



UNIVERSIDAD DE CHILE

FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS

ESCUELA DE POSTGRADO

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO EN
MAÍZ (*Zea mays* L.) MEDIANTE TÉCNICAS ISOTÓPICAS (^{15}N) Y ESTUDIO
DE LAS PÉRDIDAS POR LIXIVIACIÓN

Tesis para optar al Grado de Magíster en Manejo de Suelos y Aguas

RENATO DÍAZ CHIRINOS

Director de Tesis

Oswaldo Salazar Guerrero
Miguel Quemada Sáenz-Badillos

Profesores consejeros

Manuel Casanova Pinto
Oscar Seguel Seguel

SANTIAGO - CHILE
2019

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE POSTGRADO

DETERMINACIÓN DE LA EFICIENCIA DE USO DEL NITRÓGENO EN
MAÍZ (*Zea mays* L.) MEDIANTE TÉCNICAS ISOTÓPICAS (¹⁵N) Y ESTUDIO
DE LAS PÉRDIDAS POR LIXIVIACIÓN

DETERMINATION OF NITROGEN USE EFFICIENCY IN MAIZE (*Zea mays* L.)
USING ISOTOPIC TECHNIQUES (¹⁵N) AND STUDY OF LOSS BY LIXIVIATION

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al Grado de Magíster en
Manejo de Suelos y Aguas

RENATO DÍAZ CHIRINOS

	Calificaciones
DIRECTOR DE TESIS	
Oswaldo Salazar Guerrero Ingeniero Agrónomo, MS, Ph.D.	7,0
Miguel Quemada Sáenz-Badillos Ingeniero Agrónomo, Ph.D.	7,0
PROFESORES CONSEJEROS	
Manuel Casanova Pinto Ingeniero Agrónomo, MSc.	6,8
Oscar Seguel Seguel Ingeniero Agrónomo, MS, Ph.D.	6,1

Santiago, Chile
2019

AGRADECIMIENTOS Y DEDICATORIA

En primer lugar quisiera agradecer ante todo a Dios por haberme adoptado como su hijo y por darme esta vida de muchas oportunidades y bendiciones.

Al programa Nacional de Becas – Perú. Beca Presidente de la República convocatoria 2017, el cual me permitió crecer profesionalmente y acumular experiencias las cuales servirán para contribuir a la mejora constante de nuestra sociedad.

A la Universidad de Chile, destacando mi reconocimiento a la Escuela de Post grado de la facultad de Agronomía. A la Sra Jeannette gracias por todo el apoyo orientación y paciencia a la Srta Marjorie, Sra Mercedes por su amabilidad.

A la Universidad Politécnica de Madrid, CEIGRAM (Centro de Estudios e Investigación para la Gestión de Riesgos Agrarios y Medioambientales) por la acogida durante mi estancia de investigación. Doc. María, Maritza, José Luis, María Dolores, y demás integrantes de la institución por su apoyo y amistad.

A mis profesores guías, Osvaldo Salazar y Miguel Quemada por su constante apoyo y sobre todo la confianza brindada durante este proceso. Así como a los profesores consejeros Manuel Casanova y Oscar Seguel.

Al laboratorio de Química de Suelos y Aguas, Sra Consuelo, Sra Mary Sol, Benjamín, y la profe Yasna Tapia, gracias amabilidad y apoyo brindado en este proceso.

A la Comisión Chilena de Energía Nuclear, en especial a la división de Investigación y Aplicaciones Nucleares, a la Doc. Adriana, Ximena y Sr. Marco por su gran predisposición y colaboración en los trabajos realizados en este estudio.

A mis amigos (as) y compañeros (as) de estudios por su apoyo y consejos, Edouard, Fernando, Max, Silvia, Carlita, Juan, Berthin, Carlita Álvarez, Así mismo, a mí querida familia por brindarme todo el apoyo y comprensión. En especial a mis queridas hermanas Genara y Norma. Por ultimo a Milagros por la generosidad, la comprensión y el cariño brindado, gracias por el apoyo en este proceso.

FONDECYT Regular 2015 N°1150572, Titulado: Effect of Inorganic Nitrogen Fertilization And Cover Crops On Maize Production In Dissolved Inorganic And Organic Nitrogen Leaching In A Coarse-Textured Soil.

RLA5077, ARCAL – OIEA titulado: “Enhancing Livelihood through Improving Water Use Efficiency Associated with Adaptation Strategies and Climate Change Mitigation in Agriculture (ARCAL CLVIII)” con la participación de la Universidad de Chile y Comisión Chilena de Energía Nuclear.

ÍNDICE

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN	3
HIPÓTESIS.....	5
OBJETIVOS	5
Objetivo general	5
Objetivos específicos.....	5
MATERIALES Y MÉTODO	6
Descripción del área de estudio.....	6
Diseño experimental y tratamientos	6
Manejo del experimento.....	9
Establecimiento y riego	9
Fertilización del cultivo	9
Variables medidas	10
Análisis de las plantas.....	10
Análisis de nitrógeno residual en el suelo	11
Análisis de lixiviados.....	11
Intensidad de emisión de nitrógeno.	11
Análisis estadístico.....	12
RESULTADOS.....	13
Mediciones ambientales y riego	13
Ensayo 1. Nitrógeno en el cultivo de maíz.....	14
Rendimiento, biomasa y nitrógeno total.....	14
Nitrógeno absorbido del fertilizante (Nadf) y suelo (Nads)	14
Eficiencia del uso del nitrógeno.....	17
Nitrógeno residual en el suelo, recuperado y no recuperado por el cultivo.....	18
Ensayo 2. Lixiviación de nitrógeno.....	19
Lixiviados de nitrógeno inorgánico disuelto	19
Intensidad de emisión de nitrógeno inorgánico disuelto.....	22
DISCUSIÓN	23
Absorción de nitrógeno por el cultivo de maíz	23
Eficiencia de uso del nitrógeno	24
Lixiviación de nitrógeno inorgánico disuelto.....	26
Balance de nitrógeno (¹⁵ N).....	28
CONCLUSIONES	30
LITERATURA CITADA.....	31
APÉNDICES.....	38
ANEXOS	40

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Tratamientos estudiados: rotación de cultivo y dosis de nitrógeno aplicada.	7
Cuadro 2. Rendimiento en grano, biomasa y contenido de nitrógeno en la parte aérea, raíz y grano del cultivo de maíz.	15
Cuadro 3. Contenido de nitrógeno absorbido del fertilizante (Nadf) y del suelo (Nads) para la parte aérea, raíz y grano del maíz.	15
Cuadro 4. Eficiencia de uso de nitrógeno (%) en la fracción aérea, raíz y grano del maíz.	16
Cuadro 5. Comparación de medias para las interacciones en las variables rendimiento, Nadf y EUN, en la fracción grano y biomasa radicular	16
Cuadro 6. Contenido de nitrógeno total (Nt) y absorbido tanto del fertilizante (Nadf) como del suelo (Nads) en el cultivo de maíz.	17
Cuadro 7. Nitrógeno residual en el suelo, recuperado y no recuperado por el cultivo durante la temporada del cultivo de maíz.	18
Cuadro 8. Cantidad de amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) y nitrógeno inorgánico disuelto presente en lixiviados al final de la temporada del cultivo de maíz.	20

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. A. Sistema de rotación de cultivos realizados antes de la instalación del ensayo de ^{15}N , B. Esquema de la unidad experimental, sistema de riego e instalación de los Fullstop.....	8
Figura 2. Media diaria de los datos de precipitación (mm) temperatura ($^{\circ}\text{C}$), ETc (mm) y riego (mm) registrados durante la temporada del cultivo cubierta y maíz.....	13
Figura 3. A. Nitrógeno total absorbido del fertilizante y del suelo, B. eficiencia de uso de nitrógeno total acumulado para todas las fracciones del cultivo de maíz.	18
Figura 4 Formas finales de nitrógeno no recuperado, absorbido por el cultivo y residual del suelo al final de la temporada del cultivo de maíz.	19
Figura 5. Contenido de nitrógeno inorgánico disuelto al finalizar la temporada del maíz.	20
Figura 6. Cantidades de nitrógeno inorgánico disuelto presente en lixiviados de los estadios V7, V9 VT y R5 del cultivo de maíz.	21
Figura 7. Intensidad de emisión de nitrógeno inorgánico disuelto (kg ha^{-1}) por cada Mg de grano producido al final de la temporada de cultivo de maíz.	22
Figura 8. Balance de nitrógeno en los sistema de producción: A. rotación de maíz-cultivo cubierta con dosis optima de fertilización, B. rotación de maíz-barbecho con dosis excesiva de fertilización, derivados del presente estudio.	29

RESUMEN

El nitrógeno (N) en el cultivo de maíz es un factor determinante del rendimiento, pero también es conocido su impacto negativo en el ambiente. Por ello es necesario plantear estrategias de mitigación que permitan una mejora de la eficiencia de uso de N (EUN), como son el uso de cultivos cubierta (CC) y el ajuste de la dosis de fertilizante. En este experimento. El objetivo del estudio fue determinar la EUN mediante técnicas isotópicas de ^{15}N y la lixiviación de nitratos en una rotación maíz-barbecho vs. maíz-CC con dosis óptimas y excesiva de N en la zona mediterránea de Chile, en un Entic Haploxeroll situado en la estación experimental Antumapu, Santiago, Chile. Los tratamientos fueron una combinación de la rotación de cultivo (maíz-barbecho y maíz-CC de *Lolium multiflorum*) con la dosis óptima de N (250 kg ha^{-1}) o excesiva (400 kg ha^{-1}). Al aplicar dosis altas se obtuvieron mayores rendimientos de grano (19 Mg ha^{-1}), pero presentaron bajas EUN (28%), en cambio al aplicar dosis óptimas en la rotación maíz-CC se obtuvieron rendimientos de 17 Mg ha^{-1} , con EUN mejorada (40%). Si bien las EUN obtenidas fueron bajas, aunque acordes a las observadas en la zona. Por otro lado, las dosis altas de N generaron mayores contenidos de N inorgánico disuelto (NID) al final de la temporada de maíz ($177,3 \pm 9,0 \text{ kg ha}^{-1}$). Por el contrario, la dosis óptima asociada a la rotación maíz-CC contribuyó a disminuir las pérdidas de N por lixiviación, mejoró la EUN y la intensidad de emisión de NID por lixiviación disminuyó en un 50% comparadas a los otros manejos. En conclusión, reemplazar el barbecho de otoño-invierno tradicional en el monocultivo de maíz por un CC (ballica) con dosis óptimas de N contribuyó a mejorar la EUN y reducir la lixiviación de N en un sistema agrícola mediterráneo. En consecuencia, sería una estrategia a considerar al tener ventajas positivas en el manejo del suelo y la gestión del N, contribuyendo a reducir los procesos de contaminación difusa hacia cuerpos de aguas superficiales y subterráneas.

Palabras Claves: Cultivo cubierta, nitrógeno inorgánico disuelto, Lixiviación de nitratos.

ABSTRACT

Nitrogen (N) in maize production is a determinant of crop yield, but its negative impact on environment is also known. Therefore, it is necessary to propose mitigation strategies that allow the improvement in efficiency of N use efficiency (NUE), such as, use of cover crops (CC), and adjustment of fertilizer dose. In this experiment, the objective was to determine the EUN using ^{15}N isotopic techniques and nitrate leaching in a corn-fallow rotation vs. CC-corn, using an optimal and excessive doses of N. The test was performed in a Mediterranean area of Chile, in an Entic Haploxeroll located in the Experimental Station Antumapu, Santiago, Chile. The treatments were a combination of crop rotation (corn-fallow and corn-CC of *Lolium multiflorum*) with optimal dose of N (250 kg ha^{-1}), or an excessive one (400 kg ha^{-1}). When high doses were applied, higher grain yields (19 Mg ha^{-1}) were obtained, with specifically low NUE (28%). On the other hand, applying optimal doses in corn-CC rotation, leads to yields of 17 Mg ha^{-1} , with an improved NUE (40%). Although NUEs were low, although they agreed with those observed in the geographic area. On the other hand, high doses of N generated higher contents of dissolved inorganic N (NID) at the end of corn season ($177.3 \pm 9.0 \text{ kg ha}^{-1}$). Conversely, optimal dose associated with corn-CC rotation contributed to decrease loses of N by leaching, improving the NUE, and decreasing the intensity of NID emission by leaching (50%), when is compared to other treatments. In conclusion, replacing traditional autumn-winter fallow in maize monoculture, with a CC (ryegrass) with optimal doses of N, contributed to improve the NUE, and reduce N leaching in a Mediterranean agricultural system. Consequently, our results shown that this strategy could be consider to improve soil and N management, contributing to the reduction of diffuse pollution towards surface and underground water bodies.

Keywords: Cover crop, dissolved inorganic nitrogen, Nitrate leaching.

INTRODUCCIÓN

La agricultura en el siglo XXI enfrenta múltiples retos: i) debe producir más alimentos para una población creciente, con una menor disponibilidad de tierras y mano de obra, e incorporar mayor eficiencia en el uso de recursos para contribuir al desarrollo global de numerosos países en desarrollo, y ii) debe emplear métodos de producción más eficaces y sostenibles, asociados a estrategias de adaptación y mitigación frente al cambio climático aumentando la sostenibilidad ambiental de los sistemas agrarios (FAO, 2017). Dentro de los cultivos de prioridad mundial figura el maíz para grano (*Zea mays* L.), cuya producción ha sido controversial en la mayoría de los países productores, al generar frecuentemente un alto impacto ambiental, ocasionado por la alta demanda de insumos requerida (Rodríguez y Vivas, 2018). Por ello, es necesario desarrollar estrategias locales de producción que, mediante un manejo integrado suelo-agua-nutrientes, permitan definir una producción sostenible, minimizando el impacto ambiental (IAEA, 2008).

En Chile el maíz es de gran importancia en las explotaciones agrícolas, abarcando una superficie aproximada de 81 mil ha, con una producción de 1,110⁶ de Mg, y un rendimiento promedio de 13,3 Mg ha⁻¹ (temporada 2017-18; ODEPA, 2018). Es el cultivo más importante para los pequeños productores, quienes asocian el máximo rendimiento a la aplicación de fertilizante nitrogenado. Por ello, es común realizar aplicaciones de dosis excesivas, llegando a superar los 400 kg N ha⁻¹ (INDAP, 2011; Salazar y Nájera 2011; Salazar et al., 2019)). Las dosis recomendadas se basan en manuales de producción de maíz (ej. Faiguenbaum, 2003), donde se indica que para un monocultivo de maíz con rendimientos entre 10 y 20 Mg ha⁻¹ es recomendable aplicar dosis entre 265 y 545 kg ha⁻¹ y entre 295 y 595 kg ha⁻¹ para los casos en que se incorpore el 50% o el 25% de los residuos, respectivamente. Por otro lado, las investigaciones realizadas en la zona central de Chile por Opazo *et al.* (2008) en maíz dulce, bajo criterios de Stanford (1973) adaptados a Chile, concluyen que la aplicaciones de N son muy altas (superiores a 260 kg ha⁻¹).

El N en el cultivo de cereales ha sido un factor determinante para lograr el incremento del rendimiento, y se tiene conocimiento de sus impactos en el ambiente (Galieni *et al.*, 2016), debido a un patrón común de sobre-fertilización (Cárdenas *et al.*, 2004). Por ello, Quemada *et al.* (2020) manifiestan que una estrategia para mantener la producción y reducir los daños ambientales, es mejorar la gestión del N. Para ello se requiere una comprensión del ciclo del N, el cual se resume en tres componentes: demanda (absorción), suministro (mineralización) y posibles pérdidas de N (lixiviación, desnitrificación y volatilización) en el ciclo del cultivo (Buozo *et al.*, 2003). En las condiciones de Chile, la mayor parte de las pérdidas de N se generan por lixiviación de nitratos (NO₃⁻), generando el riesgo de contaminación de acuíferos (Salazar *et al.*, 2014), lo cual ha recibido la atención de organizaciones ambientales a nivel global (Behnke y Villamil, 2019). En este contexto, varios autores manifiestan que una forma de contrarrestar estas pérdidas de N es mejorando la eficiencia de uso de N (EUN), que es una medida cuantitativa de la absorción real del nutriente por el cultivo, en relación con la cantidad de nutriente agregado al suelo como fertilizante (IAEA, 2001; Civeira y Rodríguez, 2011).

El uso de técnicas isotópicas con ^{15}N para realizar investigaciones en la agricultura es muy destacado, sobre todo para la determinación de la EUN (IAEA, 2001). En condiciones naturales, el N está formado por dos isótopos estables, ^{14}N y ^{15}N , con composiciones isotópicas de 99,634 y 0,366% de átomos, respectivamente. El isótopo ^{14}N tiene una masa atómica de $14,0067 \text{ g mol}^{-1}$, mientras que el ^{15}N es más pesado al contener un neutrón más que el núcleo de la forma abundante (IAEA, 2001; Halitligil, 2004). La particularidad del ^{15}N de ser estable y de constituir una proporción fija, es aprovechada para enriquecer los fertilizantes nitrogenados mediante técnicas especiales, lo que le permite ser utilizado en las investigaciones agrícolas. La EUN determinada para cereales bajo la metodología de ^{15}N generalmente varía entre 40 y 65% (Ladha, 2014). Sin embargo, otros autores como González y Causarano (2014) reportan que al usar urea marcada con ^{15}N (al 5% de átomos en exceso) solo el 20% fue absorbido por el sésamo (*Sesamum indicum* L.); el resto de N se estima que se perdió del sistema por lixiviación de nitratos (NO_3^-) y en forma gaseosa (Fuhrmann *et al.*, 2018).

