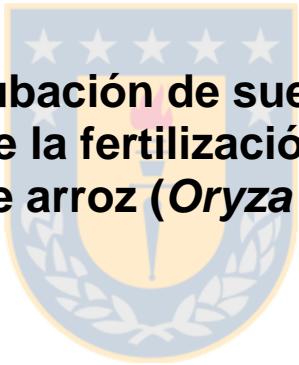




**Universidad de Concepción
Dirección de Postgrado
Facultad de Agronomía - Programa de Magíster en Ciencias Agronómicas**



**Metodología de incubación de suelos para determinar
el efecto residual de la fertilización nitrogenada en el
cultivo de arroz (*Oryza sativa* L.)**

**Tesis para optar al grado de Magíster en Ciencias Agronómicas
Mención en Suelos**

**DIEGO RICARDO VILLASEÑOR ORTIZ
CHILLÁN-CHILE
2013**

Profesor Guía Externo: Juan Fernando Hirzel Campos
Instituto de Investigaciones Agropecuarias - INIA Quilamapu,
Facultad de Agronomía
Universidad de Concepción

METODOLOGÍA DE INCUBACIÓN DE SUELOS PARA DETERMINAR EL EFECTO RESIDUAL DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN EL CULTIVO DE ARROZ (*Oryza Sativa* L.)

Aprobada por:

Juan Hirzel Campos
Ingeniero Agrónomo, M. Sc., Dr.

Profesor Guía Externo

Erick Zagal Venegas
Ingeniero Agrónomo M. Sc., Ph.D.



Profesor Co-Guía

Neal Stolpe Lau
Ingeniero Agrónomo, M. Sc. Ph.D.

Profesor Co-Guía

Inés Figueroa Cares
Ing. Agrónomo, Mg. Sc., Dr.

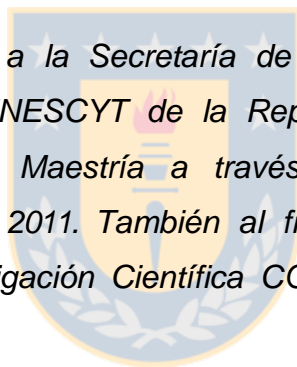
Directora de Programa

AGRADECIMIENTOS

Deseo extender mis sinceros agradecimientos por la supervisión y guía del presente escrito al Dr. Juan Hirzel Campos, así como también a los profesores Erick Zagal Venegas, Ph. D y Neal Stolpe, Ph. D, por sus acertadas contribuciones y sugerencias en el trayecto de realización de la tesis.

Al personal técnico y administrativo del Laboratorio de Suelos del Instituto de Investigaciones Agropecuarias INIA (Centro Regional Quilamapu, Chillán, Chile), en especial a Carmen Lobos, Carola Baeza y Nelson Rabanales, por su contribución en el procesamiento de muestras de laboratorio y de campo del experimento de tesis.

Finalmente, debo agradecer a la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación SENESCYT de la República del Ecuador, por haber financiado mis estudios de Maestría a través del programa de Becas, convocatoria abierta del año 2011. También al financiamiento otorgado por la Comisión Nacional de Investigación Científica CONICYT, proyecto FONDECYT 11110232, Chile.



DEDICATORIA

A Paola que con tu paciencia, comprensión, cariño y dedicación, preferiste sacrificar tu tiempo para que yo pudiera cumplir con el mío. Con tu bondad me inspiraste a ser un mejor hombre, ahora puedo decir que este esfuerzo lleva mucho de ti, gracias por estar siempre a mi lado. Y definitivamente una especial dedicación a mis amados hijitos, Diego Ricardo y Paula Emilia que aunque aún no se dan cuenta, todo esto lo hice por ellos.



TABLA DE CONTENIDOS

	Página
I. Resumen.....	1
II. Abstract.....	2
III. Introducción.....	3
IV. Materiales y Métodos.....	6
V. Resultados y Discusión.....	11
VI. Conclusiones.....	32
VII. Referencias.....	33



INDICE DE FIGURAS Y TABLAS

		Página
Figura 1	Dinámica del Nitrógeno en los compartimientos aeróbicos y anaeróbicos en un suelo arrocero bajo inundación.....	4
Figura 2	Evolución de la concentración de $N-NH_4^+$ mineralizado en el suelo Alfisol incubado en condiciones anaeróbicas sin agitación por 0, 7, 14, y 28 d. (a) incubación a 20°C. (b) incubación a 40°C. 0-N: control sin fertilización nitrogenada. 80-N: dosis equivalente a 80 kg N ha ⁻¹ . 160-N: dosis equivalente a 160 kg N ha ⁻¹	14
Figura 3	Evolución de la concentración de $N-NH_4^+$ mineralizado en el suelo Vertisol incubado en condiciones anaeróbicas sin agitación por 0, 7, 14, y 28 d. (a) incubación a 20°C. (b) incubación a 40°C. 0-N: control sin fertilización nitrogenada. 80-N: dosis equivalente a 80 kg N ha ⁻¹ . 160-N: dosis equivalente a 160 kg N ha ⁻¹	15
Figura 4	$N-NH_4^+$ mineralizado como promedio de tres dosis de fertilización nitrogenada en dos suelos arroceros incubados a 40°C por 7 días con y sin agitación constante.	18
Figura 5	Rendimiento de grano en el cultivo de arroz en dos Suelos arroceros fertilizados con tres dosis distintas de N.....	22
Figura 6	Efecto residual de la fertilización nitrogenada para dos suelos arroceros.	24
Figura 7	Eficiencia de recuperación aparente de N en los tratamientos fertilizados para dos tipos de suelo arrocero....	25
Figura 8	Relación entre N extraído por el cultivo y N disponible en el suelo (mg kg ⁻¹) como efecto residual de la fertilización nitrogenada en un suelo arrocero Alfisol, incubado anaeróbicamente sin agitación por 7 días a 20°C.....	29
Figura 9	Relación entre N extraído por el cultivo y N disponible en el suelo (mg kg ⁻¹) como efecto residual de la fertilización nitrogenada en un suelo arrocero Vertisol, incubado anaeróbicamente sin agitación por 21 días a 40°C.....	30

Figura 10	Relación entre el N residual extraído y el N disponible en el suelo (kg ha^{-1}) en los tratamientos fertilizados con N la temporada (2011-2012) y el control sin N, en un suelo arrocero Alfisol incubado por 7 d a 20°C , sin agitación constante.....	31
Figura 11	Relación entre el N residual extraído y el N disponible en el suelo (kg ha^{-1}) en los tratamientos fertilizados con N la temporada (2011-2012) y el control sin N, en un suelo arrocero Vertisol incubado por 21 d a 20°C , sin agitación constante.....	32
Tabla 1	Propiedades físicas y químicas iniciales del suelo (0-20 cm de profundidad).....	7
Tabla 2	Niveles de significancia de la concentración potencial de N-NH_4^+ disponible, en los suelos Alfisol y Vertisol, incubados en condiciones anaeróbicas sin agitación a temperaturas de 20° y 40°C por 0, 7, 14, 21, y 28 días con tres dosis distintas de nitrógeno.....	12
Tabla 3	Ecuaciones y coeficientes de determinación del modelo cuadrático que se ajustó a la evolución de la mineralización de N-NH_4^+ a cinco tiempos y dos temperaturas de incubación sin agitación de dos suelos arroceros.....	13
Tabla 4	Análisis de varianza de la concentración de N-NH_4^+ disponible, en los suelos Alfisol y Vertisol, incubados en condiciones anaeróbicas con y sin agitación a 40°C por 7 días, con tres dosis distintas de N.....	17
Tabla 5	Concentración de N, MS, y extracción de N obtenidos en el experimento de campo en los Suelos arroceros Alfisol y Vertisol.....	21
Tabla 6	Coefficientes de regresión entre N-NH_4^+ mineralizado en incubaciones anaeróbicas sin agitación por diferentes tiempos y la extracción de nitrógeno por el cultivo de arroz en dos suelos arroceros de Chile.....	26
Tabla 7	Coefficientes de regresión entre N-NH_4^+ mineralizado en incubaciones anaeróbicas con y sin agitación a 40°C por 7 d y la extracción de N por el cultivo en dos suelos arroceros de Chile.....	27



METODOLOGÍA DE INCUBACIÓN DE SUELOS PARA DETERMINAR EL EFECTO RESIDUAL DE LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA EN EL CULTIVO DE ARROZ (*Oryza sativa* L.)

SOIL INCUBATION METHODOLOGY FOR DETERMINING THE RESIDUAL EFFECT OF NITROGEN FERTILIZATION ON GROWING RICE (*Oryza sativa* L.)

I. RESUMEN

Una fuente importante de Nitrógeno (N) para el arroz (*Oryza sativa* L.) es la mineralización de los compuestos orgánicos presentes en el suelo, y la correcta determinación del aporte de este nutriente desde dichos compuestos puede contribuir a reducir la dosis de fertilizante nitrogenado a utilizar. El objetivo principal del estudio fue evaluar una metodología de laboratorio para determinar el potencial de mineralización de N de dos suelos arroceros, que proviene del efecto residual de la fertilización nitrogenada en dosis de 0, 80 y 160 kg ha⁻¹, a través de incubaciones anaeróbicas con y sin agitación. El estudio comprendió experimentos de campo e incubaciones anaeróbicas de laboratorio en suelos del orden Alfisol y Vertisol, manejados con monocultivo de arroz. Las incubaciones se realizaron en 2 modalidades; 7 días a 40°C con agitación constante, y en periodos 0, 7, 14, 21, y 28 días tanto a 20° como a 40°C. La extracción de N de los experimentos de campo se relacionó con el N mineralizado, y se determinó el mejor tiempo y temperatura de incubación para cada suelo. Los resultados indican que la temperatura y tiempo más adecuados para el Alfisol fue de a 20°C por 7 d, y para el Vertisol a 40°C por 21 d, en ambos casos bajo incubaciones sin agitación. La fertilización residual generó un rendimiento de grano en el Alfisol que fluctuó entre 3,61 y 4,93 Mg ha⁻¹ en tanto que para el Vertisol este incremento fluctuó entre 1,47 y 4,37 Mg ha⁻¹ para las dosis de 80 y 160 kg ha⁻¹ en ambos casos, respecto del control sin N. La extracción de N por el cultivo como efecto residual del N aplicado

fluctuó entre 24,6 y 33,9 kg N ha⁻¹ en el Alfisol, y entre 28,3 y 45,8 kg N ha⁻¹ en el Vertisol, respecto del control. Finalmente para el cultivo de arroz siguiente se puede ahorrar de 0,86 y 0,43 kg N a aplicar por cada 1 mg N kg⁻¹ mineralizado en los suelos Alfisol y Vertisol respectivamente.

Palabras clave: Incubación anaeróbica con agitación, sin agitación, Mineralización de N, Alfisol, Vertisol.

II. ABSTRACT

An important source of nitrogen for rice (*Oryza sativa* L.) is mineralization of the soil organic forms and its correct determination can help to reduce the fertilizer rate to use. The objective of the present study was to evaluate a laboratory method for determining the potential of N mineralization in two rice paddy soils, derived from the residual effect of N fertilization at doses of 0, 80 and 160 kg ha⁻¹ through anaerobic incubations with and without shaking. This study included field and laboratory experiments conducted in an Alfisol and a Vertisol managed with a rice monocrop. Anaerobic incubations were carried out in two ways; 7 days at 40°C with constant shaking; and 0, 7, 14, 21 and 28 days, both at 20° and 40°C without shaking. Crop N uptake was related to mineralized N; the best incubation time and temperature were determined for each soil. The results indicate that the most suitable temperature and time for the Alfisols was at 20 ° C for 7 d, and for Vertisol 40 ° C for 21 d, both under incubations without shaking. The residual fertilization produced a grain yield in the Alfisol fluctuating between 3.61 and 4.93 Mg ha⁻¹ while for the Vertisol this increase fluctuated between 1.47 and 4.37 Mg ha⁻¹ for doses of 80 to 160 kg ha⁻¹ in both cases compared with the control without N. Crop N uptake as a residual effect of applied N fluctuated between 24.6 and 33.9 kg N ha⁻¹ in the Alfisol and 28.3 and 45.8 kg N ha⁻¹ in the Vertisol compared with the control. Finally, there are possible savings in the next rice crop of from 0.86 to 0.43 kg N applied for each 1 mg N kg⁻¹ mineralized in the Alfisol and Vertisol, respectively.

