

UNIVERSIDAD DE LA REPÚBLICA
FACULTAD DE AGRONOMÍA

EFFECTO DE DISTINTOS ANTECESORES INVERNALES SOBRE LA
MINERALIZACIÓN DE N *IN SITU* Y LA PERFORMANCE EN RENDIMIENTO Y
N ABSORBIDO SOBRE CULTIVO SIGUIENTE DE MAÍZ

por

Bruno ROMANO RUMBO

TESIS presentada como uno de
los requisitos para obtener el
título de Ingeniero Agrónomo.

MONTEVIDEO
URUGUAY
2022

Tesis aprobada por:

Director: -----

Ing. Agr. Cristina Mori, MSc.

Ing. Agr. Amabelia del Pino, PhD.

Ing. Agr. Juan Pablo Viera

Fecha: 20 de abril de 2022

Autor: -----

Bach. Bruno Romano Rumbo

AGRADECIMIENTOS

A todos aquellos que fueron compañía y sostén durante esta etapa.

3.2.1. <u>Descripción del método de mineralización <i>in situ</i></u>	28
3.3. PROCESAMIENTO, ACONDICIONAMIENTO Y DETERMINACIONES REALIZADAS EN LABORATORIO.....	31
3.3.1. <u>Muestras foliares</u>	31
3.3.1.1. Muestras foliares de biomasa aérea de los CC invernales.....	32
3.3.1.2. Muestras foliares de biomasa aérea y de grano de maíz.....	32
3.3.2. <u>Muestreo de suelo</u>	33
3.4. CLIMA.....	35
3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO.....	35
4. <u>RESULTADOS Y DISCUSIÓN</u>	37
4.1. CLIMA.....	37
4.2. SUELO	39
4.3. RENDIMIENTO DE MATERIA SECA Y N FIJADO DE LOS CULTIVOS ANTECESORES	40
4.4. VARIACIONES EN LA DISPONIBILIDAD DE N MINERAL DEL SUELO INMEDIATO A LA TERMINACIÓN DE LOS CC Y A LA SIEMBRA DEL CULTIVO DE MAÍZ.....	41
4.5. VARIACIONES EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD Y TEMPERATURA DEL SUELO CONFINADO EN CILINDROS DE PVC Y DEL SUELO EXTERNO.	43
4.6. VARIACIONES EN LA DINÁMICA DE N MINERAL EN SUELO CONFINADO Y EXTERNO DURANTE LA ETAPA DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE MAÍZ.	45
4.7. VARIACIONES EN EL CONTENIDO DE N MINERAL DEL SUELO EN EL ESTRATO DE 0-15CM EN SUELO EXTERNO Y DEL N MINERALIZADO Y TASA DE MINERALIZACIÓN ANUAL RELATIVA EN EL SUELO CONFINADO (CILINDRO CUBIERTO) EN CADA PERIODO DE INCUBACIÓN.....	47
4.8. EFECTO DE LOS CULTIVOS ANTECESORES SOBRE LA RESPUESTA EN RENDIMIENTO Y N ABSORBIDO DEL CULTIVO DE MAÍZ.	58
4.9. DISCREPANCIAS ENTRE N MINERALIZADO DURANTE LOS PERIODOS DE INCUBACIÓN <i>IN SITU</i> Y EL N ABSORBIDO POR EL CULTIVO DE MAÍZ.	61

4.10. RENDIMIENTO EN GRANO A COSECHA.	62
5. <u>CONCLUSIONES</u>	63
6. <u>RESUMEN</u>	65
7. <u>SUMMARY</u>	66
8. <u>BIBLIOGRAFÍA</u>	67
9. <u>ANEXOS</u>	79

LISTA DE CUADROS E ILUSTRACIONES

Cuadro No.		Página
1.	Efecto de la relación C/N en los procesos de mineralización/inmovilización	6
2.	Historia de chacra previa al establecimiento del ensayo	24
3.	Especies y densidades de siembra usada en los cultivo de cobertura establecidos en la etapa 1 del ensayo	25
4.	Periodo de confinamiento del suelo durante el ciclo del cultivo de maíz	31
5.	Características físicas y químicas del suelo en el sitio experimental en los horizontes A y Bt	39
6.	Características químicas del suelo en el sitio experimental en los estratos 0-7 y 7-15 cm	39
7.	Rendimiento y composición de cada una de las especies empleadas como cultivo cobertura	40
8.	Medias para la concentración de N mineral (nitrato y amonio) del suelo en 0-7 y 7-15 cm de profundidad al momento de terminación de los cultivos de cobertura y a la siembra del cultivo de maíz	42
9.	Medias para la concentración de N- nitrato del suelo no confinado en 0-20 cm de profundidad al momento de siembra y V6 del cultivo de maíz	46
10.	Comparación múltiple de medias según antecesor para la variable contenido de N mineral (N-nitrato + N-amonio) del suelo no confinado en el estrato de 0-15 cm desde la terminación de los CC a madurez fisiológica del cultivo de maíz	49

11.	Probabilidades de la prueba f de ANAVA para las variables explicativas antecesor y las covariables (Nmin. inicial y HGcil) usados en el modelo de regresión múltiple para modelar la variable N mineralizado medido en el estrato de 0-15 cm de en suelo confinado en cilindro cubierto en cada período de incubación	52
12.	Probabilidades de la prueba f de ANAVA para las variables explicativas antecesor y las covariables (Nmin. inicial y HGcil) usadas en el modelo de regresión múltiple para modelar la variable tasa de mineralización anual relativa medida en el estrato de 0-15 cm de profundidad de suelo en suelo confinado en cilindro cubierto en cada período de incubación	55
13.	Comparación múltiple de medias según antecesor para la variable tasa de mineralización anual relativa del suelo confinado en elestrato de 0-15 cm desde V6 a madurez fisiológica del cultivo de maíz	57
14.	Probabilidades de la prueba f de ANAVA para las variables explicativas usadas en el modelo de regresión para modelar el rendimiento de MS medido en 4 estadios del cultivo de maíz (en V6, en Vt, en floración-R1 y enR4)	59
15.	Probabilidades de la prueba f de ANAVA para las variables explicativas usadas en el modelo de regresión para modelar el N absorbido medido en 4 estadios del cultivo de maíz (en V6, en Vt, en floración-R1 y en R4)	60
16.	Rendimiento promedio en grano a cosecha según antecesor	62

Figura No.

1.	Esquema del ciclo del N en el sistema suelo-planta	5
2.	Diseño del ensayo experimental en etapa 1	26
3.	Temperatura media y precipitaciones promedio durante la zafra 2017 y promedio histórico (1987-2018)	37
4.	Variaciones de la humedad gravimétrica del suelo en el estrato de 0-15 cm de profundidad según condición de suelo y antecesor en cuatro fechas de muestreo	44
5.	Temperatura del suelo confinado y no confinado, registrada diariamente en cada período de incubación	45
6.	Variación del contenido de N mineral (N-nitrato y N-amonio) del suelo no confinado en el estrato de 0-15 cm desde la terminación de los CC a madurez fisiológica del cultivo de maíz	48
7.	Relación lineal entre la cantidad de N-amonio y N-nitrato en el suelo no confinado en el estrato de 0-15 cm desde la terminación de los CC a madurez fisiológica del cultivo de maíz	51

8.	Variación del N (N-nitrato y N-amonio) mineralizado/ inmovilizado del suelo confinado en cilindro cubierto en el estrato de 0-15 cm desde el primer muestreo V6 al último muestreo en madurez fisiológica del cultivo	53
9.	Tasa de mineralización anual relativa de N del suelo confinado en cilindro cubierto en el estrato de 0-15 cm desde el primer muestreo coincidente con el estadio V6 del maíz al último muestreo en madurez fisiológica del maíz ..	56

1. INTRODUCCIÓN

En Uruguay el proceso de intensificación agrícola registrado en los últimos años, con base principalmente en el monocultivo de soja, tuvo como pilares fundamentales la adopción generalizada del paquete tecnológico asociado a la siembra directa (SD) y la simplificación de la secuencia de cultivos en sistemas de agricultura continua.

Como consecuencia de estos cambios la sustentabilidad y el potencial productivo del sistema se han visto comprometidos debido a problemas de erosión, deterioro en las propiedades físico-químicas del suelo, problemas de enmalezamiento y enfermedades, muchos de los cuales no fueron apreciados como corresponde mientras la ecuación económica resultaba favorable.

Recientemente la sustentabilidad, en el mediano y largo plazo, de los actuales sistemas de producción agrícola se ha puesto en tela de juicio, y se están buscando alternativas que permitan obtener un sistema productivo más sostenible y es dentro de esa lógica que surgen los cultivos de cobertura (CC) como una alternativa que busca mitigar los procesos degenerativos del sistema generados por la agricultura continua bajo siembra directa y el monocultivo de soja.

El uso de CC tiene diversos efectos sobre el sistema de producción como ser la reducción de la erosión, evitar y reducir la pérdida de nutrientes, aporte de nitrógeno (N) al sistema, secuestro de carbono, calidad del agua, control de malezas, etc. Todos ellos contribuyen a una mayor sustentabilidad del sistema.

Conocer y cuantificar los efectos de los CC antes mencionados resulta de gran relevancia en la coyuntura actual, en donde por ejemplo los costos del fertilizante tienen un gran peso en la ecuación económica de los sistemas productivos, y el impacto ambiental que genera el uso de los mismos son mirados con especial atención por el conjunto de la sociedad.

Intentando contribuir en la búsqueda de conocimiento que acerque posibles alternativas para la construcción de un sistema productivo más sostenible es que se realizó este ensayo.

1.1. OBJETIVOS

Los objetivos de este trabajo fueron: i) evaluar el efecto de la utilización de una leguminosa anual invernal como lupino, de una gramínea como avena y de un cultivo consociado de lupino+avena como CC, en la tasa de mineralización de N del suelo cuantificada *in situ* y medida durante el ciclo de crecimiento de un cultivo de maíz sembrado luego del barbecho; y ii) evaluar el efecto de la utilización de estos CC, en la disponibilidad del N derivado de la mineralización de sus rastrojos en un cultivo de maíz subsiguiente midiendo producción de biomasa y el N absorbido en distintos estadios hasta madurez fisiológica.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1. NITRÓGENO-GENERALIDADES

En el caso particular de las plantas, el N junto al fósforo y el potasio, es clasificado como un macronutriente esencial dado que forma parte de compuestos vitales para el normal ciclo de crecimiento, al tiempo que generalmente resulta ser el nutriente más influyente en el rendimiento y calidad de los productos a cosechar (Sawchik et al. 2001, Perdomo et al. 2008). Los cultivos de trigo, maíz y arroz, que son los más usados para alimentación humana a nivel mundial, requieren 20, 15 y 12 kg de N por tonelada de grano cosechado, respectivamente (Peoples et al., 2014).

Pero este nutriente no sólo es esencial para las plantas sino también lo es para diversos procesos que ocurren en el suelo, como la humificación que es clave en la estabilidad y retención de formas de carbono (C) de la materia orgánica del suelo (MO, Christopher y Lal, 2007).

Tanto el N atmosférico, principalmente N₂, como el N presente en la MOS, componen la principal fuente de reserva de N para las plantas (Perdomo et al., 2008). En sistemas donde la intervención humana es escasa o nula, la principal fuente de N inorgánico para las plantas deriva de la MOS (Perdomo et al., 2008). El perfil de suelo explorado por las raíces de las plantas usualmente contiene entre 5000 y 12000 Kg de N orgánico por hectárea, pero aproximadamente sólo un 2 % anual de ese N es mineralizado y queda disponible para las plantas. Si se compara esta tasa de mineralización anual con la de los rastrojos de plantas, esta puede ser mayor al 100%, como por ejemplo con restos de cultivos leguminosos previo a madurez fisiológica (Studdert et al., 2000).

Diversos estudios han reportado que la cantidad de N disponible para un cultivo siguiente representa menos de un 30% del aporte total de N derivado de los rastrojos (Peoples et al., 2014). Pero esta baja recuperación del N por parte del cultivo siguiente se asocia con una mayor proporción de N que permanece en el sistema suelo (60%). Este porcentaje de retención del N derivado de los residuos en la MOS comparado con el N retenido aportado vía fertilizantes (30%), demuestra que la principal contribución del uso de CC leguminosas es la mejora la fertilidad del suelo aumentando y/o estabilizando los pools de reserva de N en el mediano-largo plazo (Fillery, 2001).

2.2. FORMAS DE NITRÓGENO EN EL SUELO

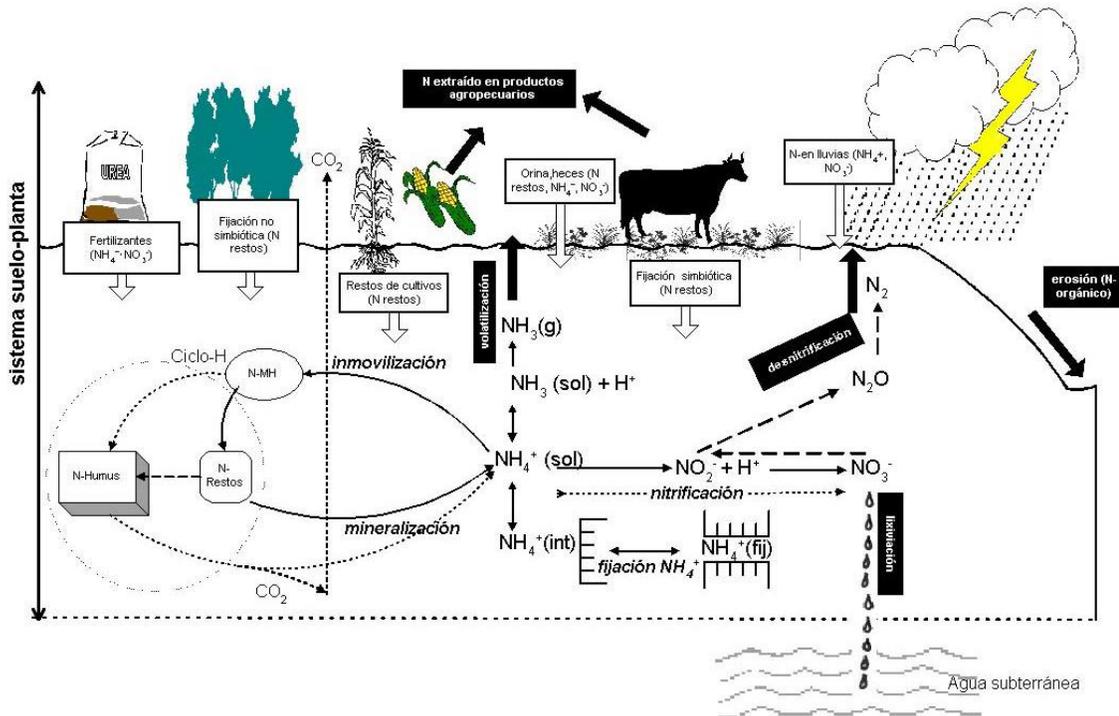
Las formas en que se encuentra el N en el suelo pueden ser divididas en orgánicas e inorgánicas (Tisdale y Nelson, 1970). Las formas inorgánicas o minerales, que son las formas disponibles para las plantas, pueden ser tomadas directamente de la solución del suelo y/o derivar directamente de sales de fertilizante nitrogenado o de la mineralización de formas orgánicas del suelo (MOS, rastrojos, otros). En lo que refiere a la nutrición de las plantas las formas que adquieren mayor relevancia son el amonio (NH_4) y el nitrato (NO_3); el nitrito (NO_2) puede estar presente en cantidades pequeñas, pero es tóxico para las plantas (Tisdale y Nelson, 1970).

Por otra lado, las formas de N orgánico del suelo se encuentran como aminoácidos y proteínas consolidadas, aminoácidos libres, amino azúcares y otros compuestos no identificados. Los aminoácidos y proteínas consolidadas por lo general se encuentran asociados a otros materiales como arcillas y ligninas lo que explicaría su resistencia a la descomposición (Tisdale y Nelson, 1970).

2.2.1. Transformación del nitrógeno en el suelo

Según Perdomo et al. (2008), a diferencia de lo que pasa con otros nutrientes como el K en donde su dinámica está regulada por un equilibrio químico, la dinámica del N está regulada por procesos biológicos producto de la actividad de los microorganismos (m.o.) del suelo que afectan las formas minerales y orgánicas de reserva.

En un ecosistema es posible dividir al ciclo bioquímico del N en un ciclo externo y otro interno (Hart et al., 1994). El ciclo externo incluye todos los procesos que adicionan o remueven N del ecosistema (fijación de N_2 , fertilización, lixiviación, erosión, desnitrificación y volatilización del amonio, Figura 1). Por otro lado, el ciclo interno de N implica a todos los procesos de conversión del N de una forma química a otra y transferencias de N entre pools del ecosistema. El ciclo interno incluye procesos como: la asimilación de N por parte de las plantas, mineralización, inmovilización, nitrificación (Hart et al., 1994).



Las ganancias de N se representan con un recuadro y flechas de fondo blanco (entre paréntesis se indica el lugar del ciclo donde se produce la entrada de N al sistema). Los procesos de pérdida de N se representan con un recuadro y flechas de fondo negro.

Figura 1. Esquema del ciclo del N en el sistema suelo-planta

Fuente: tomado de Perdomo et al. (2008).

Dado que el 98% del N presente en el suelo se encuentra formando compuestos orgánicos, éstos deben pasar a formas inorgánicas para ser absorbidos por las plantas. La disponibilidad de esas formas de N para las plantas está regulada por los procesos de mineralización, inmovilización y otros procesos de pérdida transitorios y/o permanentes que ocurren en el sistema suelo y del equilibrio entre estos (Tisdale y Nelson, 1970). En concordancia con lo antes dicho, Hart et al. (1994) mencionaron la importancia de entender los factores (temperatura, humedad del suelo, etc.) que afectan y controlan la velocidad de los procesos en el ciclo interno de N, debido a la influencia que estos tienen en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas, así como en la calidad del ambiente. Por ejemplo, gran parte del N asimilado por las plantas deriva de pools inorgánicos, N-NH_4 y N-NO_3 y estas formas de N son producto de los procesos de mineralización y nitrificación (Hart et al., 1994). Por tanto, cualquier alteración

de los factores que modifique los procesos, puede repercutir en la productividad de los cultivos.

Múltiples factores afectan la tasa de mineralización de N, pero el tipo y cantidad de residuo de cultivo que se incorpora al suelo junto con las condiciones del suelo y el clima, los cuales generalmente se identifican como los más importantes (Giacomini et al., 2007).

Como ya se mencionó, la disponibilidad de N en el sistema suelo-planta está regulada por los procesos de mineralización e inmovilización, y la intensidad de este ciclaje es gobernada principalmente por los rastrojos de planta presente en el suelo. Si la relación C/N del material a descomponer es alta, los m.o. heterotróficos que actúan en estos procesos requieren una fuente de NH_4 o NO_3 que les permita acompañar el crecimiento de la población microbiana con el aporte de material carbonado desde los residuos (Tisdale y Nelson, 1970). Por otra parte, si el material a descomponer presenta una relación C/N baja, no habrá una demanda adicional de N mineral por parte de los m.o. lo cual resulta en una mineralización neta de N (aumento del nivel de N mineral del suelo) o en un balance final neutro (ni aumento ni descenso del N mineral del suelo, Tisdale y Nelson, 1970).

Cuadro 1. Efecto de la relación C/N en los procesos de mineralización/inmovilización

Rel. C/N	Proceso favorecido	Balance final
>33/1	Inmovilización	Pérdida de N
25 aprox.		Ni pierde ni gana
< 15/1	Mineralización	Ganancia de N

Fuente: elaborado en base a Perdomo et al. (2008).

2.2.1.1. Factores que afectan las características del rastrojo y su posterior aporte de N

De acuerdo con Meisinger et al. (1991), Torbert y Reeves (1991), es necesario sincronizar el aporte de N con la demanda del cultivo renta para que no se vea afectado el rendimiento de este último, y evitar posibles excesos de NO_3^- en el suelo los cuales incrementan las posibles pérdidas por lixiviación. La proporción del N fijado por los CC leguminosas que se aprovecha por el cultivo renta depende de la sincronía que existe entre el momento de aporte del nutriente, el manejo de la fertilización nitrogenada y la demanda que realiza el cultivo (Vaughan y Evanylo 1998, Griffin et al. 2000).

Según la bibliografía consultada, la eficiencia de recuperación de N derivado del CC por el cultivo siguiente es baja, con valores que oscilan entre 3-56%. A su vez, la eficiencia de recuperación de N fijado por CC es menor a la lograda cuando el N proviene del fertilizante, pero en el caso del N fijado una parte del mismo estaría incorporado al sistema suelo permitiendo su aporte en el mediano- largo plazo (Ernst, 2004). Es por ello que Sawchik et al. (2015), plantean que el rol principal que cumpliría un CC leguminosa dentro del esquema de producción actual, en donde se tiene a la soja como cabeza de rotación, sería mejorar el balance negativo de N existente mediante un mayor aporte al pool de N lábil del sistema.

En tal sentido algunos factores que permiten sincronizar la oferta y demanda de N y así mejorar la eficiencia de recuperación de este nutriente son: el estado de madurez del CC, el periodo de tiempo entre la aplicación del herbicida sobre el CC y la siembra del cultivo renta (lo que comúnmente se denomina período de barbecho), y las condiciones de temperatura y humedad reinantes durante dicho periodo (Ernst, 2004). Coincidentemente, otros autores reportaron que la liberación de N por parte de los CC está determinada entre otros factores, por la especie utilizada, estado de crecimiento del cultivo y su manejo, clima, todos factores que modifican la calidad del rastrojo (al modificar el contenido de lignina, carbohidratos, celulosa y N), y por consiguiente su capacidad para descomponerse y liberar N (Muller et al., Bowen et al., citados por Dabney et al., 2001). Del mismo modo, la selección de la o las especies a utilizar como CC y la determinación de la fecha de siembra y aplicación del herbicida total, son factores determinantes de cuánto y cuándo el N es liberado por el rastrojo del CC afectando no sólo al cultivo siguiente, sino al ambiente circundante a éste, como el suelo, agua y aire (Dabney et al., 2001).