El establecimiento de cultivos cubierta (CC) en reemplazo del barbecho tradicional en rotaciones anuales durante el periodo entre cultivos, ayuda a disminuir las pérdidas de N por lixiviación ya que ayuda a mejorar la calidad del suelo, así como a controlar y mejorar la fertilidad del suelo (Lu *et al.*, 2000; Alonso-Ayuso, 2018). Esta técnica ha demostrado ser una estrategia válida para aumentar la sostenibilidad en muchos sistemas agrícolas (Radicetti *et al.*, 2016; Gabriel *et al.*, 2016; Muscas *et al.*, 2017). Por otro lado, la rotación de cultivos es considerada una alternativa de producción eficaz y sostenible asociada a estrategias de adaptación y mitigación frente al cambio climático (Kaye y Quemada, 2017). Por ello, se puede considerar que la introducción de CC como ballica (*Lolium sp*) en monocultivo de maíz aumenta la diversidad y provee múltiples servicios ecosistémicos (Bowman *et al.*, 2000).

En Chile la ballica ha demostrado ser una especie adaptada a las estaciones de otoño e invierno, en particular a sus condiciones de humedad y temperatura (Parga, 2008). El empleo de otras gramíneas como CC también ha dado buenos resultados en climas Mediterráneos. García-González *et al.* (2018) utilizando CC-cebada (*Hordeum vulgare* L.) a lo largo de 10 años, concluyen que la sustitución del barbecho por CC mejoró la calidad de un suelo degradado, siendo el factor determinante el aumento de la materia orgánica (MO), con la consiguiente mejora de la estabilidad del suelo y el aumento de nutrientes. El uso de los CC constituye una estrategia con beneficios ambientales y, si se maneja adecuadamente, puede proporcionar ventajas económicas y agronómicas (Gabriel *et al.*, 2013). Behnke y Villamil (2019) concluyeron que los CC pueden ayudar reducir las emisiones nocivas de gases de efecto invernadero y la contaminación de las aguas por NO_3^- , sin afectar a los rendimientos de los cultivos comerciales.

En el presente estudio se evaluó el efecto de un CC en el monocultivo de maíz y su combinación con distintas dosis de fertilizante nitrogenado, en la zona central Mediterránea regada de Chile. Con miras a evaluar la EUN y a minimizar los impactos negativos sobre el ambiente.

HIPÓTESIS

En una rotación maíz-cultivo cubierta (*Zea mays* - *Lolium multiflorum*) con una baja dosis de fertilizante nitrogenado, se incrementa la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) en relación a la rotación maíz –barbecho a la fertilización excesiva de nitrógeno.

OBJETIVOS

Objetivo general

Estudiar la eficiencia de la fertilización nitrogenada en el cultivo de maíz mediante la aplicación de técnicas isotópicas, en una rotación de cultivo maíz-barbecho y maíz-cultivo cubierta (ballica), comparando dosis óptima y excesiva de nitrógeno.

Objetivos específicos

1. Comparar la absorción de nitrógeno por el cultivo de maíz con: i) una rotación maíz-barbecho vs. maíz-cultivo cubierta de ballica y ii) dosis óptimas vs. dosis excesiva de nitrógeno.
2. Estimar la eficiencia de uso de nitrógeno en el sistema de producción con: i) rotación de maíz-barbecho con excesiva fertilización y ii) rotación de maíz-cultivo cubierta de ballica con dosis óptima de fertilización.
3. Comparar la lixiviación de nitrógeno en el suelo con: i) una rotación de maíz-barbecho vs. maíz –cultivo cubierta de ballica, y ii) dosis óptima vs. dosis excesiva de nitrógeno.

MATERIALES Y MÉTODO

Descripción del área de estudio

El presente estudio se realizó entre la primavera de 2018 y el verano de 2019 (P-V₂₀₁₈₋₁₉) en un área experimental cuyo suelo estuvo sujeto a un mismo manejo agrícola desde la primavera de 2016. El sitio pertenece a la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Chile, ubicada en la Comuna de La Pintana, Provincia de Santiago, Región Metropolitana de Santiago (33°34'13" S, 70°38'5" W), a una altitud de 625 msnm.

El clima se caracteriza por ser mediterráneo semiárido y se incluye, según Santibáñez *et al.* (2017), al distrito agroclimático Santiago. Allí el clima es de tipo templado cálido supratermal con régimen de humedad semiárido, temperaturas máximas de 30 °C durante el mes de enero y mínimas de 4 °C en el mes de junio; la precipitación anual es de 372 mm y la evapotranspiración potencial anual alcanza los 1474 mm, con una estación seca de 8 meses de duración y un periodo de húmedo de 2 meses.

El suelo es de origen aluvial y perteneciente a la Serie Santiago, miembro de la Familia franca gruesa sobre arenosa esquelética, mixta, térmica de los Entic Haploxerolls (CIREN, 1996). Es de textura gruesa, con una baja capacidad de retención de agua y una alta percolación (Casanova *et al.*, 2013). En el sitio estudiado, sus características químicas son pH 8,99, materia orgánica de 2,7% y conductividad eléctrica de 0,97 dS m⁻¹. En términos físicos, la retención gravimétrica de agua a 33 kPa es de 30% y a 1500 kPa de 15%, la densidad aparente es de 1,42 Mg m⁻³. Las descripciones morfológicas y físicas se presentan en los Anexos N°1 y N°2, respectivamente; las propiedades químicas en los Anexos N°3 y N°4 (Rossi, 2017). El agua de riego proviene de un canal cuyo pH es de 7,68 y su conductividad eléctrica de 0,94 mS cm⁻¹.

El ensayo se inició en agosto del 2018, continuando los trabajos realizados por el FONDECYT Regular N°1150572 con rotación de cultivos y dinámica del N desde la primavera del 2016. Los análisis de laboratorio se llevaron en forma conjunta en los laboratorios de la Comisión Chilena de Energía Nuclear (CCHEN) y el Laboratorio de Química de Suelos y Aguas perteneciente al Departamento de Ingeniería de Suelos y Aguas (Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile).

Diseño experimental y tratamientos

Se evaluaron 4 tratamientos con 3 repeticiones (Cuadro 1), correspondientes a la combinación de 2 rotaciones de cultivo (barbecho e inclusión de CC de ballica) con 2 dosis de fertilización nitrogenada (250 y 400 kg ha⁻¹). Así, se establecieron 12 unidades experimentales o parcelas (4,00 m x 2,65 m) con orientación N-S. El sitio del ensayo contaba con riego por goteo automatizado, con emisores de 1,4 L h⁻¹ y un marco de emisores de 0,20 x 0,65 m. En medio de cada una de las unidades experimentales se

instalaron detectores de frente agua (TMFullStop) a 50 cm de profundidad, tal como se muestra en la Figura 1 (Salazar *et al.*, 2014).

Cuadro 1. Tratamientos estudiados: rotación de cultivo y dosis de nitrógeno aplicada.

Tratamiento	Rotación anual de cultivos	Dosis N kg ha ⁻¹	
		Siembra	V8
Zm ₂₅₀ -B	<i>Z. mays</i> – Barbecho	-	250
Zm ₄₀₀ -B	<i>Z. mays</i> – Barbecho	150	250
Zm ₂₅₀ -Lm	<i>Z. mays</i> - <i>L. multiflorum</i>	150	250
Zm ₄₀₀ -Lm	<i>Z. mays</i> - <i>L. multiflorum</i>	-	250

En este experimento se consideraron dos ensayos. El ensayo 1 correspondió al análisis de muestras vegetales y de suelo al final de la temporada del cultivo, cuando el maíz llegó al punto de cosecha (R6) en otoño 2019, siendo los factores rotación de cultivos y dosis de N.

Por ello, la variable respuesta para el ensayo 1 se obtuvo utilizando el siguiente modelo lineal mixto (MLM):

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + N_j + (RN)_{ij} + \beta_{il} + \varepsilon_{ijk}$$

donde:

Y = variable respuesta; μ = media general; R = factor rotación de cultivo; N = dosis de N; RN = interacción rotación de cultivo y dosis de N; β = efecto bloque; ε = error experimental, el cual se asume normalmente distribuido.

Por otro lado, para el análisis de la variable N residual en el suelo se utilizó el mismo modelo lineal mixto (MLM), empleado en el ensayo 1.

El ensayo 2 correspondió a las mediciones de lixiviados, luego de cada evento de lluvia o riego, P-V₂₀₁₈₋₁₉. El diseño estadístico utilizado consistió en bloques completamente aleatorizados con estructura de parcelas divididas. Los factores abarcaron la rotación de cultivos, dosis de N y el tiempo.

La variable respuesta para el ensayo 2 se obtuvo utilizando el siguiente modelo lineal mixto (MLM):

$$Y_{ijk} = \mu + R_i + N_j + T_k + (RN)_{ij} + (RT)_{ik} + (NT)_{jk} + (RNT)_{ijk} + \beta_{il} + \pi_i(1) + \varepsilon_{ijkl} \quad (2)$$

donde:

Y= variable respuesta; μ = media general; R=factor rotación de cultivos; N = factor dosis de N; T= factor tiempo; RN = interacción rotación de cultivo y dosis de N; RT = interacción rotación de cultivo y tiempo; NT = interacción entre dosis de N y tiempo; RNT = interacción rotación de cultivo, dosis de N y tiempo, B=efecto bloque; p= efecto parcela; ϵ = error experimental, el cual se asume normalmente distribuido.

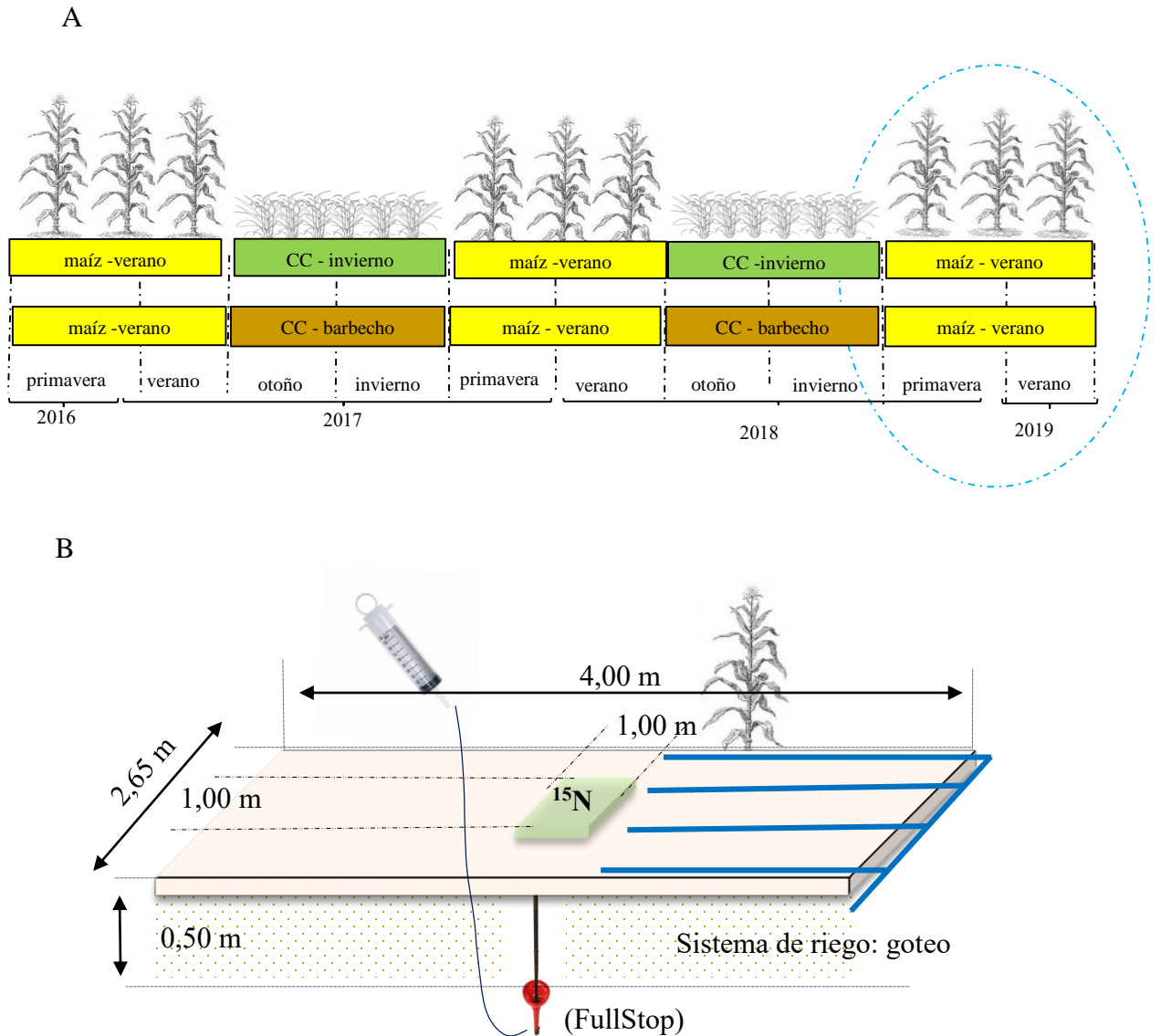


Figura 1. A. Sistema de rotación de cultivos realizados antes de la instalación del ensayo de ^{15}N , B. Esquema de la unidad experimental, sistema de riego e instalación de los Fullstop.

Manejo del experimento

Establecimiento y riego

Se empleó maíz grano variedad tardía 33Y74 – Pioneer, sembrado en una dosis de 9 semillas por metro lineal y una distancia de entre hileras de 0,7 m (primavera del 2018, 13 de octubre). Previo a la siembra se realizó una preparación manual del suelo de las parcelas a una profundidad de 10 cm. En los tratamientos donde se combinaron CC y dosis de N se incorporó todo el rastrojo de ballica (*Lolium multiflorum* L, var. Winter Star II, ANASAC) que fue sembrada previamente (otoño –invierno 2018, segunda semana de abril) con una dosis de semilla equivalente a 35 kg ha⁻¹; mientras que en los tratamientos Zm-B se realizó un barbecho tradicional. Para ambos tratamientos se incorporó todo el rastrojo de maíz de la temporada anterior.

El riego se inició en octubre de 2018 junto a la siembra del cultivo de maíz grano y la aplicación de fertilizante nitrogenado, finalizando en abril del 2019 en el estado R6 (madurez fisiológica) del maíz. La evaporación de referencia (ET_o) fue calculada a través de la ecuación de Penman – Monteith, utilizando las variables obtenidas de la estación meteorológica instalada en el sitio de estudio. Para el cálculo de la evapotranspiración del cultivo (ET_c) se utilizó un valor de coeficiente único del cultivo (kc) definido por Allen *et al.* (2006).

Fertilización del cultivo

La aplicación de la fertilización nitrogenada se realizó basada en dos criterios: la dosis de 250 kg ha⁻¹ que corresponde al resultado de la aplicación del método racional, en que la dosis aplicada se estima a partir del suministro potencial del suelo (mineralización), en tanto que la demanda del cultivo en base al rendimiento potencial esperado (Rodríguez, 1993). En cambio, la dosis de 400 kg ha⁻¹ corresponde a una fertilización excesiva de N, habitualmente usada por los productores de maíz grano en la zona central de Chile (Salazar y Nájera, 2011). En todas las parcelas la fuente de N fue urea (46% de N) y dentro de cada parcela se estableció una microparcela (1 m²) en la que se agregó urea enriquecida al 5% de átomos en exceso de ¹⁵N a 10 cm de las plantas de maíz (González, 2012; Landriscini *et al.*, 2015). Se aplicó KCl (60% de K₂O) y súper fosfato triple (46% de P₂O₅) en una dosis calculada de acuerdo a las características del suelo y los niveles de K y P disponibles, respectivamente. Para los tratamientos de 400 kg ha⁻¹ se aplicó en cobertera junto a la siembra 150 kg ha⁻¹, en octubre de 2018. Posteriormente, en diciembre de 2018, se aplicó la segunda dosis de (250 kg ha⁻¹), cuando el maíz alcanzó la octava hoja (V8). Es decir, para los tratamientos que corresponde a la dosis de 250 kg ha⁻¹ no se aplicó N en la siembra (Cuadro 1).