Key words: Anaerobic incubation with shaking, without shaking, N mineralization, Alfisol, Vertisol.

III. INTRODUCCIÓN

El Arroz, *Oryza Sativa* L., es una fuente primaria de alimento para más de un tercio de la población mundial (FAO, 2004), situado en el segundo lugar de importancia entre los cereales después del trigo (IRRI, 2002). Las estadísticas de la década pasada, mencionan que la superficie cultivada con arroz en el mundo estaba alrededor de 147,5 millones de ha, mientras tanto que en Chile se estima una superficie de 21.000,00 ha (ODEPA, 2013), concentradas en el valle central del país entre los paralelos 34 y 36° de latitud sur, esto es entre las regiones del Libertador General Bernardo O'Higgins, del Maule, y del Bio Bío; (Alvarado & Hernaiz, 2007), De acuerdo con CIREN (1983), a las zonas arroceras de estas regiones les corresponde los órdenes de suelo Alfisol, Vertisol, e Inceptisol. Tanto los Alfisoles como los Vertisoles del valle central de Chile fueron formados por depósitos sedimentarios fluviales, glaciales, y ceniza volcánica principalmente de la cordillera de los Andes, mientras que los Inceptisoles son generalmente suelos inadecuadamente desarrollados, y no tienen propiedades ándicas asociadas (Buol et al., 2011; Stolpe, 2006).

El arroz es una planta semiacuática, generalmente cultivada bajo dos condiciones en el suelo, la primera que consta de una superficie aeróbica de pocos milímetros de profundidad causada por la difusión del O₂ a través de la zona de inundación y alrededor de la superficie de la raíz por el transporte de O₂ a través del parénquima de la planta (aerénquima). La segunda condición corresponde a una capa de suelo anaeróbica, de profundidad variable. Ambas condiciones en el suelo, con presencia o ausencia de O₂, provocan considerables pérdidas de N en el sistema a través de la mineralización, nitrificación, desnitrificación (Figura 1) (De Datta, 1981; Greenland, 1997). Además, la eficiencia productiva del cultivo de arroz depende de varios factores como: clima, condición física y química del suelo, suministro de agua, fecha de siembra, variedad y dosis de semilla, control de malezas, y fertilización (Jing et al., 2008).

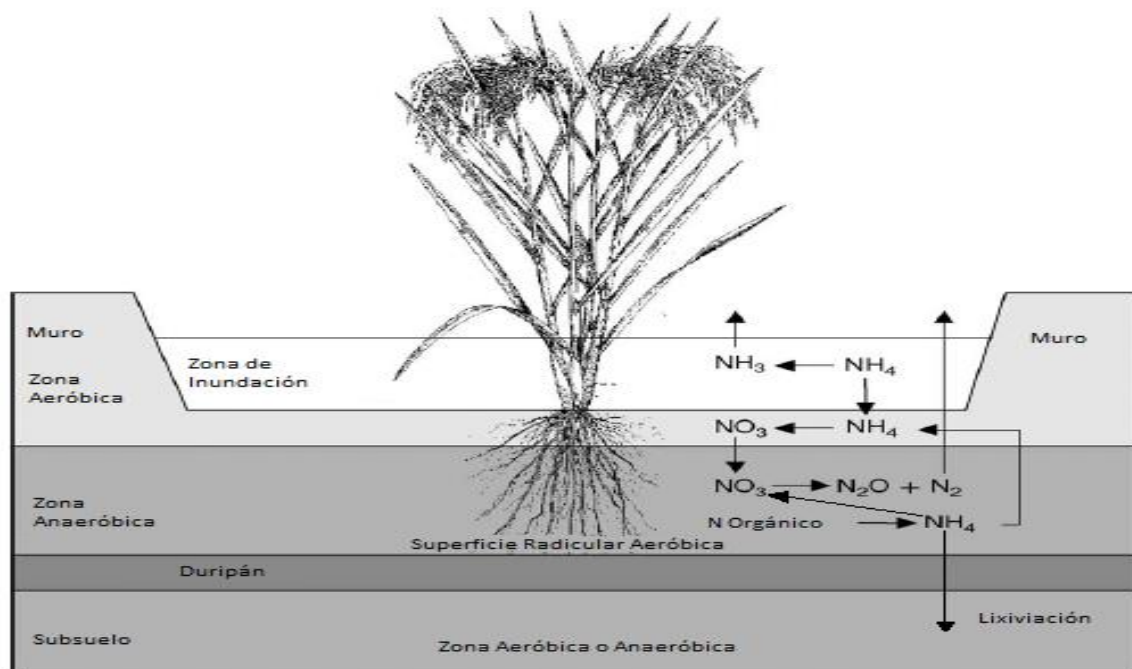


Figura 1. Dinámica del Nitrógeno en los compartimientos aeróbicos y anaeróbicos en un suelo arrozero bajo inundación. (Adaptado de Greenland, 1997).

La mineralización es un proceso fundamental del suplemento y la magnitud del Nitrógeno (N) mineral en los suelos (Manguiat et al., 1996; Honeycutt, 1999), y su estimación adecuada podrá contribuir a la optimización del uso de fertilizantes nitrogenados en el cultivo (Sainz et al., 2004), ya que el N extraído por la planta proviene principalmente de las reservas generadas por la mineralización de la materia orgánica, actividad de la biomasa microbial, y nitrógeno amoniacal (N-NH_4^+) fijado en las arcillas (Sainz et al., 2004; Sahrawat, 2006) y la fertilización (Wienhold, 2007). Sin embargo, la predicción exacta de la mineralización de N se dificulta, debido a los efectos de las variables que implican el manejo de cultivo como, condiciones climáticas, y el tipo de suelo (Li et al., 2001; Fan et al., 2005a). Varios autores han demostrado que el método de incubación anaeróbica es el apropiado para la determinación del potencial de mineralización de N en suelos arrozeros, ya que este reproduce las condiciones de inundación en la que se desarrolla el cultivo (Angus et al, 1994; Wilson et al, 1994a; Bushong et al, 2007; Rodríguez et al, 2008), donde la continuidad del suplemento de N depende

principalmente del N-NH_4^+ mineralizado desde la fracción activa de las formas orgánicas de N (Bushong et al., 2007; Soon et al., 2007; Rodríguez et al., 2008). Existen otros métodos alternativos a la incubación anaeróbica, como la oxidación leve con permanganato de potasio KMnO_4 , dicromato de potasio $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$, ácido oxálico (Wilson et al., 1994a), y ácido sulfúrico H_2SO_4 , (Standford & Smith, 1978); sin embargo, al compararlos con métodos de incubación anaeróbica, demostraron que presentaban ajustes menores (Bushong et al., 2007). Así mismo, el tiempo y la temperatura de incubación se han discutido antes (Angus et al., 1994; Wilson et al., 1994a; Bushong et al., 2007), siendo que el método clásico de incubación anaeróbica propuesto por Waring & Bremner (1964) (7 días a 40°C con agitación) contribuye a la medición de la contribución que hace la biomasa microbiana y fuentes solubles de N, mientras que al incrementar el periodo de incubación se podrá medir toda la fracción activa (Scott et al., 2005).

La importancia de predecir la mineralización de N es evitar el exceso de fertilización nitrogenada que podría afectar al medio ambiente a través de la emisión de gases de efecto invernadero, contaminación por escorrentía y lixiviación (Wang et al., 2001; Zhang et al., 2004; Fan et al., 2005b; Su et al., 2005). Además, su efecto acumulativo puede afectar la disponibilidad de N en el suelo a través del tiempo, permitiendo que una fracción importante se deposite en el suelo cada temporada y afecte la dinámica del nutriente después de cada cosecha (Clay & Clapp, 1990). Por otra parte, la fracción de N mineralizado total podría aumentar con el incremento de las dosis de fertilizante nitrogenado (Yan et al., 2006; Hirzel et al., 2012), resultando en un efecto residual que va a formar parte de las arcillas y la fracción orgánica del suelo (Jensen et al., 2000), o inmovilizándose en la biomasa microbiana del suelo (Jensen et al., 2000; Sainz et al., 2004). Estos antecedentes indican que una considerable fracción del N aplicado previamente podría ser recuperado en las temporadas subsiguientes y así estimarse a través de metodologías que se puedan ajustar para cada tipo de suelo, como ha sido propuesto anteriormente por Yan et al (2006) para arroz, y para maíz por Hirzel et al (2007a); parámetros que se pueden correlacionar con la extracción de N por el cultivo y concentración de N en la planta (Srpska & Sad.,

2005, Yan et al., 2006). Para la situación chilena, en la cual se realiza monocultivo de arroz o cultivo de arroz cada 2 años en rotación con pradera natural sin riego, la acumulación de N en el suelo puede generar un ahorro de fertilizantes nitrogenados y un manejo de fertilización (Hirzel et al., 2011a).

En base a lo anteriormente expuesto, el objetivo general de esta investigación fue comprobar una metodología de laboratorio para determinar el potencial de mineralización de N de dos suelos arroceros, que derivan del efecto residual de la fertilización nitrogenada a través de incubaciones anaeróbicas con y sin agitación constante. Los objetivos específicos fueron: 1) determinar el efecto residual de la fertilización nitrogenada aplicada en 2 cultivos de arroz sobre el rendimiento de grano, producción de materia seca (MS), y extracción de N del cultivo en la temporada siguiente, además de la eficiencia de recuperación residual aparente de N en el cultivo (NARE), y 2) obtener un índice de relación entre la capacidad de extracción de N del cultivo proveniente del efecto residual de la fertilización nitrogenada y el N mineralizado por cada suelo, determinado bajo condiciones controladas de laboratorio.

IV. MATERIALES Y MÉTODOS

Determinación de la mineralización de N del suelo en laboratorio

Las incubaciones de suelos se realizaron en el Laboratorio de Suelos del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Centro Regional Quilamapu, Chillán, Chile) durante la temporada 2012-2013, provenientes de cultivos de arroz en suelos de orden Alfisol, y Vertisol correspondientes a las series Parral franco arcilloso (fine, mixed, active, thermic Aquic Haploxeralfs) y Quella franco arcilloso (fine, smectitic, thermic Aquic Durixererts), respectivamente (CIREN, 1983; USDA, 2010), fertilizados con dosis crecientes de N (0, 80, y 160 kg N ha⁻¹) durante la temporada anterior (2011-2012) (Hirzel & Rodríguez, 2013; Hirzel & Stolpe, 2014).

Las muestras fueron colectadas de 0 a 20 cm de profundidad una vez concluido el cultivo, considerándose 10 submuestras por unidad experimental y luego caracterizada física y químicamente (Tabla 1).

Tabla 1. Propiedades físicas y químicas iniciales del suelo (0-20 cm de profundidad).