Resulta obvio en que la terminación temprana del CC disminuyen los rendimientos de MS y de N presente en la biomasa alcanzable, pero la calidad del rastrojo es mayor de modo que el aporte al cultivo siguiente podría permanecer incambiado. Cuando el tiempo de barbecho se acorta, probablemente el NO_3^- disponible en el suelo a la siembra del cultivo renta sea bajo, lo que puede ser corregido mediante fertilización (Vaughan y Evanylo, 1998). Mientras que, si el periodo de barbecho resulta excesivamente largo, el aporte de N será temprano en el ciclo del cultivo renta, cuando la demanda del mismo no es tan grande, lo que puede derivar en posibles pérdidas del nutriente si las lluvias son excesivas. Si bien el retraso en la fecha de terminación del CC puede significar un mayor y más tardío aporte cuantitativo de N en el ciclo del cultivo, también genera mayor incertidumbre sobre la cantidad de agua almacenada en el suelo y su posible recarga (Ernst, 2006).

Pese a que el potencial de mineralización inicial de N y la tasa de mineralización de N aumentan a medida que la concentración de N en los tejidos es mayor, o la relación C/N es menor (Frankenberger et al. 1985, Kuo et al. 1998), el tiempo para que la mineralización neta de N ocurra, se reduce (Kuo et al., 1998). Por otro lado, la cantidad de N fijado/absorbido aumenta con el estadio de desarrollo de todos los cultivos, pero la concentración en los tejidos se reduce (Huntington et al., Reeves et al., citados por Ernst, 2004). Por lo tanto, dejar crecer al CC más allá de la floración necesariamente no implica un aumento en la disponibilidad de N para el cultivo renta ya que se enlentece la mineralización del CC y una fracción del N queda formando parte de semillas duras (Wagger, Ranells y Wagger, citados por Dabney et al., 2001).

En la misma línea, Vaughan y Evanylo (1998) mencionaron que existe una relación positiva entre el N fijado y la MS acumulada, y que esto se encuentra asociado a cambios en la composición química de los tejidos. La concentración de N se reduce al avanzar el estado de madurez de los tejidos, lo que afecta el momento en que ocurre el aporte del N en el cultivo siguiente y su posible sincronización con la demanda del mismo. En los CC leguminosa, si bien la concentración de N en los tejidos se reduce, su cantidad aumenta con los días de crecimiento, mientras que en los CC gramíneas la compensación puede determinar que la cantidad de N absoluta permanezca incambiada. Además, en el caso de CC gramíneas, el aporte de N al cultivo siguiente es afectado por la relación C/N del residuo (Zotarelli et al., 2009). Según Renells et al. (1996), Clark et al. (1997), típicamente el contenido de N y la relación C/N de los CC gramínea es bajo y alto respectivamente. La adición de una leguminosa a la mezcla permite mejorar el contenido de N y la relación C/N de esta (Sullivan et al., 1991).

Según Pink et al. (1948), relaciones de C/N superiores a 35:1 generan inmovilización de N y enlentecen la velocidad de liberación del mismo. Por lo general los rastrojos de los CC gramíneas inmovilizan el N del suelo lo cual genera un aumento en los requerimientos de fertilización nitrogenada para lograr los máximos rendimientos económicos del cultivo de maíz subsiguiente (Mitchell y Teel, Frye et al., Brown et al., Hargrove, Wagger, Holderbaum et al, Doran y Smith, Sullivan et al., Decker et al., citados por Dabney et al., 2001). Por otro lado, los CC leguminosas tienen una relación C/N menor a 20:1 lo cual implica menores niveles de fertilización nitrogenada para un nivel de rendimiento dado (Touchton et al., Ebelhar et al., Doran y Smith, citados por Dabney et al., 2001). Estos CC, además, no siempre reducen la dosis de fertilizante óptima requerida para lograr el máximo rendimiento, dado que su uso muchas veces también aumenta el potencial de rendimiento del cultivo renta (Frye et al., Dabney et al., Utomo et al., citados por Dabney et al., 2001).

Un ejemplo de cómo las diferentes especies realizan diferentes aportes de N es el presentado por Baigorria y Cazorla, citados por Cazorla et al. (2011). Estos autores hacen referencia a ensayos realizados en la E.E.A. de INTA Marcos Juárez, en donde se constató que el contenido de NO_3^- (en los primeros 20 cm del suelo) a la siembra de un cultivo de maíz varió significativamente según el antecesor, siendo de 90 mg N kg^{-1} para barbecho y de 60 y 40 mg N kg^{-1} para CC leguminosa y gramínea, respectivamente.

En otro estudio, Espinoza et al. (2012), observaron a la siembra de un cultivo de trigo que la concentración de NO_3^- en los primeros 20 cm del suelo en parcelas con rastrojos de cultivos leguminosas de grano (lupino y arveja forrajera), fue entre 12 y 34 kg N ha^{-1} mayor que la registrada en parcelas con rastrojo de avena. Esto repercutió luego sobre el cultivo siguiente, donde el N absorbido por el trigo sembrado sobre antecesor leguminosa fue de 6 a 77 kg N ha^{-1} superior respecto al N absorbido por el trigo sobre rastrojo de avena sin fertilizar.

2.3. MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE MINERALIZACIÓN DE N

Se ha visto que para lograr el máximo aprovechamiento del N es necesario tener conocimiento cabal de su ciclo, componentes y factores que lo afectan (Cabrera, 2007). En consecuencia, con esto se han desarrollado diversos métodos que buscan evaluar la dinámica del N mineral del suelo. Dentro de estos métodos es posible dividirlos en dos grandes grupos: métodos de laboratorio y métodos *in situ*.

Los métodos de laboratorio brindan una estimación aproximada de la mineralización de N en algún momento específico, por ejemplo, previo a la siembra, mientras que los métodos *in situ* permiten cuantificar mediciones reales de la mineralización de N en el campo (Kolberg et al., 1997). Los resultados obtenidos mediante estos dos grandes grupos, lejos de ser antagónicos, deberían ser utilizados de forma complementaria.

2.3.1. Métodos *in situ*

Según la bibliografía consultada, los tres métodos más utilizados para estimar el N mineral *in situ* son: el método de las bolsas enterradas, el método de los cilindros cubiertos, y el método de la trampa de resina.

Básicamente, como lo adelanta su nombre, el método de las bolsas enterradas consiste en rellenar bolsas de plástico con muestras de suelo y enterrarlas nuevamente en el lugar en que se obtuvo el suelo por un periodo de tiempo previamente estipulado (Hanselman et al., 2004). Si bien la operativa es sencilla, el método presenta algunas limitantes que le restan atractivo, como, por ejemplo, el posible deterioro de las bolsas que contribuye a las pérdidas de N mineral (Hanselman et al., 2004). En el caso del método de los cilindros, los cambios en el contenido y formas del N mineral se evalúan de manera secuencial. La metodología requiere perforar el suelo con tubos a una profundidad previamente estipulada intentando perturbar lo menos posible la columna de suelo, e incubar dicha columna “muestra” por un periodo determinado de tiempo. Este método considera que el N transferido en el suelo se encuentra mayormente bajo formas minerales, y por tanto puede ser descrito por intermedio de los procesos de mineralización neta, pérdidas por lixiviación, consumo de plantas y m.o. (Khanna et al., 2013). Por último, el método de la trampa de resina surge de combinar la técnica de resinas de intercambio iónico y un método de contenedor, lo cual permite crear un sistema de incubación a campo capaz de impedir el flujo de iones en la muestra de suelo, pero permitiendo el flujo de agua de la misma (Hanselman et al., 2004). Básicamente se entierra un tubo de PVC con un borde afilado en el perfil para obtener una muestra “imperturbada” del suelo en estudio, luego se coloca una bolsa de resina de intercambio iónico en la base del tubo la cual se encarga de retener los iones que se pasan a través del perfil durante el periodo de incubación. En caso de que la muestra corresponda a un horizonte sub-superficial, se debe colocar una segunda bolsa en el extremo superior del tubo para filtrar los iones correspondientes al horizonte suprayacente (Hanselman et al., 2004).

Al final de cada periodo de incubación del suelo, para cualquiera de los tres métodos previamente descritos, se analiza la concentración de las formas minerales de N (NH_4^+ y NO_3^-) que son extraídas con una solución salina concentrada, la diferencia entre la concentración al final del periodo de incubación y la concentración al comienzo del periodo de incubación permite estimar la cantidad de N mineralizado en dicho periodo (Hart et al., 1994).

Al comparar estos tres métodos, Hanselman et al. (2004) señalaron que una de las limitaciones comúnmente observada en cualquiera de estos métodos fue que no logra replicar las condiciones de la dinámica del contenido de agua en suelo. Otra fue que tanto el método de bolsas enterradas como las trampas de resina tienden a subestimar el N mineralizado después de los 45-90 días, ya que el deterioro sufrido por las bolsas o la ineficiencia de las trampas de resina afectaría el correcto funcionamiento de los métodos. Por lo tanto, para estimar la utilidad de los diferentes métodos es necesario ajustes que consideren factores particulares de cada situación, así como un ajuste del periodo de incubación. Cualquier ajuste que logre una mayor representatividad de las condiciones imperantes en el suelo y que provean una recuperación del N representativa de la realidad que se quiere evaluar será fundamental para lograr resultados más precisos (Hanselman et al. 2004, Khanna et al. 2012). Una ventaja de los métodos *in situ*, es que los mismos reflejan de mejor manera el régimen de temperatura predominante durante el experimento en el sitio (Hart et al., 1994).

2.3.2. Métodos de laboratorio

La aceptación de los diferentes métodos e indicadores generados para medir la disponibilidad de N para las plantas depende, en gran medida, de que tan buenos predictores del N lábil sean y que tanto se asemejen al suministro de N del campo (Griffin 2008, Schomberg et al. 2009, Luce et al. 2011), permitiendo un mejor ajuste de la fertilización con todo lo que esto significa en términos económicos y ambientales.

Es posible subdividir a los índices de laboratorio que estiman la disponibilidad de N en test biológicos y químicos (Bremner 1965, Sharifi et al. 2007, Schomberg et al. 2009, Luce et al. 2011). Los métodos biológicos de laboratorio, en su gran mayoría presentan un corto periodo de incubación (7-25 días) bajo condiciones aeróbicas o anaeróbicas, y en muchos casos estos estudios se correlacionan con resultados logrados en ensayos de invernadero. Por otro lado, la mayoría de los métodos de laboratorio químicos analizan formas de N orgánica lábil o N- NH_4 extraíble con agua caliente o sales calientes (Keeney, 1982), y se ha encontrado también una buena correlación entre el N extraído con

agua caliente y otros índices de N o con datos de ensayos en invernadero (Jenkinson, Robinson, Verstraeten et al., Ryan et al., Lathwell et al., Gasser y Kalembasa, Osborne y Storrier, citados por Keeney, 1982).

Según Hart et al. (1994), dentro de los métodos de laboratorio el más utilizado para analizar los procesos de mineralización e inmovilización del suelo es el método de incubación aeróbico, aunque el desarrollo de métodos anaeróbicos de mineralización de N se ha popularizado entre los investigadores que utilizan este procedimiento para determinar la disponibilidad de N (Waring y Bremner, 1964). La popularidad de estos métodos en parte se debe a que presentan una serie de ventajas comparativas, respecto a los aeróbicos, dado que: I) requiere solo el análisis de NH_4 , II) resulta más simple lograr el contenido óptimo de agua, III) mineraliza más N, para igual periodo de tiempo, que en condiciones aeróbicas, IV) posibilita trabajar a mayor temperatura, lo cual favorece la mineralización, ya que no resulta necesario lograr la temperatura óptima para la nitrificación. Pese a todas las ventajas mencionadas, aun así, sigue presentando algunas limitaciones o requerimientos específicos como ser la necesidad de un periodo considerable de tiempo, equipo de incubación y en caso de tener la necesidad de determinar el contenido de NO_3 , este debe ser determinado por separado y los resultados finales continúan condicionados por el manejo previo de las muestras.

Según Keeney (1982), para lograr un índice de disponibilidad de N, es deseable que su obtención sea producto de un método de laboratorio que resulte simple, rápido y reproducible. Para evaluar la eficacia final del método biológico se requiere tener en cuenta, por ejemplo, que este sea capaz de cuantificar efectos por manejo previo, que no sea muy afectado por las condiciones previas de almacenamiento de las muestras, etc. (Mack, Keeney y Bremner, Jenkinson, Selmer-Olsen et al., Oien et al., citados por Keeney, 1982).

Los métodos químicos de laboratorio presentan como limitante la imposibilidad de replicar la acción de los m.o. y las condiciones ambientales en que estos se desarrollan en el campo (Sharifi et al., 2007).

2.4. DEFINICIÓN Y GENERALIDADES DE LOS CULTIVOS COBERTURA

Según Caviglia et al., citados por Sawchik et al. (2015), en el sistema agrícola actual, en donde la rotación está dominada por la soja, es de esperar que durante la secuencia agrícola se produzcan largos periodos de barbecho con baja cobertura de rápida descomposición. Como resultado de esta situación, es esperable que los niveles de MOS se reduzcan, el balance de N resulte negativo como consecuencia de la alta exportación del mismo con la cosecha de grano y aumente el riesgo de sufrir pérdidas por erosión que afecten la estructura del suelo.

Como consecuencia de lo antes dicho y mediante una mirada parcial del problema, urge la necesidad de generar coberturas rápidas durante el invierno que protejan el suelo contra las lluvias y es en este sentido que aparecen los cultivos de cobertura (CC) invernales como una posible alternativa para controlar la erosión. Pero esta no deja de ser una mirada parcial del problema dado que, con esta óptica centrada en la erosión, no se contempla al resto de los problemas (balance de N negativo y degradación física, Sawchik et al., 2015).

Los CC son aquellos que se siembran con la finalidad de mantener el suelo cubierto y así proteger el mismo de la erosión, evitar y reducir la pérdida de nutrientes en superficie y en profundidad. A diferencia de las pasturas, los CC no son de renta directa y crecen fuera de estación dentro de un sistema de siembra de cultivos anuales (Reeves y Touchton, 1991). Además de estos beneficios, los CC tienen ventajas o “efectos secundarios” sobre el control de malezas, secuestro de carbono, manejo integrado de plagas, calidad del agua, entre otros (Dabney et al., 2001).

Según Sawchik et al. (2015), para que un CC cumpla con su propósito y tenga beneficios secundarios, sin afectar al cultivo renta, resulta fundamental conocer el manejo de las distintas opciones de CC disponibles, ya que cada uno de ellos posee atributos y funciones diferentes.

Los CC pueden ser gramíneas, leguminosas, especies del género *Raphanus* o una mezcla de estas. Comúnmente las plantas más utilizadas como coberturas en zonas templadas pertenecen a la familia de las gramíneas y leguminosas, las más populares dentro de la primera son el centeno (*Secale cereale* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), cebada (*Hordeum vulgare* L.), avena (*Avena sativa* L.), triticale (*Triticum spp x Secale cereale*) y raigrás (*Lolium multiflorum* L.). Dentro de la segunda familia en cuestión se mencionan a la *Vicia villosa* y varios tipos de trébol (Ruffo y Parsons, 2004). Según Sawchik et al.

(2015), en Uruguay las gramíneas anuales, principalmente avena, resultan ser las más utilizadas.

En el caso de las gramíneas, el aporte de N al cultivo renta resulta de la captura de N que los mismos realizan durante el periodo de barbecho. En el caso de las leguminosas, a este efecto de reciclaje se adiciona el aporte de N mediante la fijación biológica (FBN).

Según cuál de los diversos efectos se busque priorizar, los CC también pueden ser denominados cultivos trampa o abonos verdes (Ruffo y Parsons, 2004). En el primer caso se estaría buscando evitar la pérdida del N por lixiviación al atrapar el mismo en los tejidos del CC y luego aprovechar este N en la etapa del cultivo renta, este N que se atrapa y traslada reduce la necesidad fertilización nitrogenada. En el segundo caso, se busca priorizar el aporte de N al sistema producto de la FBN mediante la incorporación de una leguminosa (Kristensen et al., 2003).

2.4.1. Ventajas de la incorporación de un cultivo cobertura

Al crecer durante periodos en que el suelo podría encontrarse en barbecho, los CC permiten que el sistema incremente la captura de energía solar, el flujo de carbono y la evapotranspiración del suelo (Dabney et al., 2001). Pero el éxito de su incorporación se encuentra agrónomicamente limitado por el periodo de tiempo con que se dispone para producir biomasa, por las temperaturas invernales, y el agua disponible durante la estación de crecimiento del cultivo renta (Smith et al., 1987).

Si bien la siembra de CC en cualquier momento de la estación de crecimiento tiene un impacto importante evitando la erosión del suelo y posterior impacto en la calidad del agua, la siembra temprana de los CC permite tener una mayor acumulación de grados día de crecimiento, mayor producción de biomasa y por ende mayor entrada de C y N al sistema suelo-planta (Delgado et al., citados por Dabney et al., 2001). La cantidad de N fijado por las leguminosas está directamente relacionada a la producción de MS de las mismas, para una leguminosa anual Unkovich et al. (2010) estimaron valores que rondaron los 20 a 24 kg de N por tonelada de MS, mientras que Ernst (2004), reportó hasta 30 kg N ton⁻¹ MS.

En síntesis, la MS y el N acumulado, hasta la muerte del CC, están directamente relacionados entre sí y con la fecha de siembra del mismo (Odhiambo et al., 2001). También existe relación directa entre estos factores y las condiciones climáticas preponderantes durante el periodo de crecimiento del cultivo leguminosa (Ernst, 2004).

2.4.1.1. Aporte y reciclaje de nutrientes (N) al sistema

En sistemas donde existe una rotación de cultivos y pasturas se observa que el contenido de N del suelo se comporta cíclicamente ya que el mismo varía según la etapa en que se encuentre; durante la etapa de pasturas, mediante diferentes procesos, se producen incrementos en el contenido de N y lo opuesto sucede durante la etapa de cultivos (Sawchik, 2001).

Mientras que en sistemas agrícolas puros o con una fase agrícola extendida, el ingreso de N al sistema se da principalmente mediante el uso de fertilizante, esto puede modificarse al cambiar la participación que tienen las pasturas en la rotación, en sistemas que rotan cultivos anuales con pasturas plurianuales de gramíneas y leguminosas el ingreso de N al sistema supera los 100 kg ha⁻¹ gracias a la FBN (Díaz Roselló, Sawchik, citados por Ernst, 2004).

Sobre lo antes dicho, en relación a que los CC leguminosa son capaces de aportar N adicional al sistema el cual puede ser utilizado por el siguiente cultivo, mientras que otros CC en especial gramíneas y brassicas recolectan N residual y evitan que se pierda por lixiviación (Dabney et al., 2001). Kristensen et al. (2003), mencionan que las raíces de los CC absorben el NO₃⁻ presente en el agua del suelo, y reducen el contenido de agua de percolación, evitando de esta manera la lixiviación del NO₃⁻. En relación a las leguminosas, se ha reportado que el aporte de N derivado de estas se encuentra entre los 15 y 200 Kg N ha⁻¹, con valores más probables de entre 60 y 100 kg N ha⁻¹ y que estas variaciones se asocian a la producción de MS de la especie, así como el manejo del barbecho y del cultivo (Smith et al., 1987).

Según Kristensen et al. (2003), en las gramíneas la capacidad de absorber N del suelo está regulada por su crecimiento, las condiciones climáticas durante el ciclo del CC, y la cantidad de N disponible en el suelo, lo que determina que la cantidad de N residual recolectado por las mismas puede variar entre 10 a 200 kg ha⁻¹.

Mediante el uso sistemático de los CC en el tiempo es posible incrementar los niveles de fertilidad del suelo mejorando así la oferta de N y otros nutrientes. Un ejemplo de esto es lo reportado por Hansen y Djurhuus (1997), estos autores trabajando durante varios años con raigrás como cultivo trampa de N, encontraron que las necesidades de aporte de N como fertilizante al sistema sin afectar el rendimiento del cultivo renta, se redujeron en unos 11 a 23 kg ha⁻¹.

El uso de leguminosas anuales como CC durante el periodo improductivo que se genera entre la cosecha y la siembra de los cultivos renta permite incorporar N adicional al sistema (Ernst, 2006). Este N adicional que ingresa al sistema puede llegar a sustituir al fertilizante nitrogenado (Blevins et al.1990, Hesterman et al.1992). En este mismo sentido Espinoza et al. (2012), reportaron importantes beneficios como, por ejemplo: incremento del reservorio de N del suelo y aprovechamiento por el cultivo renta, al incorporar un CC leguminosa (género *Pisum*, *Lupinus* y *Vicia*) a la rotación agrícola. También hace referencia a la estrecha relación que existió entre la capacidad de un suelo para mineralizar N y la absorción del mismo durante el crecimiento del cultivo renta.

Algunos ejemplos claros del aporte que realizan los CC leguminosa podrían ser el registrado por Griffin et al. (2000) quienes afirman que es posible suministrar todo el N necesario para la producción de más de 20 ton ha⁻¹ de grano de maíz mediante la incorporación de N que realiza la *Vicia villosa* utilizada como CC, o el registrado por Torres y del Pino (1995) los cuales en sistemas con laboreo utilizaron *Trifolium repens* asociado con trigo logrando un efecto equivalente al obtenido mediante el agregado de 100 kg N ha⁻¹ como urea en el maíz siguiente; mientras que García y Mautner (1989), indican que es posible trasladar hacia el cultivo renta el equivalente a 40 kg N ha⁻¹ como urea mediante el uso de moha y girasol como CC el cual actuó como cultivo trampa.

