

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**IMPACTO DE LA APLICACIÓN DE FERTILIZANTES NITROGENADOS EN LA
LIXIVIACIÓN Y ABSORCIÓN DE NITRÓGENO EN UN SUELO DE TEXTURA
GRUESA CULTIVADO CON MAÍZ GRANO EN LA REGIÓN DE O'HIGGINS**

NATALY DAIANA APABLAZA GONZÁLEZ

Santiago, Chile

2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

Memoria de Título

**IMPACTO DE LA APLICACIÓN DE FERTILIZANTES NITROGENADOS EN LA
LIXIVIACIÓN Y ABSORCIÓN DE NITRÓGENO EN UN SUELO DE TEXTURA
GRUESA CULTIVADO CON MAÍZ GRANO EN LA REGIÓN DE O'HIGGINS**

**IMPACT OF NITROGEN FERTILIZER APPLICATIONS IN THE NITROGEN
LEACHING AND UPTAKE IN A COARSE-TEXTURED SOIL CULTIVATED
WITH MAIZE IN THE O'HIGGINS REGION**

NATALY DAIANA APABLAZA GONZÁLEZ

Santiago, Chile

2014

UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRONÓMICAS
ESCUELA DE PREGRADO

**IMPACTO DE LA APLICACIÓN DE FERTILIZANTES NITROGENADOS EN LA
LIXIVIACIÓN Y ABSORCIÓN DE NITRÓGENO EN UN SUELO DE TEXTURA
GRUESA CULTIVADO CON MAÍZ GRANO EN LA REGIÓN DE O'HIGGINS**

Memoria para optar al título profesional de:
Ingeniera Agrónoma

NATALY DAIANA APABLAZA GONZÁLEZ

PROFESOR GUÍA	Calificaciones
Sr. Osvaldo Salazar Guerrero. Ingeniero Agrónomo, MS. Ph. D.	7,0
PROFESORES EVALUADORES	
Sra. Yasna Tapia Fernández. Ingeniera en Alimentos, Dra.	6,4
Sr. Ricardo Pertuzé Concha Ingeniero Agrónomo, Ph. D.	6,7

Santiago - Chile
2014

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a todas las personas que de una u otra forma se cruzaron en mi camino estos últimos años, quedándose y siendo parte del proceso. A mi profesor guía Osvaldo Salazar por brindarme su apoyo en lo académico en cada momento que era necesario y por las oportunidades de acercarme al mundo laboral.

A mi familia, en especial a mis papas, que siempre han sido y serán un pilar fundamental en cualquier cosa que me proponga, por su amor y apoyo incondicional. A mis abuelas, que a pesar de la distancia sé que siempre han de estar presente.

A mi pololo Gastón, por no dejarme caminar sola, por estar en las buenas y no tan buenas, en los momentos de alegrías y colapsos, y sobre todo por su amor. A mis amigas y amigos que han sido un apoyo en todo momento, dándome alegrías y buenos momentos.

A todo el equipo de trabajo del Laboratorio de Química de Suelos y Aguas, en especial a Sra. Consuelo, Sra. Marisol, Ricardo, Canco y Prof. Yasna, que me han enseñado con paciencia y humildad cosas del laboratorio y sobre todo de la vida, agradecerles por su cariño gratuito.

ÍNDICE

	Páginas
RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
Objetivo general.....	5
Objetivos específicos.....	5
MATERIALES Y MÉTODOS.....	6
Lugar de estudio.....	6
Materiales.....	7
Descripción de los tratamientos y diseño experimental.....	7
Lixiviación de N.....	9
Uso de clorofilómetro y tabla Munsell.....	10
Mineralización neta de N.....	11
Balance de N.....	11
Análisis estadístico.....	12
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	13
Balance de N.....	14
Absorción.....	16
Aporte de N por riego.....	17
Lixiviación de N.....	17
Uso de clorofilómetro y tabla Munsell.....	19
Mineralización neta de N.....	20
Pérdidas Gaseosas.....	24
CONCLUSIONES.....	26
BIBLIOGRAFÍA.....	27
ANEXO.....	31
Anexo I. Descripción morfológica del suelo del estudio.....	31
Anexo II. Propiedades físicas y químicas de suelos en San Luis.....	32
APÉNDICE.....	33
Apéndice I. Aporte de N por vía riego, durante la temporada de crecimiento del maíz.....	33
Apéndice II. Concentraciones de N en muestras de FullStop™, durante la temporada de riego.....	34

RESUMEN

En las últimas décadas la población ha experimentado un crecimiento significativo y junto con ello sus necesidades de optimizar la producción de alimentos. Dentro de los insumos necesarios para aumentar la producción, destacan los fertilizantes nitrogenados que muchas veces causan contaminación al ambiente por su uso excesivo. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de la aplicación de fertilizantes nitrogenados en los procesos de lixiviación y extracción de nitrógeno (N) en un suelo de textura gruesa con cultivo de maíz para grano. Además se evaluó si la cantidad de N absorbido por el maíz tiene un efecto sobre el contenido relativo de clorofila (CCI) y el color Munsell de las hojas. El estudio se realizó en la Comuna de Pichidegua localizada en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. Se establecieron tres tratamientos, cada uno corresponde a una micro parcelas que consideró como variables la aplicación de N y la presencia de maíz: T0, sin maíz y 0 kg de N; T1, maíz y 0 kg de N; y T2, maíz y 442 kg de N. La instalación de los tratamientos se realizó la primera quincena de octubre 2012 con la siembra del cultivo de maíz, y la cosecha la primera quincena de abril 2013. Para establecer un balance de N en cada tratamiento se utilizaron lisímetros Fullstop™ para medir la lixiviación de N, PVC-tubos de mineralización *in situ*, muestras de suelo en el intervalo de profundidad 0-125 cm y determinación de la concentración de N en los tejidos para cuantificar la absorción de N. Se encontraron diferencias significativas ($p < 0,05$) entre T1 y T2 en la producción de granos con valores de 67 qqm ha⁻¹ y 146 qqm ha⁻¹, respectivamente. Además, se mostraron diferencias significativas ($p < 0,05$) en la absorción de N en los tratamientos T1 y T2 con valores de 113 kg N ha⁻¹ y 237 kg N ha⁻¹, respectivamente. Los tratamientos con maíz mostraron una pérdida menor de N por lixiviación comparado con T0, debido a la absorción de N por parte de las raíces a distintas profundidades. En los tratamientos T1 y T2 se identificó una dominancia de los procesos de inmovilización de N en el suelo. Se encontraron valores significativamente más altos ($p < 0,05$) de CCI y color Munsell en hojas del tratamiento con fertilización N (T2) respecto al no fertilizado (T1). Además, se estableció una correlación alta ($r = 0,77$) entre el CCI y el color Munsell en hojas de maíz. La aplicación de fertilizantes N no mostró un efecto significativo en la lixiviación de N, sin embargo, se determinó que la salida más importante de N es por extracción de granos cosechados.

Palabras claves: Fertilizantes nitrogenados, suelos textura gruesa, lixiviación, absorción, nitrógeno, maíz para grano.

ABSTRACT

During the last decades, the human population has been increasing together with its requirement for optimization of food production. Among the inputs for increasing production, it is possible to highlight nitrogen (N) fertilizers that are usually related to environment pollution processes due to high N surplus. The objective of this study was to evaluate the effect of the N fertilizer application in N leaching and N uptake in a coarse-textured soil cultivated with maize. Moreover, it was evaluated if the amount of N uptake had an effect in chlorophyll content index (CCI) and Munsell colour in leaves. It was carried out in the Pichidegua Commune located in the Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. There were set three treatments, each one was a micro-plot considering as variables N application and presence of maize crop: T0, without maize and 0 kg of N; T1, maize and 0 kg of N; and T2, maize and 442 kg of N. The treatment setting was performed in early october 2012 with the maize seeding, and it was harvested in early april 2013. There was calculated a N budget in each treatment using Fullstop lysimeters for N leaching, PVC-tubes for in situ N mineralization, soil coring in the 0-125 cm depth interval and N determination in vegetal tissues for N uptake. It was found that T1 and T2 showed significant differences ($p < 0.05$) in the grain yield with 67 qqm ha⁻¹ and 146 qqm ha⁻¹, respectively. Furthermore, there were significant differences ($p < 0.05$) between N uptake in treatments T1 and T2 with 113 kg N ha⁻¹ and 237 kg N ha⁻¹, respectively. The treatments with maize showed lower N leaching than T0 due to the N uptake by roots at different depths. In T1 and T2 treatments were identified a dominance of N immobilization in the soil. There were significantly ($p < 0.05$) higher CCI and colour Munsell values in leaves N fertilization treatment (T2) respect to unfertilized (T1). Moreover, it was found a strong correlation ($r = 0.77$) between the CCI and the Munsell color for maize leaves. N fertilizer application showed no significant effect on the leaching of N, however, it was determined that the largest N is output by uptake of harvested grain.

Key words: Nitrogen fertilizers, coarse-textured soils, leaching, uptake, nitrogen, grain maize.

INTRODUCCIÓN

El creciente aumento de la población a nivel mundial se ha traducido en la necesidad de un mayor requerimiento de alimentos. En la actualidad existe preocupación por optimizar los procesos de obtención de estos productos, a través de la entrega de agua y elementos esenciales para que los cultivos puedan alcanzar rendimientos más altos (Rong y Xuefeng, 2011). Claramente, el elemento más demandado por los cultivos es el nitrógeno (N), el que es absorbido por las plantas desde la solución suelo en sus formas inorgánicas como amonio (NH_4^+) o nitrato (NO_3^-). Es importante considerar que también existen adiciones de N mineral al suelo por procesos de fijación simbiótica o no simbiótica por microorganismos y mineralización de formas orgánicas en el suelo, o adiciones por vías externas, como por ejemplo, aporte de rastrojos que son incorporados, adiciones atmosféricas y aporte por el riego (Robertson y Vitousek, 2009). Sin embargo, generalmente estos aportes no son suficientes para satisfacer la demanda de N de cultivos intensivos de altos rendimiento y es necesario aplicar fertilizantes nitrogenados (Havlin *et al.*, 2014). Por lo tanto, es necesario realizar un balance de N que considere las adiciones (1) antes mencionadas, salidas (absorción (4), desnitrificación (6), volatilización (7) y lixiviación (5)) y procesos internos (mineralización/inmovilización (2) y nitrificación (3)) del sistema suelo-planta para calcular la dosis de aplicación de fertilizantes nitrogenados (Figura 1).