Parámetros	Suelo	
	Alfisol	Vertisol
Arcilla, %	34,1	36,1
Limo, %	38,8	32,6
Arena, %	27,1	31,2
Densidad aparente, t m ⁻³	2,09	1,89
Porosidad total, %	22,3	28,7
pH, (agua:suelo 1:5)	5,2	5,7
Materia orgánica, g kg ⁻¹	48,0	22,0
CE, dS m ⁻¹	0,10	0,04
P Olsen, mg kg ⁻¹	12,0	4,9
K intercambiable cmol _c kg ⁻¹	0,26	0,17
Ca intercambiable, cmol _c kg ⁻¹	6,30	7,80
Mg intercambiable, cmol _c kg ⁻¹	2,30	3,26
Na intercambiable, cmol _c kg ⁻¹	0,30	0,26
Al intercambiable, cmol _c kg ⁻¹	0,12	0,02
Fe disponible, mg kg ⁻¹	266,0	47,5
Mn disponible, mg kg ⁻¹	189,0	77,6
Zn disponible, mg kg ⁻¹	2,3	0,6
S disponible, mg kg ⁻¹	32,0	1,0

Para estimar la mineralización de los suelos, las muestras fueron incubadas bajo condiciones controladas de laboratorio por dos vías: una incubación anaeróbica por 7 días a 40°C con agitación constante como método modificado de Waring y Bremner (1964), y otra incubación sin agitación por 0, 7, 14, 21, y 28 días a 20° y a 40°C, para simular las condiciones de campo. Generalmente tiempos cortos de incubación pueden mostrar toda la fracción activa del suelo (Scott et al., 2005; Hirzel et al., 2012) y podrían indicar de una manera más precisa la capacidad del suelo para suministrar N. Los dos procesos, con y sin agitación, se prepararon

bajo un mismo procedimiento, diferenciándose únicamente en la forma de incubación, correspondiente a una modificación del método propuesto por Waring & Bremner (1964) como se indica a continuación: 5 g de suelo y 12,5 mL de agua destilada se colocan en un recipiente plástico (150 cc), sellado con un tapón e incubado a dos niveles de temperatura por separado, 20 y 40°C por periodos de tiempo de 0, 7, 14, 21 y 28 días en una incubadora modelo FOC215E (Fernández, 1995; Hirzel et al., 2012) sin agitación. De la misma manera, las incubaciones de suelo con agitación se llevaron a cabo en una incubadora CARBOLITE modelo PIC 200. La concentración de N-NH_4^+ en los extractos se determinó añadiendo 12,5 mL 4M de cloruro de potasio (KCl), y llevando a agitación por 1 hr (Mulnavey, 1996), luego pasa a filtrado a través de papel filtro ADVANTEC 5C y la lectura de N-NH_4^+ se realizó en un espectrofotómetro de flujo segmentado modelo SKALAR (Skalar Inc., Breda, the Netherlands).

Experimento de campo

El experimento de campo se realizó la temporada 2012-2013, sin fertilización nitrogenada. Los suelos empleados fueron los mismos caracterizados para las incubaciones anaeróbicas, de textura franco arcillosa, baja permeabilidad y drenaje imperfecto. El clima de la zona es Mediterráneo, con altas temperaturas y baja precipitación durante el verano, y bajas temperaturas y alta precipitación durante el invierno (Hirzel et al., 2007b).

La práctica agrícola actual en estos sectores consiste en arroz de regadío entre los meses de Septiembre a Abril. Los sitios experimentales, estaban divididos en un diseño de bloques completos, con tres tratamientos de fertilización nitrogenada residual (fertilizados la temporada 2011 - 2012) y cuatro repeticiones. Cada una de las tres parcelas experimentales dentro del bloque midió 5 x 3 m. Las parcelas del experimento fueron aradas previamente en invierno usando equipos de labranza convencional y cultivadas optimizando las prácticas agronómicas para arroz. El cultivar usado fue Zafiro-INIA, la semilla fue pre germinada dos días antes de la siembra y su dosis fue de 140 kg ha⁻¹. Los suelos fueron fertilizados con 60 kg P₂O₅ y 60 kg K₂O, aplicado previo a la siembra, como superfosfato triple y cloruro

de potasio, respectivamente. El control de malezas se llevó a cabo después su emergencia entre los 35 y 60 días de desarrollo del cultivo, con los herbicidas Penoxsulam (Ricer 240 g L⁻¹) a dosis de 0,03 kg i.a. ha⁻¹, MCPA (MCPA 750 SL 750 g L⁻¹) y Bentazon (Basagran 480 g L⁻¹) a dosis de 0,19 and 0,72 kg i.a. ha⁻¹, respectivamente.

Al finalizar la temporada, se realizó la cosecha al momento de madurez de grano (20% de humedad) (Hirzel et al., 2011a); en cada parcela se colectaron muestras de la planta entera y panícula (Yan et al., 2006), con la finalidad de determinar rendimiento de grano, MS, concentración de N total en la planta, extracción de N por la planta. Para determinar rendimiento de grano se muestreó panículas provenientes de una superficie de 1 m² por unidad experimental, colectadas en 4 marcos de 0,25 m², las cuales fueron secadas al sol, trilladas y pesadas en seco. Las muestras de planta entera fueron colectadas de una superficie de 0,5 m² por unidad experimental, colectadas en 2 marcos de 0,25 m², luego este material fue secado, molido, tamizado y analizado para determinar la concentración de N total (Hirzel et al., 2012), usando el procedimiento macro-Kjeldahl, y MS pesando el material molido y seco. La extracción de N por la planta se calculó como el producto de la materia seca y la concentración de N en la planta, de cada tratamiento (Yan et al., 2006; Hirzel et al., 2007a). El efecto residual de N de la fertilización, se calculó mediante la diferencia entre la extracción de N por la planta en cada tratamiento fertilizado la temporada 2011-2012 y el control (Sørensen & Amato., 2002). Así mismo, para estimar la eficiencia de recuperación residual aparente de N (NARE) en ambas localidades, se determinó la diferencia entre extracción total de N por la planta de cada tratamiento fertilizado y el control, dividido para el total de N aplicado en su misma temporada de fertilización 2011-2012 (Rees & Castle., 2002):

$$\text{NARE} = [(A - B)/C] \times 100$$

Dónde:

A= Extracción de N del tratamiento (kg ha⁻¹)

B= Extracción de N del control (kg ha⁻¹)

C= N aplicado en cada tratamiento (kg ha^{-1}) en la temporada anterior.

Determinación del Índice de relación entre extracción de N del cultivo y N mineralizado

El N-NH_4^+ mineralizado a través de las incubaciones sin agitación por 0, 7, 14, 21, y 28 días a dos temperaturas sin agitación y las incubaciones por 7 días a 40°C con agitación constante, fueron relacionadas con el N extraído por el cultivo (Srpska & Sad., 2005; Yan et al., 2006; Hirzel & Stolpe, 2014). Los coeficientes de determinación obtenidos permitieron establecer para cada suelo el método más apropiado (tiempo y temperatura de incubación), para lo cual se empleó un modelo matemático lineal en la función de regresión simple de SAS (Wilson et al., 1994b; Sahrawat., 2006; Hirzel et al., 2012) y ANOVA. El índice de relación entre la extracción de N del cultivo proveniente del efecto residual de la fertilización nitrogenada de la temporada 2011-2012 y la mineralización diferencial de N en cada tipo de suelo (Sørensen & Amato, 2002) se calculó mediante la diferencia de las pendientes de la recta de cada modelo lineal que tuvieron un mayor ajuste de regresión en cada tipo de suelo.

Diseño experimental

Para los experimentos de incubación en condiciones controladas de laboratorio, el efecto de la agitación y las dosis de N aplicadas la temporada 2011-2012 se evaluaron en un diseño de parcelas sub-sub divididas, donde la parcela principal fue la condición sin y con agitación, la sub parcela fueron los dos suelos evaluados (Alfisol y Vertisol) y la sub-sub parcela fueron las dosis de N utilizadas (0, 80, y 160 kg N ha^{-1}). El tiempo de incubación y la temperatura fue la misma para los dos tratamientos (con y sin agitación) a 40°C por 7 días de incubación, de acuerdo con Waring & Bremner (1964). Para este experimento se utilizaron cuatro repeticiones por tratamiento.

Al mismo tiempo para las incubaciones de hasta 28 días, sin agitación a dos temperaturas (20° y 40°C) y tres dosis de N aplicadas la temporada 2011-2012 (0, 80, y 160 kg N ha^{-1}), se utilizó un diseño de parcelas sub-sub-sub divididas. Donde

la parcela principal fueron los dos suelos evaluados (Alfisol y Vertisol), la sub parcela las temperaturas de incubación (20° y 40°C), la sub-sub parcela correspondió a los tiempos de incubación (0, 7, 14, 21, y 28 días), y la sub-sub-sub parcela las dosis de N aplicadas en la temporada anterior (0, 80, y 160 kg N ha⁻¹). Para este experimento se utilizaron cuatro repeticiones por tratamiento. Los resultados fueron examinados con ANOVA y un test DMS (diferencia mínima significativa) (P=0.05) utilizando el procedimiento de modelo general de software SAS (SAS Institute, 1989).

V. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Incubaciones anaeróbicas sin agitación constante para determinar la mineralización de N

El análisis de varianza del experimento, demuestra que la mineralización de N-NH₄⁺ de los suelos Alfisol y Vertisol producidas en las incubaciones anaeróbicas sin agitación, fue principalmente influenciada por la temperatura y tiempo de incubación, y las dosis de N aplicadas la temporada anterior (2011-2012) (P<0.05). Sin embargo, no se encontraron diferencias en el análisis de los dos suelos evaluados, disminuyendo la sensibilidad para detectar diferencias entre estas dos variables (Tabla 2). Las ecuaciones y curvas, que se ajustaron a un modelo cuadrático (Tabla 3), representan la evolución de la mineralización de N-NH₄⁺ en los tratamientos que recibieron dosis distintas de N en la temporada (2011-2012) (Figuras 2 y 3) y presentaron un patrón similar a través del periodo de incubación de hasta 28 días a dos temperaturas de 20 y 40°C.

Tabla 2. Niveles de significancia de la concentración potencial de N-NH_4^+ disponible, en los suelos Alfisol y Vertisol, incubados en condiciones anaeróbicas sin agitación a temperaturas de 20° y 40°C por 0, 7, 14, 21, y 28 días con tres dosis distintas de nitrógeno.

Fuentes de variación	Gl	Cuadrados medios	Significancia
Suelo (S) ¹	1	226,8648	NS
Temperatura de incubación (T) ²	1	109474,2735	**
S*T	1	2004,6196	**
Tiempo de incubación (t) ³	4	13504,2745	**
S*t	4	126,5024	NS
T*t	4	7079,5157	**
S*T*t	4	145,6721	NS
Dosis de N (N) ⁴	2	2448,8026	**
S*N	2	1781,0504	**
T*N	2	1047,6854	**
t*N	8	203,9407	NS
S*T*t*N	26	181,7619	NS

¹ Dos órdenes de suelo: Alfisol, Vertisol; ² dos temperaturas de incubación: 20 y 40°C; ³ cinco tiempos de incubación 0, 7, 14, 21, y 28 d; ⁴ tres dosis de nitrógeno: 0, 80, y 160 kg ha⁻¹. *, ** Significancia a 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad. NS, no significativo.

El N-NH_4^+ en el suelo Alfisol registró su nivel de mineralización más alto con la tasa equivalente a 160 kg N ha⁻¹ aplicada la temporada (2011-2012) con 32,24 y 103,90 mg kg suelo⁻¹ a los 28 días de incubación a 20° y 40°C respectivamente, ambos casos superaron al control sin N (Figura 2). Por otro lado, la concentración de N-NH_4^+ mineralizado en el suelo Vertisol fue de 19,88 mg kg suelo⁻¹ a los 21 días de incubación y 90,54 mg kg suelo⁻¹ a los 14 días de incubación a 20° y 40°C respectivamente, en ambos casos para la tasa equivalente a 160 kg N ha⁻¹ aplicada la temporada anterior (Figura 3). Como era esperable el N mineralizado incrementó en los dos suelos incubados junto con el incremento de las dosis de fertilización nitrogenada empleada la temporada (2011-2012).

Tabla 3. Ecuaciones y coeficientes de determinación del modelo cuadrático que se ajustó a la evolución de la mineralización de N-NH_4^+ a cinco tiempos y dos temperaturas de incubación sin agitación de dos suelos arroceros.