2.4.1.2. Control de la erosión y mejora de la calidad del suelo

Según Sullivan (2003), los CC son una pieza clave de cualquier sistema agrícola, basado en un cultivo al año que busque ser sustentable ya que:

- a) Los CC aumentan los ingresos de C al sistema agrícola (Reeves 1997, Kuo et al. 1997).
- b) Puede derivar en secuestro de C y mejoras en la calidad del suelo mediante la modificación de propiedades biológicas, físicas y químicas del mismo (Dabney et al., 2001).
- c) Mediante la incorporación de distintos CC a lo largo del tiempo a un sistema agrícola se puede lograr una mayor estabilidad de los

agregados y menor resistencia a la penetración de las raíces en comparación con sistemas de cultivo continuo sin CC (Reeves, 1997).

A esto se le suma que la probabilidad de sufrir pérdidas de suelo y nutrientes por erosión en sistemas agrícolas basados en un cultivo por año es alta, dado que se generan periodos de barbecho excesivos. En esta situación, el uso de CC anuales permiten mantener el suelo cubierto, reciclar nutrientes y generar un ingreso adicional de C y nutrientes al sistema. En caso de que el CC sea leguminosa, se añade el beneficio del ingreso de N al sistema mediante FBN (Ernst, 2004).

Dabney et al. (2001) enfatizaron la función protectora que cumplen los CC al reducir la degradación del suelo por agentes erosivos como el agua, ya sea minimizando el impacto del golpeteo de las gotas de lluvia y/o la velocidad con la que el agua escurre sobre la superficie del suelo.

2.4.1.3. Cambios en la dinámica del agua y el contenido hídrico del suelo

De acuerdo con Corak et al. (1991), Stute y Posner (1995), Dabney et al. (2001), el consumo de agua que realiza el CC podría transformarse en una limitante para el cultivo renta, ya que de no existir recarga del perfil durante el periodo de barbecho posterior al CC, la respuesta al N adicional disponible se vería afectada. Esta limitante resulta un obstáculo a la hora de que más productores decidan incorporar CC en sus sistemas (Frye et al. 1988, Badaruddin et al. 1989, Corak et al. 1991, Hesterman et al. 1992, Hesterman et al. 1998). A esta disminución en el contenido de humedad producto del consumo que realiza el CC se le denomina costo hídrico, dependiendo de las precipitaciones registradas durante el ciclo de crecimiento del CC el mismo se encuentra entre 30 a 40mm y 40 a 80mm para leguminosas y gramíneas respectivamente (Baigorria y Cazorla, citados por Cazorla et al., 2011).

En el Uruguay según Corsi (1982), lo que permitiría implementar el uso de CC sin aumentar en forma excesiva el riesgo de no poder sembrar cultivos de verano a inicios de la estación de crecimiento con el perfil recargado, es que durante el invierno el suelo se mantiene próximo a capacidad de campo y durante la primavera son altas las posibilidades de recarga del perfil. En el mismo sentido, Sawchik et al. (2015) mencionan que desecando el CC mediante herbicida con una antelación no menor a los 20-25 días, no deberían impactar en la disponibilidad de agua para el cultivo renta.

Al retrasar la fecha de siembra del cultivo renta para alargar la estación de crecimiento de la cobertura, el rendimiento del primero sufre una merma, por lo que esta práctica no sería aconsejable (Mansoer et al., 1997). Al tiempo que, cuanto más se posterga la terminación del CC, más se condiciona la siembra del cultivo renta, debido a la limitante hídrica que puede generarse al mantener el CC consumiendo agua por más tiempo y al reducir el largo de barbecho, y la posibilidad de recargar el perfil (Andriani et al. 2001, Odhiambo et al. 2001). El régimen de precipitaciones durante la primavera juega un rol importante a la hora de cuantificar el efecto que tiene el largo del periodo de barbecho, en primaveras lluviosas el efecto de la duración del barbecho se minimiza. No así con la disponibilidad de N en donde las mayores precipitaciones favorecen la ocurrencia de pérdidas por lavado, desnitrificación y afectan de manera negativa la disponibilidad de este nutriente (Sawchick et al., 2015).

2.4.1.4. Efecto sobre el cultivo siguiente

Las respuestas observadas en el rendimiento de cultivos renta por efecto del CC antecesor son muy variadas y éstas no sólo dependen de la especie per-se utilizada sino también del manejo agronómico, de los cultivos incluidos en el sistema de rotación, de las condiciones edafo-climáticas, etc. (Studdert et al. 2000, Ernst 2006, Cazorla et al. 2011, Siri y Ernst 2012, Espinoza et al. 2015).

La inclusión de un CC leguminosa previo a la siembra del cultivo renta puede significar incrementos de entre 40-80% en el rendimiento en grano respecto al mismo cultivo sin fertilizar con N, este incremento puede significar unos 450-1000 kg ha⁻¹ adicionales dependiendo el ambiente (Hayat y Ali, Seymour et al., citados por Espinoza et al., 2015).

El efecto de los CC en el rendimiento es variable según la especie utilizada. Cazorla et al. (2011), observaron que en condiciones sin fertilización, el rendimiento se incrementa con la utilización de vicia como antecesor. Sin embargo, en condiciones de fertilización la utilización de CC no presenta beneficios sobre el rendimiento de maíz. Zotarelli et al. (2009), mencionaron que mediante la utilización de centeno y vicia puros y la mezcla de éstos como CC, fue posible obtener mayor crecimiento inicial del cultivo siguiente de maíz y más NO₃⁻ acumulado en el suelo. También afirmaron que el potencial de rendimiento logrado con el uso de estos CC fue mayor a bajos niveles de agregado de N, y que, si a estos beneficios se le suman otros como el control de malezas y la mejora de las propiedades fisicoquímicas del suelo, es posible garantizar su incorporación en el sistema de producción agrícola.

De acuerdo con Espinoza et al. (2015), los rendimientos de trigo sembrado posteriormente a un CC leguminosa de grano (lupino y arveja forrajera) fueron 70-110% de los rendimientos logrados con el mismo cultivo de trigo fertilizado con dosis de N entre 160-200 kg N ha⁻¹ con antecesor avena. Los rendimientos de trigo logrados en las parcelas con rastrojos de lupino y arveja y sin fertilización de N, se atribuyen en parte al aporte de N adicional que realizaron estas leguminosas al sistema mediante FBN.

Sin embargo algunos CC presentan efectos alelopáticos que afectan el rendimiento del cultivo rentista, dado que inhiben o retardan el crecimiento por liberación de toxinas naturales o aleloquímicos, con su consecuente efecto adverso en el rendimiento (Dabney et al., 2001).

Resulta importante mirar el efecto de los CC en su conjunto ya que puede haber casos en que no se vean efectos claros en la producción de grano como resultado de la inclusión de CC en el sistema, pero que existan consecuencias favorables en la fertilidad y sustentabilidad del sistema suelo que se reflejen a más largo plazo (incremento de los pools de reserva de C y N orgánico, en la estabilidad de los agregados, en el balance de nutrientes, etc., Studdert et al. 2000, Fillery 2001).

2.5. CARACTERIZACIÓN DE LAS ESPECIES UTILIZADAS EN EL EXPERIMENTO

2.5.1. Avena

La *Avena strigosa* o avena negra es una gramínea invernal de ciclo anual, de porte erecto, hojas y tallos finos de color verde intenso, bajo rendimiento en grano, semilla pequeña de color oscuro a negro y gran precocidad (lo que le permite cubrir el suelo rápidamente). Es una especie rústica, capaz de crecer a temperaturas bajas a moderadas, no muy exigentes en suelo, aunque poco tolerantes a situaciones de anegamiento (Carámbula, 2007). Salvo en suelos muy arenosos o muy pobres, la avena es capaz de crecer en la mayoría de los suelos siendo preferibles los arcillo-húmicos de reacción débilmente ácida y de fertilidad media-alta, y pH 5,2-5,0 (Carámbula, 2007).

Según Sawchik et al. (2015), en Uruguay la avena negra es el CC más difundido en su uso debido a su precocidad y alta tasa de crecimiento invernal. En el mismo sentido Rabuffo et al., citados por Carámbula (2007) aluden a su facilidad para la siembra, gran vigor inicial que le permite establecerse

rápida y sin mayores dificultades, todos estos atributos la vuelven ideal para su uso como CC, ya que permite cubrir el suelo rápidamente y así evitar pérdidas de nutrientes y erosión. La velocidad con que un cultivo crece y logra cubrir el suelo resulta ser una cualidad relevante para cualquier especie cuyo objetivo sea ser utilizada como CC (Teasdale, 2004). Todas estas características de la avena, explicarían porqué es la especie más difundida como CC en Uruguay.

Como lo destacan Kaspaty et al. (2020), determinar la densidad de siembra adecuada es un factor fundamental para lograr un adecuado staff de plantas y así lograr cubrir el suelo rápidamente. Estos mismos autores determinaron que la densidad de siembra óptima de la avena para el control de malezas sería 50 kg ha⁻¹ sembrada 17cm entre líneas.

En su uso como verdeo normalmente se utilizan densidades de siembra entre 100-120 kg ha⁻¹ y entre 40-80 kg ha⁻¹ de semilla cuando se siembra pura o en mezcla. Estos valores se ajustan según el tamaño de la semilla y capacidad de macollaje para cada cultivar.

2.5.2. Lupino

Los lupinos forman parte de la familia leguminosae y presentan un ciclo de vida anual invernal, predominantemente de hábito de crecimiento indeterminado, en un principio todas las especies utilizadas contenían alcaloides lo que impedía emplear el lupino en alimentación animal o humana sin un previo tratamiento. En la actualidad se han generado variedades con niveles inocuos de alcaloides denominadas lupinos “dulces” lo que permitió su incorporación en la elaboración de dietas animales y humanas. La inclusión del lupino en la alimentación animal tiene como principal beneficio el gran aporte proteico que el mismo realiza. Según estudios realizados, el grano de lupino se destaca por sobre los de arveja, lenteja, garbanzo y poroto cuyo aporte proteico se estima entre 21 y 25% mientras que para lupino se estima alrededor del 39% existiendo posibles fluctuaciones entre diferentes variedades (Mera et al., 2016).

El *Lupinus angustifolius* también conocido como lupino australiano, lupino de hoja angosta o lupino azul es originario de la península ibérica y zonas próximas al mar Mediterráneo. Antiguamente esta especie presentaba flores características azules, pero actualmente las nuevas variedades pueden presentar flores totalmente blancas o con leve pigmentación azul o rosácea (Mera et al., 2016).

El crecimiento del lupino se ve afectado por suelos de textura fina, alcalinos y pobremente drenados, aunque poco se sabe respecto a que componentes de estos suelos son los que lo afectan. En el caso de suelos franco arcillo arenosos se le atribuye los problemas en la emergencia y la presencia de plantas cloróticas, a la mala estructura que presentan este tipo de suelos. También se dice que los problemas de clorosis y pobre crecimiento de las plantas es producto del déficit de Fe (White, 1990). Por lo general lupinos creciendo sobre suelos de textura fina, alcalinos producen menos MS y presentan síntomas de clorosis, al tiempo que la penetración de las raíces y la nodulación se ven resentidos (Golebiowska y Sypniewska, Badawy y Mahoney, citados por White, 1989).

Loss et al., citados por León et al. (2001), resaltan algunas de las características agronómicas del lupino en rotación con cereales como su capacidad para fijar N, su capacidad para aumentar el fósforo disponible del suelo y sus bajos requerimientos nutricionales. La capacidad de hacer disponible para las plantas formas de fósforo fijado (no lábil) se debe a que sus raíces tienen la capacidad de exudar ácidos orgánicos que solubilizan fosfatos del suelo, aportando de este modo fósforo al sistema (Mera et al., 2016).

A su vez su alto contenido en proteína, 32% en grano de *Lupinus angustifolius* y 39% en *Lupinus albus*, lo vuelven muy atractivo para ser incorporado en la alimentación del ganado. Respecto a esto, Mera et al. (2016) mencionaron que el lupino presenta una serie de beneficios al sistema productivo, que resulta interesante resaltar de modo que sean tenidos en cuenta a la hora de sopesar su incorporación en una rotación, mejorando las propiedades físicas del suelo, la sanidad del sistema, facilita el control de malezas, aporte de nutrientes mejorando la rentabilidad de los cultivos que integran la rotación.

La baja relación C/N del rastrojo de lupino (30-40:1) resulta favorable para la microflora del suelo lo que repercute en la velocidad de descomposición de los rastrojos, en las tasas de mineralización, aumentando la disponibilidad de nutrientes del suelo. A su vez, a la baja relación C/N también se le atribuyen mejoras en la estructura del suelo como consecuencia de la acción de las hifas de hongos descomponedores que aumentan y aglutinan los agregados del suelo (Mera et al., 2016).

Respecto a la capacidad de fijar N, se ha observado que el lupino en simbiosis con bacterias del género *Rhizobium lupini* y *Bradyrhizobium* sp. fue capaz de cubrir buena parte de sus requerimientos de nitrógeno gracias a la FBN. En un experimento realizado con lupino blanco inoculado con *Bradyrhizobium* sp.

(lupinus) se logró cubrir entre el 67-78% de los requerimientos de nitrógeno total del cultivo no siendo necesario fertilización nitrogenada para concretar altos rendimientos. Un cultivo de lupino es capaz de fijar entre 150 y 316 kg N ha⁻¹ año⁻¹ lo que repercute en un menor uso de fertilizante y contribuye a la sustentabilidad del ecosistema productivo (Castillo, Larson et al., Unkovich et al. Peoples et al., citados por León et al., 2001). En concordancia con esto último, ensayos realizados en Australia muestran que después de la siembra de lupino se registró un incremento de 41 kg ha⁻¹ en el N mineral del suelo al tiempo que (o adicionalmente) el cultivo de trigo siguiente estuvo libre de enfermedades (Reeves et al., citados por León et al., 2001). En relación a esto, está demostrado que la incorporación de un cultivo leguminosa invernal como el lupino dentro de un sistema trigo-trigo permite interrumpir el ciclo de enfermedades que sobreviven en el rastrojo, reduciendo la carga de inóculo y llevándolo a niveles que permiten un nuevo cultivo de trigo de forma segura (Mera et al., 2016).

La tasa de acumulación de N varía a lo largo del ciclo del cultivo siendo mayor durante la floración, formación y crecimiento de la vaina para luego comenzar a mermar durante el llenado de grano (Gataulina, citado por León et al., 2001). Teniendo en cuenta este comportamiento es posible determinar una posible fecha de secado del cultivo, antes de llenado de grano, que permita lograr la máxima acumulación de N a fin de utilizarlo como abono verde.

Estudios citados por Unkovich et al. (2000), buscaron cuantificar y ordenar a un grupo de cultivos leguminosa según la cantidad de N fijado. Estos autores reportaron rangos de valores de N fijado para diferentes especies leguminosas, entre las cuales la soja fue la que registró los valores más altos seguido por *Vicia faba*, *Lupinus angustifolius*, *Pisum sativum*, *Lens sulinaris*, *Phaseolus vulgaris* y *Cicer arietinum*, frijol común, lenteja y garbanzos, con valores máximos de 450, 330, 327, 244, 206, 191, 165 y 141 kg ha⁻¹, respectivamente, de los cuales un 95, 97, 97, 95, 92, 87, 70 y 82% fue derivado del N de la atmósfera vía FBN.

2.6. HIPÓTESIS GENERALES

Las hipótesis de trabajo fueron:

a) la ausencia o presencia de CC y/o el uso de distintas especies de CC, afectan en forma diferente el N mineral disponible para las plantas en un momento dado, así como la tasa de mineralización de N en un tiempo sucesivo.

b) el uso de diferentes antecesores y CC de distinta cantidad y calidad (relación C/N), afectan en forma diferente la dinámica y la disponibilidad de N para el cultivo siguiente de maíz y consecuentemente su rendimiento.

c) el método del cilindro para medir mineralización de N *in situ* es representativo de la performance del N absorbido del cultivo.

Para probar estas hipótesis se realizó un experimento en el cual se evaluaron diferentes CC invernales sobre la producción y absorción de N de un cultivo de maíz, examinando las diferentes formas de N en el suelo durante el ciclo.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. LOCALIZACIÓN Y SUELOS

El ensayo se realizó en una chacra comercial perteneciente a la empresa FADISOL S.A., ubicada en el departamento de Colonia, en la localidad de Ombúes de Lavalle (33°59'5.91"S, 57°43'48.12"O). El mismo se desarrolló en la zafra 2017/2018 sobre un suelo con historia agrícola. El suelo se caracterizó como Brunosol Éútrico Lúvico, perteneciente a la formación geológica La Carolina (Altamirano et al., 1976). En dicha unidad este tipo de suelos se encuentran de forma asociada, siendo Brunosoles Éútricos Típicos Fr. / Vertisoles Rúpticos Lúvicos Fr. las formas dominantes; y a nivel CONEAT se encuentra comprendido en el Grupo 10.3.

3.2. DESCRIPCIÓN Y MANEJO DEL EXPERIMENTO

La historia de uso agrícola del sitio experimental se muestra en el Cuadro 2. Cabe señalar que el término estación utilizado en este cuadro abarca una duración de tiempo más amplia que la que se usa comúnmente (verano= octubre a marzo, e invierno= abril a septiembre).

Cuadro 2. Historia de chacra previa al establecimiento del experimento

Verano 2017	Invierno 2016	Verano 2016	Invierno 2015	Verano 2015	Invierno 2014
Soja de 2 ^{da} .	Cebada (semilla)	Soja	Barbecho	Soja de 2 ^{da} .	Cebada forrajera

Para una mejor comprensión y análisis del ensayo general las actividades del mismo se desarrollaron en dos etapas.

Etapas 1-Establecimiento de los cultivos cobertura invernales

Esta etapa abarcó desde la siembra de los cultivos cobertura (CC) invernales hasta el comienzo del periodo de barbecho previo a la siembra del maíz.

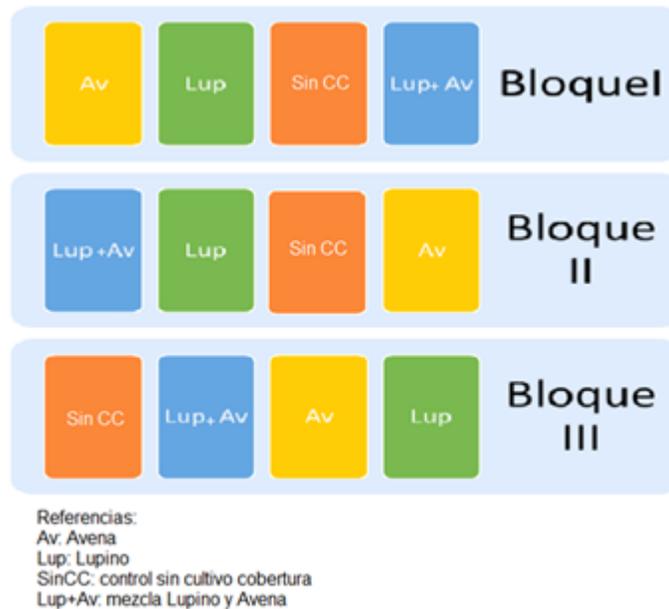
Las coberturas invernales evaluadas en esta etapa fueron básicamente dos especies, una leguminosa de grano (*Lupinus angustifolius* L.) y una gramínea forrajera (*Avena strigosa* L.). Estas a su vez fueron evaluadas en forma consociada o en cultivo mezcla definido con una densidad de siembra de 95 y 65

kg ha⁻¹ de lupino y avena, respectivamente (Cuadro 3). Por tanto, los tratamientos definidos en esta etapa fueron: 3 cultivos cobertura y un testigo o tratamiento control (sin CC).

Cuadro 3. Especies y densidades de siembra usada en los cultivos de cobertura establecidos en la etapa 1 del experimento

Cultivos cobertura	Densidad de siembra (kg ha ⁻¹)
lupino azul var. Lavallo (<i>Lupinus angustifolius</i> L.)	150
avena negra var. Agroplanalto (<i>Avena strigosa</i>)	80
lupino azul [60%] y avena negra [40%]	95 y 65 kg ha ⁻¹ , respectivamente

El arreglo de los tratamientos se realizó en un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones. Dichos bloques fueron dispuestos en función de la pendiente. Cada unidad experimental ocupó un área de 250 m² (6,6 m de ancho * 38 m de largo), por lo que las 12 parcelas resultantes ocuparon un área total de 0,3 ha (Figura 2).



Los tratamientos de CC, así como el control (sin cultivo cobertura) se indican con un color diferente.

Figura 2. Diseño experimental en etapa 1

Para el control de malezas, previo a la siembra de los CC, la empresa FADISOL S.A. realizó la aplicación de los siguientes herbicidas y dosis sobre toda la superficie experimental: glifosato 48% (1 L ha^{-1}), simazina 90% (1 kg ha^{-1}), diuron 90% (1 kg ha^{-1}), y un coadyuvante siliconado a razón de $35 \text{ cm}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Se realizó un muestreo inicial de suelo por bloque con calador manual (1,9 cm de diámetro) al momento de la siembra y a tres profundidades (0-7,5, 7,5-15 y 0-20 cm) para posterior determinación de N mineral, bases intercambiables, nitrógeno Total (NT), carbono orgánico total (CT) se determinó mediante valoración con sulfato ferroso, después de atacar la muestra con dicromato de potasio y ácido sulfúrico, sin calor externo (Walkley y Black, 1934), PBray1 (Bray y Kurtz, 1945). Simultáneo al muestreo previamente descrito, se hizo otro hasta 1,15 m de profundidad con taladro holandés, con el objetivo de realizar una descripción morfológica del perfil del suelo y a su vez analizar la composición granulométrica de los horizontes y determinar algunas propiedades químicas como pH (Van Lierop, 1990), MO, Ca y Mg intercambiables.

Además de los muestreos realizados al inicio de la instalación del ensayo, se colectaron nuevas muestras de suelo (por unidad experimental) a dos profundidades (0-7,5 y 7,5-15 cm) 4 días antes de la terminación de los CC para determinación de N mineral.

Luego del muestreo inicial de suelo y en simultáneo con la siembra, se realizó la fertilización base de toda el área experimental con dosis no limitantes de P(100 kg P₂O₅ ha⁻¹), K (90 kg K₂O ha⁻¹) y S (30 kg S ha⁻¹). Luego de esa aplicación inicial, no se realizaron otras aplicaciones de nutrientes.