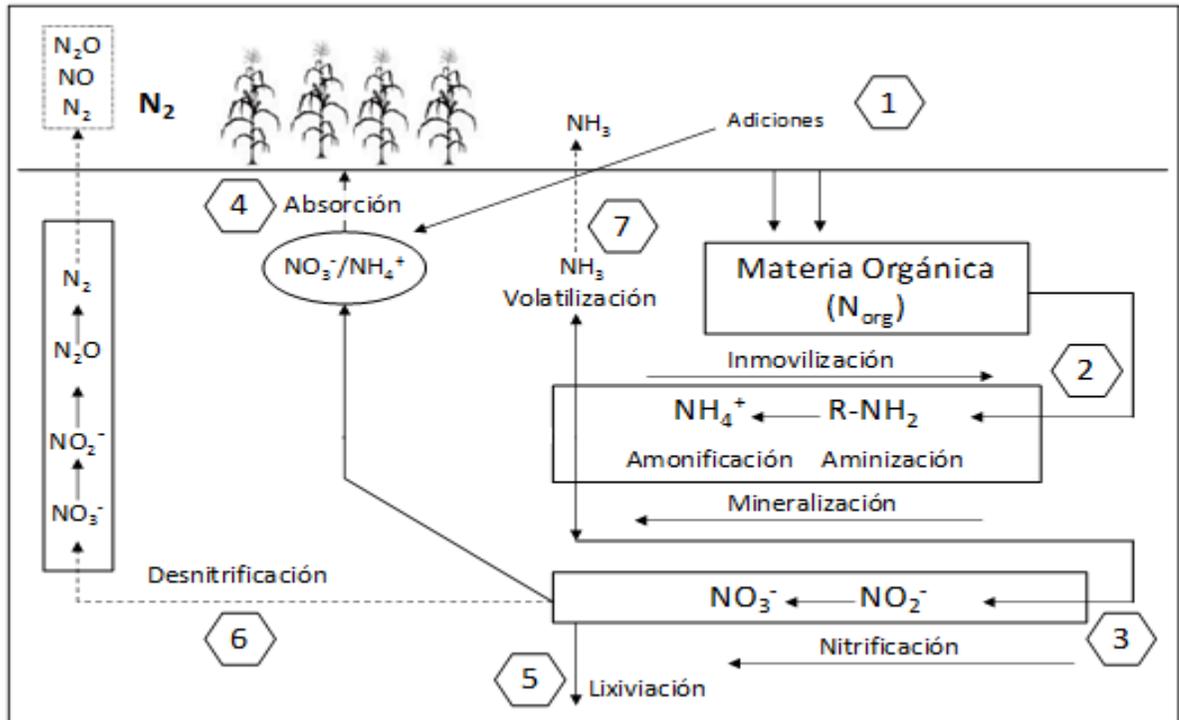


Figura 1. Ciclo del nitrógeno en el suelo (adaptado de Havlin *et al.*, 2014).

A pesar de los diversos aportes de N al sistema suelo-planta, se destaca la fertilización nitrogenada como el aporte de mayor importancia durante el crecimiento y desarrollo de los

cultivos. La fertilización con N ha permitido aumentar considerablemente los rendimientos y satisfacer las necesidades alimenticias de la población durante las últimas décadas (IIDS-Italia, 2009).

Sin embargo, debido al uso intensivo de fertilizantes, es necesaria su aplicación de forma eficiente y controlada para no incurrir en pérdidas sustanciales de nutrientes al ambiente. En este sentido, los fertilizantes nitrogenados en Chile y en el resto del mundo han sido utilizados habitualmente en dosis mayores a las que son recomendadas, las que son generalmente establecidas por tablas de referencia sin considerar muchas veces el estado de desarrollo del cultivo y los aportes desde el suelo y el ambiente (Gomiero *et al.*, 2011). De esta forma, ésta práctica ha llevado a una baja eficiencia en la aplicación de fertilizantes nitrogenados, aportando cantidades innecesarias que no son absorbidas por la planta y que tienden a perderse en el ambiente a través de la lixiviación en profundidad, o por pérdidas gaseosas (Salazar y Nájera, 2011). Robertson y Vitousek (2009) destacan que debido a la alta movilidad del N en el suelo, principalmente como NO_3^- , es que se generan estas pérdidas, quedando muchas veces el N a profundidades inalcanzables para ser absorbidas por las raíces, asumiendo que esta forma de N ha salido del sistema, proceso de pérdida denominado lixiviación de N (Havlin *et al.*, 2014).

La utilización eficiente del N suministrado al cultivo, es fundamental para la disminución de los costos en la agricultura (Berenguer *et al.*, 2009), evitar la contaminación de cuerpos de agua cercanos al predio, y obtener rendimientos similares con dosis de N menores (Vitousek *et al.*, 1997). Pérdidas significativas de N como lixiviación y extracción desde la planta se ven favorecidas en suelos de texturas gruesas (Havlin *et al.*, 2014), como por ejemplo en suelos que se encuentran en las terrazas aluviales de los valles de la Región de O'Higgins (Casanova *et al.*, 2013). En este tipo de suelos la percolación de agua es rápida dentro del perfil y poseen además una retención menor que favorece el movimiento de compuestos solubles como el NO_3^- hacia capas más profundas (Zotarelli *et al.*, 2007).

Por otra parte, Robertson y Vitousek (2009) señalan que una cantidad importante del N que es aplicado como fertilizante puede ser absorbido y exportado del sistema por el producto cosechado. Por esto, es necesario contar con herramientas no destructivas que permitan cuantificar la absorción de N durante los distintos estados fenológicos de los cultivos y así poder establecer las curvas de demanda que permitan optimizar las aplicaciones de fertilizantes nitrogenados (Huan *et al.*, 2010). Dentro de estas herramientas destacan los clorofilómetros, los que han sido utilizados en numerosos estudios en el cultivo de maíz, principalmente debido a la gran cantidad de N utilizado en este cultivo (Novoa y Villagran, 2002). Este es un instrumento que actúa en tiempo real y tiene la capacidad de detectar la concentración relativa de clorofila la cual puede ser correlacionada directamente con el nivel de N en las hojas (Huan *et al.*, 2010). Esto permite por ejemplo, la cuantificación de las concentraciones de NO_3^- que estarían presentes en las hojas (Liu y Wiatrak, 2012). El instrumento además, permite construir una curva de absorción del N a partir de los datos entregados durante el desarrollo del cultivo, pudiendo estimar los periodos donde se deben hacer aplicaciones de N, sin embargo, éste no entrega la dosis exacta para suplir aquella deficiencia (Novoa y Villagran, 2002).

Uno de los cultivos más importantes tanto a nivel mundial como nacional es el maíz (*Zea mays* L.), de la variedad *indentata* (*dent corn*) utilizado principalmente para la alimentación animal de aves y cerdos. A nivel nacional esta especie se cultiva bajo condiciones de riego, mientras que en otros países se cultiva en secano. El maíz es uno de los cultivos con mayor eficiencia en el uso de agua (EUA) y eficiencia en el uso de la radiación (EUR), debido a su condición de planta C4 (Faraldo *et al.*, 2011). Además, de utilizar una alta fertilización nitrogenada para la obtención de altos rendimientos (Domínguez *et al.* 2001). Es por esta razón que es necesaria la cuantificación de las posibles pérdidas de N al ambiente proveniente de fertilizantes nitrogenados. Estas salidas pueden ser por absorción de los granos que son cosechados y especialmente por los altos volúmenes de agua que se utilizan en el riego por surcos, transportando principalmente NO_3^- por lixiviación o escurrimiento superficial.

En suelos de textura gruesa cultivados con maíz para grano en la Región de O'Higgins es necesaria la cuantificación de las dos principales salidas de N desde el suelo: N exportado en la cosecha (absorción) y N perdido por lixiviación. Esto es indispensable para poder realizar aplicaciones óptimas de fertilizantes nitrogenados al cultivo cuando éste lo requiera, según sus estados fenológicos, evitando pérdidas que podrían generar impactos negativos en el ambiente.

La hipótesis planteada en esta investigación consiste que a partir de la cuantificación de la lixiviación y absorción de N del sistema suelo-planta, es posible mejorar la eficiencia de la fertilización nitrogenada para el cultivo de maíz grano en suelos de textura gruesa.

Por otra parte, el objetivo general que se plantea es evaluar el efecto de la aplicación de fertilizantes nitrogenados en los procesos de lixiviación y absorción de nitrógeno en un suelo de textura gruesa con cultivo de maíz para grano.

Los objetivos específicos son los siguientes:

- Establecer un balance de N en cada tratamiento para cuantificar la importancia de las salidas de N del sistema suelo-planta por los procesos de absorción y lixiviación
- Evaluar si la cantidad de N absorbido por el maíz tiene un efecto sobre la concentración de clorofila y el color de las hojas.

MATERIALES Y MÉTODO

Lugar de estudio

El estudio se realizó en la zona del valle central interior, comuna de Pichidegua localizada en la Región del Libertador General Bernardo O'Higgins. El predio se ubica específicamente en la localidad de San Luis en la rivera del río Tinguiririca ($34^{\circ}22' S$, $71^{\circ}25' O$, altitud 124 m). El manejo en campo correspondió a un monocultivo de maíz de grano durante el periodo octubre-abril, bajo una condición de riego por surcos, y el resto del tiempo se mantiene el predio en barbecho.

El clima de la zona se clasifica como Mediterráneo semiárido con veranos cálidos e inviernos relativamente fríos, con una precipitación media anual de 696 mm (Santibáñez y Uribe, 1993). Se caracteriza por presentar una estación seca prolongada, con alrededor de siete meses en ausencia de lluvias, concentrándose el 80% de las precipitaciones entre los meses de mayo y agosto (DMC, 2012).

Durante la temporada 2011-2012, en el sitio de estudio, se aplicaron 600 kg ha^{-1} de mezcla maicera comercial (20-15-15) y 700 kg ha^{-1} de urea, con un aporte total de N de 442 kg N ha^{-1} . La cosecha se realizó la primera quincena de mayo de 2012, con un rendimiento de grano de 155 qqm ha^{-1} .

El suelo se describió previamente en cuanto a sus características morfológicas (Anexo 1) y en término de sus propiedades químicas (pH, conductividad eléctrica, materia orgánica y capacidad de intercambio catiónico) y físicas (textura, densidad aparente y retención de agua a capacidad de campo y punto de marchitez permanente) por horizonte (Anexo 2), dentro de las actividades del Proyecto FONDECYT de Iniciación 2011 N° 11110464 (Rojas, 2014).

En base a la información colectada se determinó que el suelo del sitio corresponde a terrazas aluviales no diferenciadas (CIREN - Chile, 2002) y fue clasificado como Typic Xerochrepts. En términos generales la principal limitante del suelo para el cultivo del maíz es el bajo contenido de materia orgánica a lo largo del perfil, generando que la fertilidad del suelo disminuya al estar menos disponibles los micronutrientes y de elementos como el N que pueden ser absorbidos por la planta. El perfil se caracteriza por presentar texturas de franco arenosa a arenosa, lo que permite que la infiltración sea mayor y la pérdida de nutrientes por lixiviación aumente, requiriendo cantidades de agua mayor y riegos más frecuentes. El suelo presenta un pH neutro y una condición no salina, lo cual indica condiciones óptimas para el crecimiento del cultivo de maíz (Faiguenbaum, 2003).

Materiales

En este estudio se establecieron tres micro parcelas en el predio, durante un periodo de estudio comprendido entre octubre de 2012 y abril de 2013. Las micro parcelas fueron sembradas con maíz de grano, utilizando la variedad comercial 33Y74 (Pionner), realizándose la siembra del ensayo en forma manual, utilizando una densidad igual de plantas para cada una.

En cada micro parcela se establecieron tres detectores de frente de avance de agua modelo FullStop™, los cuales estaban compuestos por un embudo plástico conectado a una base con filtro de malla fina de acero y una manguera flexible hacia la superficie, con el fin de extraer por esta manguera el agua lixiviada con sustratos desde el suelo para su posterior análisis.