Suelo	Temperatura	Dosis	Ecuación de ajuste	R ²
Alfisol	20°C	0-N	$y = 0,0092x^2 + 0,3522x + 10,607$	0,958*
		80-N	$y = -0,0012x^2 + 0,5839x + 12,424$	0,977*
		160-N	$y = -0,0161x^2 + 1,1014x + 11,963$	0,778 ^{NS}
	40°C	0-N	$y = -0,0909x^2 + 3,7873x + 13,46$	0,942 ^{NS}
		80-N	$y = -0,1044x^2 + 5,3535x + 19,022$	0,876 ^{NS}
		160-N	$y = -0,1091x^2 + 5,8457x + 18,962$	0,837 ^{NS}
Vertisol	20°C	0-N	$y = -0,0061x^2 + 0,3208x + 7,9399$	0,618 ^{NS}
		80-N	$y = -0,0078x^2 + 0,4712x + 7,6555$	0,889 ^{NS}
		160-N	$y = -0,0232x^2 + 1,0451x + 7,3392$	0,944 ^{NS}
	40°C	0-N	$y = -0,0651x^2 + 4,0931x + 14,794$	0,875 ^{NS}
		80-N	$y = -0,1295x^2 + 6,0595x + 13,16$	0,923 ^{NS}
		160-N	$y = -0,2592x^2 + 9,435x + 13,853$	0,916 ^{NS}

*, ** Significancia a 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad. NS, no significativo.

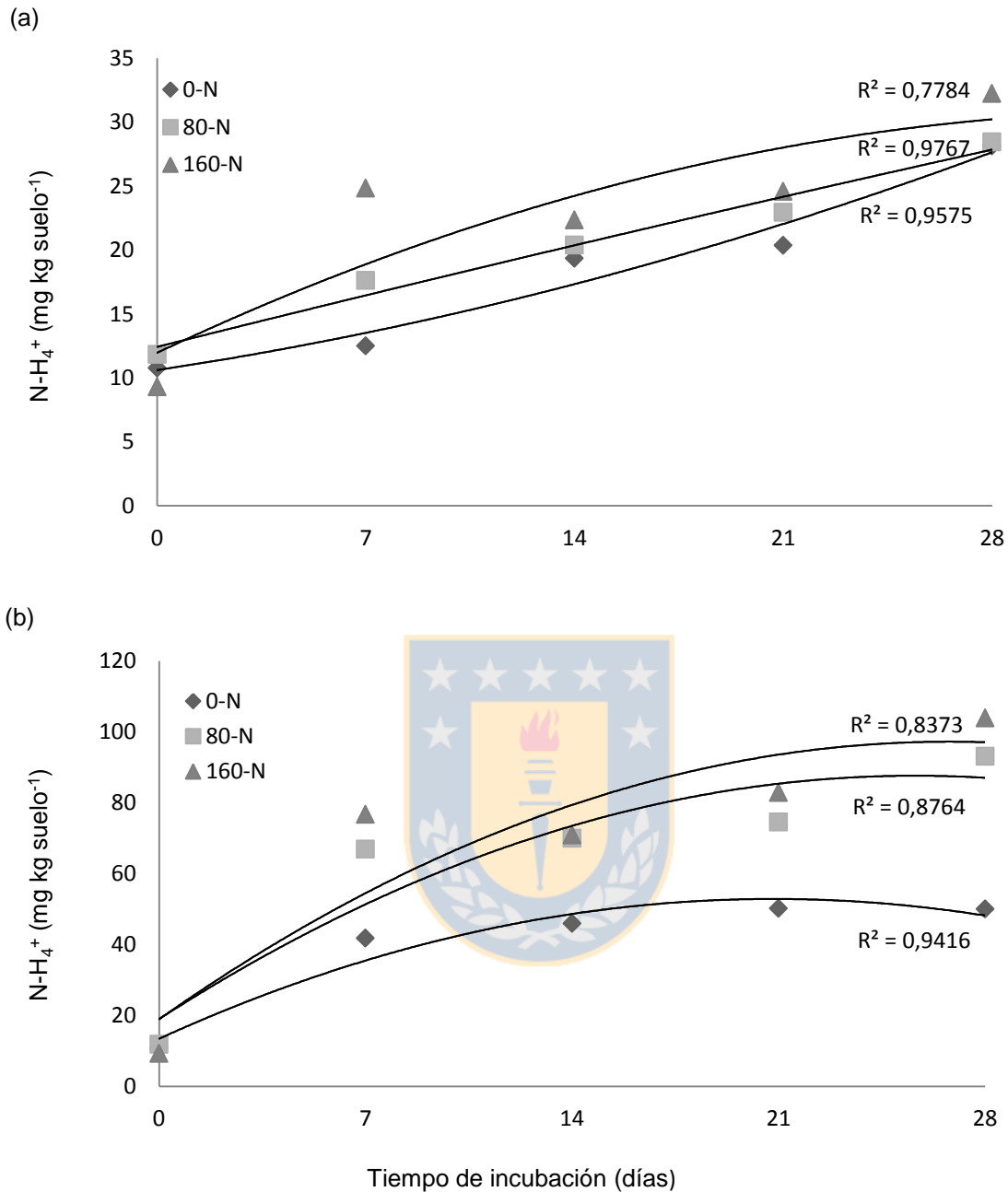


Figura 2. Evolución de la concentración de N-NH_4^+ mineralizado en el suelo Alfisol incubado en condiciones anaeróbicas sin agitación por 0, 7, 14, y 28 d. (a) incubación a 20°C . (b) incubación a 40°C . 0-N: control sin fertilización nitrogenada. 80-N: dosis equivalente a 80 kg N ha^{-1} . 160-N: dosis equivalente a 160 kg N ha^{-1} .

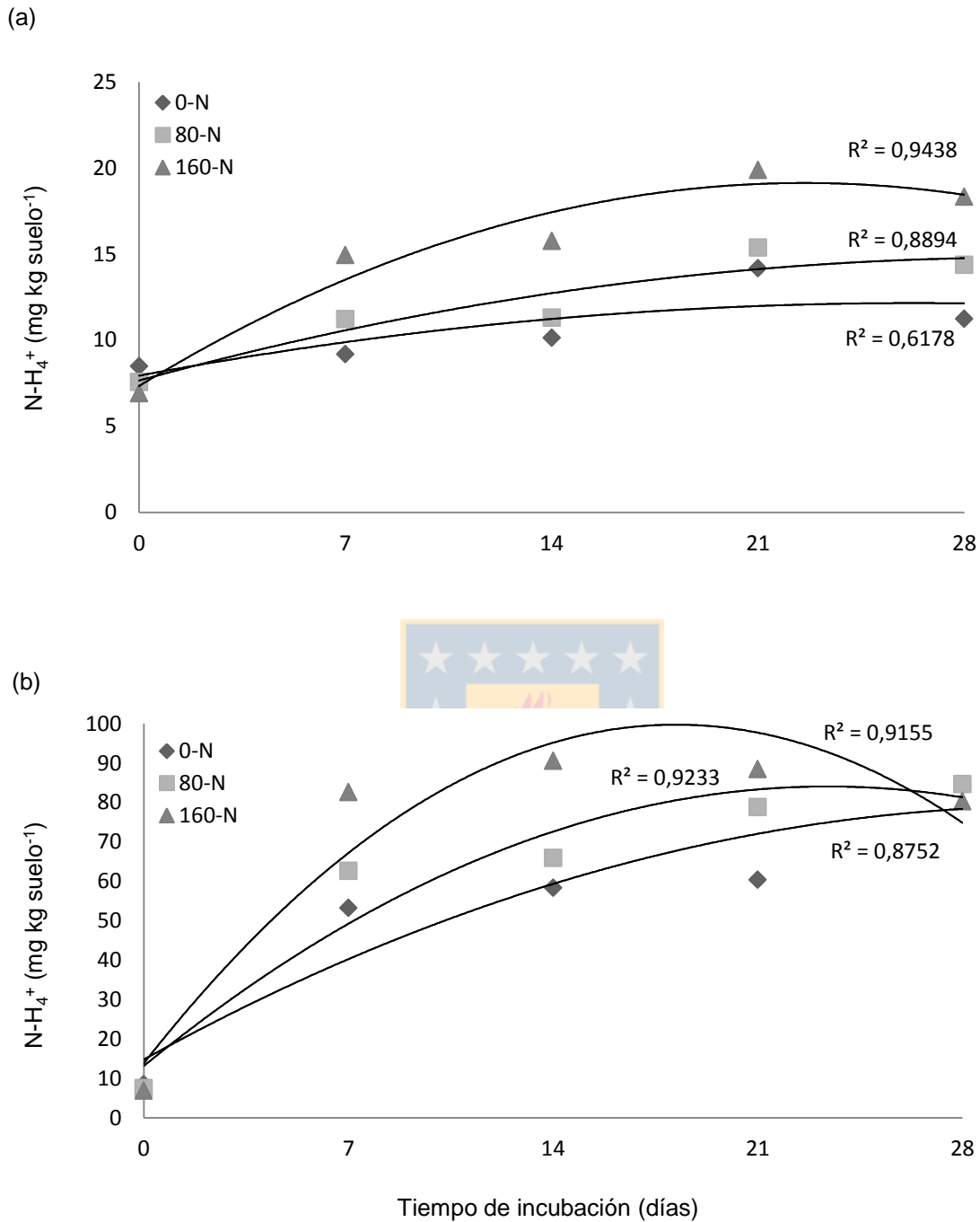


Figura 3. Evolución de la concentración de N-NH_4^+ mineralizado en el suelo Vertisol incubado en condiciones anaeróbicas sin agitación por 0, 7, 14, y 28 d. (a) incubación a 20°C . (b) incubación a 40°C . 0-N: control sin fertilización nitrogenada. 80-N: dosis equivalente a 80 kg N ha^{-1} . 160-N: dosis equivalente a 160 kg N ha^{-1} .

Estos resultados son corroborados por el análisis de varianza del experimento que indica diferencias ($P < 0.01$) con el control sin fertilización nitrogenada (Tabla 2) y concuerdan con investigaciones realizadas por varios autores (Hadas et al., 1989; Campbell et al., 1991; Rasmussen et al., 1998; Kolberg et al., 1999; Forge & Simard, 2001). Adicionalmente, Hirzel et al (2012) indicaron que la fertilización nitrogenada estimula la mineralización del N nativo del suelo, en referencia a un experimento de similares características, realizado a suelos arroceros, proceso conocido como efecto “priming”, que estimula a los microorganismos presentes en el suelo a incrementar el desarrollo de su biomasa, aumentando la mineralización de la materia orgánica nativa del suelo (Jenkinson et al., 1985; Fontaine et al., 2003; Conde et al., 2005). Sin embargo, dado que la fertilización empleada había sido aplicada en la temporada anterior, este incremento de la mineralización obedece principalmente al efecto residual de la fertilización nitrogenada, como ha sido señalado para arroz por Yan et al (2006) y para maíz por Hirzel et al (2007b).

Incubaciones anaeróbicas con agitación constante para determinar la mineralización de N

El efecto de la agitación constante por 7 días, sobre las muestras sometidas a incubación anaeróbica a una temperatura de 40°C, influyó significativamente ($p < 0,01$) de manera negativa sobre el $N-NH_4^+$ mineralizado en los dos suelos analizados (Figura 4). De la misma manera y como se esperaba, las dosis de N aplicadas la temporada (2011-2012) incrementaron la disponibilidad de $N-NH_4^+$ generando diferencias significativas entre sus tratamientos ($p < 0,05$), superando al control (Tabla 4). En el experimento de laboratorio el Alfisol registró su nivel promedio de mineralización más alto de $N-NH_4^+$ con $25,91 \text{ mg kg suelo}^{-1}$. Por su parte, en el suelo Vertisol la concentración más alta de $N-NH_4^+$ mineralizado fue de $19,99 \text{ mg kg suelo}^{-1}$; ambos suelos luego 7 días de incubación a 40°C con agitación constante, en la dosis correspondiente a 160 kg N ha^{-1} (Figura 4). Al comparar las medias de $N-NH_4^+$ mineralizado, entre las incubaciones que se sometieron a agitación y las que no por 7 días a 40°C, observamos que el procedimiento sin agitación generó niveles más altos de mineralización en los dos

suelos Alfisol y Vertisol (Figura 4). Resultados concordantes con investigaciones realizadas en experimentos similares con dos suelos arroceros del orden Inceptisol y Vertisol (Fernández, 2009).