La siembra se realizó el 6 de junio de 2017 con una sembradora SEMEATO a chorrillo de 13 líneas de siembra con una distancia entre hileras de 17 cm mediante el sistema de siembra directa. Todas las leguminosas fueron inoculadas con los inoculantes comerciales recomendados para cada especie siguiendo las indicaciones del fabricante (NITRASEC). Ante la falta en el mercado de un inoculante específico para lupino, se utilizaron especies de *Bradyrhizobium* sp., cepas U-612 + U620 recomendadas para *Ornithopus compressus*.

El período de crecimiento de las coberturas invernales fue de 124 días, durante dicho periodo el testigo permaneció libre de crecimiento vegetal. La fecha de terminación de los CC fue definida a inicio de llenado de grano de lupino.

Para la determinación del rendimiento de los CC, el día previo a la aplicación de herbicida para desecarlos (9/10/2017) se determinó en el campo el peso fresco total de las muestras de plantas de cada tratamiento, cosechando un área de 4,6 m² (1,15 * 4 m) con cortadora mecánica (segadora AGRÍA). En el campo, se registró el peso fresco de la biomasa aérea obtenida en el área cosechada de cada tratamiento de CC. Simultáneamente, se tomaron submuestras que también fueron pesadas en el campo para ser procesadas y acondicionadas en el laboratorio para posterior realización de análisis químicos de interés en este estudio.

Etapa 2- Evaluación de la residualidad de N de los CC invernal sobre cultivo siguiente de maíz

La segunda etapa estuvo comprendida por el periodo de barbecho y todo el ciclo de crecimiento del cultivo de maíz sembrado en las mismas unidades experimentales dónde se produjeron las coberturas invernales. La siembra del maíz (variedad DOW510) se realizó el 27 de noviembre de 2017, a los 49 días después de la terminación de esas coberturas con aplicación de glifosato. La

siembra se realizó con una sembradora de dosificador mecánico de placa, con una distancia de 0,7 m y 0,35 m entre filas y plantas respectivamente. La población lograda fue de 60000 plantas ha⁻¹.

Para el control de malezas el 29/11/17 se aplicó 1,5 kg ha⁻¹ de atrazina, 3 L ha⁻¹ de glifosato y 60 cm³ ha⁻¹ de dusilan (coadyuvante).

El diseño experimental fue de bloques completos aleatorizados con un arreglo de tratamientos en parcelas divididas con tres repeticiones. Diferentes dosis de N fueron evaluadas en las sub-parcelas o parcelas chicas, sobre cada CC antecesor, pero sólo el tratamiento control (0 kg N ha⁻¹) fue usado en este estudio.

Se realizaron muestreos de suelo (10 tomas de suelo por unidad experimental) a una profundidad de 0-20 cm en las fechas 27/11/17 y 27/12/17 a la siembra y en el estadio V6 del cultivo de maíz, respectivamente.

Durante todo el ciclo de crecimiento del cultivo de maíz y con una frecuencia de muestreo mensual, se cuantificó la mineralización neta de N del suelo *in situ*. La estimación fue basada en la metodología propuesta por Raison et al. (1987), el cual será detallado más adelante. Simultáneo a cada momento de muestreo de suelo (confinado y no confinado a los tubos de PVC), se realizaron también colectas de plantas de maíz para conocer el N absorbido asociado a cada período de incubación del suelo *in situ*. Para ello, se realizaron muestreos de plantas contiguas tomadas de 1 tramo de 1 metro de surco seleccionado al azar en cada una de las parcelas.

Al momento de la cosecha también se realizó un muestreo de plantas para determinación de rendimiento de grano, siendo en este caso 8 m de los dos surcos centrales el área de cosecha en cada parcela.

3.2.1. Descripción del método de mineralización *in situ*

Para estimar la tasa de mineralización neta de N del suelo *in situ* de cada uno de los tratamientos, durante el ciclo de crecimiento del cultivo de maíz, se utilizó la metodología propuesta por Raison et al. (1987). El método se basa en la inserción de tubos de PVC en el suelo hasta una determinada profundidad de interés. La mitad de los tubos se taparon con una “caperuza de plástico” (TC) y la otra mitad permaneció destapada (TE), expuesta a las condiciones

ambientales preponderantes durante el tiempo que duró el periodo de incubación (Cuadro 4).

Teniendo en cuenta esta metodología, para el experimento se utilizaron 4 tubos de PVC (10 cm de diámetro y 20 cm de largo) por tratamiento, dos expuestos (TE) y dos cubiertos por una caperuza de nylon (TC), enterrados a una profundidad de 15 cm. A su vez se colocaron dos tubos adicionales de cada tipo (TE y TC) para monitorear la temperatura del suelo confinado mediante sensores digitales (Data logger iBUTTON-marca HOBO) a una profundidad de 5 cm. También se colocó un sensor de temperatura en suelo no confinado a igual profundidad. Tanto en suelo confinado como en suelo externo se monitoreó la humedad mediante el método gravimétrico.

Una vez transcurrido el periodo de incubación (un mes aproximadamente), se retiraron todos los tubos para su posterior procesamiento y fueron sustituidos por tubos nuevos acorde al procedimiento inicial.

Al final de cada periodo de incubación la muestra de suelo de cada tubo fue dividida en dos estratos de profundidad (0-7,5 y 7,5-15cm) en las cuáles se determinó N mineral (Nmin.). Simultáneo al muestreo del suelo confinado, se tomaron muestras de suelo no confinado o externo para determinar el contenido de N mineral al inicio de cada periodo de incubación.

La mineralización neta de N se estimó como la diferencia entre la concentración de Nmin. del suelo en TC al final de cada periodo de incubación (t+1) y la concentración de N mineral del suelo no confinado al inicio del periodo de incubación (t, Ecuación 1).

$$N_{min. Neta}(kgNha^{-1}) = N_{min. C_{(t+1)}} - N_{min. (t)} \quad [1]$$

Donde Nmin. Neta corresponde al N mineralizado durante el periodo de incubación que se estimó como la diferencia entre Nmin. C_(t+1) y Nmin. (t), dónde el primer término hace referencia a la concentración de Nmin. (N-NO₃ +N-NH₄) en el cilindro cubierto al final periodo de incubación (al momento de extracción del cilindro en el campo), mientras que el Nmin. (t) al Nmin. (N-NO₃ +N-NH₄) del suelo no confinado al inicio del periodo de incubación.

Por otro lado, se estimó la tasa de mineralización diaria a través de la siguiente ecuación:

$$\text{TasaNmin}_{\text{Diaria}} (\text{kgNha}^{-1}\text{día}^{-1}) = \frac{\text{Nmin.Neta}}{\text{Tiempo incubación(días)}} \quad [2]$$

Dónde $\text{TasaNmin}_{\text{Diaria}}$ corresponde al N mineralizado por día durante el periodo de incubación. El término de $\text{TasaNmin}_{\text{Diaria}}$ también se expresó en términos anuales, así como relativos, dónde esta última refleja la cantidad de N mineralizado en función del total de N orgánico del suelo de cada profundidad evaluada. Para expresar la tasa en términos relativos se estimó la concentración de N total de cada estrato (0 a 7,5 y 7,5 a 15 cm). El valor de NT utilizado fue de 2,5 y de 1,5 g kg⁻¹ para el primer y segundo estrato, respectivamente.

Finalmente, a través de la información de los cilindros se estimó el término N absorbido para cada período de incubación bajo el supuesto planteado por Raison et al. (1987), de que las tasas de mineralización de N son iguales entre cilindro cubierto y expuesto. La ecuación para estimar esto fue:

$$\text{Nabs.} (\text{kgha}^{-1}) = \text{Nmin. } E_{(t+1)} - \text{Nmin.}_{(t+1)} \quad [3]$$

Donde Nabs. es la cantidad de N absorbido por el cultivo durante el período de incubación del suelo. Este valor se calculó como la diferencia entre el $\text{Nmin. } E_{(t+1)}$, que es la cantidad de N mineral en el cilindro expuesto menos el $\text{Nmin.}_{(t+1)}$, que hace referencia a la cantidad de N mineral presente en el suelo externo no confinado al final del período de incubación.

Mediante la estimación de la mineralización neta de N de cada periodo de incubación, se puede inferir cómo fue la dinámica del N durante el cultivo de maíz, y a su vez evaluar si el aporte de N derivado de los rastrojos de CC estuvo sincronizada con la demanda de N por el cultivo de maíz sembrado sobre esos rastrojos.

Cuadro 4. Periodo de confinamiento del suelo durante el ciclo del cultivo de maíz

Periodo de incubación	Fecha		Duración (días)	Estadio de cultivo de maíz*
	inicio	Fin		
P1	27/11/17	27/12/17	31	V6
P2	27/12/17	24/1/18	28	Vt
P3	24/1/18	27/2/18	34	R4
P4	27/2/18	20/3/18	21	MF

*Estados vegetativos y reproductivos de una planta de maíz según escala Ritchie y Hanaway (1982).

3.3. PROCESAMIENTO, ACONDICIONAMIENTO Y DETERMINACIONES REALIZADAS EN LABORATORIO

3.3.1. Muestras foliares

Todas las muestras foliares fueron secadas en estufa de aire forzado a 65°C durante 48 horas hasta peso constante y pesadas nuevamente luego de este período de secado. Luego, se tomó una sub-muestra de cada tratamiento, las cuales fueron molidas primero con un molino de cuchillas fijas y móviles (Marca Marconi, Modelo MA-580) hasta pasar por malla de 0,5 mm. En las muestras utilizadas para análisis isotópicos, se realizó una molienda adicional en un molino rotatorio (Marca SampleTek, Modelo 200 vial Rotator), hasta alcanzar consistencia talco, lo cual es necesario para el análisis de % de N y de ¹⁵N por espectrometría de masa.

3.3.1.1. Muestras foliares de biomasa aérea de los CC invernales

Posterior al secado de las muestras se estimó el rendimiento en Kg de MS para el área cosechada de la muestra y luego se expresó este dato en Kg ha⁻¹.

Los análisis de %N y %C de los CC se determinaron por espectrometría de masa. Con los contenidos de N y C en la MS aérea se estimaron las relaciones C/N de los CC.

La determinación de la composición isotópica de ¹⁵N de las coberturas fue utilizada para estimar la fijación biológica de nitrógeno (FBN) del lupino puro y en mezcla con avena mediante el método de abundancia natural. La avena se utilizó como cultivo de referencia. Otro parámetro clave para la estimación de la FBN es el valor B. Este fue determinado con la misma variedad y la misma cepa de rizobio que la empelada en el ensayo de campo, pero creciendo en un medio sin N y bajo condiciones de invernadero (datos no mostrados).

3.3.1.2. Muestras foliares de biomasa aérea y de grano de maíz

Durante el desarrollo del cultivo de maíz se realizaron determinaciones de rendimiento de MS y N absorbido en diferentes estadios fisiológicos (V6, VT, en floración, R4 y madurez fisiológica), coincidente con el momento de extracción de suelo confinado en cilindros de PVC, exceptuando floración (6/2/18) en donde no hubo extracción de cilindros. El grano de todas las plantas cosechadas en madurez fisiológica y cosecha fue separado del resto de la planta.

Con el dato de número de plantas cosechadas y el marco de plantación, se calculó el rendimiento total en MS aérea por hectárea en cada uno de los momentos de muestreo.

Las mazorcas de cada tratamiento, colectadas a madurez fisiológica y a cosecha del maíz, fueron desgranadas con equipamiento experimental. Los granos fueron pesados y se les determinó el contenido de humedad. Posteriormente se calculó el rendimiento en grano de maíz kg ha⁻¹ corregido a 14,5 % de humedad.

En todas las muestras de plantas y de grano se determinó el contenido de N por el método Kjeldahl mediante digestión de la muestra con ácido sulfúrico y posterior destilación.

3.3.2. Muestras de suelo

Todas las muestras de suelo, previo a la determinación del análisis de interés se secaron en estufa de aire forzado a 40 ° C durante 48 horas. Luego, las muestras fueron molidas en un molino de cuchillas hasta un tamaño de tamiz 2 mm.

El muestreo de suelo realizado al momento de la siembra de los CC invernales a dos profundidades (0-7,5 y 7,5-15 cm) fue con el objetivo de conocer algunos parámetros químicos relacionados con la fertilidad del suelo. En estas muestras se determinó pH, contenido de NT, PBray1 y las bases de intercambio.

El pH del suelo se midió en agua (relación 1:2,5 de suelo: agua) con electrodo de pH Orion Research 701. El contenido de NT se determinó por el método Dumas en un espectrómetro de masa Finnigan MAT DELTA plus XL (Bremen, Alemania) disponible en el laboratorio CATNAS. El contenido de P lábil ó P disponible se midió mediante el método de extracción Bray No. 1 (PBray1, Bray y Kurtz, 1945). Las lecturas de PBray1 fueron realizadas en valores de absorbancia de 665 utilizando un lector de microplacas mrc® con espectrofotómetro disponible en el laboratorio de Fertilidad de Suelos-FAgro.

Los cationes intercambiables Ca y Mg se determinaron por absorción atómica, mientras que K y Na por espectrofotometría de llama, previa extracción con acetato de amonio 1M a pH 7 (Thomas, 1982).

Durante el ciclo del cultivo de maíz, en cada periodo de incubación, se realizaron muestreos de suelo a 0-20 cm de profundidad, para luego determinar el contenido de NO₃⁻, como indicador de la disponibilidad de N para cultivos de cereales.

También se hizo otro muestreo hasta 1,15 m de profundidad, con el objetivo de realizar una descripción morfológica del perfil del suelo y a su vez determinar algunas propiedades físicas (composición granulométrica) y químicas, como materia orgánica (MO), Ca y Mg, correspondiente a los horizontes descritos hasta los primeros 70 cm de suelo. La composición granulométrica del suelo se analizó por el método del hidrómetro de acuerdo a Gee y Bauder (1979). La MO se determinó por el método de Walkley-Black (Nelson y Sommers, 1996), mientras que los cationes Ca y Mg se determinaron como fue descrito.

Previo a la terminación de los CC (6/10/2017), se hizo un muestreo de suelo (por unidad experimental) para detectar posibles cambios en la disponibilidad de N mineral del suelo, por efecto de los CC, a dos profundidades (0-7,5 y 7,5-15 cm). La determinación de NO_3^- fue realizada con el método colorimétrico citado por Doaney Horwath (2003) y la de N-NH_4 con el método colorimétrico citado por Weatherburn (1967). Las lecturas de N-NO_3^- y N-NH_4 fueron realizadas en valores de absorbancia de 540 y 650 nm, respectivamente, operando el mismo lector de microplacas que el utilizado para las lecturas de PBray1.

La concentración de N mineral (nitrato + amonio) de las muestras tomadas a la siembra y en el estadio v6 del cultivo, así como las colectadas en suelo confinado y no confinado en tubos de PVC en otros estadios del maíz, se determinó usando los métodos previamente descritos para las muestras de suelo de la Etapa 1. Los datos de N mineral (para N-NO_3^- y N-NH_4) se expresaron en masa (kg ha^{-1}) según el siguiente cálculo:

$$\text{N} - \text{NO}_3^- (\text{kg ha}^{-1}) = \frac{\text{N} - \text{NO}_3^- (\text{mg kg}^{-1}) \times \text{Prof. (cm)} \times \text{Da} (\text{Mg m}^{-3})}{10 \text{ cm}} \quad [5]$$

Donde Prof.= profundidad; Da= densidad aparente; 10= factor de corrección de unidades.

La densidad aparente utilizada para los estratos 0-7,5 y 7,5-15 cm fue realizada en un área aledaña al ensayo bajo condiciones similares. La densidad aparente se obtuvo a partir de del método directo del anillo volumétrico según lo publicado por Lal y Kimble (2001). De esta manera, se utilizó una densidad aparente de 1,1 y de 1,2 g cm^{-3} para el primer y segundo estrato, respectivamente.

En cada momento de muestreo se determinó el contenido de agua del suelo por el método gravimétrico, registrando la diferencia entre el peso de suelo húmedo (humedad de campo) y el peso una vez seco a 105°C en estufa durante 48 horas hasta peso constante (Ecuación 6).

$$\text{HG} (\%) = \frac{\text{PH}(\text{g}) - \text{PS}(\text{g})}{\text{PS}(\text{g})} * 100 \quad [6]$$

Donde HG= humedad gravimétrica; PH= peso húmedo, PS= peso seco.

3.4. CLIMA

Se estimó la temperatura media mensual y la precipitación acumulada mensual del periodo mayo 2017- mayo 2018 a partir de los datos de temperatura máxima y mínima diaria y los datos de precipitación diaria registrados en la estación meteorológica, perteneciente al Instituto Uruguayo de Meteorología, de la ciudad de Mercedes (Lat -33,25068, Long -58,06920) próxima al sitio experimental (Lat-33,984835, -Long -57,728536).

En tanto que, para calcular la temperatura media promedio mensual histórica y la precipitación acumulada promedio mensual histórica, se utilizaron los registros de temperatura media mensual y precipitación acumulada mensual del periodo 1987-2018.

3.5. ANÁLISIS ESTADÍSTICO

Para el análisis estadístico de los datos obtenidos se utilizó el programa INFOSTAT y el software R commander. Para analizar las variables de suelo (N mineral en diferentes fechas de muestreo y estratos del perfil del suelo), se realizaron ANAVAS particionado por tiempo de muestreo, considerando los efectos de tratamiento antecesor como los bloques como efectos fijos. También se realizaron regresiones lineales simples y múltiples utilizando el procedimiento lm (modelo lineal), y se realizaron ANAVAS de los efectos fijos de las variables categóricas (efectos de los CC antecesores) y de las variables numéricas (Nmin. inicial del suelo). Para las variables de rendimiento de MS y N absorbido en tres estadios definidos del maíz (V6, VT, R4) también se utilizó CC como variable categórica y NO_3^- en V6 como numérica. Los efectos se consideraron estadísticamente significativos con una $P < 0,05$ y tendencia con $P \leq 0,1$ y las comparaciones múltiples se realizaron con la prueba de Tukey.

Las variables de suelo (mineralización de N *in situ*) estimadas a partir de los cilindros de incubación fueron analizadas a través del procedimiento lm (modelos lineales) para cada tiempo de muestreo. En este modelo todos los efectos se consideraron como efectos fijos. Para este modelo también se incluyó como covariable el contenido de N mineral inicial del suelo.

A su vez se realizaron matrices de correlación de Pearson, usando los comandos cor y cor.test del software R para poder describir y o explicar mejor la asociación entre diferentes variables. Se realizaron también contrastes ortogonales (CC vs. sin CC, gramínea vs. leguminosa, leguminosa pura vs.

mezcla) a fin de observar posibles diferencias entre los distintos grupos de interés para este estudio.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. CLIMA

Durante el periodo de barbecho químico (10/10/17 al 27/11/17) se registraron lluvias equivalentes a 138 mm (Figura 3), lo que se puede considerar más que suficiente para recargar el perfil del suelo teniendo en cuenta que en promedio la capacidad de almacenaje para los suelos del Uruguay es de 120mm (Molfino y Califra, 2001). A la siembra del maíz no se registraron diferencias en el agua almacenada en el suelo relacionadas con el antecesor.

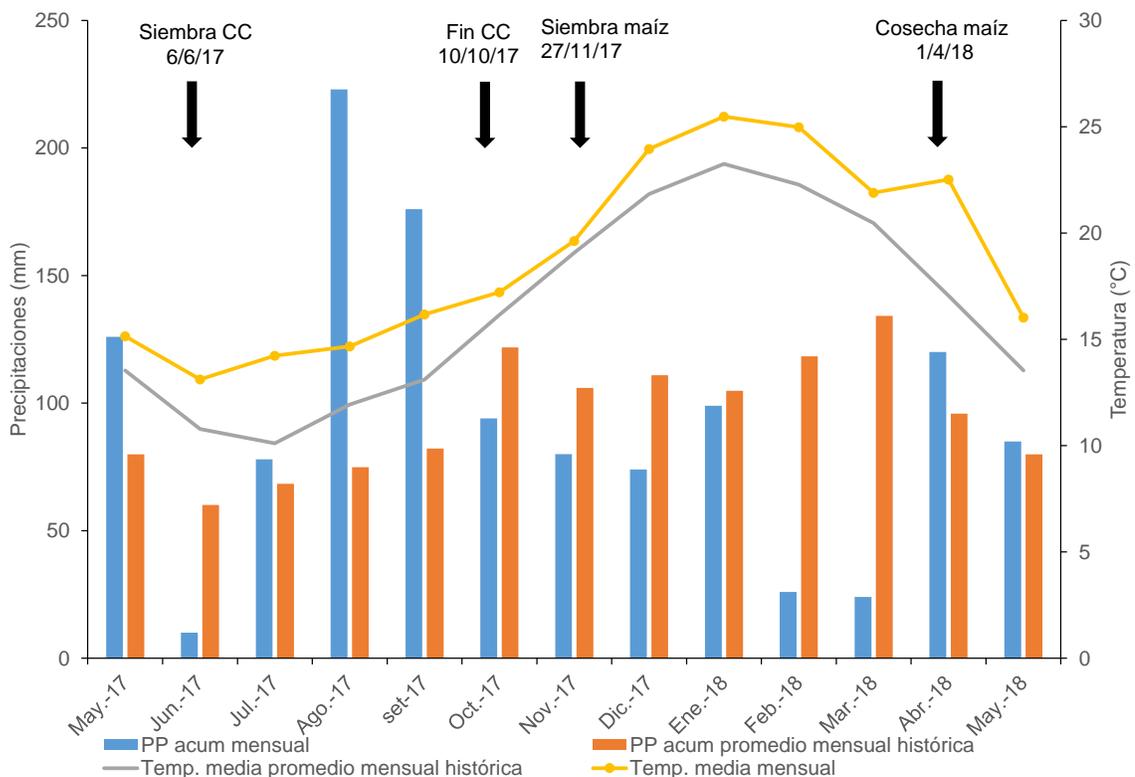


Figura 3. Temperatura media y precipitaciones (PP) promedio durante la zafra 2017 y promedio histórico (1987-2018)

Según Giménez y García Petillo (2011) los cultivos de verano realizados en secano en el litoral del país, por lo general se desarrollan en ambientes con disponibilidad de agua deficitaria y variable, estos autores estiman que en

promedio las deficiencias hídricas rondan el 35%. Teniendo en cuenta lo antes mencionado y según lo que se puede observar en la Figura 3, la oferta hídrica para el cultivo de verano durante la zafra 17/18 fue deficitaria dado que las precipitaciones mensuales acumuladas (PP) registradas durante todo el ciclo del maíz fueron inferiores al promedio mensual histórico. El período de mayor diferencia entre PP de la zafra y PP de la serie histórica se observó durante los meses de febrero-marzo (Figura 3).