En profundidad junto con el FullStop™, se instalaron tres sensores de contenido de agua marca Decagon™ en distintas profundidades: 25, 50 y 100 cm, además de un sensor de temperatura de suelo marca Decagon™ instalado a 25 cm. Los sensores se instalaron en cada micro parcela, y un datalogger colectó la información, para relacionarla con el contenido de agua en el suelo y su movimiento dentro del perfil.

Se utilizó un clorofilómetro marca Opti.Science modelo CCM-200, en estados fenológicos específicos para medir el contenido relativo de clorofila (CCI) en las hojas de maíz. Los valores de clorofila fueron relacionados con colores de una tabla Munsell para tejido vegetal, con el objeto de saber la condición de la planta en un estado específico a través del color de sus hojas.

Como materiales adicionales para la toma de muestras se utilizaron botellas plásticas de 100 ml para el traslado de las muestras de agua colectadas por los FullStop™, además de una jeringa 100 mL para la extracción de las mismas. Por otra parte, se utilizó un barreno holandés para el muestreo de suelos en cada micro parcela a distintas profundidades al inicio y final de la temporada del cultivo.

Todas las muestras de suelo, agua y tejido colectadas en este estudio fueron procesadas y analizadas en las instalaciones del Laboratorio de Química de Suelos y Aguas de la Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile.

Descripción de los tratamientos y diseño experimental

Se establecieron tres tratamientos, cada uno corresponde a una micro parcela (Figura 2) que considera como variables la fertilización con N y la presencia del cultivo de maíz (Cuadro 1). La instalación de los tratamientos se realizó la primera quincena de octubre 2012 con la siembra del cultivo de maíz.

Cuadro 1. Descripción de los tratamientos evaluados.

Tratamiento	Cultivo	Dosis
		--- kg N ha ⁻¹ ---
T0	Barbecho	0
T1	Maíz	0
T2	Maíz	442

Las micro parcelas presentaron dimensiones de 4,0 m x 2,8 m, dentro de las cuales se establecieron 8 plantas de maíz para grano por metro lineal. En cada micro parcela se situaron tres hileras separadas a 70 cm, contando con 33 plantas por hilera a una distancia sobre hilera de 12 cm y sembradas a una profundidad de 10 cm aproximadamente. Además, se consideró una eficiencia del 40%, considerando pérdidas por maquinaria de siembra, emergencia y calidad de la semilla. Cada micro parcela se mantuvo bajo riego por surcos con una frecuencia y volumen de agua manejado por el agricultor (Apéndice I), las cuales se verificaron con los sensores de movimiento de agua en el suelo instalados en cada tratamiento.

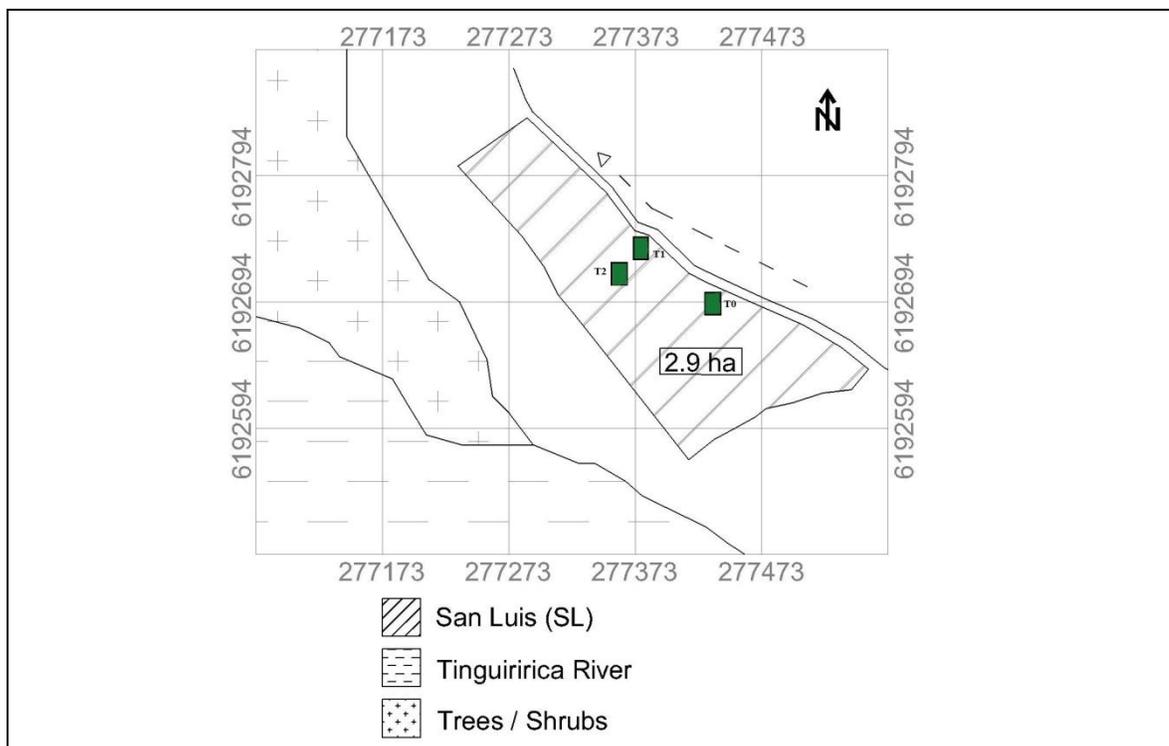


Figura 2. Distribución espacial de los tratamientos (T1 y T2) y testigo (T0) en el predio, localizado en la comuna de Pichidegua, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins.

Se utilizó un diseño de medidas repetidas, donde cada micro parcela correspondió a un tratamiento, separados espacialmente en el mismo predio existiendo en cada micro parcela tres repeticiones para cada variable a medir.

Lixiviación de N

Se instalaron tres detectores de frente de humedad FullStop™ a 100 cm de profundidad para determinar las pérdidas de N por lixiviación. Estos instrumentos se situaron bajo la hilera central de cada tratamiento separados a 100 cm uno del otro, como muestra la Figura 3. Las muestras de agua de la solución suelo fueron colectadas ejerciendo succión con una jeringa dentro de las 48 horas posteriores a cada riego o después de cada evento de lluvia.

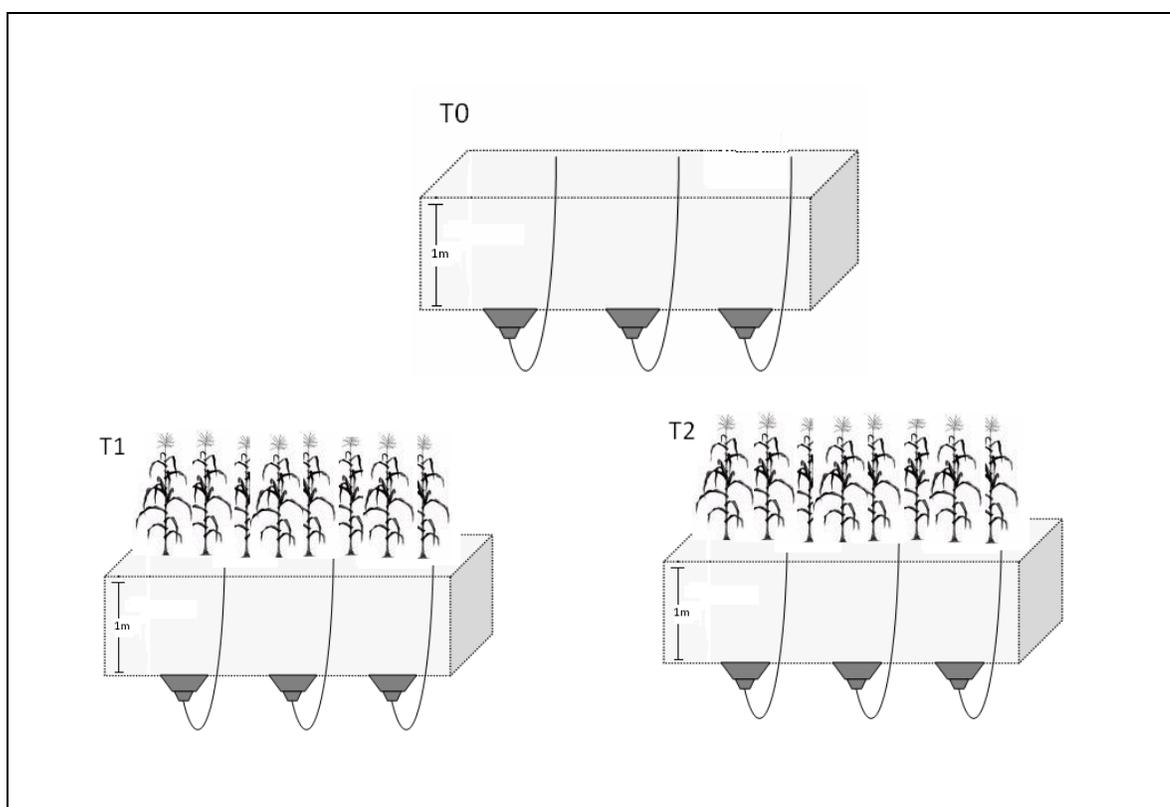


Figura 3. Disposición espacial de los detectores FullStop™, en cada micro parcela según tratamiento y testigo, instalados a 100 cm de profundidad.

El aporte de $N_{NO_3 + NH_4}$ por el agua de riego fue estimado utilizando como parámetro el volumen promedio de agua aplicado en sistemas de riego convencional, para el cultivo de maíz grano en la zona central de Chile. El volumen promedio llega a 17.000 m^3 (Antúnez, 2013) con el cual se extrapoló con las concentraciones de $N_{NO_3+NH_4}$ obtenidas en el cabezal de agua que entra al predio, colectando las muestras de agua cada 15 días durante la temporada de riego del cultivo (octubre-febrero).

Las muestras de agua de riego y las muestras de solución suelo colectadas en el campo fueron guardadas en botellas plásticas de 100 ml y mantenidas en una hielera a 4°C, y transportadas el mismo día al laboratorio donde fueron almacenadas en un refrigerador para ser analizadas dentro de 48 horas. Previo a los análisis, las muestras fueron ambientadas a temperatura de 20°C y posteriormente filtradas utilizando filtros de jeringa impulsada de 0,45 µm libres de NO₃⁻, dando un filtrado claro en el cual se determinaron las formas nitrogenadas. Los niveles de N en las muestras fueron analizados utilizando set de reactivos de la empresa Hach mediante métodos colorimétricos, donde el N-NO₃ fue determinado por el método del ácido cromotrópico y el N-NH₄ mediante el método del salicilato (Hach, 2005). Finalmente la lectura de las concentraciones de N-NO₃ y de N-NH₄ en las muestras de solución suelo se realizaron en un espectrofotómetro marca Hach modelo DR-5000.