Tabla 4. Análisis de varianza de la concentración de N-NH_4^+ disponible, en los suelos Alfisol y Vertisol, incubados en condiciones anaeróbicas con y sin agitación a 40°C por 7 días, con tres dosis distintas de N.

Fuentes de variación	Gl	Cuadrados medios	Significancia
Agitación (A) ¹	1	20203,17203	**
Suelo (S) ²	1	7,31641	NS
A*S	1	317,54941	NS
Dosis de N (N) ³	2	1090,75277	*
A*N	2	280,61234	NS
S*N	2	293,99135	NS
A*S*N	2	716,60916	NS

¹ Incubación con y sin agitación; ² dos órdenes de suelo: Alfisol y Vertisol; ³ tres dosis de nitrógeno: 0, 80, y 160 kg ha⁻¹.

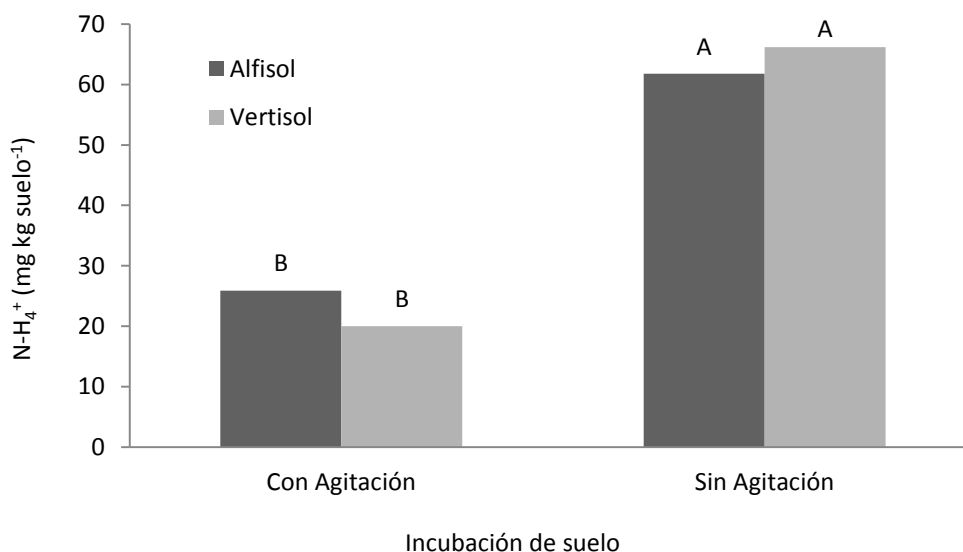


Figura 4. N-NH₄⁺ mineralizado como promedio de tres dosis de fertilización nitrogenada en dos suelos arroceros incubados a 40°C por 7 días con y sin agitación constante. Letras distintas sobre la recta de un mismo suelo, indican diferencia estadística según test de MDS ($p < 0.05$).

El comportamiento observado en las curvas de concentración de N-NH₄⁺ sometidas a incubaciones sin agitación y a dos temperaturas (Figuras 2 y 3) y en la respuesta de la mineralización de los suelos a la fertilización nitrogenada que se incubaron bajo agitación constante por 7 días a 40°C (Figura 4), concuerda con los resultados obtenidos por Standford & Smith, 1972; Bronson et al., 2001; y Yan et al., 2006. Según Tate, (1995) esta conducta se debe a que en el suelo existen distintos tipos de compuestos nitrogenados orgánicos, con tasas distintas de descomposición, formándose dos categorías, una de rápida metabolización y otra más resistente. También, las diferencias en la magnitud del N mineralizado en ambos suelos podrían responder a una mayor absorción de N de la temporada anterior en el suelo Vertisol (Hirzel & Rodríguez, 2013), y a la dinámica de adsorción y desorción de N-NH₄⁺ por el tipo de arcilla (Montmorillonita) predominante en el mismo suelo (Zhang & Scherer, 1999; Nieder et al, 2010) y por la actividad de la biomasa del suelo (Jokela & Randall, 1997; Jensen et al., 2000; Sainz et al., 2004; Sahrawat, 2006). Este mecanismo físico-químico puede llegar a adsorber de forma no intercambiable hasta 850 mg kg suelo⁻¹ (Reichardt

et al., 2000). El grado de saturación de K en las capas intermedias de los minerales de arcilla (Nieder et al, 2010) podría ser un factor influyente también, Scherer, (1982) demostró que el contenido de K en un suelo (Tabla 1) predispone a una mayor o menor fijación de NH_4^+ en función de sus niveles, es decir que los espacios interlaminares de las arcillas se saturarán en mayor magnitud con K que con NH_4^+ (Petersburgsky & Smirnov, 1966), como resultado de competencia por sitios de fijación (Nieder et al, 2010). La condición sumergida de los suelos arroceros (De Datta, 1981; Greenland, 1997), es también un factor influyente en el nivel de mineralización de N-NH_4^+ en el suelo; sin embargo, puede llevar a conclusiones contradictorias sobre su magnitud. De acuerdo con varios investigadores la inmovilización es menos pronunciada bajo condiciones sin inundación (Williams, 1968; Chen et al., 1987). Así como también existen reportes que los suelos bajo condiciones de inundación incrementan significativamente la fijación de N-NH_4^+ en el suelo (Keerthisinghe et al., 1984; Stucki et al. 1984). Por lo tanto, la mineralización del N orgánico y la disponibilidad de NH_4^+ en suelos arroceros depende de las características de cada suelo (Sahrawat, 2006). Obteniendo distintas concentraciones de NH_4^+ en diferentes suelos como Inceptisoles y Vertisoles, al incubarlos en condiciones anaeróbicas a 40 °C (Bushong et al., 2007).

Concentración de N en la planta entera, MS, y extracción de N por el cultivo

En la Tabla 5, se observa que la mayor producción de MS con los diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada se registró en el Alfisol, junto con una tendencia a menor concentración de N en la planta. Este resultado puede estar asociado a un efecto de dilución por remobilización del N almacenado en las hojas (vacuolas del tejido foliar) hacia el grano de arroz (Zhang et al., 2007; Hirzel et al., 2012). Como era esperable la producción de MS y el N extraído por la planta en los dos suelos, fueron menores a los obtenidos por Huang et al., (2008), Xiang-Long et al., (2007) y Hirzel et al. (2012), considerando que los trabajos de estos autores se realizaron con adición de N en rangos similares a las dosis utilizadas en la misma temporada en que el experimento recibió fertilización (2011-12). Sin

embargo, los resultados de concentración de N en planta fueron en promedio mayores que los indicados por Hirzel et al., (2012), lo cual se explica debido a que la presencia de N en el suelo estimula una mayor producción de MS, con una acumulación máxima de N al estado de floración (Hirzel et al., 2011a) y una posterior dilución de este elemento por remobilización hacia el grano (Zhang et al., 2007), en tanto que en ausencia de N en la producción de MS total es restringida generando una menor dilución (Souza et al., 1998; Ntanos & Koutroubas, 2002). Adicionalmente, el bajo rendimiento de MS en el control, en comparación con los tratamientos a dosis de 80 y 160 kg N ha⁻¹ sugiere un menor aporte de N del suelo posiblemente debido a que la materia orgánica del suelo (MOS) habría regresado un estado original de equilibrio, en función de las propiedades físico químicas de cada suelo, en ausencia de fertilizantes (Johnston et al., 1989).

En el Alfisol la mayor producción de MS se registró con el efecto residual de la aplicación correspondiente a 160 kg N ha⁻¹ (Tabla 5). Sin embargo, la concentración de N en la planta no fue afectada por las dosis de N aplicadas en el campo ($P > 0.05$), a diferencia de lo encontrado por algunos autores para condiciones de uso de diferentes dosis de N (Matsunami et al., 2009; Taylaran et al., 2009; Hirzel & Rodríguez, 2013). En relación a la extracción de N, los niveles más altos se obtuvieron en los dos tratamientos donde se aplicó fertilización nitrogenada la temporada anterior ($P < 0.05$) (Tabla 5). En el Vertisol el nivel más alto de MS se obtuvo en los tratamientos que recibieron N en la temporada anterior (Tabla 5), sin diferencias de producción entre éstos ($P > 0.05$), lo cual contrasta de los resultados encontrados con la mineralización de N, donde se detectó diferencias para las diferentes dosis empleadas en la temporada anterior (Tablas 2 y 4). Esto se explica por qué la recuperación del N disponible en el suelo responde con incrementos decrecientes de producción de MS a la mayor disponibilidad de este nutriente en el suelo (Vanotti and Bundy, 1994). En este suelo, la concentración de N en la planta no se vio afectada por las dosis de N aplicadas la temporada pasada ($P > 0.05$). La extracción de N en los tratamientos evaluados presentó incrementos asociados a las dos dosis de fertilizante nitrogenado usado en la temporada anterior, que si bien superaron al control sin N

($P < 0.05$), no presentaron diferencias entre los tratamientos que habían recibido N ($P > 0.05$), lo cual contrasta con las diferencias obtenidas para la mineralización de N (Tablas 2 y 4), efecto anteriormente ya explicado.

Tabla 5. Concentración de N, MS, y extracción de N obtenidos en el experimento de campo en los Suelos arroceros Alfisol y Vertisol.

Suelo	Tratamientos	Concentración	Producción de	Extracción de
		de N en la planta (gr kg^{-1})	MS (Mg ha^{-1})	N por el cultivo (kg ha^{-1})
Alfisol	0-N	7.1a	5.72b	40.69b
	80-N	7.0a	9.34a	65.31a
	160-N	7.3a	10.26a	74.58a
Vertisol	0-N	8.0a	3.43b	26.82b
	80-N	7.1a	7.52ab	55.14ab
	160-N	7.0a	10.34a	72.63a

0-N: control sin fertilización nitrogenada; 80-N: 80 kg N ha^{-1} ; 160-N: 160 kg N ha^{-1} . Letras distintas en una misma columna para un mismo suelo indican diferencias significativas según test DMS ($P < 0,05$).

Rendimiento de Grano

En la Figura 5 observamos la respuesta del rendimiento de grano del experimento, frente a la aplicación de dosis crecientes de N aplicadas la temporada anterior, dónde se evidencia que la mayor respuesta al N aplicado se presenta en el suelo Alfisol y fluctuó entre $3,61$ y $4,93 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Figura 5), que a su vez presentó la mayor concentración de N mineralizado (Figura 1), mientras que en el suelo Vertisol la respuesta a las dosis de N se manifestó en rangos entre $1,47$ y $4,37 \text{ Mg ha}^{-1}$, correlativo a una menor concentración de N mineralizado (Figura 1).