El periodo crítico (PC) de determinación de rendimiento coincidió con la etapa de déficit hídrico registrada. Considerando que el PC del maíz abarca los 15 días previos y los 15 días posteriores a R1, en el experimento en cuestión, dado que el 1 de febrero del 2018 el cultivo se encontraba en R1, el PC estuvo comprendido desde el 17/1/18 al 16/2/18. Durante este periodo se registraron lluvias equivalentes a 32 mm totales de los cuales 11 mm corresponden a la primera quincena del PC, y 21 a la segunda quincena. Es importante mencionar que durante los 5 días previos al comienzo del PC se registraron lluvias equivalentes a 83 mm, si bien estos registros escapan al PC, dada la proximidad de los mismos a dicho período, y los escasos valores de PP durante el mismo, seguramente resultaron un aporte fundamental para el cultivo.

En cuanto a los registros de temperatura, para la zafra en estudio, la temperatura promedio mensual del periodo diciembre-marzo fue de 24°C, mientras que para el mismo periodo de tiempo la temperatura media promedio mensual histórica fue de 22,5 °C (Figura 3), reduciendo en consecuencia la duración del largo del ciclo del cultivo de maíz, acortándose las etapas tempranas (siembra- emergencia y emergencia floración, Ellis et al., 1992).

Teniendo en cuenta los valores inferiores de PP registrados durante el ciclo del cultivo respecto a los registros históricos, y más precisamente durante el PC, es posible inferir que los mismos tuvieron un impacto negativo sobre la expresión del potencial de rendimiento del cultivo (Giménez, 2012), aunque también es de esperar que afecte la dinámica del N mineral del suelo y su disponibilidad para el cultivo (Perdomo et al., 2008).

4.2. SUELO

Las características físicas (composición granulométrica y clase textural) así como las químicas (MO, NT, CIC, Ca y Mg) correspondientes a 3 horizontes diagnósticos (A perturbado, A y B textural) del suelo sobre el cuál se realizó el experimento, se presentan en la Cuadro 5. Por otro lado, se realizaron análisis de suelo a dos profundidades (0-7,5 y 7,5-15 cm, Cuadro 6), en las cuales se realizaron muestreos mensualmente para determinar la concentración de N mineral en suelo confinado y no confinado.

Cuadro 5. Características físicas y químicas del suelo en el sitio experimental en los horizontes A y Bt

Hr.	Prof.	Análisis granulométrico			MO	NT	CIC	Ca	Mg	Clase textural
		Arcilla	Limo	Arena						
cm		-----%-----			cmolc kg ⁻¹					
H.Ap	0-15	37,9	45,2	17,0	2,5	0,10	25,3	20,7	3,5	FAcL ^a
H.A	15-30	43,6	35,6	20,9	2,4	0,20	29,4	23,9	4,4	Ac ^b
H.Bt	30-70	65,8	19,6	14,6	2,6	0,10	32,6	24,2	7,1	Ac

^aFAcL = franco arcillo limoso.

^bAc = arcilloso.

Cuadro 6. Características químicas del suelo en el sitio experimental en los estratos 0-7,5 y 7,5-15 cm

Profundidad	NT	pH	P Bray No.1	Ca	Mg	K	Na
Cm	%		mg kg ⁻¹	cmolc kg ⁻¹			
0-7,5	0,25	5,7	19,4	17,9	3,9	0,7	0,4
7,5-15	0,15	6,1	2,4	23,0	4,7	0,6	0,6

El contenido de P Bray1 y su distribución en los estratos de 0-7,5 y 7,5-15, deja de manifiesto que existe una clara estratificación de P en los primeros centímetros del suelo, algo común en sistemas de siembra directa (Calviño et al., 2000). De acuerdo a lo esperado para suelos de textura arcillosa (fina), este suelo presenta un nivel de bases alto con alta proporción de Ca (contenido relativo= 78%), y un balance catiónico equilibrado de acuerdo a los contenidos relativos representativos para estos suelos. La acidez promedio del suelo medido como pH en agua en los primeros 7,5 cm fue de 5,7, con valores de mínimo y máximo de 5,3 y 6,3, respectivamente, y de 6,1 en 7,5-15 cm, con mayor rango de variación que osciló entre 5,6 y 7,15, confirmando la presencia de carbonato de calcio en los horizontes subsuperficiales del suelo.

En las muestras de suelo tomadas a 0-20 cm de profundidad, se analizó el contenido de NO_3^- a la siembra de los CC, siendo 5,1 mg kg^{-1} .

4.3. RENDIMIENTO DE MATERIA SECA Y N FIJADO DE LOS CULTIVOS ANTECESORES

Los rendimientos de los CC oscilaron entre 1400 y 2700 kg de MS ha^{-1} (Cuadro 7). El CC de mayor rendimiento fue la mezcla, aunque en este cultivo casi el 80% de la biomasa acumulada fue representada por la avena. El aporte de C y N fue mayor por parte del CC mezcla, debido a la mayor producción de MS. La tasa de fijación promedio del lupino fue del 70% (Cuadro 7), aunque levemente mayor cuando este fue sembrado consociado a la avena. La menor relación C/N se observó en el CC leguminosa, mientras que la mayor se registró en el CC avena, y esta relación fue disminuida al incluir lupino en la mezcla.

Cuadro 7. Rendimiento y composición de cada una de las especies empleadas como cultivo cobertura

Especie	MS	Rend. N	Rend. C	NT	C/N	FBN	Kg N fijado
		Kg ha^{-1}		%		%	Kg ha^{-1}
Avena	1828,1	23,1	743,2	1,30	31,4	n.c. ^b	n.c.
Lupino	1398,2	35,5	569,2	2,40	17,6	67,8	23,8
Mz ^a	2747,0	42,7	1120,9	1,50	27,3	72,0	15,4

^aMz = mezcla de avena y lupino.

^bn.c. = no corresponde.

Según Varco et al. (1989) es de esperar que a menor relación C/N de los restos, los mismos se descompongan más rápido dejando disponible el N más tempranamente para el cultivo siguiente. Concomitadamente, Giacomini et al. (2007) consideran que el tipo y cantidad de rastrojo que se incorpora al suelo son dos de los factores que más inciden en la tasa de mineralización del N. De acuerdo con esto, se espera que el lupino presente una mayor tasa de mineralización del N, lo que repercutiría en un aporte más temprano de este nutriente para el cultivo renta. Mientras que, en el caso de la mezcla y la avena, dada su mayor producción de MS y la menor calidad del rastrojo (mayor relación C/N), seguramente se produzca inmovilización parcial del N, lo cual resultará en una menor mineralización neta o en un aporte más tardío de N al cultivo de maíz (Ranells et al., 1997).

4.4. VARIACIONES EN LA DISPONIBILIDAD DE N MINERAL DEL SUELO INMEDIATO A LA TERMINACIÓN DE LOS CC Y A LA SIEMBRA DEL CULTIVO DE MAÍZ

La concentración de N mineral se midió en diferentes momentos, entre los primeros registros se describen en este ítem los efectuados al momento de la terminación de los CC invernales y a la siembra del cultivo renta en los estratos de 0-7,5 y de 7,5-15 cm de profundidad (Cuadro 8). No existió efecto estadísticamente significativo del antecesor sobre la concentración de ninguna de las formas de N mineral a la terminación de los CC A la siembra de maíz, en cambio, la concentración de NO_3^- en el tratamiento sin CC fue estadísticamente mayor al nivel de NO_3^- en el tratamiento de avena pura o en mezcla en la profundidad de 0-7,5 cm; sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas con el nivel de NO_3^- aportado por el lupino. A su vez, aunque la concentración de NO_3^- del suelo con esta leguminosa no fue estadísticamente distinto a la del CC mezcla, el suelo tuvo 7 mg kg^{-1} de NO_3^- más sobre lupino puro que cuando este se sembró en mezcla con avena. Estos resultados reflejan el efecto de la relación C/N del antecesor, ya que cuánto más C fue aportado por estos cultivos, como en el caso de la avena y la mezcla, menor fue la disponibilidad de nitrato (Varco et al. 1989, Ranells et al. 1997, Giacomini et al. 2007).

Cuadro 8. Medias para la concentración de N mineral (nitrato y amonio) del suelo en 0-7,5 y 7,5-15 cm de profundidad al momento de terminación de los cultivos de cobertura y a la siembra del cultivo de maíz. Para el ANAVA se consideró un modelo ANAVA de una vía, considerando como efectos fijos el antecesor y el bloque

Antecesor	Profundidad (cm)	N-nitrato		N-amonio	
		mgkg ⁻¹			
		Fecha 1 ^a	Fecha 2 ^b	Fecha 1	Fecha 2
Avena	0-7,5	1,87 A	17,60 C	10,06 AB	7,42 A
	7,5-15	1,33 a	8,42 ab	9,33 a	6,07 a
Lupino	0-7,5	2,58 A	27,64 AB	10,98 AB	7,07 A
	7,5-15	1,26 a	9,39 ab	10,82 a	6,33 a
Mezcla	0-7,5	1,27 A	20,86 BC	8,31 B	7,14 A
	7,5-15	0,61 a	6,39 b	8,98 a	7,27 a
Sin CC	0-7,5	4,07 A	29,98 A	11,07 A	6,85 A
	7,5-15	2,34 a	12,25 a	9,57 a	6,37 a
F.V.					
Antecesor- Fecha1		-----P-----			
0-7,5		NS ^c (0,09)		NS	
7,5-15		NS		NS	
Antecesor- Fecha 2		-----P-----			
0-7,5		0,009		NS	
7,5-15		NS (0,08)		NS	

^aFecha 1 = terminación de CC (6/10/2017).

^bFecha 2 = siembra de maíz (27/11/2017).

^cNS = no significativo (P > 0,05).

Letras en mayúscula: indica diferencias entre medias por antecesores para estrato de 0-7.

Letras en minúscula: indica diferencias entre medias por antecesores para estrato de 7-15.

Independientemente de la profundidad, los contenidos de N mineral del suelo aumentaron de una fecha a otra (Cuadro 8), y si bien al momento de terminación de los CC esos valores se explicaron mayoritariamente por el componente amonio, al momento de la siembra esta relación se invierte y el nitrato pasa a ser el componente de mayor peso dentro del N mineral disponible. Posiblemente, la mayor proporción de nitrato en la segunda fecha se debió a que las condiciones fueron favorables para la actividad microbiana y por ende el proceso de nitrificación (Norton y Stark, 2011).

4.5. VARIACIONES EN EL CONTENIDO DE HUMEDAD Y TEMPERATURA DEL SUELO CONFINADO EN CILINDROS DE PVC Y DEL SUELO EXTERNO

Independientemente de la condición de incubación de suelo confinado (cubierto y expuesto) y del antecesor para un mismo periodo de tiempo, no se observaron grandes diferencias en los valores de HG registrados (Figura 4). No obstante, se registraron diferencias de HG entre los diferentes periodos de tiempo, encontrándose el mayor valor a los 93 días de la siembra (30 %), y el menor a los 114 días de la siembra (13%). En los muestreos realizados a los 31 y 59 días después de la siembra (27/12/2017 y 24/01/2018, respectivamente), se registraron valores intermedios de HG (17%), no diferenciándose significativamente entre ellos ($P > 0,05$). Por otro lado, considerando la condición del cilindro, se registraron diferencias estadísticamente significativas ($P < 0,0001$) entre suelo confinado (cubierto y expuesto) y suelo externo en los muestreos correspondientes con las fechas del 24/1/2018 y 20/03/2018, con aproximadamente 7% más de humedad en el suelo externo (no confinado en el cilindro) que en el suelo confinado.

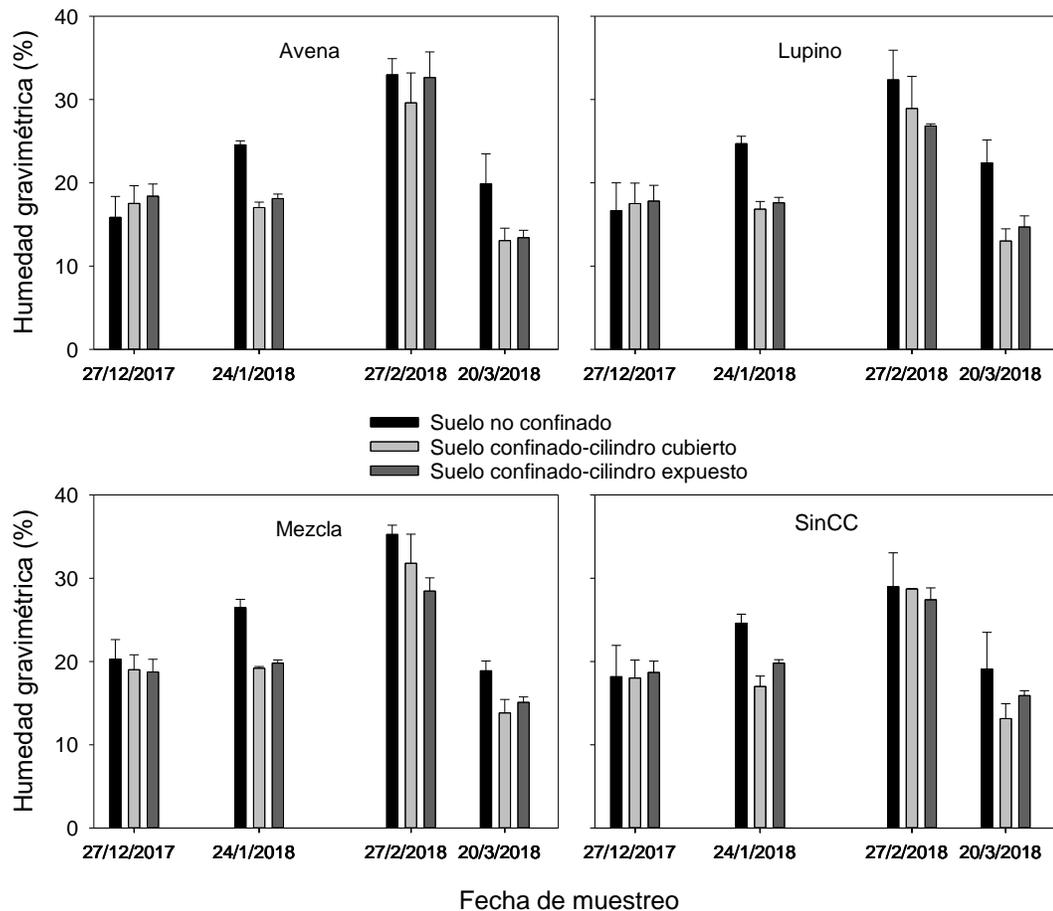
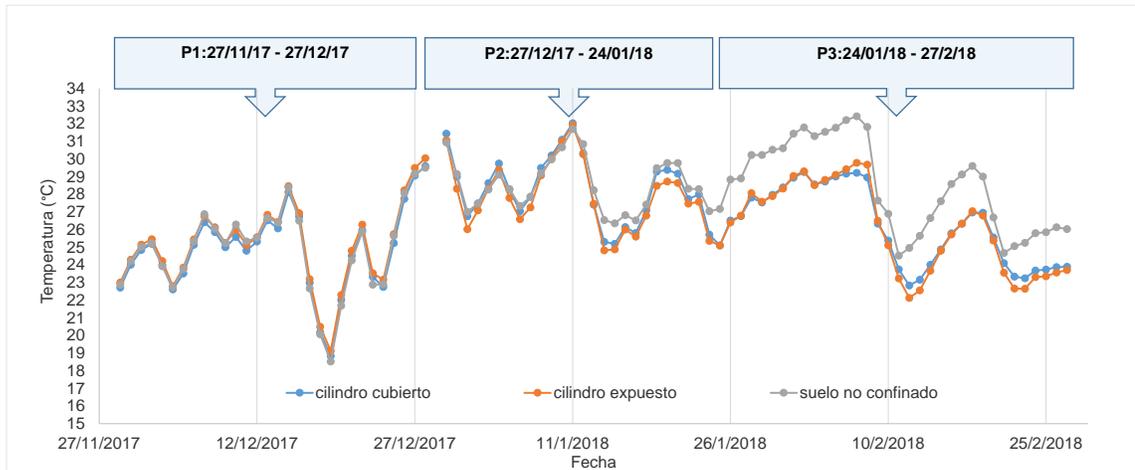


Figura 4. Variaciones de la humedad gravimétrica del suelo en el estrato de 0-15 cm de profundidad según condición de suelo y antecesor en cuatro fechas de muestreo

En relación a la temperatura del suelo medida a los 5 cm de profundidad (Figura 5), se observó que independientemente de si el suelo estaba o no confinado, durante todo el primer periodo de estudio (P1), la temperatura del suelo permaneció prácticamente igual para todas las condiciones del suelo y se mantuvo así hasta mediados de P2. Ya durante la segunda mitad de P2 y más aún en P3, se detectaron diferencias entre suelo confinado (cilindros cubiertos y expuestos) y suelo externo (Figura 5).



P1= 31 días, P2= 59 y P3= hasta los 93 días desde la siembra del maíz.
Suelo confinado= cilindro cubierto y expuesto.

Figura 5. Temperatura del suelo confinado y no confinado (7,5 cm de profundidad), registrada diariamente en cada período de incubación

4.6. VARIACIONES EN LA DINÁMICA DE N MINERAL EN SUELO EXTERNO DURANTE LA ETAPA DE CRECIMIENTO DEL CULTIVO DE MAÍZ

Durante el cultivo de maíz la concentración de N-nitrato del suelo de 0-20 cm de profundidad mostró un aumento desde la siembra a V6, siendo la magnitud de dicho aumento distinta según el antecesor (Cuadro 9). En tanto, para cada uno de los momentos evaluados, sólo se observó una tendencia ($P= 0,082$) entre antecesores en el estadio V6. En este estadio la concentración de NO_3^- en el suelo de las parcelas sin CC fue en promedio 7 mg N kg^{-1} superior respecto a las parcelas que tuvieron CC, y su valor promedio fue muy próximo al dato de nivel crítico para el cultivo de maíz (Perdomo et al., 1998). Por lo tanto, a partir de los datos de nitrato en el suelo determinados en este estadio, es posible inferir que podría existir respuesta al agregado de N y se esperaría que esta sea mayor en los tratamientos con CC (datos no mostrados). Estos resultados son coincidentes en parte con los reportados por Ernst (2006), quién evaluando el efecto del uso de *Trifolium alexandrinum* como CC en una secuencia maíz-barbecho-maíz tampoco encontró diferencias entre este tratamiento y el control (sin CC), ambos sin fertilización de N, en la concentración de nitrato a la siembra del cultivo siguiente de maíz.

Cuadro 9. Medias para la concentración de N- nitrato del suelo no confinado en 0-20 cm de profundidad al momento de siembra y V6 del cultivo de maíz. Se consideró un modelo ANAVA de una vía considerando como efectos fijos el antecesor y el bloque

Antecesor	N- nitrato	
	mg kg ⁻¹	
	Siembra	Estadio V6
Avena	8,66 a	11,69 ab
Lupino	9,36 a	12,38 ab
Mezcla	9,63 a	9,75 b
SinCC	9,20 a	17,96 a

<u>Siembra</u>				
F. V.	GI	CM	F	P
Antecesor	3	0,50	0,09	NS ^a

<u>Estadio V6</u>				
F. V.	GI	CM	F	P
Antecesor	3	37,29	3,41	NS(0,082)

^aNS = no significativo ($P > 0,05$).

Dado que las condiciones de humedad registradas durante el período de barbecho fueron inferiores a la óptima para los microorganismos involucrados en la mineralización de los rastrojos, la duración del período de barbecho no fue suficiente para lograr un aporte significativo de NO₃⁻ a la siembra del cultivo de maíz (Ernst, 2006). Cabe señalar que las precipitaciones durante este período de barbecho fueron inferiores al promedio histórico de una serie de 30 años (Figura 3), por lo cual quizás, este fue un factor que limitó la actividad de los microorganismos en la descomposición de los rastrojos (Cabrera, 2007). Este hecho podría explicar en parte la no diferencia observada entre tratamientos a la siembra. Luego en V6, si bien el contenido de NO₃⁻ en el suelo incrementó, lo que

revelaría una adecuada sincronización entre la oferta y la demanda de N (Ernst, 2006), aun así, la oferta resultó insuficiente, ya que los valores de N disponible fueron inferiores al nivel crítico.