Variables medidas

Análisis de las plantas

Las microparcels de maíz fueron cosechadas en el estado de madurez fisiológica (abril del 2018), cortando las plantas a ras de suelo. Las plantas fueron separadas en fracciones (raíz, tallo y hoja, coronta y grano), masadas y secadas en un horno a 70°C para posteriormente. Se calculó la materia seca (Mg ha⁻¹) para cada fracción. Se tomó una submuestra de cada fracción que fue molida (< 250 µm) en la que se determinó el N total (Kjeldahl) siguiendo el protocolo de Sadzawka *et al.* (2006), la relación isotópica ¹⁵N/¹⁴N por espectrometría de emisión óptica (NOI6-e-PC, ¹⁵N Analyzer System, Alemania) siguiendo los protocolos descritos por Reinhardt y Russow (1991). Con los datos obtenidos se calculó el porcentaje de N derivado del fertilizante (Nddf) utilizando la ecuación 1 (Gabriel y Quemada, 2011; Nario *et al.*, 2003):

$$Nddf = \frac{N^{15}Nep}{N^{15}ef} \times 100 \quad [1]$$

donde, N¹⁵ep se refiere al porcentaje de átomos de ¹⁵N en exceso en la muestra de material vegetal; y N¹⁵ef se refiere al porcentaje de átomos de ¹⁵N en exceso aplicados en el fertilizante marcado (Halitligil, 2004).

Seguidamente, se determinó la EUN utilizando la ecuación 2:

$$EUN = \frac{Nddf [(Np)(Materia\ seca)]}{Dosis} \quad [2]$$

donde, Np es el porcentaje de nitrógeno en el material vegetal, la materia seca (kg ha⁻¹) de cada fracción ha sido previamente determinada y la dosis (kg N ha⁻¹) es el total del fertilizante aplicado en cada microparcels.

Por otro lado, se determinó el porcentaje de N derivado del suelo (Ndds), utilizando la ecuación [3]:

$$Ndds = 100 - Nddf \quad [3]$$

Finalmente, para determinar el N absorbido por la planta, se utilizan las ecuaciones: 4 y 5 para el N absorbido del fertilizante (Nadf) y suelo (Nads) (Rouanet *et al.*, 2001).

$$Nadf (kg\ ha^{-1}) = \frac{*N-p \times Nddf}{100} \quad [4]$$

$$Nads (kg\ ha^{-1}) = N-p(kg\ ha^{-1}) - Nadf (kg\ ha^{-1}) \quad [5]$$

donde, N-p es el nitrógeno (kg ha⁻¹) en toda las fracciones de la planta.

Análisis de nitrógeno residual en el suelo

Tras de la cosecha del maíz se tomaron muestras de suelo de la parte central de las microparcels donde se aplicó el ^{15}N , a una distancia de 15 cm de donde se instaló el ($^{\text{TM}}\text{Fullstop}$). Las muestras se tomaron en los intervalos de profundidad de 0-10, 10-20, 20-30, 30-40 y 40-50 cm, en el mismo perfil del suelo. El muestreo se realizó con un barreno y se extrajo una muestra compuesta de aproximadamente 50 g. Se colocaron en cajas debidamente codificadas y se secaron durante 48 h a temperatura ambiente (28°C). Posteriormente se tomaron submuestras y se determinó el contenido de N-total (Sadzawka *et al.*, 2006), para entonces calcular el ^{15}N residual en cada profundidad y para la temporada de maíz (P-V 2018/19).

Finalmente, determinó el ^{15}N no recuperado utilizando la siguiente fórmula:

$$^{15}\text{N no recuperado} = ^{15}\text{N total (kg ha}^{-1}) - ^{15}\text{N recuperado (kg ha}^{-1}) \quad [6]$$

$$^{15}\text{N recuperado} = ^{15}\text{N cultivo (kg ha}^{-1}) + ^{15}\text{N suelo (kg ha}^{-1}) \quad [7]$$

Análisis de lixiviados

La recolección de lixiviados se realizó en cuatro estados fenológicos del maíz: V6, V9, VT y R5 que corresponden a los días 47, 92, 122 y 158 días después de la siembra. Se realizó con una jeringa de 50 mL con la que se succionaron percolados desde la cámara de colecta de los $^{\text{TM}}\text{FullStop}$. Con el fin de contar con suficiente volumen de lixiviados en las parcelas se simuló eventos de precipitación (riegos) mayores a 15 mm, procediendo a coleccionar luego de 24 h del riego. Tras recolectar los lixiviados, se tomaron muestras de 30 mL para el análisis de N total (Nt) y de N inorgánico disuelto (NID) con el objetivo de obtener la fracción disuelta de la solución suelo. Las muestras se filtraron con filtros de pirinola de $0,45\ \mu\text{m}$. Las concentraciones de NID fueron determinadas por colorimetría, utilizando la metodología del ácido cromotrópico (nitratos) y la del amonio silicato (amonio) (Hach, 2005). El contenido de NID. Por otro lado, en los mismos percolados se midieron las concentraciones de Nt y los átomos en exceso de ^{15}N por espectrometría de emisión óptica en los laboratorios de la CCHEN.

Intensidad de emisión de nitrógeno.

La intensidad de emisión es una variable métrica relacionada con el impacto ambiental del sistema agrícola y su utilidad ha sido resaltada en varios estudios (Snyder *et al.*, 2009). Si bien en los estudios de emisiones de N_2O , comúnmente, están expresadas en función a la tasa de aplicación del N fertilizante, existen muchos autores (entre ellos Van Groenigen *et al.*, 2010) que consideran que las emisiones de N deberían estar en función a la productividad debido a la demanda global de productos agrícolas. De forma análoga las pérdidas de N se consideran una forma de emisión de N, ya que este N se pierde del sistema

suelo planta (Quemada *et al.*, 2020). Por ello, en este estudio se determinó la intensidad de emisión de NID en función al rendimiento de grano de maíz mediante la ecuación 8:

$$\text{Intensidad de emisión} = \frac{\text{NID (kg ha}^{-1}\text{)}}{\text{Rendimiento (Mg ha}^{-1}\text{)}} \quad [8]$$

Análisis estadístico

Los datos fueron analizados mediante modelos lineales mixtos (MLM), realizando la prueba de comparación múltiple de Fisher ($\alpha= 0,05$). Para ello fueron consideradas diferencias estadísticamente significativas, para la interacción de los factores o para los factores de manera independiente (Di Rienzo *et al.*, 2018).

RESULTADOS

Mediciones ambientales y riego

En la Figura 2 se observa la temperatura y las entradas y salidas de agua como son la precipitación, la evapotranspiración del cultivo y el riego desde el 1 de abril del 2018 hasta el 30 de junio del 2019, es decir, el periodo de los CC y la temporada del crecimiento y desarrollo del cultivo de maíz.

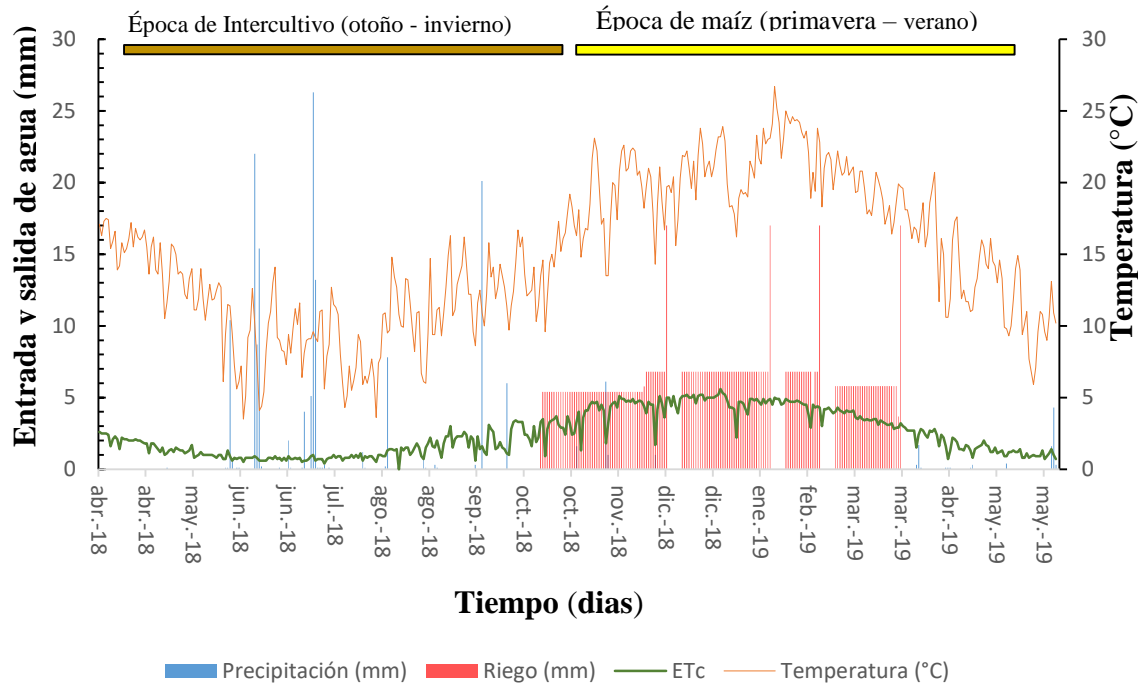


Figura 2. Media diaria de los datos de precipitación (mm) temperatura (°C), ETC (mm) y riego (mm) registrados durante la temporada del cultivo cubierta y maíz.

Las barras de color de azul indican las precipitaciones acumuladas diarias, donde la precipitación más alta fue de 26,3 mm en la temporada de otoño- invierno; las barras rojas indican el agua aplicada al cultivo mediante un sistema de riego por goteo, que fue calculado en base al ETo de referencia y el kc del cultivo considerando una eficiencia del 90% en el riego. Asimismo, se observan los cuatro eventos de riego simulados (riego por surco) tal como hacen los agricultores de la Zona Central de Chile. La carga de agua aplicada fue mayor a 15 mm día⁻¹ en los estadios V7, V9, VT y R5 del maíz. Por otro lado, se observan las variables de ETo y temperatura media diaria a lo largo de la temporada de los cultivos.

Ensayo 1. Nitrógeno en el cultivo de maíz

Rendimiento, biomasa y nitrógeno total

Se realizó el análisis estadístico para los resultados de cada componente de rendimiento de la planta a la cosecha del maíz, observándose para el rendimiento de grano una interacción significativa ($p < 0,02$) entre los factores rotación de cultivos y dosis de N (Cuadro 2). Observando el Cuadro 5, que detalla los resultados estadísticos en las variables que presentaron interacción rotación de cultivo*dosis de N, se evidencia que los tratamientos Zm_{400-B} y Zm_{400-Lm} obtuvieron rendimientos superiores, sin diferencias significativas entre ellos; en cambio, con una dosis óptima de N, la rotación de cultivo maíz-CC obtuvo un rendimiento superior al obtenido con la rotación Zm_{250-B} .

Para el caso de la biomasa aérea seca y del contenido de Nt (tanto en la fracción de grano como en la parte aérea) solo el factor dosis fue significativo ($p < 0,01$), siendo los tratamientos con altas dosis de N los que tuvieron valores superiores a los tratamientos con una dosis de 250 kg N ha^{-1} (Cuadro 2).

Por otro lado, para la biomasa radicular se observó una interacción significativa ($p < 0,03$) entre los dos factores (Cuadro 2). Así, el tratamiento Zm_{250-Lm} tuvo una mayor cantidad de biomasa acumulada al final de la temporada de maíz frente a los demás tratamientos (Cuadro 5) pero con diferencias estadísticas significativas solo con Zm_{250-B} . En cambio, para el caso del contenido de N en la raíz, no se observaron diferencias significativas para ningún factor en estudio.

Nitrógeno absorbido del fertilizante (Nadf) y suelo (Nads)

Al analizar el Nadf para la fracción grano, se observa una interacción significativa ($p < 0,04$) entre los factores rotación de cultivo y dosis de N (Cuadro 3). Así, el tratamiento Zm_{250-B} absorbió la menor cantidad de Nddf frente a los demás tratamientos (Cuadro 5). Adicionalmente, para la fracción aérea del cultivo solo el factor dosis de N fue significativo ($p < 0,02$). Los tratamientos donde se aplicaron dosis de 400 kg N ha^{-1} tuvieron una mayor absorción de Nddf frente a las dosis de 250 kg N ha^{-1} .

Por otro lado, tanto para la parte aérea como para el grano, el Nads fue significativo ($p < 0,05$) para el factor dosis de N (Cuadro 3). En los tratamientos donde se aplicaron dosis altas de N, el cultivo de maíz absorbió mayores cantidades de este N. Nuevamente para la fracción raíz no se observaron diferencias significativas.

Para el caso del Nadf y Nads totales (Cuadro 6), se observó que solo el factor dosis fue significativo ($p < 0,05$). Sin embargo, para el caso del Nads, hay significancia por separado de los factores. Los tratamientos asociados a dosis altas de N absorbieron mayores cantidades del suelo. Del mismo modo, los asociados a un rotación de cultivo maíz-barbecho.

Cuadro 2. Rendimiento en grano, biomasa y contenido de nitrógeno en la parte aérea, raíz y grano del cultivo de maíz.

factores		Biomasa ¹		Rendimiento ²		Contenido de N ³	
		Aérea	Raíz	Grano	Aérea	Raíz	Grano
		----- Mg ha ⁻¹ -----		----- kg ha ⁻¹ -----			
Rotación de cultivo	Lm	25,02 ± 1,27	4,19 ± 0,51	17,98 ± 0,28	141,31 ± 7,36	22,70 ± 3,34	232,32 ± 11,05
	B	25,26 ± 1,36	4,04 ± 0,58	17,82 ± 0,89	151,67 ± 9,07	21,90 ± 2,31	239,32 ± 11,98
Dosis (kg N ha ⁻¹)	400	27,54 ± 1,05 a	4,24 ± 0,50	19,14 ± 0,53	161,48 ± 6,38 a	22,62 ± 2,59	253,04 ± 9,32 a
	250	22,74 ± 0,57 b	3,99 ± 0,58	16,66 ± 0,41	131,50 ± 3,89 b	21,98 ± 3,13	218,87 ± 8,62 b
Rotación de cultivo		0,863	0,802	0,644	0,235	0,831	0,283
Dosis		0,011	0,699	0,001	0,006	0,864	0,002
Rotación * dosis		0,972	0,028	0,020	0,425	0,072	0,124

¹²³ Valores promedio de cada variable ± error estándar. Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticas significativas entre los niveles de cada factor, en base a las comparaciones múltiples de LSD Fischer ($\alpha \leq 0,05$).

p value (< 0,05) corresponde al efecto de los factores rotación de cultivo y dosis de N e interacción de los factores.

Cuadro 3. Contenido de nitrógeno absorbido del fertilizante (Nadf) y del suelo (Nads) para la parte aérea, raíz y grano del maíz

Factores		Nadf ¹			Nads ²		
		Aérea	Raíz	Grano	Aérea	Raíz	Grano
		kg ha ⁻¹					
Rotación de cultivo	Lm	34,33 ± 2,03	4,47 ± 0,47	62,17 ± 2,20	118,76 ± 5,96	17,44 ± 2,93	170,14 ± 9,32
	B	32,55 ± 3,22	4,81 ± 0,59	57,49 ± 3,67	107,34 ± 6,04	17,90 ± 1,72	182,10 ± 8,48
Dosis de N (kg ha ⁻¹)	400	37,69 ± 1,96 a	4,89 ± 0,61	65,17 ± 1,42	123,79 ± 5,27 a	18,24 ± 2,00	187,87 ± 8,51 a
	250	29,19 ± 1,94 b	4,39 ± 0,43	54,49 ± 2,69	102,31 ± 3,33 b	17,10 ± 2,72	164,37 ± 7,03 b
Rotación		0,558	0,632	0,036	0,085	0,883	0,076
Dosis		0,026	0,490	0,001	0,008	0,715	0,006
Rotación*dosis		0,400	0,099	0,036	0,536	0,072	0,298

¹² Valores promedio de cada variable ± error estándar. Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticas significativas entre los niveles de cada factor. En base a las comparaciones múltiples de LSD Fischer ($\alpha \leq 0,05$).

p value (< 0,05) corresponde al efecto de los factores rotación de cultivo y dosis de N e interacción de los factores.

Cuadro 4. Eficiencia de uso de nitrógeno (%) en la fracción aérea, raíz y grano del maíz.

Factores	EUN				
	Aérea ¹	Raíz ²	Grano ³	Total ⁴	
	(%)				
Rotación de cultivo	Lm	10,94 ± 0,88	1,49 ± 0,26 a	19,98 ± 1,81	32,40 ± 2,70
	B	10,16 ± 0,72	1,49 ± 0,12 a	18,11 ± 1,72	29,77 ± 1,28
Dosis de N (kg ha ⁻¹)	400	11,68 ± 0,49	1,22 ± 0,15 b	16,29 ± 2,00	26,94 ± 0,83
	250	9,42 ± 0,78	1,76 ± 0,17 a	21,80 ± 2,72	35,23 ± 1,45
Rotación		0,437	0,970	0,012	0,075
Dosis		0,051	0,046	0,001	0,005
Rotación * dosis		0,330	0,105	0,012	0,037

Valores promedio para la variable ± error estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias estadísticas significativas entre los niveles de cada factor. En base a las comparaciones múltiples de LSD Fischer ($\alpha \leq 0,05$);

p value (< 0,05) corresponde al efecto de los factores rotación de cultivo y dosis de N e interacción de los factores.