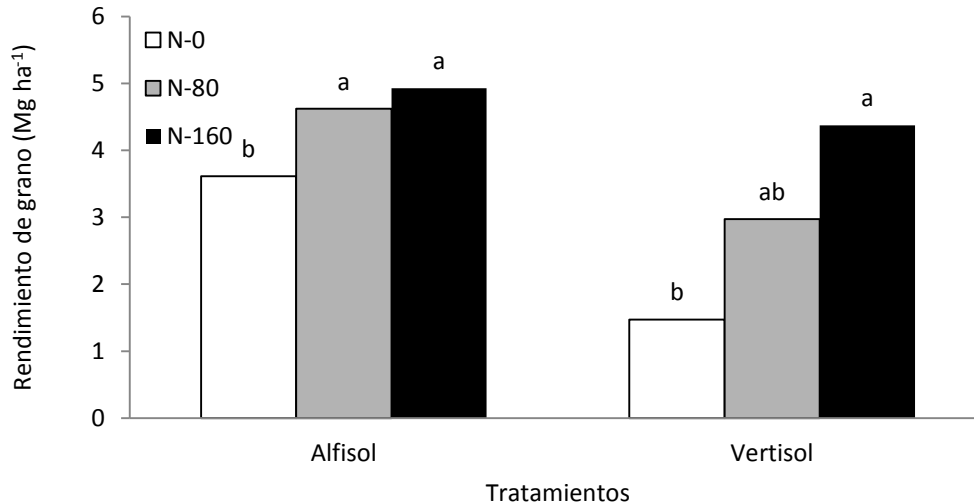


Figura 5. Rendimiento de grano en el cultivo de arroz en dos Suelos arroceros fertilizados con tres dosis distintas de N. Letras distintas sobre un mismo suelo, indican diferencia estadística según test de DMS ($p < 0.05$). N-0: control sin fertilización nitrogenada; N-80: 80 kg N ha⁻¹; N-160: 160 kg N ha⁻¹.

En ambos suelos, el rendimiento de grano fue similar a aquellos indicados por Huang et al., (2008) y Xiang-Long et al., (2007) y menores a los indicados por Artacho et al. (2009) y Hirzel et al. (2012), considerando que estos dos últimos trabajos se realizaron con aplicación de N en la misma zona donde se realizó el experimento. Al respecto, Rojas (2008) encontró una estrecha relación entre rendimientos de arroz y contenidos de $N-NH_4^+$ parcialmente mineralizados en 20 sitios experimentales de diferentes clases taxonómicas, asociadas a la edad y evolución de cada uno de ellos, en la zona arrocera de Ñuble. De tal manera, el suelo con menor presencia de arcillas expandibles del tipo Montmorillonita (Alfisol, serie Parral) presenta una menor estabilidad en las fracciones de reserva de N, generando una mayor entrega potencial de N disponible para el cultivo. De manera contraria, el suelo con mayor presencia de arcillas expandibles (Vertisol, serie Quella) presenta una mayor estabilidad en las fracciones de N de reserva, y por lo tanto una menor capacidad potencial de entrega de N hacia el cultivo (Hirzel, 2011b).

El incremento de los rendimientos de grano, estuvieron directamente relacionados con la dosis de fertilización correspondiente a 160 kg ha^{-1} , aplicadas la temporada anterior, seguido de la tasa media (80 kg ha^{-1}) (Figura 5). En el caso del Vertisol, en los dos tratamientos que recibieron N en la temporada anterior se presentaron rendimientos mayores al control sin N; sin embargo, fueron estadísticamente similares entre ellos ($P>0.05$). Situación similar ocurrió con la producción de MS (Tabla 5), efecto ya discutido. No obstante, esta diferencia de respuesta al efecto residual entre ambos suelos (diferencias de mineralización de N frente a diferentes dosis de N, (Tablas 2 y 4) y pueden estar asociadas al tipo de arcilla dominante en el suelo Vertisol (Montmorillonita), lo cual puede generar una mayor fuerza de adsorción del N-NH_4^+ y menor tasa de liberación hacia el cultivo (Zhang & Scherer.,1999; Nieder et al., 2010). Lo anterior corrobora que las dosis de fertilizante aplicadas al arroz, se deben relacionar con el potencial de rendimiento del cultivo y la mineralización de N-NH_4^+ del suelo, determinada con la incubación en condiciones parcialmente anaeróbicas (método de N incubado para suelos arroceros) (Hirzel et al., 2011a).

Efecto residual y eficiencia de recuperación aparente de N.

El efecto residual de N asociado a las dosis de fertilizante aplicadas la temporada anterior, se muestran en la Figura 6. Este efecto fue más alto en los tratamientos ligados a la dosis de 160 kg N ha^{-1} en los dos suelos evaluados con niveles de $33,89 \text{ kg N ha}^{-1}$ para el Alfisol y $45,81 \text{ kg N ha}^{-1}$ Vertisol. Sin embargo, no hubo diferencia estadística entre los tratamientos de cada suelo evaluado ($P>0.05$), a pesar que la mineralización de N mostró diferencias entre las dosis previamente aplicadas (Tablas 2 y 4), efecto anteriormente explicado. Por otra parte, para condiciones de monocultivo de arroz, estos resultados sugieren una reducción en la dosis de N a emplear en el cultivo siguiente en el suelo Vertisol, respecto a igualdad de condiciones de productividad y manejo en ambos suelos.

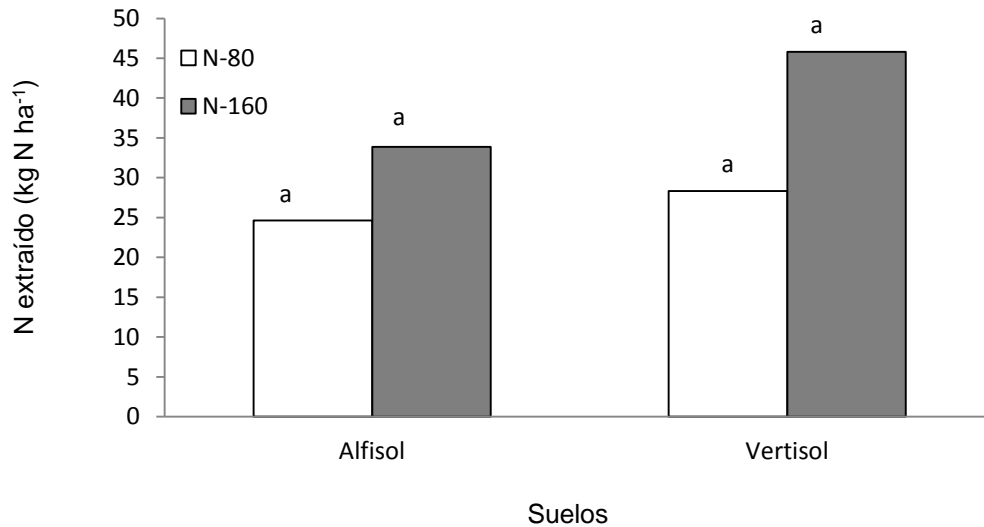


Figura 6. Efecto residual de la fertilización nitrogenada para dos suelos arroceros. Letras distintas sobre un mismo suelo, indican diferencia estadística según test de DMS ($p < 0.05$). N-0: control sin fertilización nitrogenada; N-80: 80 kg N ha⁻¹; N-160: 160 kg N ha⁻¹.

Para la eficiencia de recuperación de N residual NARE (Figura 7), en los dos suelos del experimento la dosis anterior de 160 kg N ha⁻¹ presentó un porcentaje de recuperación de N más bajo que la dosis a 80 kg N ha⁻¹ efecto que concuerda con lo señalado por otros autores (Huang et al., 2008; Hirzel & Rodríguez, 2013). La NARE residual superó el 35,0%, lo cual obedece por una parte, a la recuperación de N en la temporada anterior (entre 41 y 60% en estos suelos; Hirzel & Rodríguez, 2013), como también a las pérdidas producidas por volatilización (De-Xi et al., 2007), denitrificación, escorrentía y lixiviación (Wang et al., 2001; Zhang et al., 2004; Fan et al., 2005a; Su et al., 2005) en la misma temporada de cultivo. La dosis de 80 kg N ha⁻¹ tuvo la eficiencia más alta, con valores de 30,8 y 35,4% para el Alfisol y Vertisol respectivamente, que fueron niveles de recuperación relativamente bajos. Sin embargo, no hubo diferencia entre los tratamientos que recibieron N la temporada anterior para cada suelo evaluado ($P > 0.05$). Esta diferencia se podría explicar debido a los altos coeficientes de variación (datos no mostrados) que arrojó el experimento, los que superaron el 50%, también señalado por Hirzel & Rodríguez (2013).

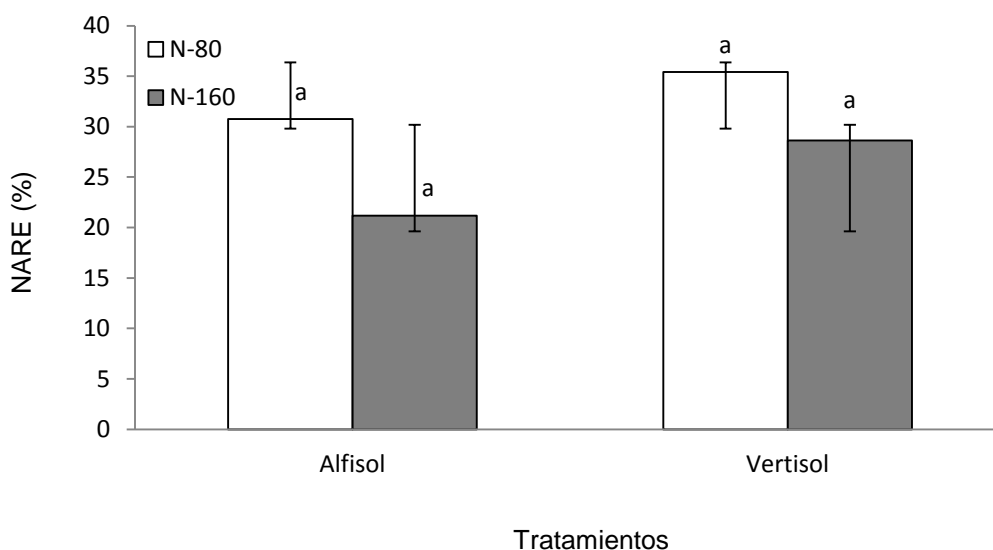


Figura 7. Eficiencia de recuperación aparente de N en los tratamientos fertilizados para dos tipos de suelo arrocero. Letras distintas sobre un mismo suelo, indican diferencia estadística según test de LSD ($p < 0.05$). N-0: control sin fertilización nitrogenada; N-80: 80 kg N ha⁻¹; N-160: 160 kg N ha⁻¹.

Extracción de N por el cultivo y mineralización de N en suelo

La extracción de N por el cultivo tuvo relación directa con el incremento de la fertilización nitrogenada empleada en la temporada anterior (Tabla 5). Sin embargo, no hubo diferencias estadísticas entre los tratamientos ($P > 0.05$) para los dos tipos de suelo. Este efecto es explicado por la ley de respuesta decreciente a incrementos en la dosis o disponibilidad de un insumo (Vanotti y Bundy, 1994).

Los coeficientes de determinación entre N mineralizado y N extraído por la planta bajo incubaciones de suelo a dos temperaturas de 20° y 40°C sin agitación constante fluctuaron entre $R^2 = 0,20$ y $R^2 = 0,78$ para en el suelo Alfisol, y $R^2 = 0,34$ y $R^2 = 0,77$ para el suelo Vertisol (Tabla 6), que para este último tuvieron un efecto significativo. Estos valores fueron generalmente menores a los obtenidos por Wilson et al. (1994b), para un experimento similar de hasta 14 días de incubación anaeróbica.

Tabla 6. Coeficientes de regresión entre N-NH_4^+ mineralizado en incubaciones anaeróbicas sin agitación por diferentes tiempos y la extracción de nitrógeno por el cultivo de arroz en dos suelos arroceros de Chile.

Soil	Tiempo de incubación (días)	Coeficientes de regresión para un modelo matemático lineal (R^2)	
		Temperatura	
		20°C	40°C
Alfisol	0	0.20 ^{ns}	0.20 ^{ns}
	7	0.73 ^{**}	0.41 [*]
	14	0.59 ^{**}	0.32 ^{ns}
	21	0.22 ^{ns}	0.31 ^{ns}
	28	0.66 ^{**}	0.58 ^{**}
Vertisol	0	0.34 [*]	0.34 [*]
	7	0.41 [*]	0.51 ^{**}
	14	0.42 [*]	0.50 ^{**}
	21	0.50 ^{**}	0.78 ^{**}
	28	0.56 ^{**}	0.31 ^{ns}

*,** Significancia a 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad. NS, no significativo.