4.7. VARIACIONES EN EL CONTENIDO DE N MINERAL DEL SUELO EN EL ESTRATO DE 0-15 CM EN SUELO EXTERNO Y DEL N MINERALIZADO Y TASAS DE MINERALIZACIÓN ANUAL RELATIVA EN EL SUELO CONFINADO (CILINDRO CUBIERTO) EN CADA PERIODO DE INCUBACIÓN

Como se observa en la Figura 6 y en el Cuadro 10, el contenido de N mineral en los primeros 15 cm de profundidad del suelo externo varió a través del tiempo, encontrándose diferencias significativas desde la terminación de los CC ($P=0,007$) hasta la siembra ($P=0,035$). El comportamiento fue similar para todos los CC, el contenido de N mineral se incrementó hasta un máximo observado a los 31 días del ciclo del maíz, para posteriormente decaer (Figura 6). El suelo sin CC mostró una mayor disponibilidad de N mineral durante toda la fase ascendente (T-CC hasta el estadio V6) relativo a los CC gramínea (avena y mezcla). El lupino en cambio, sólo fue diferente con la mezcla a la terminación de los CC (tiempo -52). A diferencia de los resultados obtenidos en el presente estudio, Restovich et al. (2012), observaron que en el estadio V6, el contenido de NO_3^- del suelo a los 20 cm de profundidad en las parcelas con tratamiento control (sin CC), siguió siendo superior a los tratamientos con CC, con excepción de la vicia. Además, desde la terminación de los CC hasta el estadio V6 todos los tratamientos con CC mostraron incremento en el contenido de nitrato, en tanto el tratamiento control no mostró cambios. Este resultado estaría revelando el gran efecto de los CC en la dinámica de N del suelo, lo cual no fue observado en este estudio, donde los cambios en N mineral del suelo con CC mostraron variaciones similares al suelo sin CC, es decir el aporte de N derivado desde los residuos fue poco significativo como para manifestar cambios de nitrato a nivel de suelo. Tonitto et al. (2006) mencionaron que el beneficio de un CC leguminosa sobre un cultivo siguiente sería significativo y no diferente a un sistema convencional fertilizado con N si la producción de MS del mismo permite aportar como mínimo 110 kg N ha^{-1} . En esta investigación, los CC que aportaron más N fue el lupino y la mezcla con 35 y 42 kg N ha^{-1} , respectivamente, dado la escasa producción de biomasa lograda por la leguminosa lupino (Cuadro 7).

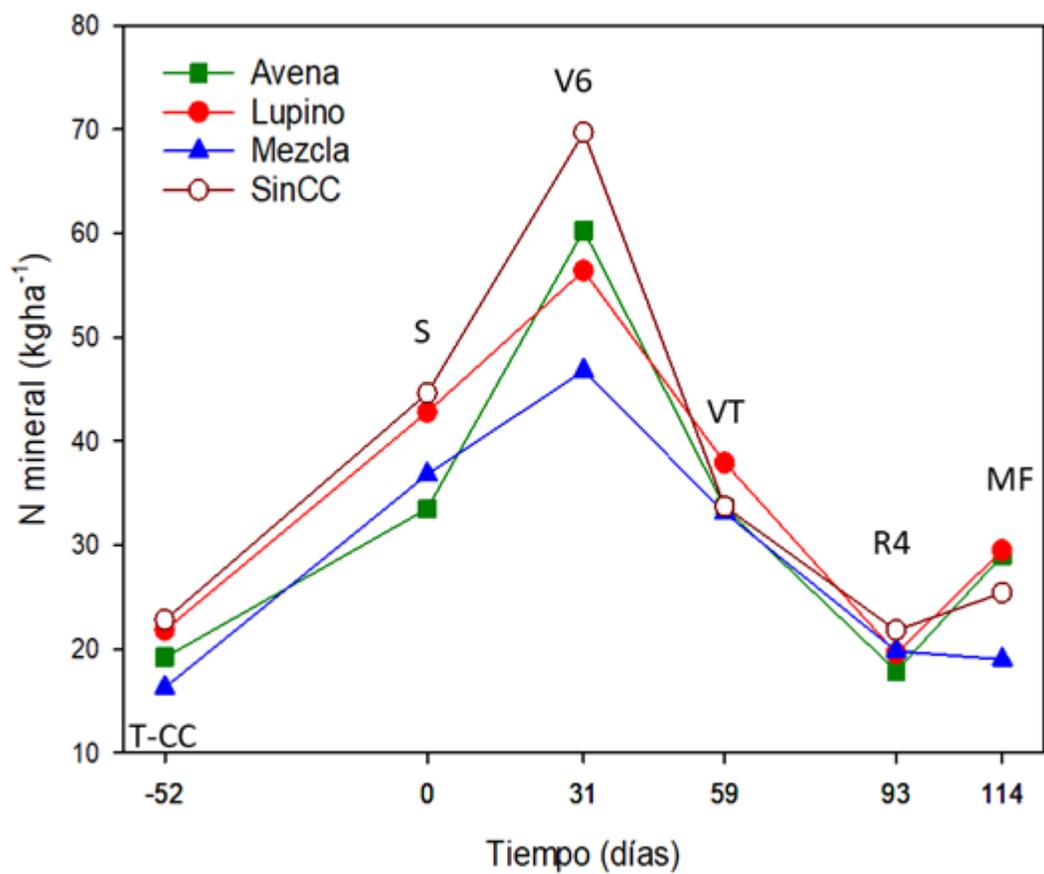


Figura 6. Variación del contenido de N mineral (N-nitrato y N-amonio) del suelo no confinado (suelo externo) en el estrato de 0-15 cm desde la terminación de los CC (tiempo -52, 6/10/2017,) a madurez fisiológica del cultivo de maíz (tiempo 114, 20/03/2018)

Cuadro 10. Comparación múltiple de medias según antecesor para la variable contenido de N mineral (N-nitrato + N-amonio) del suelo no confinado en el estrato de 0-15 cm desde la terminación de los CC (-52) a madurez fisiológica del cultivo de maíz (114 días)

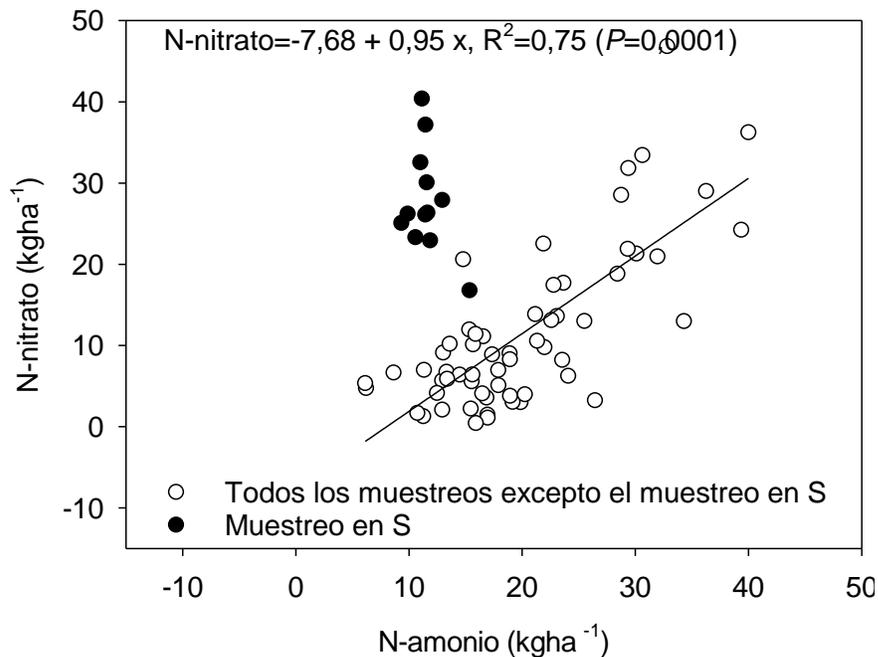
Contraste de medias Antecesor	Tiempo (días) de muestreo tomando como referencia fecha de siembra del maíz (día 0)					
	-52(T-CC)			0(S)		
	Diferencia	EE	P	Diferencia	EE	P
Avena-lupino	-2,65	1,33	NS	-9,33	3,26	NS (0,06)
Avena-mezcla	2,84	1,33	NS	-3,30	3,26	NS
Avena-sin CC	-3,62	1,33	NS(0,076)	-11,12	3,26	0,02
Lupino-mezcla	5,49	1,33	0,007	6,04	3,26	NS
Lupino-sin CC	-0,98	1,33	NS	-1,79	3,26	NS
Mezcla-sin CC	-6,46	1,33	0,002	-7,82	3,26	NS
	31(V6)			59(Vt)		
Contraste	Diferencia	EE	P	Diferencia	EE	P
Avena-lupino	3,85	8,32	NS	-4,30	9,61	NS
Avena-mezcla	13,46	8,32	NS	0,44	9,61	NS
Avena-sin CC	-9,40	8,32	NS	-0,13	9,61	NS
Lupino-mezcla	9,61	8,32	NS	4,74	9,61	NS
Lupino-sin CC	-13,25	8,32	NS	4,17	9,61	NS
Mezcla-sin CC	-22,86	8,32	NS (0,07)	-0,57	9,61	NS

Contraste	93(R4)			114(MF)		
	Diferencia	EE	<i>P</i>	Diferencia	EE	<i>P</i>
Avena-lupino	-1,77	6,25	NS	-0,47	5,35	NS
Avena-mezcla	-1,93	6,25	NS	10,03	5,35	NS
Avena-sin CC	-3,98	6,25	NS	3,61	5,35	NS
Lupino-mezcla	-0,16	6,25	NS	10,50	5,35	NS
Lupino-sin CC	-2,21	6,25	NS	4,8	5,35	NS
Mezcla-sin CC	-2,05	6,25	NS	-6,42	5,35	NS

EE = error estándar.

NS = no significativo ($P > 0,05$).

La dinámica de N mineral en el suelo externo también se evaluó por separado para las formas de N amoniacal y nítrica. En tal sentido pudo verse que, para las condiciones del experimento, las variaciones en la forma de N-nítrica fueron explicadas en un 75% por las variaciones en N amoniacal (Figura 7), y una relación lineal positiva y significativa ($P < 0,0001$) entre los datos de casi todos los periodos de muestreo, a excepción de la siembra en donde la variación de nitrato no fue explicada por la de amonio. Este hecho podría ser debido a que en estos períodos se dieron condiciones más favorables para los procesos de nitrificación por sobre los de amonificación (Perdomo et al., 2008).



Los círculos negros, correspondientes al muestreo a la siembra no fueron incluidos en la regresión.

Figura 7. Relación lineal entre la cantidad de N-amonio y N-nitrato en el suelo no confinado (suelo externo) en el estrato de 0-15 cm con los muestreos desde la terminación de los CC a madurez fisiológica del cultivo de maíz

La evolución de N mineralizado en el suelo confinado en cilindros cubiertos en el transcurso del tiempo para el estrato de 0-15cm, presentó un comportamiento similar entre los distintos antecesores, y no se observó efecto significativo de antecesor en ninguno de los momentos de muestreo de suelo confinado durante el ciclo del cultivo de maíz (ANAVA no mostrado). Además, se realizaron análisis de regresión para modelar esta variable usando 2 covariables: Nmin. inicial y HG cilindro. Los resultados mostraron que el N mineral inicial fue una variable significativa para explicar las variaciones de N mineralizado en todos los períodos de incubación, con excepción de V6. La variable HG cilindro sólo fue significativa a los 59 días de la siembra (Vt, Cuadro 11). El modelo de regresión tuvo un R² alto y significativo en Vt y R1 (Cuadro 11).

En Vt se constató que la cantidad de N mineralizado disminuyó en relación al periodo anterior, y esto se explica por el alto contenido de N-nitrato al inicio de este período de incubación (31 días después de la siembra, Figura 6). También se manifiesta una inmovilización aparente (dado que la cantidad de N mineralizado en todos los tratamientos con CC es menor al tratamiento sin CC y

aunque no fue estadísticamente significativa), podría considerarse relativamente importante desde el punto de vista agronómico dada su magnitud (aproximadamente 10 kg N ha⁻¹ para el tratamiento mezcla). Esta inmovilización fue observada en todos los tratamientos, siendo el valor promedio mínimo de -1,3 kg N ha⁻¹ con antecesor lupino, y de -9,7kg N ha⁻¹ con antecesor mezcla (ver Anexos).

Cuadro 11. Probabilidades de la prueba F de ANAVA para las variables explicativas antecesor y las covariables (Nmin. inicial y HGcil) usados en el modelo de regresión múltiple para modelar la variable N mineralizado medido en el estrato de 0-15 cm de profundidad de suelo en suelo confinado en cilindro cubierto en cada período de incubación

Tiempo (días) de muestreo tomando como referencia fecha de siembra del maíz (día 0)						
31(V6)				59(Vt)		
F de V ^b	gl	F	P	gl	F	P
Antecesor	3	1,07	NS ^a	3	3,00	NS
HGcil ^c	1	0,66	NS	1	5,72	0.049*
Nmin. inicial ^d	1	0,59	NS	1	18,19	0.005**
R ² (P)		NS			0,85 (P= 0,02)	
93(R4)				114(MF)		
F de V	gl	F	P	gl	F	P
Antecesor	3	4,60	NS (0,052)	3	2,58	NS
HGcil	1	3,74	NS (0.10)	1	0,86	NS
Nmin. inicial	1	12,42	0,012*	1	9,53	NS (0.07)
R ² (P)		0,83= (P=0,025)			NS	

*p≤0.05; **p<0.01; ***p<0.001 ^aNS = no significativo (P > 0,05).

^bF de V = fuente de variación. ^cHGcil = humedad gravimétrica cilindro.

^dNmin. Inicial = nitrógeno mineral inicial (NH₄ y NO₃).

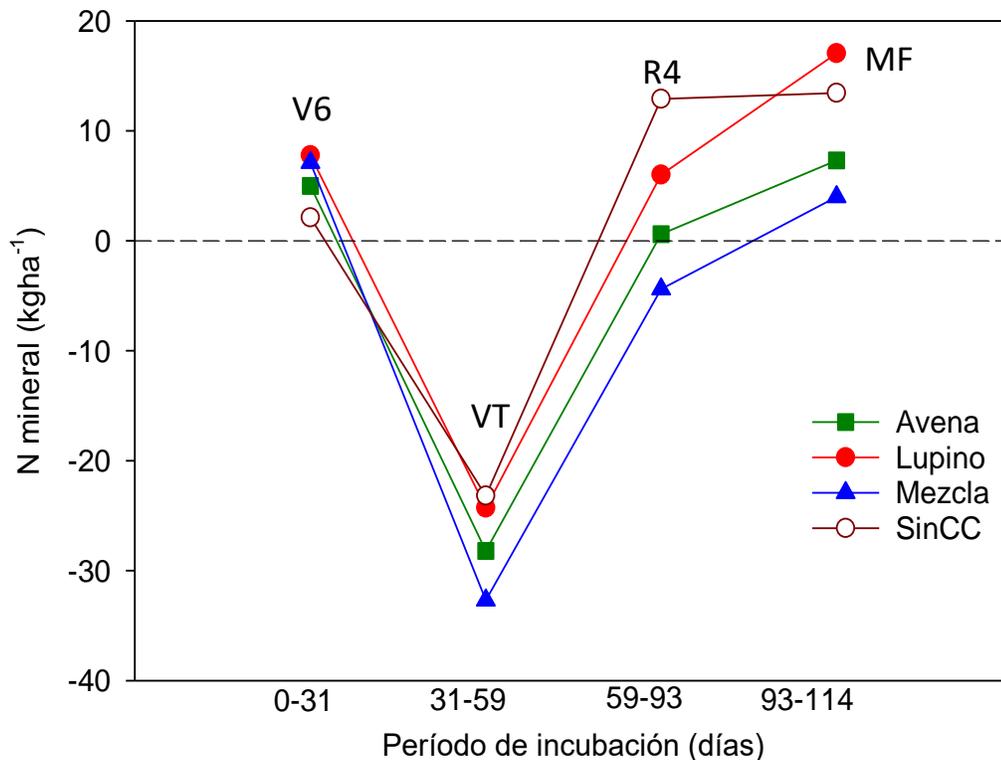


Figura 8. Variación del N (N-nitrato y N-amonio) mineralizado/inmovilizado del suelo confinado en cilindro cubierto en el estrato de 0-15 cm desde el primer muestreo (tiempo 31) correspondiente con el final del primer período de incubación (0-31) y coincidente con el estadio V6 del maíz al último muestreo (tiempo 114) en madurez fisiológica del cultivo

Si se observa y analiza de manera conjunta las Figuras 6 y 8 es posible observar que la cantidad de N mineral al comienzo de cada periodo de incubación estaría condicionando el N mineralizado durante dicho periodo. Es posible inferir que el N mineralizado tuvo un comportamiento inverso/opuesto al contenido de N mineral registrado al inicio de cada periodo. Este resultado, coincide con lo expuesto por Sierra (1992), quién observó una relación negativa (un mecanismo de retroalimentación negativa) entre la cantidad de N mineral al inicio del experimento y el N producido durante el mismo. Este mismo autor también observó una relación negativa para la tasa de mineralización de periodos de incubación consecutivos. Como consecuencia, cuando la tasa de mineralización fue mayor durante un período dado, esta fue relativamente menor durante el siguiente período de incubación. Los resultados del presente estudio son coincidentes con el de este investigador, ya que se observó que la tasa de

mineralización fue opuesta entre períodos consecutivos. Los contrastes realizados entre antecesores solo mostraron diferencias significativas en el periodo 59-93 para avena vs. sin CC y mezcla vs. sin CC ($P= 0,05$ y $0,016$, respectivamente, datos sin mostrar).

Independientemente del antecesor, el periodo de incubación que presentó mayor tasa de mineralización diaria promedio fue el 93-114 con un valor estimado de $0,5 \text{ Kg N ha}^{-1}$ seguido por el periodo 0-31, el periodo 59-93 y el periodo 31-59 con $0,2$, $0,1$ y $-0,97 \text{ Kg N ha}^{-1}$, respectivamente, siendo sólo en este último periodo donde la tasa diaria promedio fue negativa, es decir que la cantidad de N mineral al final del periodo de incubación fue menor que la inicial.

La tasa de mineralización diaria promedio por antecesor para todo el periodo fue de $0,4 \text{ kg N ha}^{-1}$ para lupino y sin CC mientras que avena y mezcla presentaron valores inferiores de $0,2$ y $0,1 \text{ kg N ha}^{-1}$, respectivamente. Es importante aclarar que para el cálculo de la tasa de mineralización diaria promedio por antecesor se excluyeron los datos del periodo 31-59 en donde para todos los antecesores ocurrió una tasa de mineralización negativa.

El patrón de variación de la tasa de mineralización anual relativa (al N total del suelo) en el tiempo, fue similar al observado en N mineralizado. Además, el comportamiento fue similar entre los distintos tratamientos, siendo el efecto del antecesor no significativo en ninguno de los momentos del ciclo del cultivo de maíz (Cuadro 12 y Figura 9). Por otro lado, el efecto de la covariable N mineral inicial fue significativo en los mismos períodos de incubación que lo fue para N-mineralizado. La variable HG del cilindro, en cambio, no fue significativa en ningún período (Cuadro 12). El modelo de regresión tuvo un R^2 alto y significativo en V_t , y en R_4 se observó una tendencia (Cuadro 12).

La tasa anual relativa fue negativa sólo durante el periodo 31-59 del ciclo del cultivo de maíz, lo que presupone que este habría sido el único momento durante el ciclo de estudio, en el cual el proceso de inmovilización superó al de mineralización (Figura 9). A su vez, sólo se observó diferencia significativa ($P=0,05$) entre las tasas de sin CC y la mezcla en el tiempo 93 (Cuadro 13).

Cuadro 12. Probabilidades de la prueba F de ANAVA para las variables explicativas antecesor y las covariables (Nmin. inicial y HGcil) usadas en el modelo de regresión múltiple, para modelar la variable tasa de mineralización anual relativa medida en el estrato de 0-15 cm de profundidad de suelo en suelo confinado en cilindro cubierto en cada período de incubación

Tiempo (días) de muestreo tomando como referencia fecha de siembra del maíz (día 0)						
31(V6)				59(Vt)		
F de V ^b	gl	F	P	gl	F	P
Antecesor	3	1.20	NS ^a	3	2.27	NS
HGcil ^c	1	0.72	NS	1	2.12	NS
Nmin. inicial ^d	1	1.30	NS	1	14.84	0,008**
R ² (P)		NS			0,80 (P=0,042)	
93(R4)				114(MF)		
F de V	gl	F	P	gl	F	P
Antecesor	3	2.43	NS	3	0.85	NS
HGcil	1	4.21	NS (0,09)	1	0.53	NS
Nmin. inicial	1	6.82	0,04*	1	3.63	NS
R ² (P)		0,75 (NS-P=0,072)			NS	

*P<0.05; **P<0.01; ***P<0.001

^aNS = no significativos (P > 0,05).

^bF de V = fuente de variación.

^cHGcil = humedad gravimétrica cilindro.

^dNmin. Inicial = nitrógeno mineral inicial (NH₄ y NO₃).