Cuadro 5. Comparación de medias para las interacciones en las variables rendimiento, Nadf y EUN, en la fracción grano y biomasa radicular

Tratamientos	Grano ¹			Raíz ²
	Rendimiento	Nadf	EUN	Biomasa seca
	Mg ha ⁻¹	kg ha ⁻¹	%	Mg ha ⁻¹
Zm ₄₀₀ -B	19,42 ± 0,75 a	65,17 ± 2,23 a	16,30 ± 0,56 c	4,93 ± 0,75 a
Zm ₄₀₀ -Lm	18,72 ± 0,71 a	65,16 ± 2,17 a	16,29 ± 0,54 c	3,45 ± 0,25 a
Zm ₂₅₀ -Lm	17,24 ± 0,56 b	59,18 ± 3,60 a	23,68 ± 1,44 a	5,02 ± 0,82 a
Zm ₂₅₀ -B	16,08 ± 0,40 c	49,80 ± 0,92 b	19,92 ± 0,37 b	3,05 ± 0,37 b
<i>p value</i>	0,020	0,036	0,012	0,028

^{1,2} Valores promedio de las variables en interacción ± error estándar. Letras diferentes en cada columna indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. En base a las comparaciones múltiples de LSD Fischer ($\alpha \leq 0,05$).

Cuadro 6. Contenido de nitrógeno total (Nt) y absorbido tanto del fertilizante (Nadf) como del suelo (Nads) en el cultivo de maíz.

Factores		Nt		
		Nadf ¹	Nads ²	Nt ³
		kg ha ⁻¹		
Rotación de cultivo	Lm	100,98 ± 3,30	294,92± 10,38 b	391,96 ± 12,16
	B	94,84 ± 6,89	318,76± 14,84 a	410,88 ± 21,66
Dosis de N (kg ha ⁻¹)	400	107,45 ± 3,30 a	328,76± 13,47 a	432,78 ± 15,27 a
	250	88,07 ± 3,62 b	284,92± 4,32 b	370,05 ± 5,13 b
Rotación		0,202	0,022	0,119
Dosis		0,004	0,001	0,001
Rotación*dosis		0,090	0,077	0,055

Valores promedio para las variables ± error estándar. Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticas significativas entre los niveles de cada factor. En base a las comparaciones múltiples de LSD Fischer ($\alpha \leq 0,05$). *p value* (< 0,05) corresponde al efecto de los factores rotación de cultivo y dosis de N e interacción de los factores.

Eficiencia del uso del nitrógeno

Para la EUN en la fracción grano, se observó una interacción significativa ($p < 0,012$) entre los factores rotación de cultivo y dosis de N (Cuadro 4). El tratamiento de rotación de maíz –CC (ballica) y dosis recomendada de N mostró una EUN significativamente superior al resto de tratamientos. Le siguió el otro tratamiento con dosis recomendada, pero con rotación maíz-barbecho. Por otro lado, los tratamientos con dosis de excesivas de N tuvieron valores de EUN más bajos, aunque sin diferencias entre los tratamientos de rotación de cultivos (Cuadro 5).

Para las fracción de raíz solo el factor dosis fue significativo ($p < 0,05$). Los tratamientos con dosis de 250 kg N ha⁻¹ tuvieron mayor EUN frente a las de dosis altas de N.

Finalmente, para la EUN del cultivo total obtenida en la temporada del maíz se observó una interacción significativa entre los factores en estudio ($p < 0,04$, Cuadro 5).

Partiendo de la información entregada en la Figura 3, se evidencia claramente que los tratamientos Zm₄₀₀–B y Zm₄₀₀–Lm, donde se aplicaron dosis de 400 kg N ha⁻¹, tuvieron una EUN de 27%, independientemente de la rotación de cultivos. Sin embargo, a los que se aplicaron dosis óptimas de 250 kg N ha⁻¹ tuvieron una eficiencia de 32% cuando se asoció a la rotación maíz-barbecho y de 38% cuando se combinó con una rotación de maíz- CC (ballica).

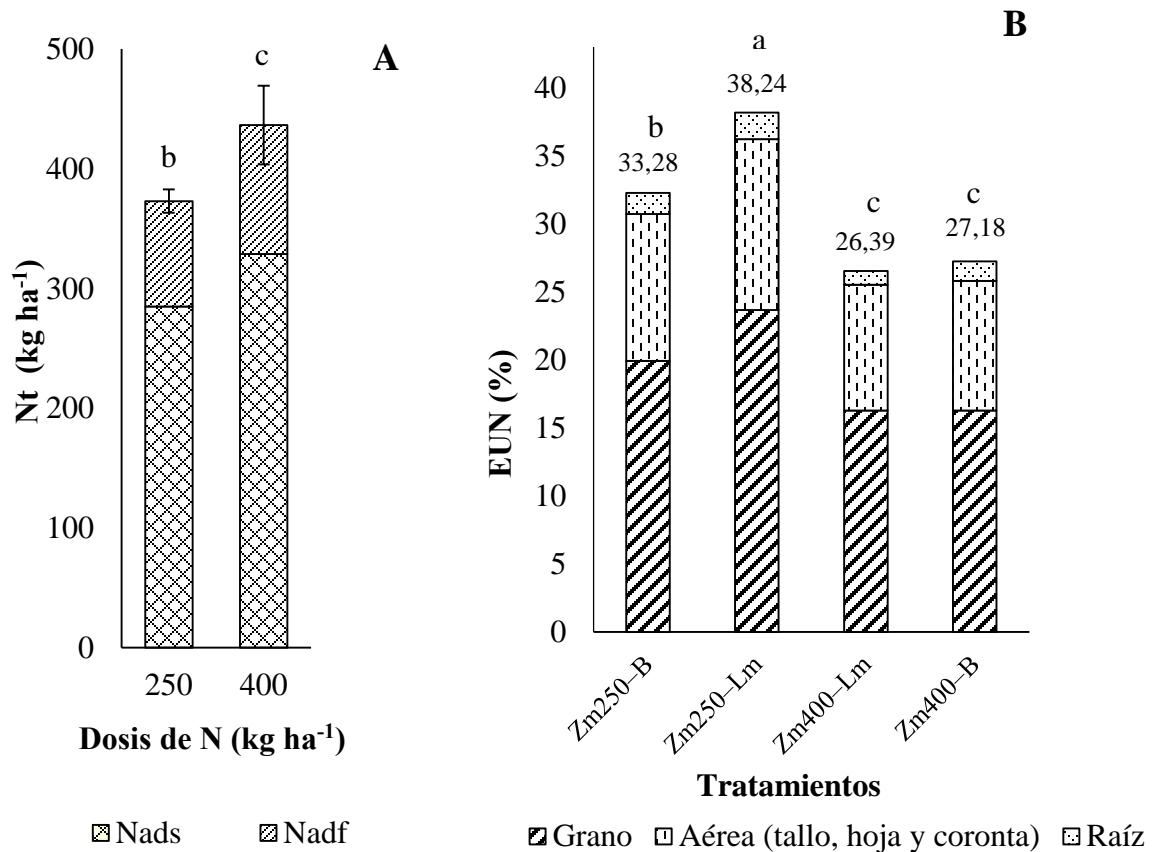


Figura 3. A. Nitrógeno total absorbido del fertilizante y del suelo, B. eficiencia de uso de nitrógeno total acumulado para todas las fracciones del cultivo de maíz.

Nitrógeno residual en el suelo, recuperado y no recuperado por el cultivo

Cuadro 7. Nitrógeno residual en el suelo, recuperado y no recuperado por el cultivo durante la temporada del cultivo de maíz

Destino de N		Residual ¹	Recuperado ²	No recuperado ³
		kg ha ⁻¹		
Rotación de cultivo	Lm	158,48 ± 6,67	100,97 ± 3,94	65,55 ± 26,10
	B	170,64 ± 11,18	94,84 ± 6,73	59,51 ± 21,46
Dosis de N (kg ha ⁻¹)	400	179,00 ± 9,45 a	107,75 ± 3,37 a	113,25 ± 9,97 a
	250	150,12 ± 8,34 b	88,07 ± 9,33 b	11,81 ± 9,95 b
Rotación		0,227	0,202	0,477
Dosis		0,019	0,004	0,001
Rotación*dosis		0,711	0,090	0,178

1,2,3 Valores promedio en los niveles de cada factor ± error estándar. Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticas significativas entre los niveles del factor dosis en base a las comparaciones múltiples de LSD Fischer ($\alpha \leq 0,05$); *p value* (< 0,05) corresponde al efecto de los factores rotación de cultivo y dosis de N e interacción de los factores

Al analizar el destino del fertilizante ^{15}N después de la cosecha de maíz (Cuadro 7), se observó que el factor dosis fue estadísticamente significativo para las variables de ^{15}N suelo, ^{15}N cultivo de maíz y ^{15}N no recuperado en el sistema suelo ($p < 0,05$).

Al observar la Figura 4, se evidencia el destino del ^{15}N del fertilizante al final de la temporada del cultivo de maíz, donde los tratamientos con dosis de 400 kg N ha^{-1} , el N no recuperado fue de 113 kg N ha^{-1} , en cambio, cuando se aplicaron dosis óptimas, el N no recuperado fue muy bajo (12 kg N ha^{-1}). Dicho de otro modo, este N no recuperado expresó las pérdidas de N fertilizante durante la temporada de maíz.

Al analizar el N residual en el suelo a 5 profundidades (Apéndice 1) se observa el comportamiento del N en el perfil del suelo, las mayores cantidad de N están presentes entre los 0 – 10 cm. Por otro lado, al realizar el análisis estadístico se observó una interacción entre los factores rotación de cultivo*dosis entre 20- 30 cm. Sin embargo, entre 0 -10 cm y 40 – 50 cm el factor dosis de N tuvo significancias (Apéndice 2).

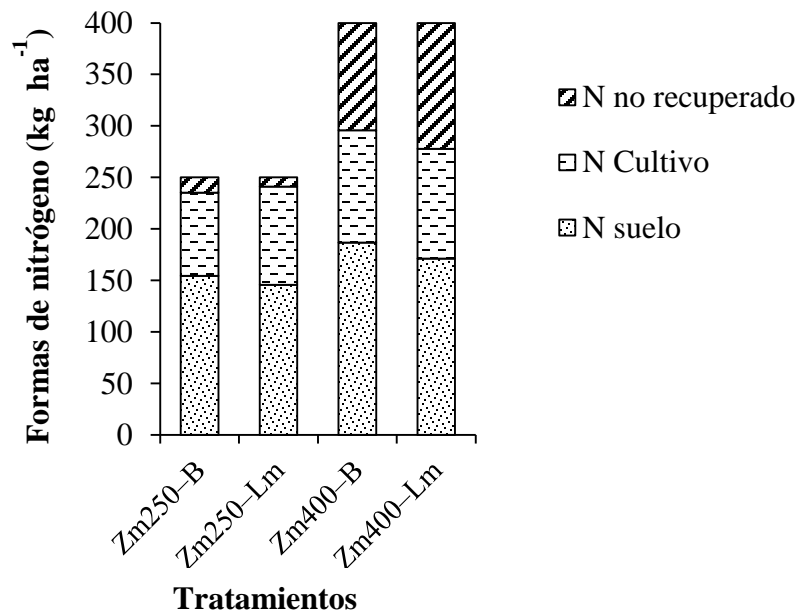


Figura 4 Formas finales de nitrógeno no recuperado, absorbido por el cultivo y residual del suelo al final de la temporada del cultivo de maíz.

Ensayo 2. Lixiviación de nitrógeno

Lixiviados de nitrógeno inorgánico disuelto

Primeramente, al analizar la cantidad de NID al final de la temporada del cultivo de maíz (Figura 5), se puede evidenciar claramente que los tratamientos con dosis excesivas de N (400 kg N ha^{-1}) presentaron las cantidades más altas de NID (177 kg N ha^{-1}). Por el contrario, al aplicar dosis óptimas, las cantidades fueron de 72 kg N ha^{-1} (Apéndice 3).

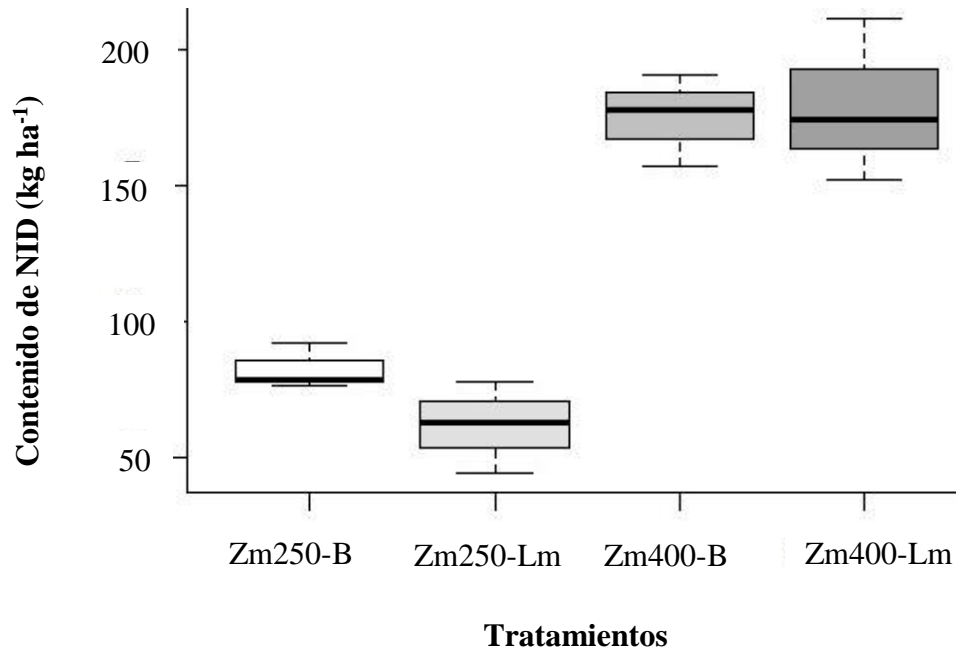


Figura 5. Contenido de nitrógeno inorgánico disuelto al finalizar la temporada del maíz.

Por otro lado, al realizar el análisis de la cantidad de NID para cada fecha de muestreo de los lixiviados (Apéndice 4), se observaron diferencias estadísticas significativas solo para la interacción factores tiempo*dosis ($P < 0,001$) y los demás factores actuaron de forma independiente. Por lo tanto, se decidió analizar la dosis de N más el efecto de rotación de cultivo como un solo factor (tratamiento) y el tiempo como segundo factor (Cuadro 8).

Cuadro 8. Cantidad de amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) y nitrógeno inorgánico disuelto presente en lixiviados al final de la temporada del cultivo de maíz.

Factores		NH_4^+	NO_3^-	NID
		kg N ha ⁻¹		
Dosis + efecto rotación cultivos	Zm400-Lm	7,68 ± 2,11 ab	32,42 ± 7,52 a	44,88 ± 8,39 a
	Zm400-B	14,21 ± 7,63 a	23,35 ± 7,28 ab	43,00 ± 10,70 a
	Zm250-B	5,78 ± 2,15 b	14,81 ± 2,72 bc	20,58 ± 2,77 b
	Zm250-Lm	1,83 ± 0,68 b	13,53 ± 2,82 c	15,36 ± 2,56 b
Tiempo	I V7	6,29 ± 6,29 b	41,23 ± 7,93 a	52,96 ± 10,59 a
	II V9	5,48 ± 5,48 b	19,62 ± 2,51 b	18,20 ± 5,74 c
	III VT	2,88 ± 2,88 b	15,32 ± 2,29 bc	18,21 ± 3,66 c
	IV R6	14,85 ± 14,85 a	7,94 ± 3,78 c	34,46 ± 2,61 b
Tratamiento		0,010	0,007	0,001
Tiempo		0,007	0,001	0,001
Tratamiento*Tiempo ²		0,167	0,002	0,005

Valores promedio de las variables ± error. Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. En base a las comparaciones múltiples de LSD Fischer ($\alpha \leq 0,05$).
p value (< 0,05) corresponde al factor dosis más el efecto de la rotación de cultivo vs tiempo.

En el Cuadro 8, es posible observar para la variable de NO_3^- (kg N ha^{-1}) una interacción significativa ($p < 0,002$) entre los factores tratamiento*tiempo. En cambio, para los contenidos de NH_4^+ los factores fueron significativos por separado. Por otro lado, en las cantidades de NID existe una interacción fuerte entre los factores tratamiento*tiempo ($p < 0,005$), cuyo resultado estadístico se presenta en la figura 6.