Tabla 7. Coeficientes de regresión entre N-NH_4^+ mineralizado en incubaciones anaeróbicas con y sin agitación a 40°C por 7 d y la extracción de N por el cultivo en dos suelos arroceros de Chile

Suelo	Coeficientes de determinación para un modelo matemático lineal	
	R^2	
	Con Agitación	Sin Agitación
Alfisol	0,52**	0,41 *
Vertisol	0,65**	0,51**

*,** Significancia a 0.05 y 0.01 niveles de probabilidad. NS, no significativo.

Para la temperatura de 20°C en una incubación anaeróbica sin agitación en el Alfisol, el coeficiente de determinación más elevado se registró a los 7 d con valor $R^2=0,73$ y para los 40°C de incubación el coeficiente más alto se registró a los 28 d con un valor $R^2=0,58$ en ambos casos altamente significativos (Tabla 6). Para el suelo Vertisol, los coeficientes de determinación fueron de la misma manera que en el suelo Alfisol, más bajos que los valores reportados por Wilson et al. (1994b). El coeficiente de determinación más alto para la incubación a 20°C fue de $R^2=0,56$ a los 28 d y para la incubación a 40°C el $R^2=$ a 0,78 en ambos casos altamente significativos (Tabla 6).

Por otro lado, en el experimento de incubación de suelos por siete días con agitación constante a 40°C , los coeficientes de determinación fluctuaron entre $R^2=0,52$ y $R^2=0,65$ para los suelos Alfisol y Vertisol respectivamente, en ambos casos altamente significativos (Tabla 7). En la misma Tabla se presentan los coeficientes de determinación que resultaron entre el N mineralizado en las incubaciones de suelos sin agitación por siete días a 40°C , resultando éstos menores a los que se obtuvieron por el método con agitación con los mismos tiempos de incubación y temperatura. Sin embargo, al comparar los coeficientes de determinación de las incubaciones con agitación de la Tabla 7 con los coeficientes de determinación de las incubaciones sin agitación de la Tabla 6, resultaron con menor ajuste.

Estos resultados presentan estrecha relación entre la mineralización de N bajo condiciones anaeróbicas y la absorción de N por el cultivo de arroz como ha sido señalado por algunos autores (Srpska & Sad, 2005; Yan et al., 2006), y sugieren que el procedimiento de incubación anaeróbica que permite estimar el valor residual de la fertilización nitrogenada fue de 20° por 7 d en el suelo Alfisol y 40° por 21 d en el suelo Vertisol. El valor para el suelo Vertisol, concuerda con lo expresado por Hirzel et al. (2012), donde nos indica un $R^2= 0,84$ altamente significativo para una incubación a 40°C de un suelo Vertisol por 21 d.

Extracción residual de N y concentración residual de N mineralizable

En la Figura 8 se observa el modelo lineal para la relación entre el N extraído por el cultivo y el N mineralizado por el suelo Alfisol usando el método de mayor $R^2= 0,73$ a los 7 días de incubación a 20°C de incubación. Para el suelo Vertisol se empleó la mineralización de N obtenida a los 21 días de incubación a una temperatura de 40°C $R^2= 0,78$ (Figura 9). En general para ambos suelos se observó una relación altamente significativa que se ajustó con un modelo lineal, y que representa la dependencia del N extraído por el cultivo respecto del N mineralizado en el suelo. No obstante, para recomendar una metodología de determinación del N potencialmente mineralizable se habría esperado concordancia entre las temperaturas y tiempos de incubación para ambos suelos, por otra parte, se necesitaría trabajar con mayor número de suelos y temporadas de estudio.

La relación entre la capacidad de extracción de N del cultivo proveniente del efecto residual de la fertilización nitrogenada anterior y el N mineralizado por el suelo considerando el control que no recibió N fue de 2.2 y 1.2 kg de N extraído por cada mg kg^{-1} de N mineralizado para el Alfisol y Vertisol, respectivamente, valores representados por las pendientes de las rectas en las Figuras 8 y 9. Esto indica que el suelo Alfisol presenta una mayor liberación del N residual hacia el cultivo respecto del suelo Vertisol, lo cual está asociado al tipo de arcilla predominante en ambos suelos (Zhang y Scherer, 1999; Nieder et al., 2010) y a la dinámica del N en cada suelo en presencia de plantas, donde la capacidad de

entrega de N del suelo podría ser mayor al resultado que arroje un análisis de disponibilidad de N previo al establecimiento del cultivo, como ha sido señalado para maíz en ausencia de fertilización por Fernández (1995) e Hirzel et al. (2007a).

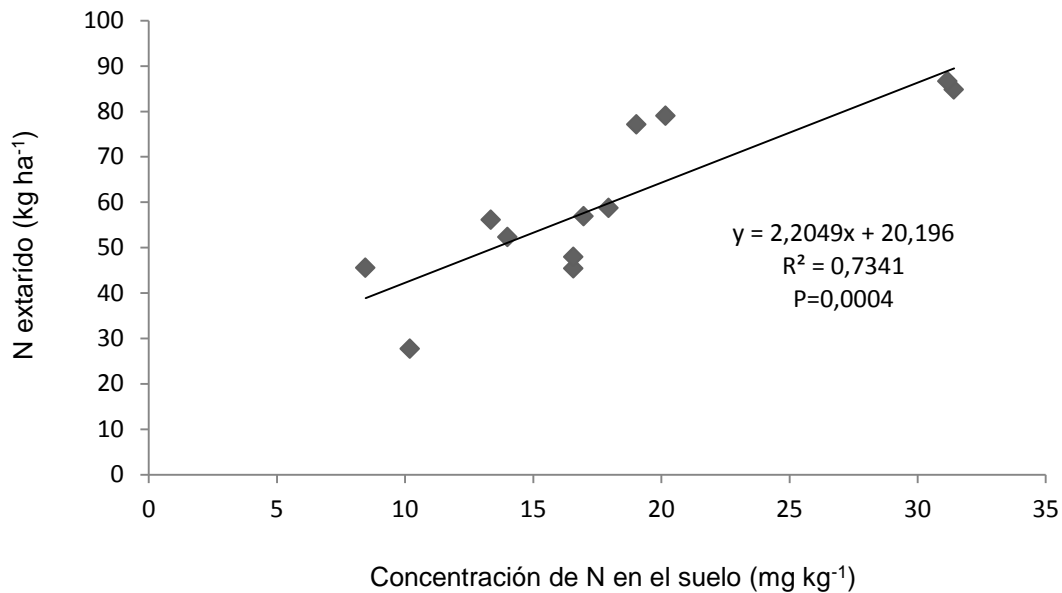


Figura 8. Relación entre N extraído por el cultivo y N disponible en el suelo (mg kg⁻¹) como efecto residual de la fertilización nitrogenada en un suelo arrocero Alfisol, incubado anaeróbicamente sin agitación por 7 días a 20°C.

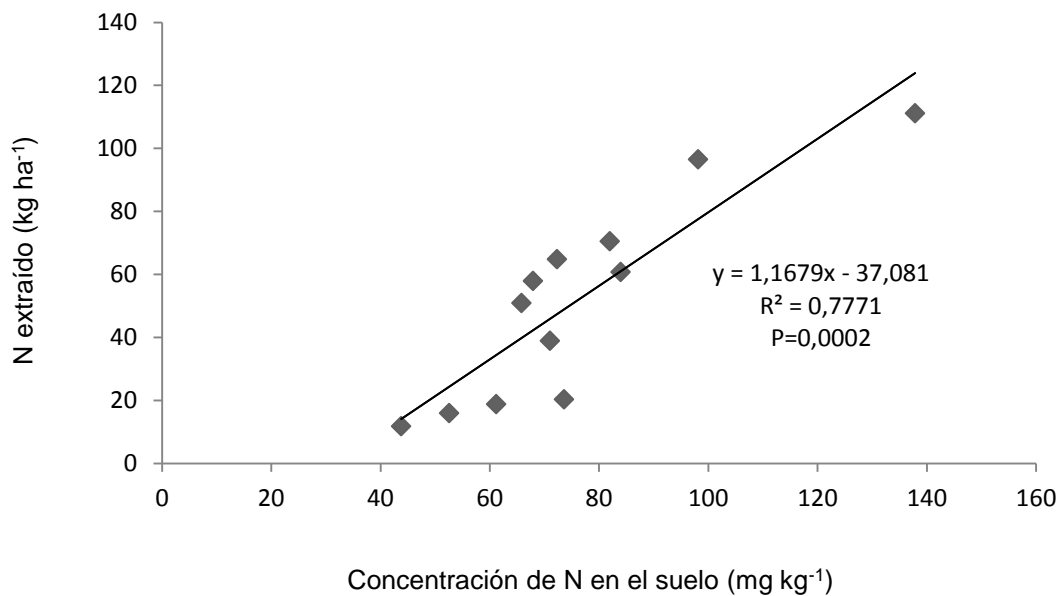


Figura 9. Relación entre N extraído por el cultivo y N disponible en el suelo (mg kg⁻¹) como efecto residual de la fertilización nitrogenada en un suelo arrocero Vertisol, incubado anaeróbicamente sin agitación por 21 días a 40°C.

Índice de relación entre extracción de N del cultivo y N mineralizado

El índice de relación entre la capacidad de extracción de N del cultivo proveniente del efecto residual de la fertilización nitrogenada anterior y el N mineralizado por el suelo fue de 1,34 y 0,74 kg de N extraído por cada mg kg⁻¹ de N mineralizado para el suelo Alfisol y Vertisol respectivamente (Figuras 10 y 11). Al descontar la mineralización de N del suelo que no recibió N en la temporada anterior se logra un nuevo ajuste entre la relación de extracción de N y la mineralización de N del suelo (diferencia entre las pendientes de cada recta), tanto en el suelo Alfisol (Figuras 8 y 10) y en el Vertisol (Figuras 10 y 11), que se traduce en valores de 0.86 y 0.43 kg de N extraído por cada mg kg⁻¹ de N mineralizado para el suelo Alfisol y Vertisol respectivamente. En términos prácticos, una vez realizada la determinación del N mineralizado en incubaciones anaeróbicas se puede generar un ahorro de 0.86 y 0.43 kg N a aplicar al cultivo de arroz por cada 1 mg N kg⁻¹ mineralizado, respecto de la dosis calculada o de referencia a aplicar respectivamente, para los suelos Alfisol y Vertisol usados en este experimento.

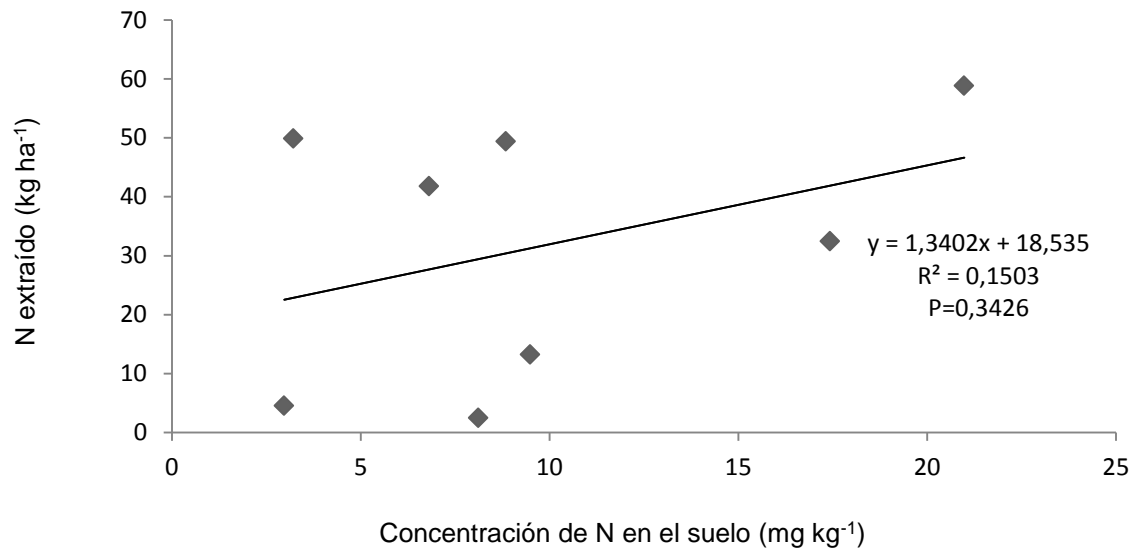


Figura 10. Relación entre el N residual extraído y el N disponible en el suelo (kg ha⁻¹) en los tratamientos fertilizados con N la temporada (2011-2012) y el control sin N, en un suelo arrocero Alfisol incubado por 7 d a 20°C, sin agitación constante.