La cuantificación de la lixiviación se basa en la siguiente ecuación:

$$\text{Lixiviación (kg N ha}^{-1}\text{)} = \text{Percolación profunda (mm)} * \text{concentración N (mg N L}^{-1}\text{)} \quad (\text{Ec. 1})$$

Por lo que es necesaria la determinación de la percolación profunda en base a las precipitaciones (PP), contenido de humedad del suelo al inicio y final de la temporada ($\Delta W/t$), Riego (R), evapotranspiración del cultivo (Etc) y escurrimiento (SR) que conforman las entradas y salidas al sistema suelo planta de acuerdo a la ecuación:

$$\text{Percolación Profunda} = \text{PP} - \frac{\Delta W}{t} + \text{R} - \text{Etc} - \text{Sr} \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde PP fue estimada a partir de información colectada de una estación meteorológica ubicada en la zona de estudio; ΔW fue medido a partir de muestreos de suelo colectados con barreno y secados en estufa a 105°C, hasta masa constante; R fue estimado a partir de información reportada por el INIA en la región de O'Higgins (Antúnez, 2013); la Etc fue estimada según Allen *et al.* (2006) utilizando variables climáticas de una estación meteorológica ubicada en la zona de estudio; y Sr fue estimado a partir de información reportada por Antúnez (2013).

Uso de clorofilómetro y tabla Munsell

Durante el crecimiento del cultivo se midió en las hojas el CCI a través del clorofilómetro marca Opti-Science modelo CCM-200. Los estados que fueron medidos por el clorofilómetro son: 4° hoja (V4), 6° hoja (V6), 8° hoja (V8) y 10° hoja (V10), permitiendo observar el comportamiento CCI, estableciendo en qué estado se produjo la mayor demanda de N.

El índice de concentración de clorofila (CCI) se refiere a la relación de transmitancia óptica medida entre 931 nm y 653 nm a través de una hoja (Biber, 2007), es decir, la cantidad de luz que atraviesa a una hoja en una determinada longitud de onda.

Por otra parte, se utilizó la tabla de colores Munsell para tejido vegetal para las dos últimas fechas, las cuales se correlacionaron con los valores de CCI. Cabe destacar que para realizar la comparación de colores según tabla Munsell, para los tratamientos con maíz, se les asignó valores referenciales de acuerdo a la posición del color en tabla (Realini, 2014)

Mineralización neta de N

La mineralización neta del N en el suelo se determinó mediante el método propuesto por Raison *et al.* (1987). Se instalaron 12 tubos de PVC de 5 cm de diámetro y 28,5 cm de largo, a una profundidad de 25 cm en cada micro parcela. Los tubos tienen 4 perforaciones de 1 cm de diámetro en sus paredes y están ubicados a 10 y 20 cm desde el extremo superior para permitir el intercambio gaseoso. La parte superior del tubo se cubrió con una tapa plástica, para disminuir riegos de lixiviación. Estos tubos se instalaron en los tres tratamientos. Durante el periodo de estudio se retiraron 3 tubos de cada tratamiento en cuatro fechas: noviembre 2012, enero 2013, febrero 2013, y abril 2013. Al inicio y al final del estudio en las muestras de suelo colectadas desde los tubos de mineralización se cuantificó los niveles de N total por digestión ácida, carbono orgánico (CO) por el método de calcinación y en todas la muestras las concentraciones de N disponible (N-NO₃ + N-NH₄) (Sadzawka *et al.*, 2006). Con estas mediciones se evaluó la dinámica de los procesos de mineralización e inmovilización usando los siguientes criterios:

$$\text{Mineralización neta (kg de N ha}^{-1}\text{)} = \text{N disponible final} - \text{N disponible inicial} \quad (\text{Ec. 3})$$

donde sí:

Mineralización neta ≥ 0 (kg N ha⁻¹), dominan los procesos de mineralización de N.

Mineralización neta < 0 (kg N ha⁻¹), dominan los procesos de inmovilización de N.

$$\text{Relación C/N} = \text{contenido de carbono orgánico} / \text{contenido de N total} \quad (\text{Ec. 4})$$

donde sí:

C/N < 20 dominan los procesos de mineralización de N.

C/N 20-30 zona de transición entre mineralización/inmovilización de N.

C/N > 30 dominan los procesos de inmovilización de N.

Balance de N

En cada unidad experimental se estableció un balance de N, de acuerdo a:

$$\Delta \text{N}_{\text{NO}_3+\text{NH}_4} = \text{Fertilización} + \text{Mineralización neta} + \text{aporte agua de riego} - \text{absorción} - \text{lixiviación} - \text{pérdidas gaseosas} \quad (\text{Ec. 5})$$

A partir de la ecuación anterior por despeje de los componentes medidos y analizados se pueden obtener las posibles pérdidas gaseosas de N al ambiente.

Para conocer el contenido de N disponible en el suelo fue necesario coleccionar al inicio (octubre 2012) y al final del estudio (abril de 2013) muestras de suelo con barreno en los intervalos de profundidad 0-25, 25-50, 50-75, 75-100 y 100-125 cm en la zona contigua a cada FullStop™ de cada unidad experimental, determinando los niveles de N mineral ($N_{NO_3+NH_4}$) de acuerdo a la metodología propuesta por Sadzawka *et al.* (2006). Mediante la extracción con cloruro de potasio (KCl) se extraen las formas inorgánicas de N en el suelo, aplicando posteriormente MgO (extracción de NH_4^+) y aleación de Devarda (extracción de NO_3^-), el cual es sometido a un destilado mediante arrastre por vapor y posterior titulación. De acuerdo al gasto en titulación se puede conocer el contenido de N inorgánico presente en el suelo a distintas profundidades y en cada tratamiento.

Para evaluar el N extraído por el cultivo a la cosecha (abril de 2013) se coleccionaron tres plantas por hilera de cada tratamiento. En cada muestra se determinó el N total en la materia seca aérea separadas por órganos: mazorcas (divididas en corontas, granos y chalas), tallo + hojas (junto a panojas) y raíces concentradas principalmente en los 45-50 cm de profundidad. Los tallos fueron mezclados con las hojas y panoja para su análisis. Las muestras vegetales fueron coleccionadas y llevadas al laboratorio, separadas por órganos y picadas para posteriormente secarlas en una estufa de aire forzado a 70-75°C, por 12 a 24 horas en bolsas de papel. Una vez secadas las muestras, fueron trituradas en un molinillo, y posteriormente tamizadas a 0,5 mm para su posterior digestión y determinación de N total de acuerdo a Sadzawka *et al.* (2007).

Análisis estadístico

En cada micro parcela los resultados obtenidos en rendimientos, contenido de N disponible, N total, CO, y C/N al inicio y al final del estudio en el suelo, valores de contenido relativo de clorofila y absorción de N por la planta fueron sometidos a una prueba t de Student con un nivel de significancia de 95% ($p \leq 0,05$). Esta prueba fue realizada con el programa estadístico MINITAB.

Sin embargo, para los resultados obtenidos de la lixiviación, mineralización neta y pérdidas gaseosas fueron sometidos a un ANDEVA, realizando una prueba de comparaciones múltiples (PCM) de Tukey. Esta prueba fue realizada con el programa estadístico InfoStat.

Previo a la realización de esta prueba estadística se verificaron los supuestos de homocedasticidad de las varianzas y de distribución normal de los datos, en caso de no cumplirse alguno de los supuestos se procedió a la transformación de ellos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El cultivo de maíz finalizó su temporada en abril del año 2013, donde se cosechó el grano con una humedad comercial determinada por el agricultor (aproximadamente 18%), dejando en campo el resto de la planta como residuo para ser incorporado en la preparación de suelo de la temporada siguiente. Los tratamientos T1 y T2 presentaron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$) respecto a sus rendimientos, donde el tratamiento que no recibió fertilizantes nitrogenados (T1) presentó un rendimiento aproximado de 67 qqm ha⁻¹. Este rendimiento es menor al rendimientos obtenido por el tratamiento con fertilización completa en pre siembra y aporca (T2), que fue de 146 qqm ha⁻¹. Según los estudios de Széles *et al.* (2012) registraron rendimientos más altos en aquellos tratamientos con fertilización y con riego, tal como se mostró en esta investigación. La cuantificación del rendimiento consideró una masa aproximada de granos por mazorca para T1 y T2 de 94 g y 205 g respectivamente, con un total de 71.429 plantas ha⁻¹ a la cosecha. Aunque el tratamiento T2 fue levemente menor a los rendimientos obtenidos en la temporada anterior con manejos similares (155 qqm ha⁻¹), se encontró por sobre los rendimientos promedio de la Región que alcanzan 118 qqm ha⁻¹ (INE, 2013) y los rendimientos nacionales de 133 qqm ha⁻¹ (ODEPA, 2013).

La disminución del rendimiento en T1 se explica por una menor disponibilidad de N durante el periodo de crecimiento del cultivo (Huan *et al.*, 2010), donde se forma parte importante de la biomasa responsable de generar fotoasimilados para la formación de granos y llenado de estos. Así a pesar de tener un contenido inicial similar de N disponible en el suelo, T1 no fue capaz de igualar el rendimiento de T2 que recibió un aporte extra de N.

La distribución de las precipitaciones del sitio, observadas en la Figura 4a, se pueden comparar con datos históricos (INIA, 1989) que muestran el déficit de agua caída durante el periodo de crecimiento del cultivo. Lo anterior pudo ser desfavorable para la planta al necesitar un aporte de agua mayor, principalmente en los primeros riegos, por no haber reservas de agua en el perfil de suelo. El crecimiento del cultivo se concentra en el periodo donde se alcanzan las temperaturas más altas, que junto con riegos eventuales y precipitaciones puntuales hacen que el comportamiento de la evapotranspiración del cultivo (Etc) se incremente en las micro parcelas T1 y T2. Sin embargo, paralelamente se grafica la evaporación de suelo desnudo en T0 (Figura 4b), que presentó un comportamiento relativamente constante en el tiempo, donde se utilizó un Kc de 0,15 para todo el periodo (Allen *et al.*, 2006).

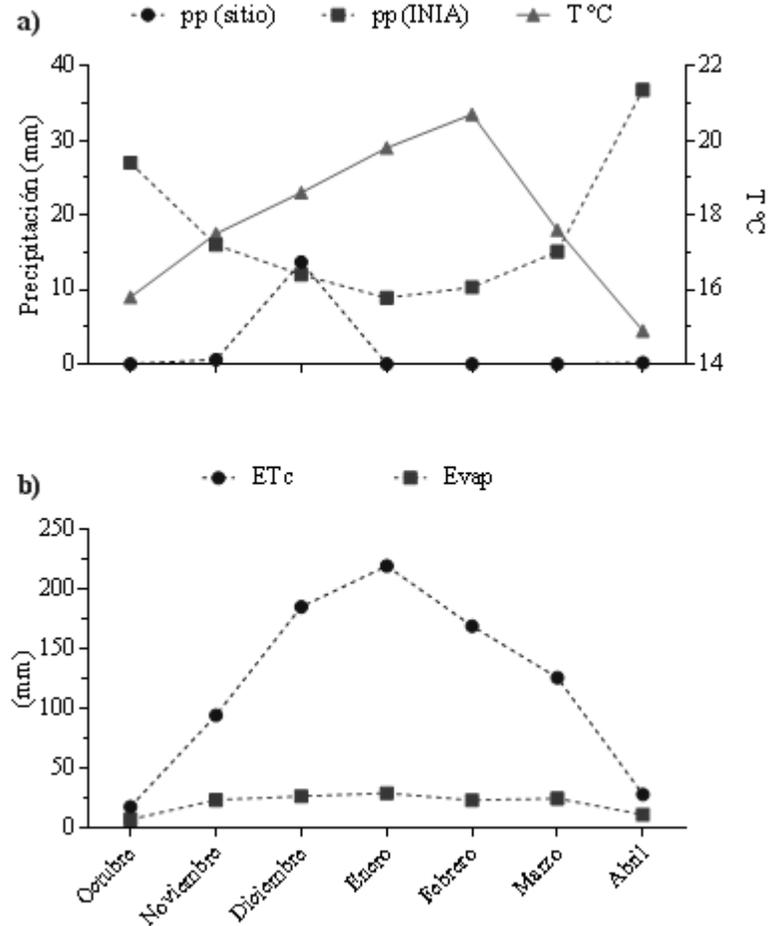


Figura 4. a) Variación de las precipitaciones (Pp) y temperatura (T°) durante el periodo de crecimiento del cultivo. b) Comportamiento de la evaporación (Evap) en T0 y evapotranspiración (Et_c) en T1 y T2.