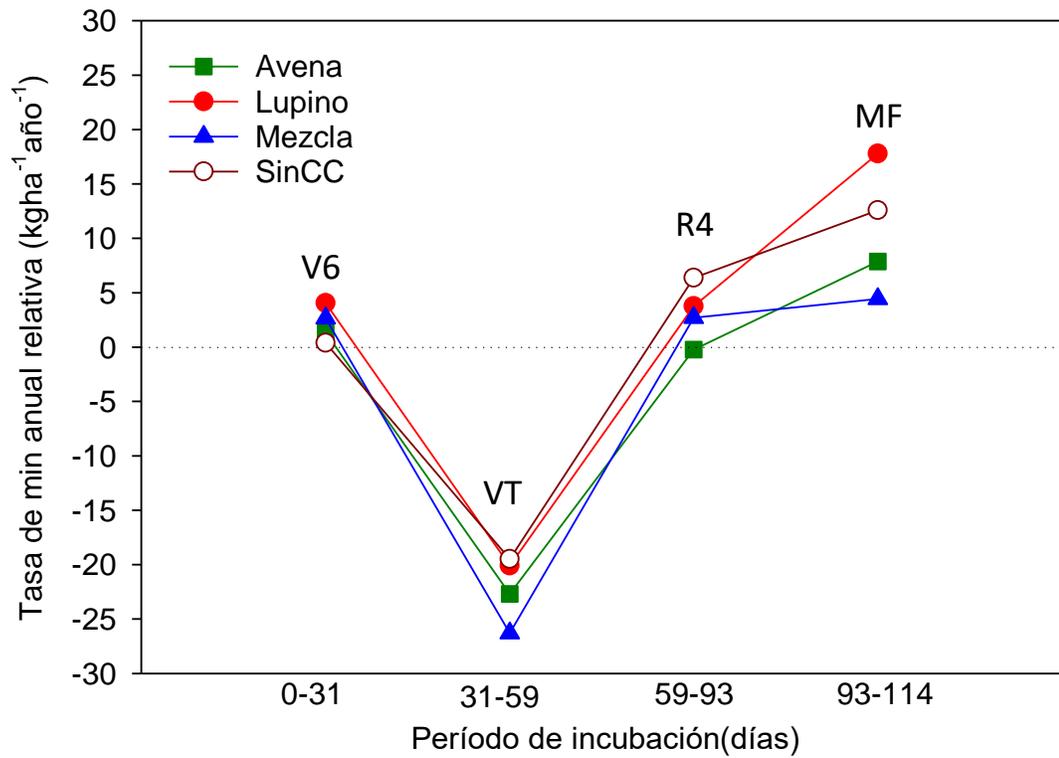


Figura 9. Tasa de mineralización anual relativa de N del suelo confinado en cilindro cubierto en el estrato de 0-15 cm desde el primer muestreo (tiempo 31) correspondiente con el final del primer período de incubación y coincidente con el estado V6 del maíz al último muestreo (tiempo 114) en madurez fisiológica del cultivo

Cuadro 13. Comparación múltiple de medias según antecesor para la variable tasa de mineralización anual relativa del suelo confinado en el estrato de 0-15 cm desde V6 (31) a madurez fisiológica del cultivo de maíz (114 días)

Contraste	Tiempo (días) de muestreo tomando como referencia fecha de siembra del maíz (día 0)					
	Tiempo 31(V6)			Tiempo 59(Vt)		
	Diferencia	EE	P	Diferencia	EE	P
Avena vs. lupino	-2,71	5,48	NS	-2,57	3,93	NS
Avena vs. mezcla	-1,31	4,70	NS	3,84	4,45	NS
Avena vs. sinCC	0,95	6,29	NS	-2,93	4,19	NS
Lupino vs. mezcla	1,40	4,45	NS	6,37	4,28	NS
Lupino vs. sinCC	3,66	3,98	NS	-0,40	4,54	NS
Mezcla vs. sinCC	2,26	4,80	NS	-6,78	5,30	NS
Contraste	Tiempo 93(R4)			Tiempo 114(MF)		
	Diferencia	EE	P	Diferencia	EE	P
Avena vs. lupino	-3,99	2,57	NS	-9,91	9,71	NS
Avena vs. mezcla	2,49	2,59	NS	3,44	10,18	NS
Avena vs. sin CC	-6,59	2,51	NS	-4,71	10,16	NS
Lupino vs. mezcla	6,47	2,79	NS	13,35	9,89	NS
Lupino vs. sin CC	-2,60	2,53	NS	5,19	9,81	NS
Mezcla vs. sin CC	-9,07	2,69	0,05	-8,15	9,72	NS

†NS = no significativo (P > 0,05).

En el tiempo 59 de incubación se registraron diferencias en HG entre suelo confinado vs. suelo externo (Figura 4). Durante las dos semanas previas a la extracción del cilindro se registraron lluvias de aproximadamente 100 mm (Figura 3), por lo cual el suelo externo que estuvo expuesto a esa lluvia al tener mayor variación en las condiciones de secado/humedecimiento/secado, pudo

haber tenido una mayor tasa de mineralización que el suelo confinado en cilindro cubierto. En consecuencia, y dado que la cantidad de N mineralizado se estimó como la diferencia de N mineral entre esas dos condiciones de suelo, el valor obtenido no representa la situación real en la que crecía el maíz, pues esas diferencias en humedad de suelo también habrán promovido tasas de mineralización diferentes. Por ello, es posible dilucidar, que las condiciones de humedad del suelo confinado no fueron muy representativas de las condiciones imperantes en el campo durante el período en estudio.

4.8. EFECTO DE LOS CULTIVOS ANTECESORES SOBRE LA RESPUESTA EN RENDIMIENTO Y N ABSORBIDO DEL CULTIVO DE MAÍZ

La producción de biomasa aérea del maíz a madurez fisiológica fue máxima sobre el antecesor mezcla seguida por el sin CC, avena y por último lupino, dicha producción osciló entre los 13569 y 11614 kg MS ha⁻¹. Sin embargo, los resultados del ANAVA (Cuadro 14) para las variables explicativas utilizadas en el modelo de regresión de la variable rendimiento de MS, reflejan que, aunque el antecesor no tuvo un efecto significativo, se observó una tendencia en el primer y último estadio en que fue medido (P=0,06 y P=0,076, para V6 y R4, respectivamente). La otra variable (covariable) incluida en el modelo fue el contenido de NO₃⁻ medido en V6, siendo este estadísticamente significativo en los momentos Vt y R4. El modelo de regresión tuvo un R² alto y significativo sólo en R4 (Cuadro 14).

Cuadro 14. Probabilidades de la prueba F de ANAVA para las variables explicativas usadas en el modelo de regresión para modelar el rendimiento de MS medido en 4 estadios del cultivo de maíz (en V6 a los 31, en Vt a los 59, en floración-R1 a los 71 y en R4 a los 93 días desde la siembra del cultivo)

Tiempo (días) de muestreo tomando como referencia fecha de siembra del maíz (día 0)						
F de V ^b	31(V6)			59(Vt)		
	gl	F	P	gl	F	P
Antecesor	3	3,95	NS (0,06)	3	0,76	NS
N-nitrato V6	1	0,0002	NS ^a	1	10,13	0,015
R ² (P)	NS			NS		
71(R1)						
F de V	71(R1)			93(R4)		
	gl	F	P	gl	F	P
Antecesor	3	0,52	NS	3	3,54	NS (0,076)
N-nitrato V6	1	2,18	NS	1	7,72	0,027
R ² (P)	NS			0,72 (P=0,039)		

^aNS = no significativo (P > 0,05).

^bF de V = fuente de variación.

Los resultados del ANAVA para la variable N absorbido expresan que el efecto antecesor fue significativo únicamente para el tiempo 31 (V6). Estas diferencias se dieron entre el tratamiento sin CC vs. el resto de los tratamientos (P=0,046; Cuadro 15), en tanto que N-nitrato medido en V6 únicamente lo fue en el tiempo 59 (Vt).

En relación a este resultado y teniendo en cuenta que, la población de maíz fue la misma para todos los tratamientos, y considerando el N absorbido por los distintos antecesores en V6 (Figura 10), es posible suponer que la menor concentración de nitrato de los CC respecto a sin CC en este estadio (Cuadro 9) podría ser explicado por una mayor absorción de N por parte del maíz creciendo bajo aquella condición.

Cuadro 15. Probabilidades de la prueba F de ANAVA para las variables explicativas usadas en el modelo de regresión para modelar el N absorbido medido en 4 estadios del cultivo de maíz

Tiempo (días) de muestreo tomando como referencia fecha de siembra del maíz (día 0)						
31(V6)				59(Vt)		
F de V ^b	gl	F	P	gl	F	P
Antecesor	3	4,40	0,048	3	1,96	NS
N-nitrato V6	1	0,49	NS ^a	1	10,33	0,0007
R ² (P)		NS			0,70 (P=0,05)	
71(R1)				93(R4)		
F de V	gl	F	P	gl	F	P
Antecesor	3	0,86	NS	3	2,76	NS
N-nitrato V6	1	3,29	NS	1	1,43	NS
R ² (P)		NS			NS	

^aNS = no significativo (P > 0,05).

^bF de V = fuente de variación.

Se estimaron también las correlaciones de Pearson entre rendimiento de maíz y el contenido de NO₃⁻ para cada momento (se verificó la distribución bimodal), y se encontró que las mismas fueron relativamente altas y positivas para los estadios Vt (r= 0,59; P= 0,045) y R4 (r= 0,63; P= 0,028), en V6 y R1 fue no significativa (P > 0,05), aunque en esta última se mantuvo la asociación con tendencia similar (r= 0,5; P= 0,094). Una asociación lineal significativa fue también constatada entre el contenido de NO₃⁻ en V6 y el N absorbido para los estadios Vt, R1 y R4 con r= 0,69, 0,65 y 0,59 y P= 0,009, 0,020 y 0,036, respectivamente.

En relación al N absorbido real a MF, el mismo fue de 98,6, 86,0, 78,7, 77,5 kg ha⁻¹ para sin CC, lupino, mezcla y avena y no se observó efecto significativo de los antecesores. Tampoco se encontró ningún tipo de asociación entre estos valores de nitrógeno absorbido real y los estimados mediante la ecuación [3]. Esto indicaría que el método de cilindro PVC no logró replicar las

condiciones imperantes durante el experimento, y por lo tanto no reflejó lo que realmente sucedió con la absorción de N por el cultivo (datos no mostrados).

4.9. DISCREPANCIAS ENTRE N MINERALIZADO DURANTE LOS PERIODOS DE INCUBACIÓN *IN SITU* Y EL N ABSORBIDO POR EL CULTIVO DE MAÍZ

Teniendo en cuenta la cantidad de N mineral del suelo presente a la siembra y la cantidad de N mineralizado desde la siembra hasta R4 (Figura 6), se estimaron las cantidades totales de N mineral del suelo disponible para ser absorbido por el maíz durante toda la temporada de crecimiento, siendo 46, 53, 86 y 88 kg N ha⁻¹ para mezcla, avena, sin CC y lupino, respectivamente. La estimación se realizó tomando como base la tasa de mineralización diaria promedio por antecesor (ítem 4.7) estimada sin los datos del tiempo 59 en donde para todos los antecesores ocurrió una tasa de mineralización negativa.

Las cantidades totales de N mineral del suelo disponible para ser absorbido por el maíz fueron coincidentes con el ranking de N real absorbido. Estas cantidades de N mineral disponible estimadas en los suelos incubados en los tubos de PVC fueron menores que la cantidad de N absorbido por el cultivo de maíz, debido probablemente a que la mineralización de N estuvo más limitada en suelo confinado que en suelo externo desde dónde absorbió el cultivo, quizás por menor disponibilidad de agua y/o menores temperaturas (ver Figuras 4 y 5). Muchos trabajos han reportado que los niveles de humedad tienen una influencia significativa en el ciclo del N del suelo (mineralización e inmovilización) y en la absorción de N (Khalil et al., 2001). Una posible explicación fue que en el presente experimento se produjeron tasas de mineralización de N más altas en el suelo externo no confinado que dentro de los tubos de incubación. Presumiblemente, las condiciones que prevalecieron dentro de los tubos de incubación no representaron en forma completa las condiciones acontecidas en el suelo no confinado. Otra hipótesis para explicar las menores cantidades de N disponible en el suelo confinado respecto a las medidas de N absorbido por el maíz podría ser que las raíces de este cultivo probablemente hayan explorado más allá de los 15 cm a los que fue confinado el suelo incubado. Por lo tanto, las raíces podrían haber extraído N de zonas del suelo más profundas que el límite de profundidad de 15 cm considerado en las estimaciones de mineralización de N *in situ*. También otro factor podría haber sido la compactación provocada en suelo confinado al enterrar el cilindro.

4.10. RENDIMIENTO EN GRANO A COSECHA

En el Cuadro 16 se presentan los rendimientos en grano promedio a cosecha según antecesor, cabe aclarar que no se observó efecto estadísticamente significativo del antecesor sobre el rendimiento en grano (datos no mostrados).

Cuadro 16. Rendimiento promedio en grano a cosecha según antecesor

Antecesor	Rendimiento promedio (kg ha ⁻¹)*
Avena	5445
Sin CC	6672
Lupino	5272
Mezcla	5711

* Rendimiento en grano de maíz kg ha⁻¹ corregido a 14,5 % de humedad.

5. CONCLUSIONES

Los resultados de este experimento mostraron que, a mayor rendimiento de los CC, el aporte tanto de C como de N fue mayor, y que la inclusión de una leguminosa mejoró la calidad del rastrojo (mejora la relación C/N). Sin embargo, esta mejora en calidad, no se vio reflejada en el aporte de N para el cultivo de maíz tanto a la siembra como en V6, siendo que en el primero de estos momentos los mayores niveles de N disponible se registraron en el tratamiento sin CC.

La dinámica del N mineral y la disponibilidad de este nutriente fueron influenciadas por las precipitaciones y temperaturas registradas durante el período de estudio. Se constató además una relación negativa para la tasa de mineralización entre periodos de incubación consecutivos. En consecuencia, cuando la tasa de mineralización fue mayor durante un período dado, esta fue relativamente menor durante el siguiente período de incubación, lo cual estaría reflejando que la mineralización neta de N del suelo es resultado de procesos de retroalimentación negativa, que actúan en función de la cantidad de N disponible en un momento dado.

La evolución de la oferta de N mineral fue similar para distintos CC, y la misma acompañó la demanda del cultivo de maíz, aunque no cubrió los requerimientos del mismo. La tasa de mineralización anual relativa presentó un comportamiento similar al observado para el N mineralizado, siendo negativa (inmovilización de N) en el tiempo 59 (Vt), mientras que no se observó efecto significativo de los antecesores en ningún momento del ciclo del maíz.

Los menores niveles de NO_3^- observados en los CC respecto al tratamiento sin CC se explicarían por una mayor absorción de N por parte de estos cultivos, aunque no se observaron diferencias significativas en el maíz sembrado luego de las coberturas.

El método de estimación de mineralización de N *in situ* no permitió reproducir las condiciones de temperatura y humedad registradas en suelo externo, especialmente durante los periodos en que se registraron precipitaciones. Dicho método logró explicar en promedio un 55% del N total absorbido por el cultivo de maíz. La diferencia entre el N disponible estimado y el absorbido en planta puede explicarse por el hecho de que las raíces del cultivo pudieron haber absorbido N más allá de los 15 cm de profundidad del tubo de PVC. En función de lo antes dicho, será necesario realizar modificaciones al método que permitan lograr una mejor estimación de la mineralización del N,

como por ejemplo, el ajuste del periodo de incubación, con el fin de captar las variaciones en el contenido de humedad del suelo producto de los eventos de precipitación registrados durante dicho periodo; así como utilizar tubos de PVC de mayor diámetro y profundidad, con el fin de reducir la perturbación de la muestra de suelo, y abarcar la profundidad efectiva de exploración radicular. Otro aspecto a tener en cuenta sería la determinación de N mineral en muestras de suelo manteniendo la humedad de campo, en lugar de secarlas en estufa a 40 ° C como se realizó en este estudio. De esta manera se evitaría posibles estímulos en los procesos de mineralización del N orgánico presente en la muestra de suelo.

6. RESUMEN

En el Uruguay, la sustentabilidad y el potencial productivo del sistema se vieron afectados por la simplificación de la secuencia de cultivos. En respuesta a esta problemática, surgen los cultivos de cobertura (CC) como una alternativa para mitigar los procesos degenerativos del sistema. Los CC se siembran con la finalidad de mantener el suelo cubierto y así proteger el mismo de la erosión, y evitar y reducir la pérdida de nutrientes en superficie y en profundidad, especialmente nitrógeno (N). El aporte de N que los CC realizan depende tanto de la calidad como de la cantidad de rastrojo de los mismos, siendo para gramíneas y leguminosas de 10 a 200 kg N ha⁻¹. Los objetivos de este trabajo fueron: i) evaluar el efecto de la utilización de lupino, avena y de un cultivo consociado de lupino+avena, en la tasa de mineralización de N del suelo cuantificada *in situ* y medida durante el ciclo de crecimiento de un cultivo de maíz sembrado luego del barbecho; y ii) evaluar el efecto de la utilización de lupino, avena y de la consociación de éstas, en la disponibilidad del N derivado de la mineralización de los rastrojos de estos en el rendimiento y N absorbido del cultivo de maíz subsiguiente. Para esto, se instaló un ensayo donde los tratamientos consistieron en los CC mencionados anteriormente, sembrados previo a un cultivo de maíz, ordenados en un diseño de bloques completos al azar, con tres repeticiones. Se determinó el rendimiento de los CC al final del período de crecimiento, así como su contenido de N total, y N mineral (N-NO₃ + N-NH₄) en suelo. Durante la etapa de crecimiento del maíz, se determinó la tasa de mineralización del N, el N mineral en suelo, el N absorbido por el maíz, y el rendimiento del mismo. Los resultados mostraron que, si bien hubo diferencias en el rendimiento y calidad de los CC, esto no tuvo incidencia en el aporte de N al cultivo de maíz, siendo la producción de MS y aporte de N promedio de los CC 1991 kg ha⁻¹ y N 33,7 kg N ha⁻¹, respectivamente. No se encontró relación entre el N absorbido por el cultivo de maíz y el N absorbido determinado mediante el método de estimación de mineralización de N *in situ*, dado que en dicho método no fueron reflejadas las condiciones imperantes durante el período experimental. Por lo tanto, para lograr un buen aporte de N de los CC hay que maximizar el rendimiento de los mismos, teniendo en cuenta la influencia de las condiciones de temperatura y humedad reinantes durante su mineralización. Para una correcta estimación de dicho aporte de N al cultivo siguiente, sería necesario hacer ajustes al método que permitan captar de mejor manera las variaciones de temperatura y humedad ocurridas a campo.

Palabras clave: Cultivo cobertura; Tasa de mineralización de N; Lupino.

7. SUMMARY

In Uruguay, the simplification of the cropping system has reduced the productive potential of the system and its sustainability. In this way, the inclusion of cover crops (CC) in the crop rotation can minimize this negative effect. Commonly CC has been used to protect the soil from erosion and nutrient loss, mainly nitrogen (N), through leaching and runoff. The contribution of N to the subsequent crops is related to the quality and yield of the CC species selected, being for grasses or legumes from 10 to 200 kg N ha⁻¹. The objectives of this experiment were: i) to evaluate the effect of the use of lupine, oat and a consociated crop of lupine + oat, on the soil N mineralization rate quantified *in situ* and measured during the growth cycle of a maize crop sown after fallowing; and ii) to evaluate the effect of the use of lupine, oat and the consociation of these, on the availability of N derived from the mineralization of their stubble on the yield and N absorbed from the subsequent maize crop. To assess that, a field experiment was installed where the treatments consisted of the aforementioned CCs plus a control treatment (without CC), planted prior to a corn crop, ordered in a randomized complete block design, with three replications. At the end of the growth period, the yield and content of total N of the CC was determined, and soil mineral N (NO₃ + NH₄). During the maize growth stage, the N mineralization rate, soil mineral N, N absorbed by the maize, and its yield were determined. The results showed that, although there were differences in the yield and quality of the CC, this had no effect on the contribution of N to the maize, with the average DM production and N contribution of the CC being 1991 kg ha⁻¹ and N 33.7 kg N ha⁻¹, respectively. No relationship was found between the N absorbed by the maize and the N absorbed determined through the in-situ N mineralization estimation method, since the prevailing conditions during the experimental period were not reflected in that method. Therefore, to achieve a good supply of N from the CC, their yield must be maximized, taking into account the influence of the prevailing temperature and humidity conditions during their mineralization. For a more accurate estimation of N contribution to the following crop, it would be necessary to make adjustments to the method that allow to better capture the variations of temperature and humidity that occur in the field.

Keywords: Cover crop; N mineralization rate; Lupin.

8. BIBLIOGRAFÍA

1. Altamirano, A.; Da Silva, H.; Durán, A.; Echevarría, A.; Panario, D.; Puentes, R. 1976. Carta de reconocimiento de suelos del Uruguay: clasificación de suelos. Montevideo, MAP. DSF. t. 1, 96 p.
2. Álvarez, R.; Steinbach, H. S.; De Paepe, J. L. 2014. A regional audit of nitrogen fluxes in pampean agroecosystems. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 184:1-8.
3. _____.; _____.; _____. 2017. Cover crop effects on soils and subsequent crops in the pampas: a meta-analysis. *Soil and Tillage Research*. 170:53-65.
4. Andriani, J. M.; Bacigaluppo, S.; Malaspina, A. 2001. Dinámica del agua en sistemas agrícolas. *In*: Panigati, J. L.; Buschiazzi, D.; Marelli, H. eds. *Siembra directa II*. San Juan, Argentina, INTA. s.p.
5. Badaruddin, M.; Meyer, D. W. 1989. Water use by legumes and its effect on soil water status. *Crop Science*. 29(5):1212-1216.
6. Blevins, R. L.; Herbek, J. H.; Frye, W. W. 1990. Legume cover crops as a nitrogen source for no-till corn and grain sorghum. *Agronomy Journal*. 82(4):769-772.
7. Bray, R. H.; Kurtz, L. T. 1945. Determination of total organic, and available forms of phosphorus in soil. *Soil Science*. 59(1):39-46.
8. Bremner, J. M. 1965. Nitrogen availability indexes. *In*: Norman, A. G. ed. *Methods of soil analysis*. s.l., Normando. pt. 2, pp. 1324-1345 (Agronomy monographs).
9. Cabrera, M. L. 2007. Mineralización y nitrificación: procesos claves en el ciclo del nitrógeno. *In*: Simposio de Fertilidad (2007, Rosario). *Trabajos presentados*. Rosario, IPNI Cono Sur/Fertilizar AC. pp. 1-18.

10. Calviño, P.; Echeverría, H.; Redolatti, M. 2000. Trigo en siembra directa en el Sudeste Bonaerense: diagnóstico de necesidades de nitrógeno en función de la fertilización fosfatada. *In*: Congreso Argentino Ciencia del Suelo (17°. , 2000, Mar del Plata). Actas. s.n.t. p.irr.
11. Carábula, M. 2007. Verdeos de invierno. Buenos Aires, Hemisferio Sur. 178 p.
12. Cazorla, C. R.; Baigorria, T.; Lardone, A.; Bojanich, M.; Almetta, B. 2011. Antecesoros de maíz: barbecho o cultivo de cobertura? (en línea). Rosario, Instituto La Salle. 7 p. Consultado 12 oct. 2019. Disponible en https://inta.gob.ar/sites/default/files/script-tmp-inta-antecesoros_de_maz.pdf
13. Clark, A. J.; Decker, A. M.; Meisinger, J. J.; McIntosh, M. S. 1997. Kill date of vetch, rye, and a vetch-rye mixture. I. Cover crop and corn nitrogen. *Agronomy Journal*. 89(3):427-434.
14. Corak, S. J.; Frye, W. W.; Smith, M. S. 1991. Legume and nitrogen fertilizer effects on soil water and corn production. *Soil Science Society of American Journal*. 55(5):1395-1400.
15. Corsi, W. C. 1982. Regionalización agroclimática de Uruguay para cultivos. *Miscelánea CIAAB*. no. 40. s.p.
16. Christopher, S. F.; Lal, R. 2007. Nitrogen management affects carbon sequestration in North American cropland soils. *Critical Reviews in Plant Sciences*. 26(1):45-64.
17. Dabney, S. M.; Delgado, J. A.; Reeves, D. W. 2001. Using Winter cover crops to improve soil and water quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 32(7):1221-1250.
18. Doane, T. A.; Horwath, W. R. 2003. Spectrophotometric determination of nitrate with a single reagent. *Analytical Letters*. 36(12):2713-2722.
19. Doran, J.; Scott, M. 1991. Role of cover crops in nitrogen cycling. *In*: Hargrove, W. L. ed. *Cover crops for clean water*. Ankeny, Iowa, Soil and Water Society. pp. 85-90.