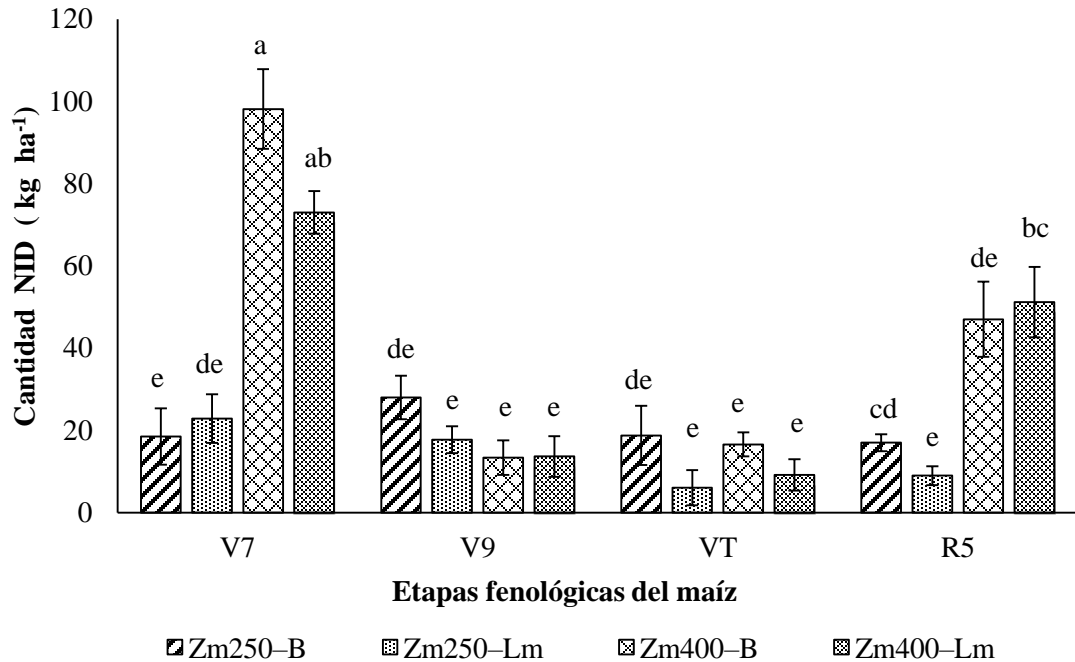


Figura 6. Cantidades de nitrógeno inorgánico disuelto presente en lixiviados de los estadios V7, V9 VT y R5 del cultivo de maíz.

Partiendo de la información presentada en la Figura 6, se evidencia de manera general que los tratamientos con dosis excesivas de N, en las que se aplicaron 150 kg N ha^{-1} a la siembra, reportaron las mayores cantidades de NID, destacando en los estadios V7 y R5. En cambio, los tratamientos con dosis óptimas son los que menores cantidades de NID mostraron en las diferentes colectas.

Por otro lado, en el estadio V7 (tiempo 1) el tratamiento Zm400-B presentó la mayor cantidad de NID (95 kg N ha^{-1}), seguido del Zm400-Lm (75 kg N ha^{-1}). En cambio los tratamientos Zm250-B y Zm250-Lm reportaron contenidos de NID de 18 y 23 kg N ha^{-1} , respectivamente (Apéndice 5). Por otro lado, en los estadios V9 y VT las pérdidas por lavado disminuyen considerablemente, pero vuelven a incrementar en el estadio R6 superando los 47 kg N ha^{-1} .

Finalmente, se destaca el comportamiento del tratamiento Zm250-Lm en toda la temporada, donde registró niveles en un rango de 6 a 23 kg N ha^{-1} en los diferentes estadios fenológicos. En síntesis, tuvo las menores pérdidas de NID en toda la temporada del cultivo de maíz.

Intensidad de emisión de nitrógeno inorgánico disuelto

En la variable intensidad de emisión, se observó que el factor dosis fue significativo ($P < 0,0001$) (Apéndice 3). Los tratamientos con dosis altas de N (400 kg N ha^{-1}), independientemente de la rotación de cultivos, mostraron una mayor intensidad de emisión ($9 \text{ kg de N ha}^{-1}$) por cada tonelada de maíz que producido. En cambio cuando se aplicaron las dosis óptimas se observó una intensidad media (4 kg N ha^{-1}) por tonelada de grano de maíz producido. Sin embargo, es importante destacar el tratamiento con dosis óptima combinado con una rotación de maíz-CC, que tuvo la intensidad de emisión más baja, menor a 4 kg N ha^{-1} por tonelada de maíz producido (Figura 7).

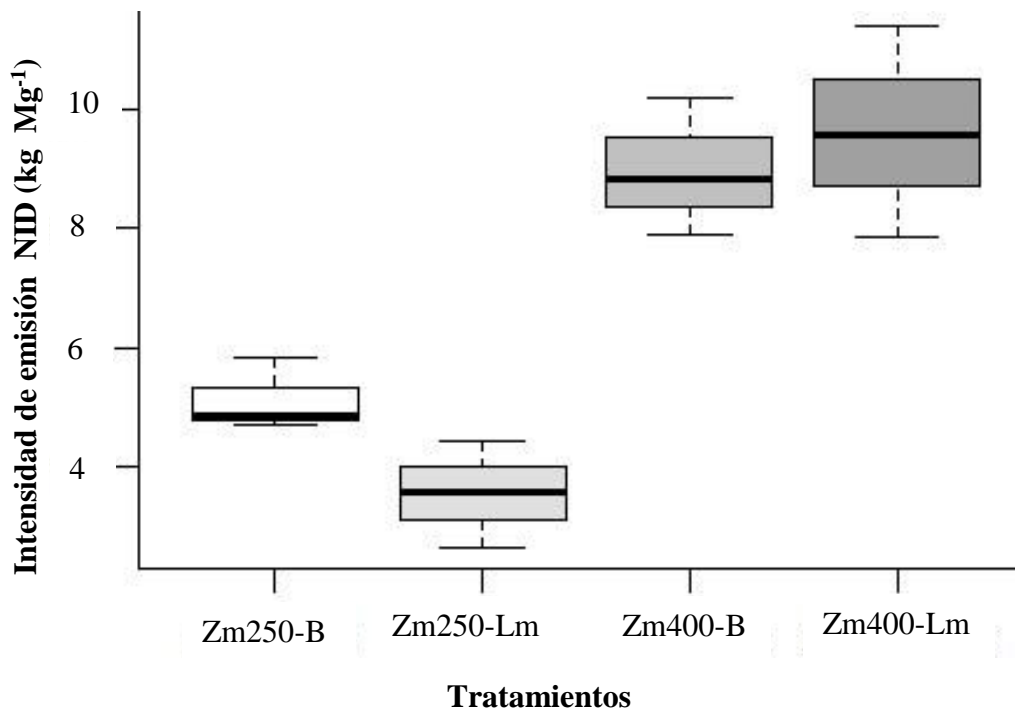


Figura 7. Intensidad de emisión de nitrógeno inorgánico disuelto (kg ha^{-1}) por cada Mg de grano producido al final de la temporada de cultivo de maíz.

DISCUSIÓN

Absorción de nitrógeno por el cultivo de maíz

Comparando el presente estudio con otro similar desarrollado en un clima mediterráneo seco realizados por Nario *et al.* (2012), donde se aplicó una dosis de 390 kg N ha⁻¹ en la Comuna de Las Cabras, Región de O'Higgins, se observaron similitudes en el rendimiento del grano de maíz cuando se aplican dosis excesivas de N. Estos rendimientos son elevados y en consonancia con los indicados para el maíz híbrido empleado en este experimento (Pioneer, 2018). Es evidente que al aplicar dosis mayores de N se genera un incremento en el rendimiento, pero este aumento no fue tan diferente cuando se compara con la dosis óptima de 250 kg N ha⁻¹ en la cual se empleó una práctica de rotación de cultivos maíz-CC (ballica) donde se registró un rendimiento de 17 Mg ha⁻¹. Estos rendimientos son razonables debido a las condiciones de temperatura y radiación solar de la zona central de Chile (Faiguenbaum, 2003). Sin embargo, se debe considerar la gestión del N, sobre todo cuando esta se asocia a los CC y la incorporación de residuos (tallo de maíz y paja de ballica), que complementado con una dosis óptima podrían ayudar a mejorar la absorción del N y con ello mejorar los rendimientos del maíz y generan beneficios ambientales (Sainju, 1997; Alonso-Ayuso *et al.*, 2014; Snapp y Surapur, 2018). Esto es muy relevante, sobre todo al considerar que cerca del 26% del costo total de la producción de maíz está asociado al fertilizante (ODEPA, 2017). Por otro lado, se observó que en todos los tratamientos cerca del 60% del N se acumuló en el grano (rango de 50 – 65 kg N ha⁻¹) cantidades que son concordantes con otros estudios (Ciampitti *et al.*, 2013). Esto es debido a que el N acumulado en las partes vegetales después del estadio R1 es removilizado hacia los granos (Andrade *et al.*, 1996). Además, la cantidad de N absorbido en post-floración es determinado por el desarrollo del grano (Ciampitti *et al.*, 2013; Havlin *et al.*, 2005). Por otro lado, de acuerdo a Di Paolo y Rinaldi (2008), para obtener altos rendimientos de grano de maíz, se debe tener altas EUN y un adecuado manejo de riego para poder evitar pérdidas por lavado de N y de esta manera reducir el riesgo de contaminación por NO₃⁻ de las aguas subterráneas particularmente en climas mediterráneos.

Al final de la temporada del maíz, se observó que en los dos sistemas agrícolas en estudio independientemente de la cantidad de N aplicado, el N absorbido por el maíz durante los periodos de crecimiento y desarrollo de grano, varió entre 370 a 433 kg N ha⁻¹ (Cuadro 6). Estos valores son altos visto que de manera general el cultivo de maíz acumula en su biomasa cantidades menores (rango de 150 – 300 kg N ha⁻¹) cuando se tienen rendimientos en grano de entre 14 a 16 Mg ha⁻¹ (Andrade *et al.*, 1996). Sin embargo, estas altas cantidades de N absorbido son acordes a los rendimientos de grano y biomasa obtenidos por Ciampitti *et al.* (2013) debido a la relación del N con el rendimiento hasta cierto umbral.

Por otro lado, las cantidades de N absorbidos del suelo (285 y 329 kg ha⁻¹) para los tratamientos con dosis óptimas y excesivas respectivamente fueron muy altas (Cuadro 6). Dicho de otro modo, el suelo aportó mayor cantidad de N en toda la temporada del maíz y el N absorbido del fertilizante se presentó en menor cantidad producto de la inmovilización y/o lixiviación del N (Havlin *et al.*, 2005). Estas cantidades de Nads podrían estar relacionadas al aporte de N proveniente de los rastrojos de maíz y la paja de los CC, debido a la alta tasa

de mineralización que se presenta en los suelos alcalinos y climas mediterráneos, como es el caso de nuestro estudio. Así mismo, se suma el efecto de las prácticas de manejo del suelo, como fue la labranza manual, donde no se realizó la quema de rastrojos que, de acuerdo a varios autores, incrementa la fertilidad del suelo debido al reciclaje del N (Pino *et al.*, 2002; Teasdale *et al.*, 2008;). Sin embargo, esto se contradice con lo reportado por Zagal *et al.* (2003) en un ensayo realizado en un suelo Volcánico (Typic Melanoxerand) en el que estudiaron una rotación de cultivos de maíz-trigo por 4 años, concluyeron que los residuos de maíz no constituyeron una fuente de N importante para los cultivos siguientes y que el manejo de residuos (adición extra de C) no conducía a una mayor retención de N en el sistema. Así mismo, se observó de acuerdo a los resultados (Cuadro 6) que aplicar dosis altas de N (400 kg ha^{-1}) el maíz absorbió 107 kg ha^{-1} proveniente del fertilizante mientras que la dosis óptima absorbió 88 kg ha^{-1} . Si bien la absorción de N fertilizante es baja, Esto se debió a las altas concentraciones de N residual en el suelo rango de 0,17 - 0,20% (datos de Soto, 2019) producto del manejo agrícola de las parcelas desde la primavera del 2016. Por otro lado, debemos considerar el aporte de N de los rastrojos de maíz que de acuerdo a los cálculos realizados siguiendo la guía de (Rodríguez, 1993) se tiene un aporte entre 50 y 55 kg N ha^{-1} . Por esta razón el N residual del suelo y el aporte de los rastrojos del maíz suplieron las demanda iniciales del cultivo (Ciampitti *et al.*, 2013; Johnston y Bruulsema, 2014).

Finalmente, los resultados obtenidos sobre las cantidades de N absorbido por el maíz, indistintamente que provengan de la fuente del fertilizante o suelo, nos permiten inferir que la absorción del N está relacionada al tiempo de aplicación y la dosis, ya que, al aplicar 250 kg N ha^{-1} en la fase V8 se observó mayor acumulación de N adf asemejándonos a lo expuesto por Cueto *et al.* (2013), quienes estudiaron la aplicación de N en forma fraccionada en maíz forrajero durante el ciclo de crecimiento, e indicaron que la mayor absorción se da en la fase V6, que es cuando el maíz inicia el crecimiento de los órganos vegetativos y los órganos reproductivos se están diferenciando.

Eficiencia de uso del nitrógeno

El tratamiento donde se aplicó dosis óptima (250 kg N ha^{-1}) combinado con una rotación de maíz-CC (ballica) tuvo la mayor EUN (38%). Este aumento de la EUN es relevante y podría estar asociado directamente a la implementación de CC en la temporada otoño- invierno durante tres temporadas de rotación de cultivos (Rossi, 2017; Balboa, 2019). Los CC implementados ayudaron en el reciclaje del N y a reducir las pérdidas N por lixiviación de nitratos (NO_3^-), aumentando los contenidos de N en el suelo que fue aprovechado por el cultivo de maíz (O'Reilly *et al.*, 2012). Sin embargo, es relevante considerar el aporte del N debido a la mineralización de los rastrojo del maíz, el cual varía en un rango del 31 al 40% de acuerdo a Andrade *et al.* (1996). Por otra parte, al incorporar los CC y rastrojos de maíz normalmente, la tasa de mineralización aumenta porque la aireación del suelo mejora y es una condición favorable para la actividad microbiana que contribuye a mejorar la calidad del suelo (Havlin *et al.*, 2005). Por ello, al realizar el cálculo del aporte de N por los rastrojos del maíz, considerando un índice de cosecha (IC = 0,48) y un rendimiento de 15 Mg ha^{-1} en la campaña anterior (P-V 2017/2018) se determinó un aporte de N cercano a 50 kg ha^{-1} según lo calculado con los datos de Soto (2019) que es una cantidad considerable al momento de

analizar las entradas del N en los sistemas de producción estudiados. En síntesis, esta cantidad de N fue suficiente para suplir la demanda inicial del maíz. Así mismo, la aeración del suelo facilitó un mayor desarrollo radicular, lo cual se infiere por el valor de la biomasa radicular del maíz ($5,02 \pm 0,82 \text{ Mg ha}^{-1}$). Es por ello que al aplicar la dosis óptima en el estadio V8 la planta pudo asimilar mayor cantidad de N del fertilizante. Por consiguiente, aumentó la eficiencia del uso del N y se pudieron mantener rendimientos competitivos (Coombs *et al.*, 2017).

Por otro lado, en el presente estudio se esperaba tener EUN más altas considerando el manejo del cultivo de maíz, el riego y las condiciones climáticas. Sin embargo, las eficiencias obtenidas fueron muy bajas (rango 27 - 38 %) en comparación con otros estudios similares empleando técnicas isotópicas (^{15}N), donde se atribuyen eficiencias de un rango de 40 – 65% para los cereales (Ladha, 2014). No obstante, las eficiencias obtenidas fueron bajas pero acordes con las observadas en la zona por Nario *et al.* (2012) en un clima mediterráneo con una precipitación media anual de 550 mm y una temperatura media 15°C y un manejo de riego por surcos. Las EUN obtenidas para los tratamientos con dosis excesivas de N (400 kg N ha^{-1}), independientemente de estar combinadas con rotaciones de maíz - barbecho o maíz-CC, tuvieron EUN del 27%, en cambio, cuando se aplicaron dosis óptimas combinadas con una rotación maíz -barbecho obtuvo un 33 % de EUN. Por ello, se debe aplicar las dosis óptimas de N en los tiempos de mayor demanda del cultivo a fin de contribuir a incrementar la EUN, tal como lo indican otros autores (Vázquez *et al.*, 2006; Quemada *et al.*, 2019). Por otro lado, en este análisis se debe considerar el error típico de los trazadores isotópicos (^{15}N) que se confunden con el reciclaje interno del N en el suelo, como es el caso la rápida absorción y liberación de NH_4^+ y NO_3^- (mineralización - inmovilización) que por lo general reduce la concentración del trazador al momento evaluar de la disponibilidad para la planta (Stewart, 2007).

Como se ha comentado, estas bajas EUN también podrían estar influenciadas por el tipo y manejo del suelo, como es la incorporación de rastrojos, labranza, y dosis de N de años previos, tal como lo señalan González *et al.* (2016), donde los valores de EUN fueron mayores en suelos de textura arcillosa con dosis bajas de N, frente a los suelos de textura gruesa y dosis alta. Nuestro experimento tenía un suelo de textura franca, por lo que se encontraría en una situación intermedia. Así mismo, también hay que resaltar la influencia del pH elevado del suelo (pH=8,99, Anexo 3), que pudo haber sido un factor limitante en la absorción del N proveniente del fertilizante y por ende pudo reducir la EUN, ya que el pH óptimo para la absorción de N por el cultivo está en un rango de 6 a 7. Adicionalmente, también se debe considerar la gestión del riego tal como lo manifiestan Lasa *et al.* (2011), quienes señalaron que la mayor eficiencia de N en el cultivo de maíz está asociada al riego, indicando que en sistemas con riego por surcos se provocan situaciones de déficit hídrico temporal, se manifiestan mayores pérdidas de N por lixiviación y desnitrificación, lo cual reduce la EUN. En principio, en nuestro estudio el riego se realizó usando riego por goteo y ajustado a las necesidades del cultivo. Sin embargo, se realizaron simulaciones de riego tal como lo realizan los agricultores de Chile (riego por surcos), tal como se muestra en la Figura 2. Al realizar estas simulaciones de riego se pudo observar que las mayores pérdidas se producen por lixiviación que están directamente relacionados a los tratamientos donde se aplicaron dosis altas de N. Por ello es importante considerar el riego como parte de los resultados, visto que de manera general los agricultores aplican cantidades superiores a

15,000 m³ de agua por temporada de maíz (Nájera *et al.*, 2015; Salazar *et al.*, 2019). Esta práctica habitual es fundamental al momento de analizar la EUN en los sistemas agrícolas de monocultivo, lo que se coincide con lo que señalado por Quemada *et al.*, (2013), en que las bajas EUN están directamente relacionadas con el mal manejo del riego.