Debido a la distribución de las precipitaciones en diciembre y los riegos efectuados durante el mes de enero, el proceso de lixiviación fue más importante en este último mes, presentando además el crecimiento y desarrollo exponencial de la planta, por lo que pérdidas de N en este periodo pueden influir en los requerimientos nutritivos de la planta.

Balance de N

Para establecer el balance de N en cada unidad experimental se cuantificaron las pérdidas y posibles entradas al sistema. En la Figura 5 se muestran los contenidos de N disponible en el suelo al inicio y final de temporada del maíz en los tratamientos, donde se registró una disminución en el contenido de N disponible para la planta. Esta disminución se atribuyó a un consumo por parte de la planta durante el periodo de crecimiento y desarrollo, además a las posibles pérdidas de formas nitrogenadas al ambiente.

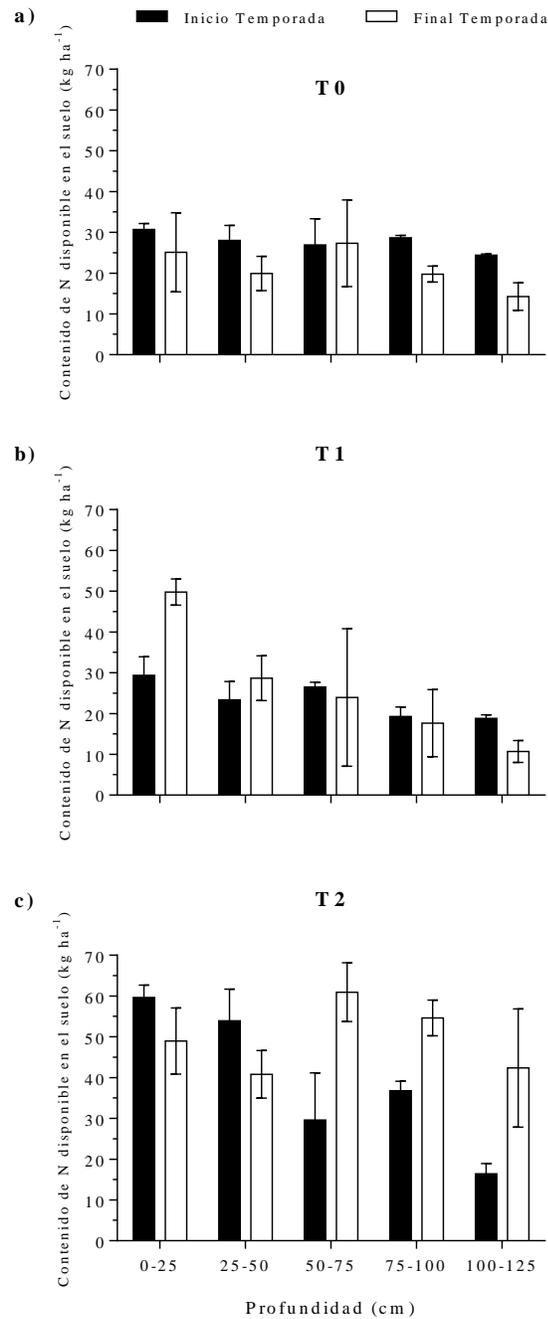


Figura 5. Contenido de N disponible en el suelo respecto a la profundidad de muestreo, al inicio y fin de temporada en los tratamientos a) T0, b) T1 y c) T2. Las barras verticales indican error estándar (n=3).

Absorción

En el Cuadro 2 se muestra la distribución del N absorbido en los distintos órganos de la planta de maíz. Aunque se observó que los valores fueron mayores en T2 respecto a T1, sólo se encontraron contenidos significativamente ($p < 0,05$) más altos en T2 en relación a T1 en los granos y el total absorbido de la planta ($p < 0,05$). En el resto de los órganos la falta de diferencias significativas se asoció a la variabilidad alta de los datos medidos. Sin embargo, la extracción obtenida por el cultivo se encuentra entre el rango de datos informados por Navarro (2003) de 50-250 kg ha⁻¹ año en un sistema de agricultura intensiva.

Cuadro 2. Absorción de N por órgano vegetativo en maíz grano.

Tejido vegetal	Tratamiento	
	T1	T2
	kg N ha-1	
Grano	52,32 ± 19,19 b	126,95 ± 4,24 a
Chala	4,32 ± 0,44 a	5,38 ± 0,69 a
Corontas	7,05 ± 1,98 a	10,42 ± 2,84 a
Tallo+hojas	45,22 ± 12,12 a	82,37 ± 28,09 a
Raíz	4,02 ± 0,21 a	11,40 ± 3,21 a
Total	112,93 ± 16,65 b	236,51 ± 36,02 a

Letras distintas en una fila indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$, t-Student).

Es importante destacar que las raíces se encuentran concentradas principalmente en los primeros 50 cm de profundidad, pudiendo llegar incluso hasta 2 metros si no existen limitantes físicas en el suelo (Faiguenbaum, 2003). Sin embargo, en este estudio solo fue posible cosechar las raíces presentes en los primeros 30 cm de suelo aproximadamente, lo que no permitió cuantificar el contenido de N en raíces a mayor profundidad.

Claramente los valores más altos encontrados en T2 se asocian a la fertilización nitrogenada. El N absorbido por T1, donde no se aplicó fertilización nitrogenada se relacionó al aporte de N por el proceso de mineralización en el suelo al inicio de la temporada, que se discute más adelante al igual que el aporte de N por agua de riego. La absorción de N por parte de la planta representa un 83% y 94% de las salidas del balance de N presentado en la Ecuación (5) para T1 y T2, respectivamente.

En este estudio se cosecharon tres plantas completas de maíz por tratamiento para la realización de los análisis. Sin embargo, se detectó una dispersión alta de los valores, lo cual sugiere que en estudios futuros se debe aumentar la cantidad de plantas a cosecha.

Aporte de N por riego

Los aportes de N disponible al ambiente por agua de riego se originan a partir de fuentes fijas y difusas que descargan N en estos cuerpos de agua superficial. En el caso de las fuentes difusas, y en particular en este estudio, se asocian a campos de maíz que se encontraban aguas arriba en el canal de riego. En estos campos, el agua que no percola en el perfil de suelo, escurre superficialmente desprendiendo y transportando fuentes de N en suspensión y en solución las que son depositadas en un canal de desagüe, que se conecta a la red de canales de riego de la zona.

En este estudio a partir del monitoreo de formas nitrogenadas en el agua ($N-NO_3+N-NH_4$), que incluyó 10 mediciones durante el periodo de crecimiento del cultivo, se estimó un aporte por agua de riego al cultivo aproximado de 45 kg ha^{-1} (31 mg N L^{-1}) (Apéndice I). Es importante destacar que en la zona se han encontrado concentraciones de hasta $60 \text{ mg N-NO}_3 \text{ L}^{-1}$ en canales de desagüe de campos con maíz grano (Corradini, 2012).

En este ensayo se estimó que el aporte de agua de riego fue aproximadamente $17 \text{ mil m}^3 \text{ ha}^{-1}$, de acuerdo a los estudios hechos por el Instituto de Investigación Agropecuaria en la zona (Antúnez, 2013). Esta institución reporta que el escurrimiento superficial en la zona en suelos de textura gruesa corresponde en promedio a un 14% del monto total de agua de riego aplicado, por lo tanto lo anterior sugiere que en este ensayo se habrían aplicado alrededor de $14 \text{ mil m}^3 \text{ ha}^{-1}$ durante la temporada.

El valor del aporte de N por riego se utilizó para el balance final de N en cada micro parcela al igual que en las Ecuaciones (1) y (2), para el cálculo del escurrimiento superficial por tratamiento y lixiviación correspondiente.

Lixiviación de N

Aunque los primeros riegos en el cultivo comenzaron en noviembre de 2012, no fue posible la obtención de muestras de aguas de los lisímetros a los 100 cm de profundidad hasta el mes de enero de 2013. Lo anterior sugiere que el perfil de suelo estaba con un contenido de agua bajo al inicio de la temporada, relacionado al déficit de precipitaciones invernales. Así el agua aplicada en profundidad no habría sido suficiente para saturar el sistema poroso y generar percolación profunda que lixiviera NO_3^- .

En el Apéndice II se muestran los resultados obtenidos del análisis de aguas colectadas de los FullStop™. Los lixiviados captados a un metro de profundidad mostraron variabilidad entre los diferentes tratamientos, donde T0 presentó en cada fecha de muestreo una concentración mayor de $N_{NO_3+NH_4}$ en solución. Estas formas de N son las disponibles por la planta para su crecimiento y desarrollo. Sin embargo, estas son también fáciles de ser pérdidas, principalmente el NO_3^- en profundidad por su movilidad alta en el perfil de suelo. Entre los tratamientos se encontraron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) en las concentraciones de N en la solución de suelo, donde se identificó una concentración mayor

en el T0, por sobre T1 y T2. Los tratamientos T1 y T2 mostraron una lixiviación menor de N asociado a la presencia cultivo de maíz. Éste absorbió el N disponible en la solución de suelo debido al desarrollo radical durante el periodo de estudio. Por lo tanto, en T0 se favoreció una lixiviación mayor, teniendo un riesgo potencial mayor de movilización de formas nitrogenadas a cuerpos de agua cercanos, o a aguas subsuperficiales.

Las concentraciones obtenidas desde los FullStopTM, se relacionaron con el contenido de agua dentro del perfil de suelo, el cual se obtuvo desde los dataloggers en profundidad. Además, se utilizó como supuesto que el primer riego dejó el suelo saturado, lo cual se pudo estimar a través de una ponderación de las densidades aparentes de los horizontes hasta un metro de profundidad para saber la porosidad del suelo. El agua que percoló en el perfil de suelo se determinó a partir de la Ecuación (2) donde los principales aportes de agua al suelo fueron por precipitaciones y riegos durante la temporada de crecimiento del cultivo que se relacionaron directamente con las concentraciones.

En el Cuadro 3 se muestra el N perdido por lixiviación en el periodo de estudio, donde se tomó el promedio de la concentración de N disponible en enero para obtener un valor referencial, el cual se utilizó en el resultado de la lixiviación de N calculada a partir de las Ecuaciones (1) y (2).

Cuadro 3. Lixiviación de nitrógeno (N) en los tratamientos.

Tratamiento	Concentración N- NO ₃ +NH ₄ ---- mg L ⁻¹ ----	Percolación ---- cm ----	Lixiviación ---kg N ha ⁻¹ ---
T0	5,49 ± 3,50 a	4.961,45	27,24 ± 17,4 a
T1	2,19 ± 0,81 b	4.876,08	10,68 ± 4,0 b
T2	1,71 ± 0,43 b	4.876,02	8,34 ± 2,1 b

Letras distintas en una columna indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$, PCM de Tukey).