20. Ellis, R. H.; Summerfield, R. J.; Edmeades, G. O.; Roberts, E. H. 1992. Photoperiod, temperature, and the interval from sowing to tassel initiation in diverse cultivars of maize. *Crop Science*. 32(5):1225-1232.
21. Ernst, O. 1999. Siembra sin laboreo de cultivos de verano. Paysandú, Facultad de Agronomía. 16 p.
22. _____. 2004. Leguminosas como cultivo de cobertura. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. no. 21:s.p.
23. _____. 2006. Efecto de una leguminosa invernal como cultivo de cobertura sobre rendimiento en grano y respuesta a nitrógeno de maíz sembrado sin laboreo. *Agrociencia (Uruguay)*. 10(1):25-35.
24. Espinoza, S.; Ovalle, C.; Zagal, E.; Matus, I.; Tay, J.; Peoples, M. B.; Del Pozo, A. 2012. Contribution of legumes to wheat productivity in mediterranean environments of central Chile. *Field Crops Research*. 133:150-159.
25. _____.; Matus, I.; Ovalle, C.; Pozo, A.; Zagal, E. 2015. Contribution of legumes to the availability of soil nitrogen and its uptake by wheat in Mediterranean environments of central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*. 75(1):111-121.
26. Fageria, N. K. ; Baligar, V. C.; Bailey, B. A. 2005. Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 36(19-20):2733-2757.
27. Fillery, I. R. P. 2001. The fate of biological fixed nitrogen in legume-based dryland farming systems. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 41(3):361-381.
28. Frankenberger, W. T.; Abdelmagid, H. M. 1985. Kinetic parameters of nitrogen mineralization rate of leguminous crops incorporated into soil. *Plant and Soil*. 87(2):257-271.
29. Frye, W. W.; Blevins, R. L.; Smith, M. S.; Corak, S. J.; Varco, J. J. 1988. Role of annual legume cover crops in efficient use of water and nitrogen. In: Hargrove, W. L. ed. *Cropping strategies for efficient use of water and nitrogen*. Madison, WI, ASA. pp. 129-154 (Special Publication no. 51).

30. García, C.; Mautner, A. 1989. Abonos verdes, barbecho cubierta y sistema de laboreo para trigo. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 105 p.
31. Gee, G. W.; Bauder, J. W. 1979. Particle Size Analysis by Hydrometer: a Simplified Method for Routine Textural Analysis and a Sensitivity Test of Measurement Parameters. *Soil Science Society of American Journal*. 43(5):1004-1007.
32. Giacomini, S. J.; Recous, S.; Mary, B.; Aita, C. 2007. Simulating the effects of N availability, straw particle size and location in soil on C and N mineralization. *Plant and Soil*. 301(1):289-301.
33. Giménez, L.; García Petillo, M. 2011. Evapotranspiración de cultivos de verano para dos regiones climáticamente contrastantes de Uruguay. *Agrociencia (Uruguay)*. 15(2):100-108.
34. _____. 2012. Producción de maíz con estrés hídrico provocado en diferentes etapas de desarrollo. *Agrociencia (Uruguay)*. 16(2):92-102.
35. Griffin, T.; Liebman, M.; Jemison, J.Jr. 2000. Cover crops for sweet corn production in a short-season environment. *Agronomy Journal*. 92(1):144-151.
36. _____.; Honeycutt, C. W.; Albrecht, S. L.; Sistani, K. R.; Torbert, H. A.; Wienhold, B. J.; Woodbury, B. L.; Hubbard, R. K.; Powell, J. M. 2008. Nationally coordinated evaluation of soil nitrogen mineralization rate using a standardized aerobic incubation protocol. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 39(1-2):257-268.
37. Hanselman, A.; Graetz, D. A.; Obreza, T. A. 2004. A Comparison of In Situ Methods for Measuring Net Nitrogen Mineralization Rates of Organic Soil Amendments. *Journal of Environmental Quality*. 33(3):1098-1105.
38. Hansen, E.; Djurhuus, J. 1997. Yield and nitrogen uptake as affected by soil tillage and catch crop. *Soil and Tillage Research*. 42(4):241-252.

39. Hart, S. C.; Stark, J. M.; Davidson, E. A.; Firestone, M. K. 1994. Nitrogen Mineralization; Immobilization, and Nitrification. *In*: Weaver, R. W.; Angle, S.; Bottomley, P.; Bezdicek, D.; Smith, S.; Tabatabai, A.; Wolloum, A. eds. *Methods of soil Analysis*. Madison, SSSA. p.t. 2, pp. 985-1018.
40. Hesterman, O. B.; Griffin, T. S.; Williams, P. T.; Harris, G. H.; Christenson, D. R. 1992. Forage legume–small grain intercrops: Nitrogen production and responses of subsequent corn. *Journal Production Agriculture*. 5(3):340-348.
41. _____; Tiffin, P. L. 1998. Response of corn grain yield to early and late killed red clover green manure and subirrigation. *Journal Production Agriculture*. 11(1):112-121.
42. Kaspar, T.; García, A.; Jorajuria, P.; Cabrera, M. 2020. Uso de avena negra y rolado en el manejo de malezas. *Revista INIA*. no. 61:47-51.
43. Keeney, D. R. 1982. Nitrogen-Availability Indices. *In*: Page, A. L. ed. *Methods of Soil Analysis*. 2nd. ed. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America. pt. 2, pp. 711-733 (*Agronomy* no. 9).
44. Khalil, M. I.; Boeckx, P.; Rosenani, A. B.; Van Cleemput, O. 2001. Nitrogen transformations and emission of greenhouse gases from three acid soils of humid tropics amended with n sources and moisture regime. II. Nitrous oxide and methane fluxes. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 32(17-18):2909-2924.
45. Khanna, P. K.; Raison, R. J. 2013. In situ core methods for estimating soil mineral-N fluxes: re-evaluation based on 25 years of application and experience. *Soil Biology y Biochemistry*. 64:203-210.
46. Kjeldahl, J. 1883. A New Method for the Determination of Nitrogen in Organic Matter. *Zeitschrift für Analytische Chemie*. 22(1):366-382.
47. Kolberg, R. L.; Ruippet, B.; Westfall, D. G.; Peterson, G. A. 1997. Evaluation of an In Situ Net Soil Nitrogen Mineralization Method in Dryland Agroecosystems. *Soil Science Society of American Journal*. 61(2):504-508.

48. Kristensen, K. T.; Magid, J.; Jensen, L. S. 2003. Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy*. 79:227-302.
49. Kuo, S.; Sainju, U. M.; Jellum, E. J. 1997. Winter cover crop effects on soil organic carbon and carbohydrate in soil. *Soil Science Society of American Journal*. 61(1):145-152.
50. _____.; _____. 1998. Nitrogen mineralization and availability of mixed leguminous and non-leguminous cover crop residues in soil. *Biology Fertility Soils*. 26(4):345-353.
51. Lajtha, K.; Driscoll, C. T.; Jarrell, W. M.; Elliott, E. T. 1999. Soil phosphorus characterization and total element analysis. *In*: Philip, G.; Coleman, D. C.; Bledsoe, C. S.; Sollins, P. eds. *Standard Soil Methods for Long-Term Ecological Research*. New York, Oxford University. pp. 115-165.
52. Lal, R.; Kimble, J. M. 2001. Importance of soil bulk density and methods of its measurement. *In*: Lal, R.; Kimble, J. M.; Follet, R. F.; Stewart, B. A. eds. *Assessment methods for soil carbon*. New York, Lewis. pp. 31-44.
53. León, O.; Silva, P.; Acevedo, E. 2001. Respuesta a la inoculación en dos especies de lupino (*Lupinus albus* L. y *Lupinus angustifolius* L.). Tesis Ing. Agr. Santiago, Chile. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas. 41 p.
54. Luce, M.; Whalen, J. K.; Ziadi, N.; Zebarth, B. J. 2011. Nitrogen dynamics and indices to predict soil nitrogen supply in humid temperate soils. *Advances in Agronomy*. 112:55-102.
55. Mansoer, Z.; Reeves, D. W.; Wood, C. W. 1997. Suitability of sun hemp as an alternative late-summer legume cover crop. *Soil Science Society of American Journal*. 61(1):246-253.
56. Meisinger, J. J.; Hangrove, W. L.; Mikkelsen, R. L.; Williams, J. R.; Benson, V. W. 1991. Effects of cover crops on groundwater quality. *In*: Hangrove, W. L. ed. *Cover crops for clean water*. Ankeny, Iowa, Soil and Water Society. pp. 57-68.

57. Mera, M.; Espinoza, N.; Galdames, R.; Aguilera, A.; García, J. C.; Montenegro, A.; Alcalde, J. M. 2016. Lupino dulce y amargo producción en Chile. INIA. Boletín INIA no. 326. 122 p.
58. Molfino, J.; Califra, A. 2001. Agua disponible en las tierras del Uruguay: segunda aproximación. Montevideo, MGAP. 12 p.
59. Müller, M. M.; Sundman, V. 1988. The fate of nitrogen (¹⁵N) released from different plant materials during decomposition under field conditions. *Plant and Soil*. 105(1):133-139.
60. Nelson, D. W.; Sommers, L. E. 1996. Total Carbon, Organic Carbon and Organic Matter. *In*: 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*. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy. pt. 3, pp. 961-1010 (Book Series no. 5).
61. Norton, J. M.; Stark, J. M. 2011. Regulation and measurement of nitrification in terrestrial systems. *Methods in Enzymology*. 486:343-368.
62. Odhiambo, J. O.; Bomkeb, A. A. 2001. Grass and legume cover crop effects on dry matter and nitrogen accumulation. *Agronomy Journal*. 93(2):299-307.
63. Peoples, M. B. ; Brockwell, J. ; Herridge, D. F. ; Rochester, I. J. ; Alves, B. J. R. ; Urquiaga, S. ; Boddey, R. M. ; Dakora, Felix ; Bhattarai, S. ; Maskey, S. L. ; Sampet, C. ; Rerkasem, B. ; Khan, D. F. ; Hauggaard-Nielsen, H. ; Jensen, E. S. 2009. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. *Symbiosis*. 48:1-17.
64. _____; Richardson, A. E.; Simpson, R. J.; Fillery, I. R. P. 2014. Soil Nutrient Cycling. *In*: Alfen, N. K. V. ed. *Encyclopedia of Agriculture and Food Systems*. Davis, California, Elsevier. pp. 192-210.
65. Perdomo, C. H.; Ciganda, V. S.; Borghi, E.; Wornicov, G. 1998. Evaluación del test de nitrato en suelo para las condiciones de maíz en Uruguay. *In*: Reunão Brasileira de Fertilidade de Solo e Nutrição (13^a, 1998, s.l.). *Trabalhos apresentados*. s.n.t. p. 337.

66. _____; Barbazán, M.; Durán Monzoni, J. M. 2008. Nitrógeno. Montevideo, Facultad de Agronomía. 74 p.
67. Pink, L. A.; Allison, F. E.; Gaddy, U. L. 1948. Greenhouse experiments on the effect of green manures crops of varying carbon-nitrogen ratios upon nitrogen availability and soil organic matter content. *Agronomy Journal*. 40(3):237-248.
68. Ranells, N. N.; Wagger, M. G. 1996. Nitrogen release from grass and legume cover crop monocultures and bicultures. *Agronomy Journal*. 88(5):777-782.
69. _____; _____. 1997. Nitrogen-15 recovery and release by rye and crimson clover cover crops. *Soil Science Society of American Journal*. 61(3):943-948.
70. Reeves, D. W.; Touchton, J. T. 1991. Influence of fall tillage and cover crops on soil water and nitrogen use efficiency of corn grown on a Coastal Plain Soil. *In: International Conference Cover Crops for Clean Water (1991, Jackson, TN). Proceedings*. Ankeny, IA, Soil and Water Conservation Society. pp. 76-77.
71. _____. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 43(16):131-167.
72. Restovich, S. B.; Andriulo, A. E.; 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.
73. Ritchie, S. W.; Hanway, J. J. 1982. How a Corn Plant Develops. Iowa State University of Science and Technology. Cooperative Extension Service. Special report no. 48. 17 p.
74. Ruffo, M.; Parsons, A. 2004. Cultivos de coberturas en sistemas agrícolas. *Informaciones Agronómicas del Cono Sur*. no. 21:8-17.
75. Sánchez, A. I. 2011. Efecto de distintas alternativas de cultivo de cobertura invernal sobre la respuesta a nitrógeno en el cultivo de Arroz en siembra directa. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 69 p.

76. Sawchik, J. 2001. Dinámica del nitrógeno en la rotación cultivo-pastura bajo laboreo convencional y siembra directa. Montevideo, INIA. 24 p.
77. _____; Siri, G.; Ayala, W.; Barrios, E.; Bustamente, M.; Ceriani, M.; Gutiérrez, F.; Mosqueira, J.; Otaño, C.; Pérez, M.; Piñeiro, G.; Pinto, P.; Terra, J.; Zarza, R. 2015. El sistema agrícola bajo amenaza: ¿que aportan los cultivos de cobertura y/o las pasturas cortas? In: Simposio Nacional de Agricultura (4°. 2015, Paysandú, Uruguay). Trabajos presentados. s.n.t. pp. 149-168.
78. Schomberg, H. H.; Wietholter, S.; Griffin, T. S.; Reeves, D. W.; Cabrera, M. L.; Fisher, D. S.; Endale, D. M.; Novak, J. M., Balkcom, K. S., Raper, R. L., Kitchen, N. R.; Locke, M. A.; Potter, K. N., Schwartz, R. C.; Truman, C. C.; Tyler, D. D. 2009. Assessing indices for predicting potential nitrogen mineralization in soils under different management systems. *Soil Science Society of American Journal*. 73(5):1575-1586.
79. Sharifi, M.; Zebarth, B. J.; Burton, D. L.; Grant, C. A.; Cooper J. M. 2007. Evaluation of some indices of potentially mineralizable nitrogen in soil. *Soil Science Society of American Journal*. 71(4):1233-1239.
80. Sierra, J. 1992. Relationship between Mineral N Content and N Mineralization Rate in Disturbed and Undisturbed Soil Samples Incubated Under Field and Laboratory Conditions. *Australian Journal of Soil Research*. 30(4):477-492.
81. Siri, G.; Ernst, O. 2012. Effect of legum or grass cover crops and nitrogen application rate on soil properties and corn productivity. *Agrociencia (Uruguay)*. 16(3):294-301.
82. Smith, M. S.; Frye, W. W.; Varco, J. J. 1987. Legume winter cover crops. In: Stewart, B. A. ed. *Advances in soil science*. New York, Springer-Verlag. v. 7, pp. 95-139.
83. Studdert, G. A.; Carabaca, L. S.; Echeverría, H. E. 2000. Estimación del nitrógeno mineralizado para un cultivo de trigo en distintas secuencias de cultivo. *Ciencia del Suelo*. 18(1):17-27.
84. Stute, J. K.; Posner, J. L. 1995. Synchrony between legume nitrogen release and corn demand in the upper Midwest. *Agronomy Journal*. 87(6):1063-1069.

85. Sullivan, P. G.; Parrish, D. J.; Luna, J. M. 1991. Cover crop contributions to N supply and water conservation in corn production. (en línea). American Journal of Alternative Agriculture. 6(3):106 -113. Consultado 21 nov. 2020. Disponible en <https://doi.org/10.1017/S0889189300003982>
86. _____. 2003. Overview of cover crops and green manures: fundamentals of sustainable agriculture. Arkansas, NCTA. 16 p.
87. Symonds, R.; Rubio, A. 2012. Efecto de coberturas, largo de barbecho y manejo de nitrógeno en el rendimiento de maíz. Tesis Ing. Agr. Montevideo, Uruguay. Universidad de la República. Facultad de Agronomía. 48 p.
88. Teasdale, J. R. 2004. Principios y prácticas para el uso de cultivos de cobertura en el manejo de sistemas de malezas. (en línea). In: Labrada, R. ed. Manejo de malezas para países en desarrollo (Addendum I). Roma, FAO. 305 p. Consultado 12 oct. 2021. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/007/y5031s/y5031s00.HTM>
89. Thomas, G. W. 1982. Exchangeable Cations. In: Page, A. L. ed. Methods of Soil Analysis. 2nd. ed. Madison, Wisconsin, American Society of Agronomy/Soil Science Society of America. pt. 2, pp. 159-165 (Agronomy no. 9).
90. Tisdale, S. L.; Nelson, W. L. 1970. Fertilidad de los suelos y fertilizantes. Barcelona, Montaner y Simón. 760 p.
91. Tonitto, C.; David, M. B.; Drinkwater, L. 2006. Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: a meta-analysis of crop yield and N dynamics. Agriculture, Ecosystems y Environment. 112(1):58-72.
92. Torbert, H. A.; Reeves, D. W. 1991. Benefits of winter legumes cover crop to corn: rotation versus fixed-nitrogen effects. In: International Conference West Cover Crop for Clean Water (1991, Jackson). Proceeding. Ankeny, TN Soil and Water Conservation Society. pp. 99-100.
93. Torres, D.; Del Pino, A. 1995. Dynamics of soil nitrogen in agroecosystems with addition of fertilizer and incorporation of legumes. In: Conference Efficient Use of Biological Nitrogen

Fixation (1995, Buenos Aires, Argentina). Accomplishments and prospects: proceedings. Buenos Aires, SAREC. s.p.

94. Unkovich, M. J.; Pate, J. S. 2000. An appraisal of recent field measurements of symbiotic N₂ fixation by annual legumes. *Field Crops Research*. 65(2-3):211-228.
95. _____; Baldock, J.; Peoples, M. B. 2010. Prospects and problems of simple linear models for estimating symbiotic N₂ fixation by crop and pasture legumes. *Plant Soil*. 329(1-2):75-89.
96. Van Lierop, W. 1990. Soil ph and lime requirement determination. *In*: Westerman, R. L. ed. *Soil testing and plant analysis*. Madison, WI, Soil Science Society of America. pp. 73-126.
97. Varco, J. J.; Frye, W. W.; Smith, M. S.; MacKown, C. T. 1989. Tillage effects on nitrogen recovery by corn from a nitrogen-15 labeled legume cover crop. *Soil Science Society of American Journal* 53(3):822-827.
98. Vaughan, J. D.; Evanylo, G. K. 1998. Corn response to cover crop species, spring desiccation time, and residue management. *Agronomy Journal*. 90(4):536-544.
99. Walkley, A.; Black, I. A. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*. 37(1):29-38.
100. Waring, S. A.; Bremner, J. M. 1964. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of nitrogen availability. *Nature*. 201:951-952.
101. Weatherburn, M. W. 1967. Phenol-hypochlorite reaction for determination of ammonia. *Analytical Chemistry*. 39(8):971-974.
102. White, P. F.; Robson, A. D. 1989. Effect of soil pH and texture on the growth and nodulation of lupins. *Australian Journal of Agricultural Research*. 40(1):63-73.
103. _____. 1990. Soil and plant factors relating to the poor growth of *Lupinus* species on fine-textured, alkaline soil – a review. *Australian Journal of Agricultural Research*. 41(5):871-890.

104. Zamuz, E. M.; Castro J. L. 1974. Evaluacion de métodos de análisis de suelo para determinar fósforo asimilable. Ministerio de Ganadería Agricultura y Pesca. Boletín no. 15. 15 p.
105. Zotarelli, L.; Ávila, L.; Scholberg, J. M. S.; Alves, J. R. 2009. Benefits of Vetch and Rye cover crops to sweet corn under no-tillage. *Agronomy Journal*. 101(2):252-260.

9. ANEXOS

Comparación múltiple de medias según antecesor para la variable N mineralizado del suelo confinado en el estrato de 0-15 cm desde V6 (31) a madurez fisiológica del cultivo de maíz (114 días)

Contraste	Tiempo (días) de muestreo tomando como referencia fecha de siembra del maíz (día 0)					
	Tiempo 31(V6)			Tiempo 59(Vt)		
	Diferencia	EE	P	Diferencia	EE	P
Avena vs. lupino	-2,779	7,74	NS	-3,94	4,77	NS
Avena vs. mezcla	-2,162	6,63	NS	4,47	5,41	NS
Avena vs. sin CC	2,875	8,89	NS	-5,25	5,09	NS
Lupino vs. mezcla	0,617	6,28	NS	8,41	5,21	NS
Lupino vs. sin CC	5,654	5,63	NS	-1,32	5,52	NS
Mezcla vs. sin CC	5,037	6,77	NS	-9,72	6,44	NS

Contraste	Tiempo 93(R4)			Tiempo 114(MF)		
	Diferencia	EE	P	Diferencia	EE	P
Avena vs. lupino	-5,50	3,71	NS	-9,94	7,42	NS
Avena vs. mezcla	5,04	3,74	NS	3,31	7,78	NS
Avena vs. sin CC	-12,26	3,62	0,05	-6,13	7,76	NS
Lupino vs. mezcla	10,53	4,02	NS	13,25	7,55	NS
Lupino vs. sin CC	-6,75	3,65	NS	3,81	7,50	NS
Mezcla vs. sin CC	-17,30	3,88	0,016	-9,44	7,43	NS

†NS= no significativo (P> 0,05).