
- Dobbie, K.E. y Smith, K.A. (2001). The effects of temperature, water-filled pore space and land use on N₂O emissions from an imperfectly drained gleysol. *European Journal of Soil Science*. 52: 667-673.
- Dube, E., Chiduzza, C. y Muchaonyerwa, P. (2012) Conservation agriculture effects on soil organic matter on a Haplic Cambisol after four years of maize–oat and maize–grazing vetch rotations in South Africa. *Soil and Tillage Research*, 123: 21-28.
- Fang, C. y Moncrieff, J. B. (2001). The dependence of soil CO₂ efflux on temperature. *Soil Biology and Biochemistry*, 33(2): 155-165.
- Galloway, J. N., Aber, J. D. y Erisman, J. W. (2003). The nitrogen cascade. *Bioscience*, 53(4): 341-356.
- Gao, B., Ju, X., Su, F., Meng, Q., Oenema, O., Christie, P., Chen, X. y Zhang, F. (2014). Nitrous oxide and methane emissions from optimized and alternative cereal cropping systems on the North China Plain: a two-year field study. *Science of the Total Environment*, 472: 112–124.
- Gregory, P. J., Bengough, G., George, T. S. y Hallett, P. D. (2013). Rhizosphere engineering by plants: quantifying soil-root interactions. En: Timlin, D. y Ahuja, L. R. (eds). *Enhancing understanding and quantification of soil-root growth interactions*. American Society of Agronomy, Inc, Crop Science Society of America, Inc Madison, WI, USA 1-30.
- Guardia, G., Abalos, D., García-Marco S., Quemada, M., Alonso-Ayuso, M., Cárdenas, L. M., Dixon, E.R. y Vallejo, A. (2016). Effect of cover crops on greenhouse gas emissions in an irrigated field under integrated soil fertility management. *Biogeosciences*, 13(18): 5245-5257.
- Halvorson, A. D., Del Grosso, S. J. y Alluvione, F. (2010). Tillage and inorganic nitrogen source effects on nitrous oxide emissions from irrigated cropping systems. *Journal of environmental quality*, 39(5): 1554-1562.
- Han, Z., Walter, T. y Drinkwater, L. E. (2017). N₂O emissions from grain cropping systems: a meta-analysis of the impacts of fertilizer-based and ecologically-based nutrient management strategies. *Nutrient cycling in agroecosystems*, 107(3): 335-355.
- Hillel, D. (1980). *Fundamentals of soil physics*. London Academic Press, Inc, p. 413.
- IPCC. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis*. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Stocker, T. F., D. Qin, G. K. Plattner, M. Tignor, S. K., Allen, J., Boschung, A., Nauels, Y., Xia, V. Bex, P. y Midgley, M. (eds.). Cambridge University Press. Cambridge, UK.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis*. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de

- Expertos sobre el Cambio Climático. Equipo principal de redacción, R. K. Pachauri y L. A. Meyer (eds.). IPCC, Ginebra, Suiza, pp.157..
- Irizar, A. B., Milesi, L. A., Giannini, A. P. y Andriulo, A. (2018). Aporte desde la Pampa Ondulada argentina a la "Iniciativa 4 por mil". En Actas del XXVI Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo. Del 15 al 18 de mayo de 2018, Tucumán, Argentina.
- Komatsuzaki, M., Sato, Y. y Ohta, H. (2008). Relationships between fungal biomass and nitrous oxide emission in upland rice soils under no tillage and cover cropping systems. *Microbes and environments*, 23(3): 201-208.
- Larney, F. J., Ren, J., McGinn, S. M., Lindwall, C. W. y Izaurralde, R. C. (2003). The influence of rotation, tillage and row spacing on near-surface soil temperature for winter wheat in southern Alberta. *Canadian journal of soil science*, 83(1): 89-98.
- Livingston, G. P. y Hutchinson, G. L. (1995). Enclosure-based measurement of trace gas exchange: application and source of error. En: Matson, P. A., Harris R. C (eds). *Biogenic Trace Gases: measuring emissions from soil and water*. Blackweel Science, Cambridge. pp, 14-50.
- Ludwig, J., Meixner, F.X., Vogel B. y Förstner, J. (2001). Soil-air exchange of nitricoxide: an overview of processes, environmental factors, and modeling studies. *Biogeochemistry*. 52(3): 225–257.
- Melillo, J. M., Terese, T. C., Richmond, J. H. y Gary, W., Yohe (eds.). (2014). *Climate Change Impacts in the United States: The Third National Climate Assessment*. U.S. Global Change Research Program, 841 pp.
- Montzka, S. A., Dlugokencky, E. J., y Butler. R. (2011). Non CO2 greenhouse gases and climate change. *Nature*, 476: 43-50.
- Mulvaney, R. L. (1996). Nitrogen-Inorganic Forms. In: Sparks, D. L., Page, A. L., Helmke, P. A., Loeppert, R. H., Soltanpour, P. N., Tabatabai, M. A., Johnston, C. T. y Sumner, M. E. (eds.), *Methods of Soil Analysis: Chemical Methods. Part 3*. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, USA., pp. 1123-1184.
- Parkin, T. B. y Venterea, R. T. (2010). Sampling Protocols. Chapter 3. Chamber-Based Trace Gas Flux. Measurements. En: *Sampling Protocols*. Follett, R.F. (ed) pp. 1 -39.
- Peyrard, C., Mary, B., Perrin, P., Véricel, G., Gréhan, E., Justes, E. y Léonard, J. (2016). N2O emissions of low input cropping systems as affected by legume and cover crops use Agriculture, Ecosystems & Environment 224 145-156.
- Portela, S. I., Andriulo, A. E., Jobbágy, E. G. y Sasal, M. C. (2009) Water and nitrate exchange between cultivated ecosystems and groundwater in the Rolling Pampas Agriculture, Ecosystems and Environment 134: 277-286 doi: 10.1016/j.agee.2009.08.001
- Portela, S. I., Andriulo, A. E., Sasal, M. C., Mary, B. y Jobbágy, E. G. (2006). Fertilizer vs. organic matter contributions to nitrogen leaching in cropping systems of the Pampas:

15N application in field lysimeters. *Plant and Soil* 289: 265-277 doi:10.1007/s11104-006-9134-z

- Portela, S. I., Restovich, S., González, H. y Torti, M. J. (2016). Reducción del drenaje profundo y la lixiviación de nitrógeno en rotaciones agrícolas con cultivos de cobertura. *Ecología austral*, 26(3), 212-220.
- Restovich, S. B., Andriulo, A. E. y Amendola, C. (2011). Inclusion of cover crops in a soybean-corn rotation: effect on some soil properties *Ciencia del Suelo (Argentina)* 29: 61-73.
- Restovich, S. B., Andriulo, A. E. y Portela, S. I. (2012). Introduction of cover crops in a maize-soybean rotation of the Humid Pampas: Effect on nitrogen and water dynamics. *Field Crops Research*, 128: 62-70.
- Restovich, S. B., Portela, S. I., Farroni, A., Garcia Parisi, P., Garcia, L., Copia, P., Chavarría, D., Gonzalez-Anta, G. y Albarracin, D. (2018). Cultivos de cobertura y bajas dosis de fertilizantes nitrogenados: efecto sobre la funcionalidad del suelo en el largo plazo. Argentina. Mar del Plata, IV Congreso Argentino de Microbiología Agrícola y Ambiental.
- Rimski-Korsakov, H., Alvarez, C. R. y Lavadom, R. S. (2015). Cover crops in the agricultural systems of the Argentine Pampas. *Journal of Soil and Water Conservation*, 70(6): 134A-140A
- Robertson, P. (2004). Abatement of nitrous oxide, methane, and other non-CO2 greenhouse gases: The need for a system approach. pp. 493-506. In: C. R. Field and M. R. Raupach. (eds.). *The Global Carbon Cycle Integrating Humans, Climate, and the Nature World*. Scope 62. Island Press. Washington, DC, USA.
- Ruffo, M. (2004). *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*, N°21.
- Ruffo, M. y Parsons, A. (2004). Cultivos de cobertura en sistemas agrícolas. *Informaciones agronómicas del cono sur*, 21: 13-20.
- Sanz-Cobena, A., García-Marco, S., Quemada, M., Gabriel, J. L., Almendros, P. y Vallejo, A. (2014). Do cover crops enhance N2O, CO2 or CH4 emissions from soil in Mediterranean arable systems. *Science Total Environ.* 466–467, 164–174.
- SAyDS. (2015). Tercera Comunicación Nacional sobre Cambio Climático. <http://unfccc.int/resource/docs/natc/argnc3s.pdf>
- Schipanski, M. E., Barbercheck, M., Douglas, M. R., Finney, D. M., Haider, K., Kaye, J. P., Kemanian, A. R., Mortensen, D. A., Ryan, M. R., Tooker, J. y White, C. (2014). A framework for evaluating ecosystem services provided by cover crops in agroecosystems. *Agricultural Systems*, 125: 12-22.
- Scianca, C. (2010). Cultivo de cobertura en Molisoles de la región pampera: Aporte de carbono e influencia sobre propiedades edáficas y dinámica de malezas. Tesis Magíster en Ciencias Agrarias. Universidad Nacional del Sur, Bahía Blanca, Argentina. 80 pp.

Taboada, M. y Cosentino, V. (2011). Emisiones de gases con efecto invernadero provenientes de la agricultura. Estado actual del conocimiento en el mundo y Argentina. Simposio Fertilidad 2011. IPNI International Plant Nutrition Institute. 55-68.

Thorup-Kristensen K., Magid, J., Jensen, L. S. y Sparks, F.(2003). Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones (ed) Advances in Agronomy Academic Press 227-302.

Venterea, R. T. (2010). Simplified method for quantifying theoretical underestimation of chamber-based trace gas fluxes. Journal of environmental quality, 39(1): 126-135.