De acuerdo a los resultados mostrados en el Cuadro 3, se encontró que existen diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p < 0,05$), siendo T0 el tratamiento que presentó una pérdida mayor de N por lixiviación en profundidad. Lo anterior fue directamente relacionado con las mayores concentraciones de N en la solución de suelo y una percolación mayor por poseer un suelo desnudo. Sin embargo, entre los tratamientos T1 y T2 no se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p > 0,05$), principalmente por poseer cobertura vegetal en superficie que absorbió y retuvo el N en el perfil, impidiendo que se lixiviera. Las pérdidas en profundidad de N representan un 17% y 6% del total de las salidas del balance de N presentado en la Ecuación (5), para T1 y T2, respectivamente. Sharma *et al.* (2012) señalan que en suelos de textura arenosa, la lixiviación de N es mayor que en suelos de textura arcillosa, pudiendo alcanzar valores por sobre los 65 kg N ha⁻¹. Por otro lado, Estrada *et al.* (2007) obtuvo valores de 3 kg N ha⁻¹ en suelos arcilloso con drenaje superficial. Aunque en este estudio se obtuvieron valores bajos de pérdidas de N por lixiviación (<30 kg ha⁻¹ año⁻¹), debido al déficit de precipitaciones

invernales y los riegos eventuales en la temporada de cultivo del maíz, estos fueron mayores a los encontrados por Gallyas (2014) y Vargas (2013) en suelos de textura gruesa y cultivados con maíz en la zona central de Chile con valores de 4 y 10 kg N ha⁻¹ año⁻¹, respectivamente.

El tratamiento T0 presentó los valores más altos de pérdidas de N por lixiviación. En este sentido, Diez *et al.* (1997) y Navarro (2003) señalan que en suelos en barbecho existen distintos aportes de N proveniente de: agua de riego, fertilizantes más el N remanente en el suelo de la temporada anterior de monocultivo de maíz, rastrojo incorporado y las raíces en profundidad que se descomponen. Todos estos aportes habrían generado un *pool* de N disponible en el perfil de suelo fácilmente lixiviable al no poseer cobertura vegetal en superficie.

Uso de clorofilómetro y tabla Munsell

Las mediciones en estados fenológicos específicos en la planta con el clorofilómetro se utilizaron para determinar mediante un método no destructivo el contenido relativo de clorofila (CCI) que se relaciona directamente con el contenido de N en la planta. En el Cuadro 4 se muestran los valores obtenidos en terreno con este instrumento en cuatro estados fenológicos, mostrando que el CCI en la planta fue mayor en el tratamiento que recibió aplicación de fertilizantes nitrogenados (T2), en comparación con el que no recibió fertilización (T1). Estos presentaron diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) en todos los estados fenológicos medidos, a excepción de la cuarta hoja verdadera (V4). Resultados similares son presentados por Széles *et al.* (2012). La aplicación de fertilizantes nitrogenados aumentó la disponibilidad de N para la formación de las moléculas de clorofilas que son importantes en el proceso de fotosíntesis, al aumentar el contenido de estas la planta presenta una mayor capacidad de generar fotoasimilados para formación de estructuras reproductivas y mayor altura de planta, que pueden influenciar de forma importante en los rendimientos obtenidos que se detallaron anteriormente. Así el CCI medido en maíz presentó aumento en los niveles durante los meses de muestreo entre V4 (noviembre) y V10 (enero), coincidiendo con el comportamiento del crecimiento del cultivo y la demanda de N de la planta

Cuadro 4. Contenido relativo de clorofila (CCI) en diferentes estados fenológicos.

Tratamiento	Estado fenológico			
	V4	V6	V8	V10
	----- CCI -----			
T1	19,14 ± 3,04 a	23,70 ± 6,95 b	19,35 ± 3,90 b	21,69 ± 3,83 b
T2	20,76 ± 0,76 a	40,41 ± 3,76 a	46,69 ± 5,23 a	45,56 ± 3,97 a

Letras distintas en una columna indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$, t-Student).

De acuerdo a la Figura 6 el T2 presentó una tendencia a incrementar los niveles de CCI,

acorde al desarrollo del cultivo y al requerimiento de fotoasimilados necesarios para el desarrollo final de la planta. Sin embargo, el T1 no evidenció mayores diferencias entre los valores de CCI en los estados fenológicos muestreados. Como complemento, en la Figura 6, además de los niveles de CCI se indican dos fechas en las cuales se determinaron los colores Munsell de las mismas hojas. Al igual que en las mediciones de CCI, el tratamiento T2 presentó valores referenciales de color Munsell ponderado más altos que T1, mostrando una correlación positiva alta ($r= 0,77$; $n=36$).

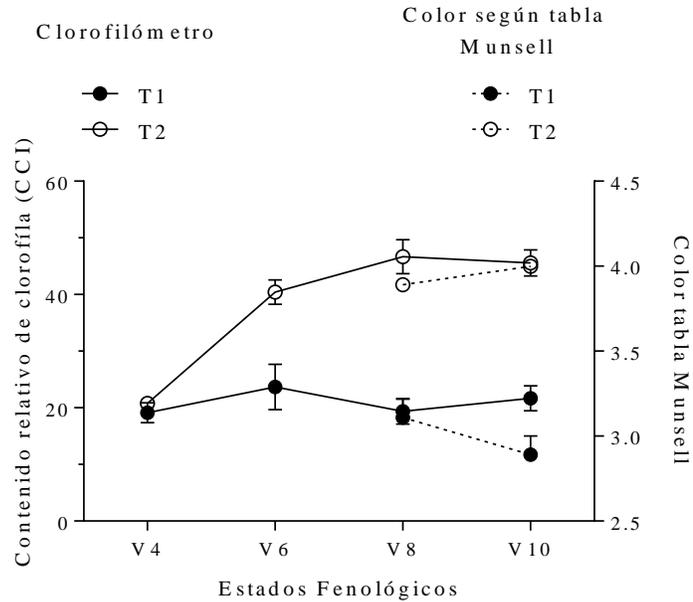


Figura 6. Contenido relativo de clorofila (CCI) y color Munsell en los distintos estados fenológicos de hojas de maíz en T1 y T2.

Mineralización neta de N

La mineralización neta de N (Ecuación 3) es un indicador de la disponibilidad de este nutriente en el suelo, por lo que se observó que en los primeros 25 cm de profundidad tuvo un comportamiento diferenciado en dos etapas (Figura 7). Etapa I: presentó una fuerte mineralización en T0, T1 y T2, durante el primer mes de estudio (octubre-noviembre); y Etapa II: presentó una inmovilización de N, disminuyendo drásticamente el N disponible entre los meses de noviembre-abril para todos los tratamientos.

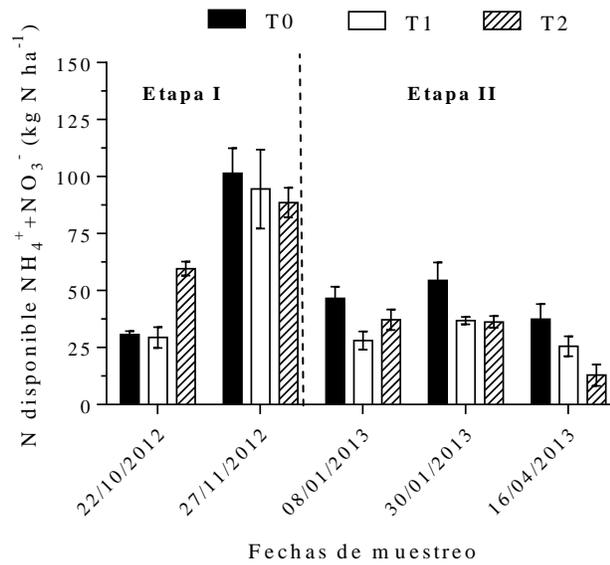


Figura 7. Comportamiento del N disponible ($N_{\text{-NH}_4+\text{NO}_3}$) en tubos de mineralización en cinco fechas de muestreo. La línea punteada representa el cambio de mineralización de N en el suelo a inmovilización del mismo. Las barras verticales indican error estándar ($n=3$).

Mineralización: Los valores de N disponible absorbido por las plantas pueden variar de acuerdo a las fechas de muestreo como también debido a los tratamientos. Se determinaron los valores de N disponible al inicio y final de la temporada del cultivo. Sin embargo, para la determinación de la mineralización en la Etapa I en los tubos, se tomó la fecha inicial de muestreo (fuera de los tubos) y la segunda fecha (a un mes de la siembra) (Cuadro 5), obteniéndose valores de mineralización neta positivos que indican el predominio de procesos de mineralización de N, aunque no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p>0,05$).

Cuadro 5. Mineralización neta en etapa I en cada tratamiento.

Tratamiento	N disponible		Mineralización neta
	Inicio (oct.)	Noviembre	
	----- kg $N_{\text{-NH}_4+\text{NO}_3}$ ha ⁻¹ -----		
T0	30,71 ± 2,50 b B	101,43 ± 19,00 a A	70,72 ± 20,54 a
T1	29,37 ± 7,85 b A	94,50 ± 30,05 a A	65,13 ± 32,99 a
T2	59,62 ± 5,28 a A	88,52 ± 11,27 a A	28,90 ± 14,73 a

Letras minúsculas distintas en una columna indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p<0,05$, PCM de Tukey). Letras mayúsculas distintas en una fila indican diferencias estadísticamente significativas entre fechas ($p<0,05$, t-Student) para un mismo tratamiento.

Sin embargo, a pesar de haber una mineralización en la primera etapa del cultivo (Figura

7), lo mineralizado por el suelo es utilizado por la planta para satisfacer sus necesidades nutricionales en los primeros estadios, sobre todo en T1 que no recibió aporte externo de la fertilización. A partir de este aporte por mineralización junto con el aporte por agua de riego, se puede explicar porque T1 presenta una absorción de N alta (Cuadro 2).

De acuerdo a la Figura 7, todos los tratamientos luego de la fuerte mineralización en el primer mes presentan una tendencia a la disminución del N disponible a través de las fechas de muestreo, presentando un pequeño aumento a fines de enero pudiendo deberse a una nueva mineralización producto del agua acumulada por riegos y temperaturas altas en la superficie del suelo.

Inmovilización: Se determinaron los valores de N disponible en la segunda etapa de mineralización, abarcando desde noviembre hasta la cosecha (abril) (Cuadro 6), obteniéndose valores de mineralización neta negativos que indican el predominio de procesos de inmovilización de N. Sin embargo, no se encontraron diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos ($p > 0,05$).

Cuadro 6. Mineralización neta en etapa II en cada tratamiento.

Tratamiento	N disponible		Mineralización neta
	Noviembre	Final (abril)	
	-----kg N _{-NH₄+NO₃} ha ⁻¹ -----		
T0	101,43 ± 19,00 a A	37,49 ± 11,39 a A	-63,95 ± 27,59 a
T1	94,50 ± 30,05 a A	25,52 ± 7,56 ab B	-68,99 ± 22,58 a
T2	88,52 ± 11,27 a A	12,92 ± 8,15 b B	-75,60 ± 18,88 a

Letras minúsculas distintas en una columna indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$, PCM de Tukey). Letras mayúsculas distintas en una fila indican diferencias estadísticamente significativas entre fechas ($p < 0,05$, t-Student) para un mismo tratamiento.