Recapitulando, la EUN fue mayor en los tratamientos con 250 kg N ha⁻¹ frente a los que recibieron 400 kg N ha⁻¹. Este efecto podría deberse al tiempo de aplicación de N que se realizó en el estadio vegetativo (V8), ya que en las primeras etapas el N del suelo suple las demandas iniciales del maíz y la mayor absorción se presenta entre los estadios V3 – floración, por ello varios autores recomendaban que la aplicación del N a la siembra sea mínima o nula (Lindquist *et al.*, 2010; Ciampitti *et al.*, 2013). Por lo tanto, los 150 kg N ha⁻¹ aplicados a la siembra no son en gran parte absorbidos por la planta, sino que podrían perderse del sistema suelo-planta en gran parte por lavado de N. Al analizar el ¹⁵N residual a 50 cm de profundidad del suelo, se observó que en los tratamientos donde se aplicaron dosis altas de N (400 kg N ha⁻¹) faltaba un promedio de 123 kg N ha⁻¹, lo cual permite inferir pérdidas por lavado de N (lixiviación). Por otro lado, sería relevante considerar la volatilización de NH₃ en los estudios de EUN, tal y como señalan Terrada *et al.* (2014) que realizaron un estudio con técnicas isotópicas (¹⁵N) y concluyeron que las pérdidas de NH₃ fueron inferiores al 6,5%, pero pueden extenderse hasta los 25- 30 días después de haber aplicado el fertilizante.

Lixiviación de nitrógeno inorgánico disuelto

De acuerdo a los valores obtenidos en este estudio, se infiere que la mayor pérdida de N por lavado se debió a la gestión del riego y a la aplicación de dosis altas de fertilizante nitrogenado. Así, bajo una simulación de riego por surco, tal como lo realizan los productores de maíz de la zona central de Chile, donde se aplicaron cargas equivalentes a una precipitación superiores a 15 mm día⁻¹, observándose que a los 47 días después de la siembra de maíz (estadio V7) los tratamientos con dosis excesivas (400 kg N ha⁻¹) presentaron altas pérdidas de NID por lixiviación, en un rango de 75 a 95 kg N ha⁻¹, independientemente de la estrategias de rotación de maíz –CC. Estos resultados se asemejan a lo obtenido por Álvarez-Sánchez *et al.* (2014), quienes determinaron que la principal forma de pérdidas de N es el NO₃⁻ (cerca del 49%) y que también se asociaba más a los tratamientos con contenidos de materia orgánica altos.

Por otro lado, al analizar la lixiviación acumulada (Figura 5), se observó que al aplicar dosis altas de N los contenidos de NID en toda la temporada del cultivo de maíz llegaron a 177 kg N ha⁻¹, en cambio al aplicar dosis óptimas de N, los contenidos disminuyeron hasta los 72 kg N ha⁻¹. Estas cantidades de NID son muy elevadas para el manejo agrícola empleado en el estudio. Sin embargo, son razonables si se considera el historial de manejo de la parcela, ya que estas parcelas tuvieron el mismo manejo de rotación de cultivos y dosis de N desde la primavera del 2016. Además, en estas parcelas los rendimientos de maíz fueron inferiores a 15 Mg ha⁻¹ y no llegaban a conseguir cantidades altas de NID en las colectas de lixiviados (Rossi, 2017; Balboa, 2019). Por ello, al realizar la simulación de eventos de lluvia en primavera del 2018 (superiores a 15 mm día⁻¹), la cantidad de N obtenido en el estadio V7

fue la suma del N aplicado en la siembra, el N residual del suelo acumulado de las temporadas anteriores y el N procedente de la mineralización de los rastrojos del maíz incorporados. En síntesis, las altas cantidades de NID cercanas a 177 kg N ha^{-1} obtenidas en toda la temporada (Apéndice 4) podrían estar relacionadas con la baja evapotranspiración que se produce en los primeros estadios del cultivo, en el que el suelo está más descubierto y se produce mayor percolación, tal como lo determinaron Salazar *et al.* (2019) en un sistema de barbecho continuo, donde se produjo la percolación profunda más alta en suelos descubiertos en la temporada otoño – invierno. En definitiva, los tratamientos con dosis excesivas perdieron más N por lavado, siendo el NO_3^- la forma más habitual (58%) en consonancia a la práctica habitual de los agricultores de Chile (Nájera *et al.* 2015). Se sugiere que los 150 kg N ha^{-1} aplicados en la siembra se estarían perdiendo principalmente por lixiviación de N. Del mismo modo, esta información permite inferir que estas pérdidas por lixiviación están relacionadas directamente con la baja EUN del cultivo de maíz y a las prácticas agrícolas de suelo y riego (Vázquez *et al.*, 2006).

Adicionalmente es evidente que los contenidos de NID en el estadio V9 y VT son las más bajas de la temporada (Apéndice 2). Esto podría deberse a que la máxima demanda de N por el maíz se manifiesta a partir de la octava hoja (V8) porque en esta etapa el cultivo empieza a desarrollar la diferenciación en los órganos sexuales (Bundy y Andrasky, 2005), por lo que la planta absorbe mayor cantidad de N del suelo y agua y reduce las pérdidas de N en forma de NID. Sin embargo, a medida que transcurre el tiempo, las pérdidas de NID vuelven a incrementarse, sobre todo en los tratamientos con dosis excesivas de N, superando incluso los 47 kg N ha^{-1} . Esto se relaciona directamente con fenología del maíz, que entra en senescencia y los requerimientos de nutrientes y agua son bajos y solo se produce la removilización de nutrientes (Lindquist *et al.*, 2010; Ciampitti *et al.*, 2013).

Finalmente, considerando los datos obtenidos de NO_3^- y NH_4^+ , se deduce que la cantidad de NID en el suelo está relacionada con la gestión del riego. Los riegos iniciales fueron abundantes y ocasionaron pérdidas por lixiviación del NID acumulado en el suelo. Lo anterior, también lo señalaron Bortolotto *et al.* (2012), quienes evaluaron la eficiencia del N fertilizante con urea marcada al 5% de átomos en exceso de ^{15}N en condiciones de clima tropical como el de Brasil en el cultivo de café. Bajo condiciones de clima Mediterráneo, Vázquez *et al.* (2006) mostraron que el 80% de la lixiviación durante un cultivo de tomate regado por goteo se produjo durante las 4 semanas siguientes a la plantación, debido al riego excesivo y a una baja demanda de agua y N por las plántulas del cultivo. Sin embargo, la instalación de los CC en invierno redujo la lixiviación de N, coincidiendo con lo reportado por Lee *et al.* (2016) quienes indican que los CC redujeron la lixiviación de N cuando las cargas de referencia de NO_3^- son altas en suelos bien drenados y/o cuando la disponibilidad de N residual y mineralizado es alta debido a las prácticas agrícolas del cultivo. En síntesis, con la dosis de N aplicado al momento de la siembra (150 kg ha^{-1}), tal como lo realizan los agricultores de Chile, se podrían estar perdiendo entre $75 -95 \text{ kg N ha}^{-1}$ por lixiviación de nitratos, lo cual se potencia si se aplican grandes volúmenes de agua en el riego (riego por surco). También Cueto *et al.* (2013) indicaron que durante la fase V0 – V3 del maíz el requerimiento de N es bajo y la demanda puede ser suplida por el que aporta el suelo, y que el fertilizante nitrogenado aplicado en la siembra se pierde por lixiviación.

Balance de nitrógeno (^{15}N)

Al analizar el balance general del ^{15}N en el cultivo de maíz-barbecho donde se aplicaron dosis alta de N (400 kg N ha^{-1}) Figura 7 B, se observó que el cultivo absorbió 108 kg N ha^{-1} , en el suelo quedaron 178 N ha^{-1} y el N no recuperado fue 113 kg N ha^{-1} . Esta cantidad de N no recuperado se puede atribuir a las pérdidas de N por lixiviación, desnitrificación y volatilización. En este estudio se intentó medir el exceso de átomos de ^{15}N en los lixiviados, pero esto no se logró debido a la dificultad de realizar la determinación en las muestras líquidas. En consecuencia, no se calculó la cantidad de ^{15}N perdido por lixiviación. Sin embargo, considerando las altas cantidades de NID en los lixiviados (177 kg N ha^{-1}) en toda la temporada del maíz, se sugiere que la mayor parte del ^{15}N se pudo haber perdido por lixiviación de NO_3^- . En general se estima que la volatilización no supera el rango de entre el 5 y el 6,5% del total de las pérdidas de N (Terrada *et al.*, 2014). Además, las aplicaciones de N se cubrieron al momento de realizar la siembra y la aporca del maíz, por lo que esta forma de pérdida resulta no ser significativo al momento de realizar el balance de ^{15}N . Por otro lado, los procesos de nitrificación y desnitrificación, si bien son principales responsables de la emisión de óxido nitroso (N_2O) en los cultivos de cereales, en este ensayo podrían tener valores bajos, debido a las condiciones del suelo ($\text{pH} = 8,99$ y $\text{MOS}=1,12\%$) sumado las condiciones de un clima mediterráneo (Terrada *et al.*, 2014; Illarze *et al.*, 2018).

Por otro lado, los tratamientos donde se aplicaron dosis óptimas (250 kg N ha^{-1}) combinados con un manejo de rotación de CC (ballica) tuvieron una mejor gestión del N (Figura 8A). Al realizar el balance de todo el ^{15}N aplicado, el cultivo absorbió 88 kg N ha^{-1} , 150 kg N ha^{-1} quedan en el suelo y solo 12 kg N ha^{-1} se reportó como pérdida. Es decir, las pérdidas de N del sistema suelo-planta fueron muy bajas. En síntesis, la implementación de los CC (ballica) en la temporada de otoño-invierno frente a un monocultivo tradicional de maíz con dosis óptimas contribuye a mejorar la gestión del N, ya que ayudan a mejorar la EUN por una reducción de los procesos de lixiviación en los sistemas agrícolas mediterráneos (Alonso-Ayuso, 2018). Por el contrario, cuando se aplican altas dosis de N, independientemente del manejo de rotación de cultivos a emplear, las pérdidas por lixiviación son altas y las EUN bajas, y por tanto el riesgo de contaminación de aguas superficiales y subterráneas se incrementa.

Finalmente, de manera general, en el estudio se evidenció la necesidad de seguir investigando en las estrategias de manejo de fertilización nitrogenada, que contribuyan a mejorar EUN y reduzcan los impactos negativos de la lixiviación de NO_3^- . Por ello algunos autores proponen estrategias como el uso de inhibidores de la ureasa (N-(n-butil) tiofosfórico triamida (nBTPT) o el uso de zeolitas que por su alta capacidad de intercambio catiónico, favorecen la retención de cationes como NH_4^+ (Civeira y Rodríguez, 2009; Zaman *et al.*, 2014). Sin embargo, en este estudio observamos que las mayores EUN y pérdidas de N están relacionadas con el tiempo de aplicación del fertilizante, la gestión del riego y sumado la aplicación de dosis excesivas de N. Por ello, es necesario adaptar manejo de fertilización bajo estrategias de fertilización 4R, que implica fertilizar considerando la fuente, dosis, tiempo y lugar correcto (Johnston y Bruulsema, 2014). Complementariamente a las estrategias de manejo de fertilizantes por medio de CC y gestión del riego (Gabriel *et al.*, 2016).

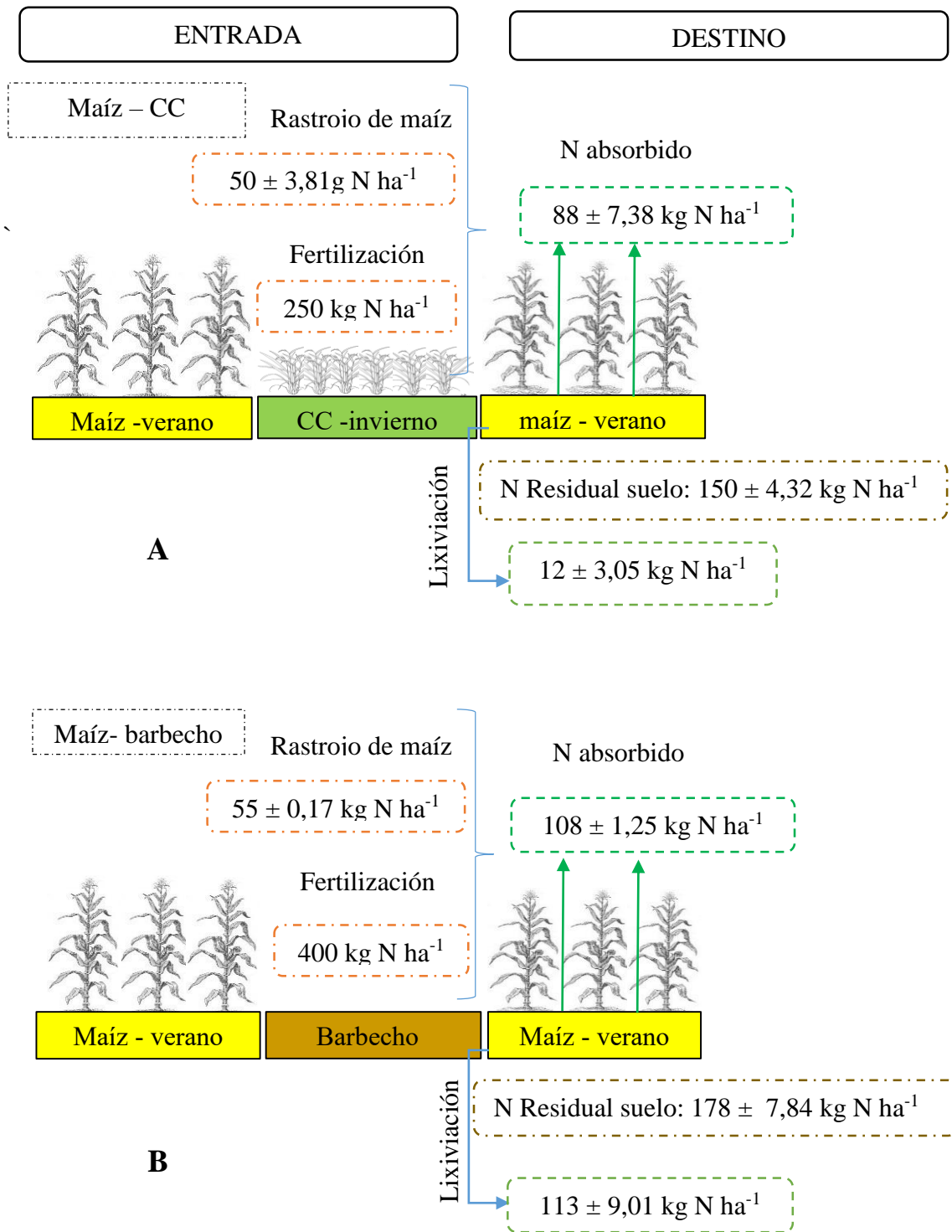


Figura 8. Balance de nitrógeno en los sistema de producción: A. rotación de maíz-cultivo cubierta con dosis óptima de fertilización, B. rotación de maíz-barbecho con dosis excesiva de fertilización, derivados del presente estudio.

CONCLUSIONES

Reemplazar el barbecho de otoño-invierno tradicional en el monocultivo de maíz por un cultivo cubierta (*Lolium multiflorum*) con dosis óptimas de N contribuyó a mejorar la EUN y reducir la lixiviación de N en un sistema agrícola mediterráneo. Por lo cual es una estrategia a considerar al tener ventajas positivas en el manejo del suelo y la gestión del N a fin de contribuir a reducir los procesos de contaminación difusa en aguas superficiales y subterráneas.

La mayor absorción de N derivado del fertilizante se evidenció en los tratamientos con dosis excesivas de N. Sin embargo, la mayor cantidad de N acumulado fue aportada por el suelo, independientemente de la dosis y sistema de rotación de cultivos.

Aunque en el estudio se determinó mediante la aplicación de técnicas isotópicas de ^{15}N que la dosis excesiva (400 kg N ha^{-1}) incrementó el rendimiento de grano en el maíz, la EUN disminuyó hasta un 28%, sin mostrar diferencia estadística entre los sistemas de rotación maíz-barbecho o maíz-CC. En cambio, utilizando la dosis óptima de 250 kg N ha^{-1} en una rotación de maíz-cultivo cubierta (ballica) se alcanzó una EUN cercano al 40%.

Las pérdidas más altas de N por lixiviación se presentaron en los tratamientos con dosis excesivas de N, particularmente en el sistema de rotación de cultivo maíz-barbecho donde se aplicaron 150 kg N ha^{-1} a la siembra. Al implementar la práctica de rotación de CC en temporada invierno acompañada de dosis óptimas de N, la intensidad de emisión de nitrógeno inorgánico disuelto en lixiviados se redujo a la mitad con respecto a la dosis excesiva.

De acuerdo a los resultados, se sugiere que se realicen más estudios en el sistema de rotación de cultivo de maíz - cultivos cubierta y dosis óptima de N, a fin de aumentar la EUN y reducir los procesos de contaminación difusa de N de aguas superficiales y subterráneas.

LITERATURA CITADA

- Allen R.G., L.S. Pereira, D. Raes, D. and M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Roma, Italia. 277 p.
- Alonso-Ayuso, M., J.L. Gabriel, and M. Quemada. 2014. The kill date as a management tool for cover cropping success. *PLoS One* 9(10): 109587.
- Alonso-Ayuso, M. 2018. Estrategias de manejo de cultivos cubierta para optimizar el uso de agua y nitrógeno, así como el control de malas hierbas. Tesis de doctorado. Escuela Técnica Superior de Ingeniería Agronómica, Alimentaria y de Biosistemas. Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España. 273 h.
- Álvarez-Sánchez, E., R. Amendola-Massiotti, D. Cristóbal-Acevedo, and M.C. Soto-Barajas. 2014. Nitrogen losses by leaching in a mixed grassland grazed in temperate climate. *Revista Fitotecnia Mexicana* 37(3): 271-278.
- Andrade, F., A. Cirilo, S. Uhart, and M. Otegui. 1996. Nutrición mineral. pp. 147-155. *In: Editorial La Barrosa, Ecofisiología del cultivo de maíz. Buenos Aires, Argentina. 226 p.*
- Balboa, L. 2019. Lixiviación de carbono orgánico disuelto en sistemas de rotación maíz-cultivos de cubierta y fertilización nitrogenada inorgánica. Tesis de Magister en Manejo de Suelos y Aguas, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Santiago, Chile. 67 h.
- Behnke, G. D., and M.B. Villamil. 2019. Cover crop rotations affect greenhouse gas emissions and crop production in Illinois, USA. *Field Crops Research* 241: 107580.
- Bortolotto, R.P., I.P. Bruno, K. Reichardt, L.C. Timm, T.J. Amado, and A. Ferreira. 2012. Nitrogen fertilizer (¹⁵N) leaching in a central pivot fertigated coffee crop. *Revista Ceres (Brasil)* 59(4): 466-475.
- Bowman, G., C. Shirley, y C. Cramer. 2000. Benefits of cover crops. pp. 9-11 *In: Managing Cover Crops Profitably* (Ed. A. Clark). Sustainable Agriculture Network. Beltsville, USA.
- Buozo, C.A., E.D. Astegiano, y J.C. Favaro. 2003. Procedimientos para predecir la necesidad de abonos en cultivos hortícolas. *Revista FAVE – Ciencias Agrarias* 2: 1-12.
- Bundy, L. G., and T. W. Andraski. 2005. Recovery of fertilizer nitrogen in crop residues and cover crops on an irrigated sandy soil. *Soil Science Society of America Journal* 69(3): 640-648.
- Cárdenas, R., J.M. Sánchez, R. Farías, y J.J. Peña. 2004. Los aportes del nitrógeno en la agricultura. *Revista Chapingo Serie Horticultura (México)* 10(2): 173-178.

- Casanova, M., O. Salazar, O. Seguel and W. Luzio. 2013. *The Soils of Chile*. World Soils Book Series. Dordrecht, Germany: Springer Science and Business Media. 183 p.
- Ciampitti, I.A., S.T. Murrell, J.J. Camberato, M. Tuinstra, X. Yanbing, P. Friedemann and T.J. Vyn. 2013. Physiological dynamics of maize nitrogen uptake and partitioning in response to plant density and nitrogen stress factors: II. Reproductive Phase. *Crop Science* 53: 2588-2602.
- CIREN. 1996. (Centro de Información de Recursos Naturales).1996. Estudio agrológico Región Metropolitana. N° 115. Santiago, Chile. 474 p.
- Civeira, G., y M.B. Rodríguez. 2011. Nitrógeno residual y lixiviado del fertilizante en el sistema suelo-planta-zeolitas. *Ciencia del Suelo* 29(2): 285-294.
- Coombs, C., J.D. Lauzon, B. Deen, and L.L. Van Eerd. 2017. Legume cover crop management on nitrogen dynamics and yield in grain corn systems. *Field Crops Research* 201: 75-85.
- Cueto, J.A., D. Guadalupe, U. Figueroa, H.M. Quiroga, A. Ramos y J.J. Peña. 2013. Recuperación de nitrógeno aplicado en forma fraccionada en maíz forrajero utilizando ¹⁵N. *Ingeniería Agrícola y Biosistemas* 5(1): 11-16.
- Di Rienzo J.A., F. Casanoves. M.G. Balzarini, L. Gonzalez, M. Tablada y C.W. Robledo. 2018. InfoStat versión 2018. Centro de Transferencias InfoStat, FCA, Universidad de Córdoba, Argentina. 336 p.
- Di Paolo, E., M. Rinaldi. 2008. Yield response of corn to irrigation and nitrogen fertilization in a Mediterranean environment. *Field Crops Research* 105: 202-210.
- Faiguenbaum, H. 2003. *Labranza, siembra y producción de los principales cultivos de Chile*. Universidad de Chile. Santiago de Chile. 760 p.
- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2017. *El futuro de la alimentación y la agricultura. Tendencias y Desafíos*. Roma, Italia. 47 p.
- Fuhrmann, I., H. Yao. Lehndorff, N. Brüggemann, W. Amelung, R. Wassmann and J. Siemens. 2018. Nitrogen fertilizer fate after introducing maize and upland-rice into continuous paddy rice cropping systems. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 258: 162-171.
- Gabriel, J.L. and M. Quemada. 2011. Replacing bare fallow with cover crops in a maize cropping system: yield, N uptake and fertiliser fate. *European Journal of Agronomy* 34: 133-143.
- Gabriel, J. L., Garrido, A., and Quemada, M. 2013. Cover crops effect on farm benefits and nitrate leaching: linking economic and environmental analysis. *Agricultural Systems* 121: 23-32.

- Gabriel, J. L., M. Alonso-Ayuso, I. García-González, C. Hontoria and M. Quemada. 2016. Nitrogen use efficiency and fertiliser fate in a long-term experiment with winter cover crops. *European Journal of Agronomy* 79: 14 -22.
- Galièni, A., F. Stagnari, G. Visioli, N. Marmioli, S. Speca, G. Angelozzi, S. D'Egidio, and M. Pisante. 2016. Nitrogen fertilisation of durum wheat: a case study in Mediterranean area during transition to conservation agriculture. *Italian Journal of Agronomy* 11: 662.
- García-González, I., C. Hontoria, J.L. Gabriel, M. Alonso-Ayuso, and M. Quemada. 2018. Cover crops to mitigate soil degradation and enhance soil functionality in irrigated land. *Geoderma* 322: 81-88.
- González, A., U. Figueroa, P. Preciado, G. Núñez, J. Guadalupe, and O. Antuna. 2016. Efficient use and apparent recuperation of nitrogen in fodder corn at different grounds. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 7(2): 301-309.
- González, A. L. 2012. Determinación de destino del nitrógeno aplicado a un cultivo de sésamo mediante la técnica isotópica. Tesis de Magister. Universidad Nacional de Asunción. Facultad de Ciencias Agrarias. San Lorenzo, Paraguay. 113 h.
- González, A.L. and H.J., Causarano. 2014. Fate of nitrogen applied to a sesame crop (*Sesamun indicum* L.) in a degraded soil of Paraguay. *Acta Agronómica (Paraguay)* 63(2): 253-261.
- Hach, D.R. 2005. DR5000 Spectrophotometer procedures manual. 2th Edition. Hach Company. Germany. 846 p.
- Halitligil, M.B. 2004. Nuclear techniques used in soil fertility and plant nutrition. pp. 303-306 *In: Proceedings of the third conference "Nuclear science and its application. Ankara, Turkey. 5-8 octubre. Turkish Atomic Energy Authority, Ankara – Turkey. 363 p.*
- Havlin, J. L., S.L. Tisdale, J.D. Beaton y W.L. Nelson. 2005. *Soil Fertility and Fertilizers. An introduction to nutrient management. 7 th Ed., Pearson Education Asia Ltd. China. 522 p.*
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2001. Applications of nuclear techniques in soil fertility and plant nutrition studies. pp. 21-103 *In: Use of isotope and radiation methods in soil and water management and crop nutrition. Training Course Series N°14. Viena, Austria. 247 p.*
- IAEA (International Atomic Energy Agency). 2008. Guidelines on nitrogen management in agricultural systems. pp. 1-19 *In: Introduction to nitrogen management in agricultural system. Training course series N° 29. Viena, Austria. 243 p.*
- Illarze, G., A. Del Pino, S, Riccetto and P. Irisarri. 2018. Nitrous oxide emission, nitrification, denitrification and nitrogen mineralization during rice growing season in 2 soils from Uruguay. *Revista Argentina de Microbiología* 50(1): 97-104.

INDAP (Instituto Nacional de Desarrollo Agropecuario). 2011. Manual de recomendaciones cultivo de maíz grano. Santiago, Chile 48 p.

Johnston, A.M. and T.W. Bruulsema. 2014. 4R Nutrient stewardship for improved nutrient use efficiency. *Procedia Engineering* 83: 365-370.

Kaye, J.P., and M. Quemada. 2017 Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 37(1): 4.

Ladha, J.K. 2014. Contributions of fertilizer nitrogen in global cereal production, soil organic matter status and nitrogen balance. pp 21- 25. *In: International symposium on managing soils for food security and climate change adaptation and mitigation.* FAO – IAEA. Italia, Roma. 410 p.

Landriscini M.R., J.A., Galantini y J.M., Martínez. 2015. Eficiencia de recuperación de nitrógeno por métodos de la diferencia y de la dilución isotópica. *Ciencia del Suelo* 34: 155 -162.

Lasa, B., I. Irañeta, J. Muro, I. Irigoyen, and P.M. Aparicio. 2011. Isotopic composition of maize as related to N-fertilization and irrigation in the Mediterranean Region. *Scientia Agrícola (Brasil)* 68(2): 182-190.

Lee, S., I.Y. Yeo, A.M. Sadeghi, G.W. McCarty, W.D. Hively, and M.W. Lang. 2016. Impacts of watershed characteristics and crop rotations on winter cover crop nitrate-nitrogen uptake capacity within agricultural watersheds in the Chesapeake Bay region. *Plos One* 11(6): 1-22.

Lindquist, J.L., S.P., Evans, C.A., Shapiro, and S.Z. Knezevic. 2010. Effect of nitrogen addition and weed interference on soil nitrogen and corn nitrogen nutrition. *Weed Technology* 24: 50-58.

Lu, Y. C.K. Bradley Watkins, J.R. Teasdale and A.A. Abul-Baki. 2000. Cover crops in sustainable food production. *Food Reviews International* 16(2): 121-157.

Muscas, E., A. Cocco, L. Mercenaro, M. Cabras, A. Lentini, C. Porqueddu, and G. Nieddu. 2017. Effects of vineyard floor cover crops on grapevine vigor, yield, and fruit quality, and the development of the vine mealybug under a Mediterranean climate. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 237: 203-212.

Nájera, F., Y. Tapia, C. Baginsky, V. Figueroa, R. Cabeza and O. Salazar. 2015. Evaluation of soil fertility and fertilisation practices for irrigated maize (*Zea mays* L.) under Mediterranean conditions in central Chile. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 15(1): 84-97.

Nario, A., I. Pino, F. Zapata, M. P., Albornoz, and P. Baherle. 2003. Nitrogen (¹⁵N) fertiliser use efficiency in peach (*Prunus pérsica* L.) cv. Goldencrest trees in Chile. *Scientia Horticulturae* 97: 279 – 287.

- Nario, A., Parada A.M., Videla X., M. Casanova, and O. Seguel. 2012. ^{15}N Fertilizer efficiency in Maize Cropped by small farmers at the VI Region of Chile. pp. 89-90 *In: International symposium on Managing soils for food security and climate change adaptation and mitigation*. Vienna, Austria.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias), Chile. 2018. Cereales: Producción, precios y comercio exterior de trigo, maíz y arroz. Santiago, Chile. 60 p.
- ODEPA (Oficina de Estudios y Políticas Agrarias), Chile. 2017. Costos de producción del maíz Región de O'Higgins. Santiago, Chile. 60 p.
- Opazo, J.D., A. Luchsinger, y O. Neyra. 2008. Factores de suelo y planta para determinar la fertilización nitrogenada en maíz dulce en la zona central de Chile. *IDESIA (Chile)* 26(2): 53 -58.
- O'Reilly, K. A., J.D. Lauzon, R.J. Vyn, and L.L. Van Eerd. 2012. Nitrogen cycling, profit margins and sweet corn yield under fall cover crop systems. *Canadian Journal of Soil Science* 92(2): 353-365.
- Parga. J. 2008. Ballicas de rotación corta asociadas a avena. *Boletín Informativo N° 64*. Instituto de Investigación Agropecuaria INIA-Remehue 4 p.
- Pino, I., J.L. Rouanet, F. Zapata, A.M. Parada, y A. Nario. 2002. Eficiencia de recuperación de nitrógeno en el sistema planta-suelo en un cultivo de trigo bajo manejo de suelo alternativos en un ultisol de la IX Región. *Agricultura Técnica (Chile)* 62(2): 272-283.
- Pioneer, 2018. Catálogo de Híbridos de maíz. Híbrido 33Y74 de maíz. 15 p.
- Quemada, M., M. Baranski, M.N.J. Nobel-de Lange, A. Vallejo and J.M. Cooper. 2013. Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 174: 1 – 10.
- Quemada, M., M. Alonso-Ayuso, A. Castellano-Hinojosa, E.J. Bedmar, J.L. Gabriel, I.G. González, F. Valentín and M. Calvo. 2019. Residual effect of synthetic nitrogen fertilizers and impact on Soil Nitrifiers. *European Journal of Agronomy* 109: 25917.
- Quemada, M., L. Lassaletta, L. S. Jensen, O. Godinot, F. Brentrup, C Buckley, S. Foray, S.K. Hvid, J. Oenema, K.G. Richards and O. Oenema. 2020. Exploring nitrogen indicators of farm performance among farm types across several European case studies. *Agricultural Systems*, 177, 102689.
- Radicetti, E., R. Mancinelli, R. Moschetti, and E. Campiglia. 2016. Management of winter cover crop residues under different tillage conditions affects nitrogen utilization efficiency and yield of eggplant (*Solanum melanogena* L.) in Mediterranean environment. *Soil and Tillage Research* 155: 329-338.

Reinhardt, R., and R. Russow. 1991. Use of the ^{15}N isotope dilution technique to study the effect of mineral nitrogen on biological nitrogen fixation in red clover Abstract pp.193 – 200. *In: Proceedings of a symposium – Stable isotopes in plant nutrition, soil fertility and environmental studies/FAO, Viena, Austria. 1-5 october1990. Impreso por el OIEA, Vienna – Austria.*

Rodríguez, J. 1993. Manual de fertilización. Facultad de Agronomía, Pontificia Universidad Católica de Chile. Colección en Agricultura. 362 p.

Rodríguez, B.A., y Y.S. Vivas. 2018. Eficiencia de uso del nitrógeno en maíz fertilizado de forma orgánica y mineral. *Revista Agronomía Mesoamérica (Costa Rica) 29: 207-219.*

Rossi, M. 2017. Efectos de la rotación de maíz-cultivo cubierta y de la fertilización nitrogenada, en la lixiviación de carbono orgánico y nitrógeno disueltos. Tesis de Magister Manejo de Suelos y Aguas. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile. 69 h.

Rouanet, J.L., I. Pino, A.M. Parada y A. Nario. 2001. Efecto de tres sistemas de manejo de suelo en la eficiencia fisiológica de uso de nitrógeno fertilizante en trigo. *Agricultura Técnica (Chile) 61(4): 459-469.*

Sadzawka, A, A. Carrasco, R. Grez, M. Mora, H. Flores y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Revisión 2006. Manual INIA y CNA de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo. Centro Regional de Investigación La Platina, Santiago de Chile 164 p.

Sainju, U. M., and B.P. Singh. 1997. Winter cover crops for sustainable agricultural systems: influence on soil properties, water quality, and crop yields. *HortScience 32(1): 21-28.*

Salazar, O. y F. Nájera. 2011. Contaminación de las aguas por el uso de fertilizantes nitrogenados y enmiendas orgánicas *Boletín de la Sociedad Chilena de la Ciencia del Suelo 24: 147-152.*

Salazar, O., J. Vargas, F. Nájera, O. Seguel, and M. Casanova. 2014. Monitoring of nitrate leaching during flush flooding events in a coarse-textured floodplain soil. *Agricultural Water Management 146: 218-227.*

Salazar, O., L. Balboa, K. Peralta, M. Rossi, M. Casanova, Y. Tapia, R. Singh andy M. Quemada. 2019. Effect of cover on leaching of dissolved organic nitrogen and carbon in a maize-cover crop rotation in Mediterranean Central Chile. *Agricultural Water Management 212: 399-406.*

Santibáñez, F., P. Santibáñez, C. Caroca, P. González. 2017. Atlas agroclimático de Chile. Tomo III: Regiones de Valparaíso, Metropolitana, O'Higgins y del Maule. AGRIMED (Centro de Agricultura y Medioambiente), Universidad de Chile y Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Santiago, Chile. 138 p. Disponible en <http://www.agrimed.cl/atlas/tomo3.html> (Consultado en octubre del 2018).