El contenido de N total en los tubos de mineralización, no indicó diferencias significativas ($p > 0,05$) entre noviembre y final de temporada (abril) en los tres tratamientos (Cuadro 7), moviéndose entre valores de 0,036-0,042% que están dentro del rango de suelos minerales de 0,01-0,5% según Navarro (2003). De igual forma se comportó el (CO) en el T0 y T2, no presentando variaciones estadísticamente significativas ($p > 0,05$) en inicio de temporada y final de temporada. Si bien existen diferencias estadísticas significativas ($p < 0,05$) en CO entre los tratamientos evaluados, estas no son cuantitativamente importantes para generar un cambio en la mineralización neta.

La inmovilización ocurrida en la segunda etapa del periodo de crecimiento, coincide con el comportamiento de los microorganismos presentes en el suelo y su ciclo natural, ya que debido al aumento de temperaturas y disminución de la disponibilidad de agua la actividad microbiana de este disminuye considerablemente evitando la mineralización y favoreciendo la inmovilización del N.

Cuadro 7. Contenido de nitrógeno total (N total), carbono orgánico (CO) y relación C/N en suelos al inicio y final de temporada.

Tratamiento	N total		CO		C/N	
	Noviembre	Abril	Noviembre	Abril	Noviembre	Fin
	----- % -----					
T0	0,039 ± 0,009 a A	0,036 ± 0,003 a A	1,78 ± 0,17 b A	1,57 ± 0,08 c A	47,56 ± 8,61 a A	47,98 ± 4,09 a A
T1	0,044 ± 0,006 a A	0,042 ± 0,003 a A	2,41 ± 0,14 a B	2,68 ± 0,18 a A	55,82 ± 7,01 a A	56,51 ± 3,74 a A
T2	0,039 ± 0,003 a A	0,037 ± 0,002 a A	2,04 ± 0,29 ab A	2,21 ± 0,18 b A	52,57 ± 4,83 a A	48,19 ± 11,94 a A

Letras minúsculas distintas en una columna indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos ($p < 0,05$, PCM de Tukey). Letras mayúsculas distintas en una fila indican diferencias estadísticamente significativas entre fechas ($p < 0,05$, t-Student) para un mismo tratamiento.

A partir de la relación C/N en el suelo (Ecuación 4), se encontró que la inmovilización de N fue el proceso dominante en la segunda etapa de mineralización en el suelo, presentando valores mayores al 30%, cuando el N mineral se transformó a formas orgánicas que no son disponibles para la planta (Celaya *et al.*, 2011). Por otra parte la relación C/N en los tratamientos al inicio y al final de la temporada no mostraron diferencias significativas ($p > 0,05$).

La variabilidad de la relación de C/N entre los tratamientos ya descritos se pueden deber a la distribución espacial de los mismos, por la presencia de microorganismos que favorecen el proceso de mineralización, la presencia de raíces en los tratamientos que presentaban cultivo en superficie.

Los procesos de inmovilización permiten que el N no se encuentre en sus formas disponibles en el suelo, encontrándose incorporado a la biomasa de los posibles microorganismos presentes en éste. Por otra parte, la arquitectura de los tubos de mineralización puede permitir eventualmente la entrada de raíces, el aumento en el contenido de agua y temperatura al interior, favoreciendo la disminución del N disponible y el predominio de los procesos de inmovilización dentro de los tubos.

Pérdidas gaseosas

Las posibles pérdidas de N al ambiente en forma de gas pueden deberse a procesos de transformación del N, donde destacan la volatilización y la desnitrificación. Las pérdidas de N por volatilización tienen lugar en suelos con $\text{pH} \geq 8,0$ (Casanova y Benavides, 2009). Sin embargo, el suelo estudiado en este ensayo presenta pH entre 6,9 y 7,3 (Anexo II), por lo tanto las pérdidas de N por este proceso serían despreciables.

Es importante tener presente que para establecer las pérdidas gaseosas en cada tratamiento se estableció un balance de N, estableciéndose por diferencias entre entradas y salidas del sistema utilizando la Ecuación (5). El balance en T0 y T2 presentaron pérdidas gaseosas aproximadas de 47 y 170 kg N ha^{-1} , respectivamente, encontrándose diferencias significativas ($p < 0,05$) entre ambos tratamientos. Sin embargo, éstas pérdidas están por sobre los valores registrados por Gallyas (2014) de 24 kg N ha^{-1} , pero bajo las pérdidas evaluadas por Barton *et al.* (1999) con valores que pueden llegar hasta 239 kg N ha^{-1} para suelos agrícolas con riego y fertilizados con N. Las pérdidas altas en T2, se asocian a la fertilización nitrogenada recibida durante el periodo de estudio.

Las pérdidas gaseosas en T1 marcaron valores negativos, es decir, no se habrían generado pérdidas de N al ambiente por desnitrificación, lo que no está respaldado por la literatura (Havlin *et al.*, 2014). Es importante tener presente que podría existir un aporte de N por mineralización a profundidades mayores (> 25 cm) que no se evaluaron en este estudio. Así a diferencia de T2, en T1 el cultivo se desarrolló en un suelo con un déficit de N, lo que podría haber generado una mayor exploración de raíces en el suelo, absorbiendo formas nitrogenadas que se habrían mineralizado en profundidades mayores a los 0-25 cm y no

fueron cuantificadas en este estudio. Por lo tanto, en T1 habría existido una entrada adicional al balance de N que fue absorbido por el cultivo, pero que no fue cuantificada, y que se expresó en un valor negativo de pérdidas gaseosas. Lo anterior, debe ser validado en estudios futuros.

Por otra parte, las pérdidas gaseosas de N podrían tener un impacto negativo en el ambiente, principalmente la liberación de óxido nitroso (N_2O) que es un potente gas de efecto invernadero. En este sentido, las pérdidas deben ser consideradas al momento de establecer la eficiencia con la que actuará el fertilizante, potenciando una aplicación correcta del producto para evitar estos efectos negativos.

CONCLUSIONES

La aplicación de fertilizantes nitrogenados no tuvo un efecto significativo en la lixiviación de N. Mientras que se identificó que para reducir este proceso de pérdida de N, fue más importante la presencia de un cultivo en superficie. Así comparado con en el suelo desnudo (T0), los tratamientos con cultivo (T1 y T2) presentaron pérdidas por lixiviación de N significativamente menores.

La aplicación de fertilizantes tuvo un efecto significativo en el aumento del rendimiento de grano de maíz y en la absorción de N en los tratamientos con cultivo. En los tratamientos con cultivo de maíz (T1 y T2) se determinó que la salida más importante de N del sistema suelo correspondió a la absorción de N por el maíz, principalmente asociado al contenido de N en los granos que salen del sistema por la cosecha.

Por otra parte, en T2 las posibles pérdidas gaseosas se asociaron a la fertilización nitrogenada, ya que la planta no absorbió la totalidad del N incorporado. La dosificación de N en campo debería ser ajustada las necesidades reales del cultivo para evitar pérdidas al ambiente por lixiviación y pérdidas gaseosas. Sin embargo, es necesario realizar ensayos futuros incluyendo varias temporadas de cultivo-barbecho, para generar un balance más completo de N en el suelo.

Respecto al índice de concentración de clorofila (CCI) y color de las hojas según tabla Munsell, se encontraron valores significativamente más altos en el tratamiento con fertilización N (T2) respecto al no fertilizado (T1). Además, se estableció una correlación alta entre el CCI y el color Munsell en hojas de maíz.

BIBLIOGRAFÍA

Allen, R.; L. Pereira; D. Raes y M. Smith. 2006. Evapotranspiración del cultivo: Guía para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Estudio FAO Riego y Drenaje N° 56. Roma, Italia. 298 p.

Antúnez, A. 2013, marzo. Mejoramiento de riego por surcos en maíz mediante pulsos (surge irrigation) en la Región de O'Higgins. [Presentación en Seminario de Contaminación Difusa]. Aula Magna, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. Investigador, Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA).

Barton, L.; C.D.A. McLay; L.A Schipper y C.T. Smith. 1999. Annual denitrification rates in agricultural and forest soils: a review. *Australian Journal of Soil Research*. 37(6): 1073-194.

Berenguer, P.; F. Santiveri; J. Boixadera y J. Lloveras. 2009. Nitrogen fertilization of irrigated maize under Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy*. 30: 163-171.

Biber, P. 2007. Evaluating a Chlorophyll Content Meter on Three Coastal Wetland Plant Species. *Journal of Agricultural, Food and Environmental Sciences*. 1(2): 1-11.

Casanova, M y C. Benavides. 2009. Cartografía de las pérdidas potenciales de N-urea por volatilización en suelos de Chile central. *Revista de la Ciencia del Suelo y Nutrición Vegetal*. 9(1): 14-25.

Casanova, M.; O. Seguel; O. Salazar y W. Luzio. 2013. Soils of Chile. Soils of the World Soils Serie. Springer Science+Business Media. 193p

Celaya, H. y A. Castellanos. 2011, jul.-sept. Mineralización de nitrógeno en el suelo de zonas áridas y semiáridas. *Terra Latinoamericana*. 29(3): 343-356.

CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales), Chile. 2002. Estudio Agrológico. Descripción de suelos materiales y símbolos: VI Región. (Doc. Tec. N°114), CIREN. Santiago, Chile: CIREN. 479 p.

Corradini, F. 2012. Relationships between nitrogen and phosphorus application to maize fields and water quality in nearby drainage channels in central Chile. Tesis de Magister en Manejo de Suelos y Aguas. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 58h.

Diez, J.A.; R. Roman; R. Caballero; A. Caballero. 1997. Nitrate leaching from soils under a maize-wheat-maize sequence, two irrigation schedules and three types of fertilizers. *Agriculture Ecosystems & Environment*. 65: 189-199.

DMC (Dirección Meteorológica de Chile). 2012. Región del Libertador Bernardo O'Higgins. Descripción climatológica. [En línea]. Recuperado en <http://www.meteochile.cl/climas/climas_sexta_region.html>. Consultado el: 10 de julio de 2012.

Dominguez, G.; G. Studdert; H. Echeverría y F. Andrade. 2001. Sistemas de cultivo y nutrición nitrogenada en maíz. *Ciencias del Suelo*. 19 (1): 47-56.

Estrada M.A.; I. Nikolskii; J.D. Mendoza; C. Acevedo; E. de La Cruz; N.P. Brito; A. Gómez y O. Bakhlaeva. 2007. Inorganic nitrogen leaching in agricultural soil with different types of drainage in humid tropic. *Universidad y Ciencia*. 23 (1):1-14.

Faiguenbaum H. 2003. Labranza, siembra y producción de los principales cultivos de Chile: Maíz. Chile. 760 p.

Faraldo M.; G. Vergara; G. Casagrande; J. Arnaiz; H. Mirasson y C. Ferrero. 2011. Eficiencia en el uso de agua y radiación en maíz, girasol y soja, en la región oriental de la pampa Argentina. *Agronomía Tropical*. 61(1): 47-57.

Gallyas J. 2014. Efecto de la aplicación de purines de cerdo en la dinámica del nitrógeno, en suelos de textura gruesa bajo cultivo de maíz (*Zea mays* L.) en la comuna de San Pedro, Región Metropolitana. Memoria Ingeniero agrónomo. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 39h.

Gomiero T.; D. Pimentel y M.G. Paoletti. 2011. Environmental impact of different agricultural management practices: conventional vs. organic agriculture. *Critical Reviews in Plant Sciences* 30: 95-124.

Hach. 2005. Manual de procedimientos espectrofotómetro DR5000. 2th Edición. Hach Company. Alemania. 846 p.

Havlin, J.; J. Beaton; S. Tisdale y W. Nelson. 2014. Soil Fertility and fertilizers. 8° edition. Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, New Jersey. United State of America. 516p.

Huan Y.; W. Hua-Song y W. Zhi-Jie. 2010, may. Evaluation of SPAD and Dualex for In-Season Corn Nitrogen Status Estimation. *Acta Agronómica Sinica* 36(5): 840–847.

INIA (Instituto de Investigaciones Agropecuarias). 1989. Mapa agroclimático de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Santiago. Chile.

INE (Instituto Nacional de Estadísticas). 2013. [En línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: <http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/calendario_de_publicaciones/pdf/agropecuarias_informe_anual_2012.pdf> Consultado el: 02 de septiembre de 2014.

IIDS (Instituto Internacional para el Desarrollo Sostenible), 2009. Síntesis de la tercera cumbre mundial sobre seguridad alimentaria. Volumen 150. N°7. Roma, Italia. 10p.

Lui K. y P. Wiatrak. 2012. Corn production response to tillage and nitrogen application in dry-land Environment. *Soil & Tillage Research*, 124: 138–143.

Navarro G. 2003. Química Agrícola: El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. 2° edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 487p.

Novoa R. y N. Villagran. 2002. Evaluación de un instrumento medidor de clorofila en la determinación de niveles de nitrógeno foliar en maíz. *Agricultura Técnica*, 62 (1): 166 – 171.

ODEPA (Oficina de estudios y políticas agrarias). 2013. [En línea]. Santiago, Chile. Recuperado en: http://www.odepa.cl/wp-content/files_mf/1379351338Maiz_se_aproxima_una_temporada_complicada.pdf
Consultado el: 02 de septiembre de 2014.

Raison, R.; M. Connel y P. Khanna. 1987. Methodology for studying fluxes of soil mineral N in situ. *Soil Biology & Biochemistry*, 19(5): 521-530.

Realini, P. 2014. Validation of non-destructive techniques to estimate the nitrogen retention in the vegetation components of buffer strips. Tesis de Magister en Manejo de Suelos y Aguas. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. (En desarrollo)

Robertson, P. y P. Vitousek. 2009. Nitrogen in Agriculture: Balancing the Cost of an Essential Resource. *Annual Review of Environment and Resource*. 34:97–125.

Rojas, C. 2014. Narrow buffer strip as mitigation measure to reduce nitrogen losses from corn fields in central Chile: installing and N budget during the first year. Tesis de Magister en Manejo de Suelos y Aguas. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. (En desarrollo)

Rong, Y. y W. Xuefeng. 2011. Effects of nitrogen fertilizer and irrigation rate on nitrate present in the profile of a sandy farmland in Northwest China. *Procedia Environmental Sciences*. 11: 726 – 732.

Sadzawka, A.; M. Carrasco; R. Grez; M. Mora; H. Flores y A. Neaman. 2006. Métodos de análisis recomendados para los suelos de Chile. Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 164 p. (Serie actas INIA N° 34)

Sadzawka, A.; A. Carrasco; R. Demanet; H. Flores; R. Grez; M. Mora y A. Neaman. 2007. Métodos de análisis de tejidos vegetales. 2ª Ed. Santiago, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias. 139 p. (Serie Actas INIA N° 40).

Salazar, O. y F. Nájera. 2011. Contaminación de las aguas por el uso de fertilizantes nitrogenados y enmiendas orgánicas. (pp: 147-152) En: Simposio Nacional de la Ciencia del Suelo: Conservación de suelos y aguas, un compromiso de Chile. (11, 12 de julio, 2011, Santiago, Chile).Boletín N° 24. Santiago, Chile: SCHCS. 174 p.

Santibáñez, F. y J.M. Uribe. 1990. Atlas Agroclimático de Chile: regiones sexta, séptima, octava y novena. Santiago de Chile: Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile. Esc. 1:1.500.000. 65 p., [1] Lám. Blanco y negro.

Sharma, P.; M. Shukla; T. Sammis; R. Steiner y J. Mexal. 2012. Nitrate-nitrogen leaching from three specialty crops of New Mexico under furrow irrigation system. *Agricultural Water Management*. 109: 71– 80.

Széles, A.; A. Megys; J. Nagy. 2012. Irrigation and nitrogen effects on the leaf chlorophyll content and grain yield of maize in different crop years. *Agricultural Water Management*.107: 133-144.

Vargas, F. 2013. Comparación de métodos para la estimación de la lixiviación de nitratos en suelos de textura gruesa. Memoria Ingeniero Agrónomo. Santiago, Chile. Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Chile. 28h

Visousek, P.M.; J.A. Chair; R. Howarth; G. Likens; P.A. Matson; D. Schindler; W. Schlesinger y D. Tilman. 1997. Human Alteration of the Global Nitrogen Cycle: Causes and Consequences. Issues in Ecology. Massachusetts. *Ecological Society of America*. 16p.

Zotarelli L.; J. Scholberg; M. Dukes y R. Muñoz-Carpena. 2007, jul.-agost. Monitoring of nitrate leaching in sandy soils: Comparison of three methods. *Journal Environment Quality* 36: 953-962.

ANEXO

Anexo I. Descripción morfológica del suelo del estudio.

Ubicación: Comuna de Pichidegua, Región del Libertador General Bernardo O'Higgins (34°22' S, 71°25' O, altitud 124 m)

Serie de Suelos: Terrazas aluviales no diferenciadas (CIREN, 2002)

Clasificación taxonómica (Soil Taxonomy): Typic Xerochrepts (Inceptisol)

Horizonte	Profundidad (cm)	Descripción
A_p	0-15	Pardo muy oscuro (7.5 YR 2.5/2); areno francosa; ligeramente plástico; ligeramente adhesivo; bloques subangulares medios débiles; friable; poros tubulares finos; raíces finas abundantes, medianas escasas; bioporos finos abundantes; límite lineal difuso.
A₂	15-39	Pardo oscuro (7.5 YR 3/2); areno francosa; plástico; ligeramente adhesivo; bloques subangulares medios débiles; friable, poros gruesos comunes; raíces finas abundantes; bioporos finos abundantes; límite lineal difuso.
B_{w1}	39-73	Pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2); arenosa; no plástico; no adhesivo; bloques subangulares medios débiles; friable; poros gruesos abundantes; raíces finas escasas; límite lineal claro.
B_{w2}	73-103	Pardo oscuro (7.5 YR 3/2); franco arcillo arenosa; muy plástico; adhesivo; bloques subangulares medios débiles; friable, raíces finas comunes, bioporos gruesos comunes y finos muy abundantes; límite lineal difuso.
C	103-132	Pardo grisáceo muy oscuro (10 YR 3/2); arenosa; no plástico, ligeramente adhesivo; bloques subangulares débiles; friable; poros gruesos abundantes; raíces finas y gruesas escasas, límite lineal difuso.
C_g	132-155+	Pardo oscuro (10 YR 3/3); arenosa; plástico; ligeramente adhesivo; bloques subangulares medios débiles, friable, raíces finas escasas; poros gruesos abundantes; presencia de rasgos redoximórficos.

Anexo II. Propiedades físicas y químicas de suelos en San Luis

Profundidad cm	Propiedades ¹								
	Db	Clase textural ²	HA	MOS	N _T	pH (H ₂ O)	pH (KCl)	CE	CIC
	Mg m ⁻³	-	-----	%	-----	-	-	dS m ⁻¹	cmol ₍₊₎ kg ⁻¹
0-15	1,35	F	11,91	1,47	0,039	6,93	6,20	1,59	9,65
15-39	1,36	Fa	9,11	1,24	0,015	6,90	5,78	1,04	10,64
39-73	1,32	Fa	6,27	1,18	0,015	6,90	5,76	0,89	10,15
73-103	1,31	F	28,18	1,35	0,024	6,80	6,80	1,32	10,94
103-132	1,46	A	0,19	0,44	0,002	7,27	4,68	0,80	10,49
132-155+	1,31	aF	5,10	0,71	0,023	7,29	5,75	0,59	10,94

¹ Db: densidad aparente; HA humedad aprovechable, MOS: materia orgánica; NT: nitrógeno total; CE: conductividad eléctrica; CIC: capacidad de intercambio catiónica.

² F: franca; Fa: franco arenosa; aF: areno francosa; a: arenosa

APÉNDICE

Apéndice I. Aporte de N por vía riego, durante la temporada de crecimiento del maíz.

Fecha	N-NO ₃	N-NH ₄	N _{NO₃+NH₄}	Riego	Adición
	----- mg N L ⁻¹ -----			--- m ³ ha ⁻¹ ---	--- kg N ha ⁻¹ ---
24/10/2012	3,0	0,0	3,0	1.438	4,32
31/10/2012	2,7	0,2	2,9	1.438	4,17
14/11/2012	2,7	0,1	2,8	1.438	4,03
12/12/2012	2,8	0,0	2,8	1.438	4,03
19/12/2012	3,5	0,2	3,7	1.438	5,32
03/01/2013	3,5	0,1	3,6	1.438	5,18
08/01/2013	3,3	0,2	3,5	1.438	5,03
15/01/2013	3,3	0,3	3,6	1.438	5,18
22/01/2013	2,8	0,3	3,1	1.438	4,46
31/01/2013	2,2	0,0	2,2	1.438	3,16
Aporte total					44,88

Apéndice II. Concentraciones de N disponible en muestras de FullStop™, durante la temporada de riego.

Tratamiento/Fecha	N disponible		
	N-NO ₃	N-NH ₄	N _{NO3+NH4}
	----- mg L ⁻¹ -----		
03 de enero de 2013			
T0	6,47±5,40	0,50±1,17	6,97 a
T1	2,30±1,92	1,17±0,45	3,47 a
T2	0,90±0,40	0,75±0,35	1,65 a
08 de enero de 2013			
T0	10,40±1,50	0,55±0,05	10,95 a
T1	1,67±0,06	0,37±0,15	2,03 b
T2	0,55±0,05	0,60±0,5	1,15 b
15 de enero de 2013			
T0	2,97±0,11	0,47±0,06	3,43 a
T1	1,70±0,50	0,47±0,23	2,17 b
T2	1,90±0,70	0,45±0,05	2,35 ab
22 de enero de 2013			
T0	3,13±3,02	0,60±0,61	3,73 a
T1	0,93±0,12	1,08±0,23	2,01 a
T2	0,75±0,05	0,95±0,05	1,70 a
31 enero de 2013			
T0	2,23±2,19	0,13±0,23	2,37 a
T1	1,13±0,93	0,10±0,10	1,23 a
T2	1,70±0,00	0,00±0,00	1,70 a

Letras distintas en una columna indican diferencias estadísticamente significativas entre tratamientos en cada fecha de muestreo ($p < 0,05$, PCM de Tukey)