Snapp, S and S. Surapur. 2018. Rye cover crop retains nitrogen and doesn't reduce corn yields. *Soil & Tillage Research*. 180: 107-115.

Soto, C. 2019. Mineralización de nitrógeno en un suelo franco arenoso, bajo rotación maíz-cultivo cubierta y fertilización y fertilización nitrogenada inorgánica. Tesis de Magister de Manejo de Suelos y Aguas. Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Santiago, Chile. 55 h.

Snyder, C. S., T.W. Bruulsema, T.L. Jensen, and P.E. Fixen. 2009. Review of greenhouse gas emissions from crop production systems and fertilizer management effects. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 133: 247-266.

Stanford, G. 1973. Rationale for optimum nitrogen fertilization in corn production. *Journal of Environmental Quality* 2(2): 159-166.

Stewart, W.M. 2007. Consideraciones en el uso eficiente de nutrientes. IPNI (International plant nutrition Institute) *Informaciones Agronómicas* 67: 1-7.

Teasdale, J.R., A.A. Abdul-Baki and Y. Bong Park. 2008. Sweet corn production and efficiency of nitrogen use in high cover crop residue. *Agronomy for Sustainable Development* 28(4): 559-565.

Terrada, M.M., L. Benavides and S.C. López. 2014. Ammonia volatilization losses from urea fertilizer applied on wheat. pp. 25-29. *In: International symposium on Managing soils for food security and climate change adaptation and mitigation*. FAO – IAEA. Italia, Roma. 410 p.

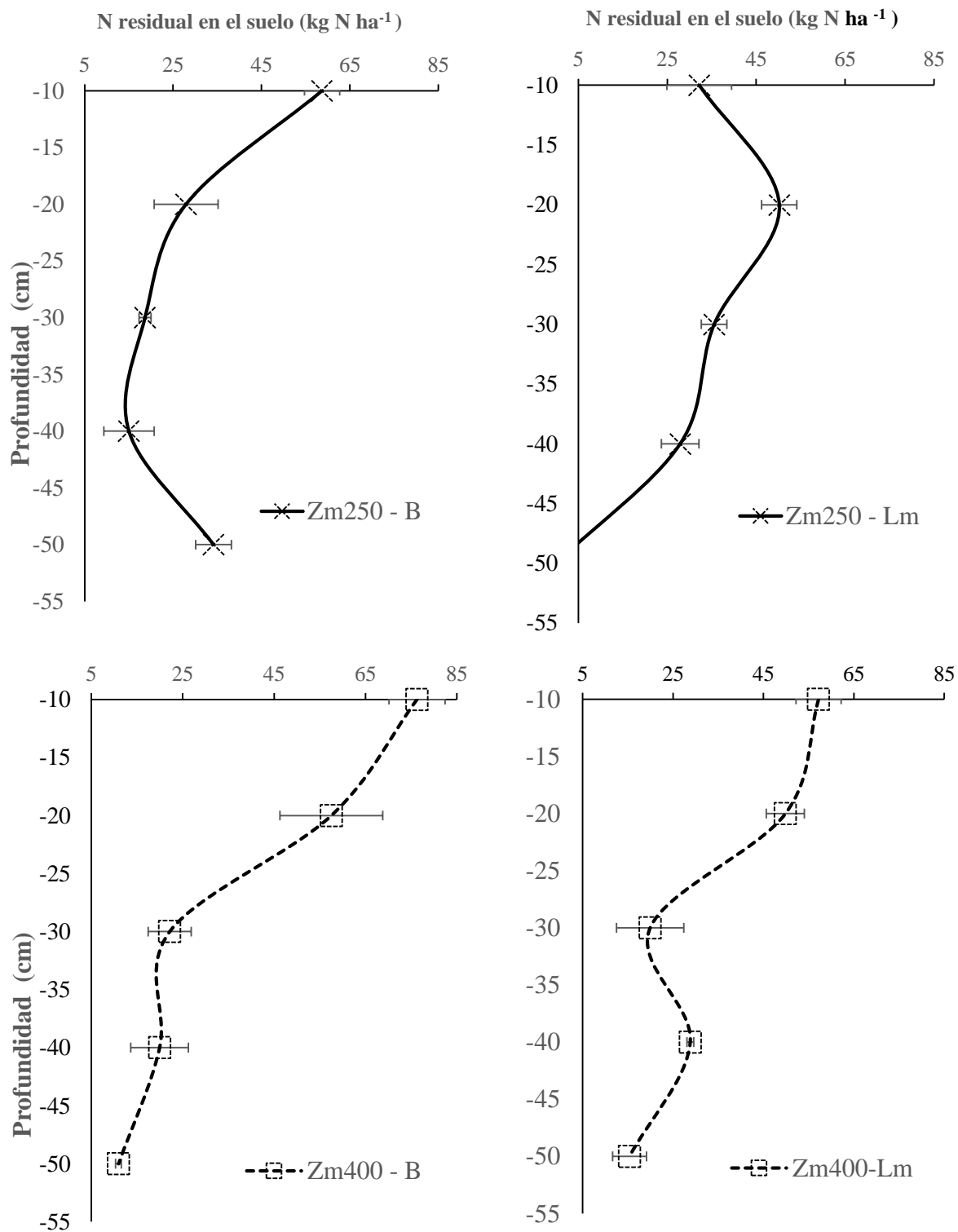
Van Groenigen, J.W., G.L. Velthof, O. Oenema, K.L. Van Groenigen, and C. Van Kessel. 2010. Towards an agronomic assessment of N₂O emissions: a case study for arable crops. *European Journal of Soil Science* 61(6): 903-913.

Vázquez, N., A. Pardo, M.L. Suso, and Quemada M. 2006. Drainage and nitrate leaching in processing tomato under drip irrigation and plastic mulching. *Agriculture Ecosystems and Environment* 112: 313-323.

Zagal E., N. Rodríguez, I. Vidal y G. Hofmann. 2003. Eficiencia de uso y dinámica del nitrógeno en una rotación con y sin uso de residuos. *Agricultura Técnica (Chile)* 63(3): 293-310.

Zaman, M., M.M. Bardour, M.H. Turnbull, and L.V. Kurepin. 2014. Influence of fine particle suspension of urea and urease inhibitor on nitrogen and water use efficiency in grassland using nuclear techniques. 29 – 33 pp. *In: International Symposium on Managing soils for food security and climate change adaptation and mitigation*. FAO – IAEA. Italia, Roma . 410 p.

APÉNDICES

Apéndice 1. Nitrógeno residual presente en el perfil del suelo para los distintos tratamientos.

Apéndice 2. Contenido de nitrógeno residual en profundidad del perfil de suelo.

Profundidad (cm)		0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 50
		kg N ha ⁻¹				
Rotación de cultivo	Lm	44,48 ± 6,84 b	50,01 ± 2,58	27,74 ± 4,98	28,36 ± 1,92	7,68 ± 3,82 a
	B	67,48 ± 5,11 a	42,73 ± 8,92	20,40 ± 2,33	17,48 ± 3,96	22,55 ± 5,50 b
Dosis kg N ha ⁻¹	400	66,73 ± 5,54 a	53,69 ± 5,64 a	27,09 ± 3,96	24,38 ± 3,46	17,07 ± 1,96
	250	45,44 ± 6,99 b	39,06 ± 6,19 b	21,04 ± 4,03	21,46 ± 4,28	13,16 7,85
Rotación		0,007	0,311	0,108	0,062	0,002
Dosis		0,010	0,068	0,171	0,562	0,207
Rotación*dosis		0,541	0,064	0,049	0,689	0,004

¹Valores promedio de cada variable ± error estándar. Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticas significativas entre los niveles de cada factor. En base a las comparaciones múltiples de LSD Fischer ($\alpha \leq 0,05$); *p value* ($< 0,05$) corresponde al efecto de los factores rotación de cultivo y dosis de N e interacción de los factores.

Apéndice 3. Contenido de NID total e intensidad de emisión al final de la temporada de maíz

		NID total ¹	Intensidad de emisión ²
		kg N ha ⁻¹	kg NID / Mg ha ⁻¹
Rotación de cultivo	Lm	120,74 ± 27,86	7,05 ± 1,45
	B	128,49 ± 21,33	6,58 ± 0,92
Dosis kg N ha ⁻¹	400	177,34 ± 8,96 a	9,29 ± 0,56 a
	250	71,89 ± 6,76 b	4,34 ± 0,45 b
Rotación		0,437	0,419
Dosis		0,005	0,000
Rotación*dosis		0,330	0,086

^{1,2}Valores promedio de cada variable ± error estándar. Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticas significativas entre los niveles de cada factor. En base a las comparaciones múltiples de LSD Fischer ($\alpha \leq 0,05$). *p value* ($< 0,05$) corresponde al efecto de los factores rotación de cultivo y dosis de N e interacción de los factores.

Apéndice 4. Contenido de amonio (NH_4^+), nitrato (NO_3^-) y nitrógeno inorgánico disuelto (NID) lixiviados en la temporada (primavera – verano 2018-19).

Factores		NH_4^+	NO_3^-	NID
		kg N ha ⁻¹		
Cultivo cubierta	Lm	9,99 ± 1,19 a	22,98 ± 4,30	30,12 ± 4,83 a
	B	4,76 ± 4,17 b	19,08 ± 3,90	32,19 ± 5,92 a
Dosis de N (kg ha⁻¹)	400	10,95 ± 4,14 a	27,89 ± 5,17 a	44,34 ± 6,69 a
	250	3,80 ± 1,18 b	14,17 ± 1,92 b	17,97 ± 1,92 b
Tiempo	1 V7	14,85 ± 7,53 a	41,23 ± 7,93 a	53,75 ± 10,59 a
	2 V9	6,29 ± 0,87 b	19,62 ± 2,51 b	18,20 ± 2,61 c
	3 VT	5,48 ± 2,08 b	15,32 ± 1,62 bc	18,20 ± 2,59 c
	4 R5	2,88 ± 3,94 b	7,94 ± 3,78 c	34,46 ± 5,74 b
Cultivo		0,038	0,234	0,625
Dosis		0,006	0,002	0,001
Tiempo		0,007	0,001	0,001
Cultivo * Dosis		0,597	0,118	0,456
Cultivo * Tiempo		0,766	0,198	0,649
Dosis * Tiempo		0,031	0,001	0,001
Cultivo * Dosis x Tiempo		0,485	0,438	0,141

¹ Valor promedio en los niveles de cada factor ± error estándar. Letras diferentes en la columna indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos. En base a las comparaciones múltiples de LSD Fischer ($\alpha \leq 0,05$); *p value* (< 0,05) corresponde a los factores rotación de cultivo, dosis de N y tiempo.

Apéndice 5. Comparación de medias entre nitrato (NO_3^-) y nitrógeno inorgánico disuelto (NID) en los lixiviados en la temporada (primavera – verano 2018-19).

Tratamiento	Tiempo	Contenido promedio			
		NO_3^-		NID	
		kg N ha ⁻¹			
Zm ₂₅₀ -Lm	1 V7	22,91 ± 5,92	cde	22,91 ± 5,92	de
	2 V9	15,85 ± 4,61	cde	17,77 ± 3,26	e
	3 VT	5,34 ± 4,64	f	6,05 ± 4,30	e
	4 R5	10,04 ± 3,21	ef	14,72 ± 2,27	e
Zm ₄₀₀ -Lm	1 V7	68,37 ± 1,52	a	75,44 ± 5,17	ab
	2 V9	11,03 ± 3,48	def	13,66 ± 4,91	e
	3 VT	8,12 ± 1,31	f	31,34 ± 0,09	de
	4 R5	42,17 ± 8,89	b	59,07 ± 8,58	bc
Zm ₂₅₀ -B	1 V7	15,27 ± 7,06	def	18,50 ± 6,87	e
	2 V9	22,78 ± 3,84	cd	28,01 ± 5,28	de
	3 VT	7,58 ± 0,50	f	18,78 ± 7,17	e
	4 R5	10,59 ± 1,62	ef	17,03 ± 2,07	e
Zm ₄₀₀ -B	1 V7	33,94 ± 17,66	bc	94,98 ± 9,68	a
	2 V9	10,72 ± 2,14	ef	13,38 ± 4,17	e
	3 VT	8,63 ± 3,95	ef	16,61 ± 2,90	e
	4 R5	15,68 ± 1,10	cde	47,03 ± 9,15	cd
<i>p-value</i> ²		0,002		0,005	

¹Valores promedio de cada variable ± error estándar. Letras minúsculas diferentes en sentido vertical indican diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos medidos en el tiempo. En base a la prueba de comparaciones múltiples de LSD Fischer ($\alpha \leq 0,05$). *p-value* correspondiente al efecto de los factores dosis+ efecto rotación de cultivo y tiempo.

ANEXOS

Anexo 1. Descripción morfológica del sitio de estudio (Rossi, 2017).

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción morfológica
A _p	0–37	Pardo oscuro (10 YR 3/3); franco arcillo limosa; muy plástico; muy adhesivo; bloques subangulares medios y gruesos moderados; poros finos y medios abundantes; raíces finas y medias comunes; gravas angulares y redondeadas escasas (<5%); fuerte reacción al HCl; límite lineal abrupto.
C	37–55	Variiegado; arenosa; no plástico; no adhesivo; bloques subangulares medios y finos débiles; poros muy finos abundantes; raíces finas y medias escasas; reacción moderada al HCl; límite lineal abrupto.
2C	55–65+	Pardo amarillento oscuro (10 YR 3/4); arcillo limosa; muy plástico; muy adhesivo; maciza; poros muy finos abundantes; raíces medias y finas comunes; fuerte reacción al HCl.

Anexo 2. Caracterización de propiedades físicas del sitio de estudio (Rossi, 2017).

Propiedades físicas e hidráulicas del suelo ^{1 2}													
Horiz. (prof.)	Textura				Clase textural	Da	Dr	Contenido volumétrico de agua					K _{sat}
	A	L	a					33 kPa	1500 kPa	PDR	PDL	AA	
cm	--- % ---				--- Mg m ⁻³ ---	-----cm ³ cm ⁻³ -----					cm h ⁻¹		
Ap ₍₀₋₄₂₎	20,9	44,7	34,4	F	1,42 ± 0,02	2,40	0,30 ± 0,02	0,15 ± 0,00	0,10 ± 0,02	0,06 ± 0,00	0,15 ± 0,02	11,88 ± 13,32	
C ₍₄₂₋₇₀₎	5,3	16,9	77,8	aF	1,38 ± 0,03	2,65	0,20 ± 0,02	0,06 ± 0,01	0,21 ± 0,02	0,07 ± 0,00	0,14 ± 0,03	17,64 ± 13,32	
2C ₍₇₀₋₉₀₎	25,1	42,9	32,0	F	1,31 ± 0,06	2,72	0,28 ± 0,02	0,17 ± 0,01	0,12 ± 0,01	0,11 ± 0,00	0,11 ± 0,00	–	

¹ Valores corresponden a promedio ± error estándar (n = 3)² Da, densidad aparente; Dr, densidad real; 33 kPa (CC), capacidad de campo; 1500 kPa (PMP), punto de marchitez permanente; PDR, poros de drenaje rápido; PDL, poros de drenaje lento; AA, agua aprovechable; K_{sat}, conductividad hidráulica a saturación (n = 13).

Anexo 3. Caracterización de propiedades químicas del sitio de estudio (Rossi, 2017).

Propiedades químicas del suelo								
Horizonte / Profundidad			pH (1:2,5 m/v)		TDC	TOC	TDN	C:N
	MO	CE	H ₂ O	KCl				
cm	%	dS m ⁻¹	----- mg kg ⁻¹ -----					
Ap (0–22)	1,12	0,97	8,99	7,56	115,38	103,72	19,99	6
C (42–70)	0,19	1,1	8,1	7,7	28,51	15,07	9,22	3
2C (70–90)	0,52	1,82	8,74	7,58	23,2	11,39	6,6	4

Anexo 4. Caracterización de propiedades químicas del sitio de estudio, continuación (Rossi, 2017).

Propiedades químicas del suelo									
Horizonte / Profundidad	Nutrientes disponibles					Cationes de intercambio			
	Cu	Fe	Mn	P-Olsen	Zn	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
cm	-----mg kg ⁻¹ -----					-----cmol(+) kg ⁻¹ -----			
Ap (0–22)	4,04	5,99	5,56	12,6	1,38	–	–	0,2	2,2
C (42–70)	0,8	4,41	1,24	0,5	0,33	21,3	2,3	0,5	0,6
2C (70–90)	2,06	6,99	2,03	1,5	0,63	19,5	2,1	0,7	0,5