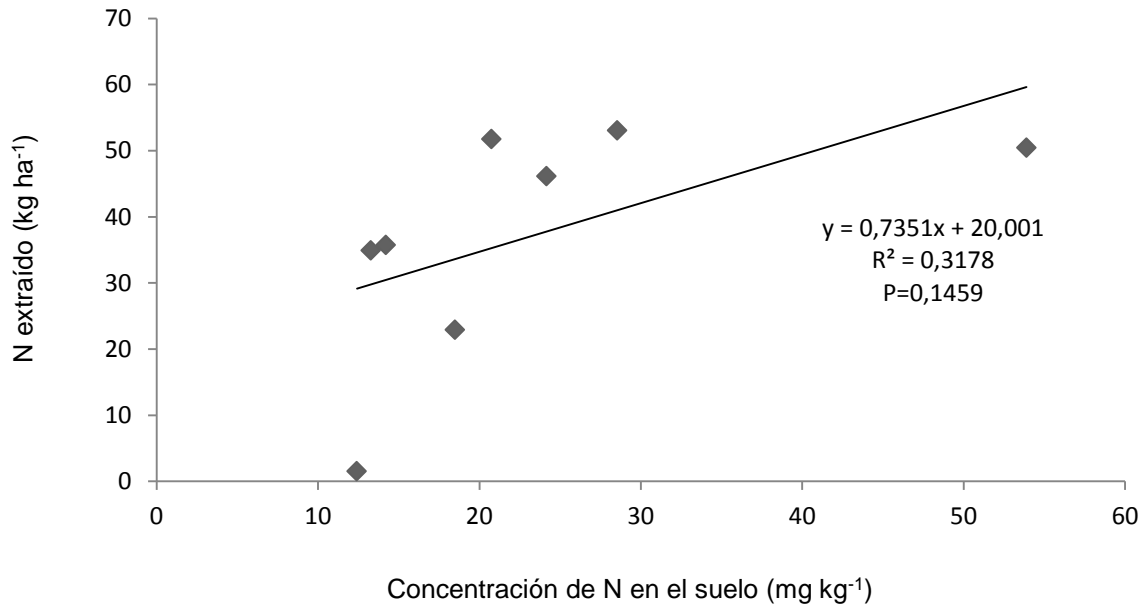


Figura 11. Relación entre el N residual extraído y el N disponible en el suelo (kg ha⁻¹) en los tratamientos fertilizados con N la temporada (2011-2012) y el control sin N, en un suelo arrocero Vertisol incubado por 21 d a 20°C, sin agitación constante.

VI. CONCLUSIONES

1. La mineralización de N en los suelos arroceros sometidos a incubaciones anaeróbicas sin agitación constante es afectada principalmente por la temperatura, el tiempo de incubación y dosis de fertilización nitrogenada del cultivo anterior, y puede ser representada a través de modelos lineales con un alto valor de determinación estadística.
2. El efecto de la agitación constante en el proceso de incubación de suelos arroceros, no afecta la mineralización de N respecto de incubaciones sin agitación.
3. Al comparar los tiempos y temperaturas de incubación anaeróbica sin agitación, el mejor ajuste de relación entre la extracción de N como efecto residual de la fertilización y el N mineralizado, se obtuvo para el suelo Alfisol bajo una incubación por 7 días a 20°C y para el Vertisol para incubaciones por 21 días a 40°C.

4. El mayor rendimiento de grano y extracción de N se presentó en suelo Alfisol respecto del Vertisol, contrastando con el resultado del efecto residual de la fertilización nitrogenada, donde el Alfisol obtuvo rangos menores al Vertisol.
5. Finalmente, para los suelos estudiados, al realizar incubaciones de suelo similares a las empleadas en este experimento previo al cultivo de arroz siguiente, se puede generar un ahorro de 0.86 y 0.43 kg N a aplicar por cada 1 mg N mineralizado kg⁻¹, para los suelos Alfisol y Vertisol respectivamente. Estos resultados contribuyen a ajustar las dosis de N a emplear en el cultivo de arroz, mejorando la eficiencia de uso de la fertilización nitrogenada y reduciendo el impacto ambiental.

VII. REFERENCIAS

1. Alvarado, J. R., & S. Hernaiz. 2007. Antecedentes generales sobre el arroz en Chile. En: Arroz Manejo Tecnológico, ed. R. Alvarado, pp. 7-20. Chillán, Chile: Instituto de Investigaciones Agropecuarias.
2. Angus, J. F., M. Ohnishi, T. Horie, & L. Williams. 1994. A preliminary study to predict net nitrogen mineralization in a flooded rice soil using anaerobic incubation. *Australian Journal of Experimental Agriculture* 34:995-999.
3. Artacho, P., C. Bonomelli, & F. Meza. 2009. Nitrogen application in irrigated rice growth in Mediterranean conditions: Effects on grain yield, dry matter production, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency. *Journal of Plant Nutrition* 32:1574-1593.
4. Bronson, K., E. Abao, B. Singh, Yadvinder Singh, Y. V. Singh, G. Panuallah & A. Regmi. 2001. Predicting potential anaerobic nitrogen mineralization of rice-rice and rice-wheat soils of Asia. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 32 (15-16):2411-2424.
5. Buol, S.W., R.J. Southard, R.C. Graham, & P.A. McDaniel. 2011. Kindle Edition. *Soil Genesis and classification.* (pp. 6283-9592).
6. Bushong, J. T., R. J. Norman, W. J. Ross, N. A. Slaton, C. E. Wilson, & E. E. Gbur. 2007. Evaluation of several indices of potentially mineralizable soil

- nitrogen. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38:2799-2813.
7. Campbell, C. A., G.P. LaFond, A.J. Leyshon, R.P. Zentner & H.H. Janzen. 1991. Effect of cropping practices on in a flooded rice soil using anaerobic incubation. *Aust. J. Exp. Agr.* 34: 995-999. for cereals in south-eastern Australia. *Aust. J. Agric. Res.* 49: 511-522. the initial potential rate of N mineralization in a thin Black Chernozem. *Can. J. Soil Sci.* 71:43-53.
 8. Chen, R., J. Zhang, W. Guo, W. Chen 1987a. N fertilizer (urea) top dressed on unsaturated soil and deep-placed using reflood-ing water. *International Rice Research Newsletter* 12:35-3.
 9. CIREN (Centro de Información de Recursos Naturales). 1983. *Descripciones de suelos: Estudio Agrológico Complementario VII Región*. Santiago, Chile: CIREN.
 10. Clay, D. E. & C.E. Clapp. 1990. Mineralization of low C-to-N ratio corn residue in soils fertilized with NH₃ fertilizer. *Soil Biol. Biochem.* 22:355-360.
 11. Conde, E., M. Cardenas, A. Ponce-Mendoza, M.L. Luna-Guido, C. Cruz-Mondragón, L. Dendooven. 2005. The impacts of inorganic nitrogen application on mineralization of ¹⁴C-labelled maize and glucose, and on priming effect in saline alkaline soil. *Soil Biology & Biochemistry* 37: 681-691.
 12. De Datta, S.K. 1981. *Principles and practices of rice production*. John Willey and Sons, New York. 637p.
 13. De-Xi, L., F. Xiao-Hui, H. Fena, Z. Hong-Tao & L. Jia-Fa. 2007. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu lake region, China. *Pedosphere* 15(5):639-645.
 14. Fan, X. H., D. X. Lin, M. Shen & S. W. Qin. 2005a. Characteristics of mineralization and nitrification in the calcareous soils from a long-term fertilization experimental field. *Acta Pedologica Sinica (in Chinese)*. 42: 340-343.

15. Fan, M., R. Jiang, X. Liu, F. Zhang, S. Lu, X. Zeng & P. Christie. 2005b. Interactions between non-flooded mulching cultivation and varying nitrogen inputs in rice-wheat rotations. *Field Crops Research* 91, 307-318.
16. FAO. 2004. Estimaciones globales de las emisiones gaseosas de NH₃, NO y N₂O provenientes de las tierras agrícolas. Roma: FAO, p: 1-22. <ftp://ftp.fao.org/docrep/fao/009/y2780s/y2780s00.pdf>.
17. Fernández, M. 1995. Fertilización nitrogenada y su eficiencia en maíz de grano. *Simiente* 65:122-132.
18. Fernández, C. 2009. Estimación de la disponibilidad de nitrógeno en dos suelos arroceros con diferentes dosis de nitrógeno agregado. Tesis de Ingeniero Agrónomo. Universidad de Concepción. Chile. 22 p.
19. Fontaine, S., A. Mariotti, L. Abbadie. 2003. The priming effect of organic matter: A question of microbial competition? *Soil Biology & Biochemistry*. 35: 837-843.
20. Forge, T. A. & S. W. Simard. 2001. Short-term effects of nitrogen and phosphorus fertilizers on nitrogen mineralization and trophic structure of the soil ecosystem in forest clear cuts in the southern interior of British Columbia. *Can. J. Soil Sci.* 81:11-20.
21. Greenland, D.J. 1997. *The Sustainability of Rice Farming*, pp.1-273. Wallingford, UK: CABI Publishing/Manila, Philippines: International Rice Research Institute.
22. Hadas, A., A. Feigin, S. Feigenbaum & R. Portnoy. 1989. Nitrogen mineralization in the field at various depths. *J. Soil Sci.* 40:131-137.
23. Hirzel, J., I. Matus, F. Novoa, & I. Walter. 2007a. Effect of poultry litter on silage maize (*Zea mays* L.) production and nutrient uptake. *Spanish Journal of Agricultural Research* 5:102-109.
24. Hirzel J. , I. Walter, P. Undurraga & M. Cartagena. 2007b. Residual effects of poultry litter on silage maize (*Zea mays* L.) growth and soil properties derived from volcanic ash. *Soil Science and Plant Nutrition* (2007) 53, 480-488.

25. Hirzel, J., A. Pedreros, K. Cordero. 2011a. Effect of nitrogen rates and split nitrogen fertilization. *Chilean Journal of Agricultural Research* 71(3): 1-8.
26. Hirzel, J. 2011b. *Fertilización de Cultivos en Chile*. 434 p. Colección libros INIA N°28. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Centro Regional de Investigación Quilamapu, Chillán, Chile.
27. Hirzel, J., K. Cordero, C. Fernández, J. Acuña, M. Sandoval & E. Zagal. 2012. Soil potentially mineralizable nitrogen and its relation to rice production and nitrogen needs in two paddy rice soils of Chile, *Journal of Plant Nutrition*, 35:3, 396-412.
28. Hirzel, J., & F. Rodríguez. 2013. Increasing nitrogen rates in rice and its effect on plant nutrient composition and nitrogen apparent recovery. *Chilean J. Agric. Res* 73(4):385-390.
29. Hirzel, J., & N. Stolpe. 2014. Anaerobic incubation without shaking over a prolonged period as a method to determine mineralizable nitrogen in rice soils. *Communications in soil science and plants analysis* (In Press).
30. Honeycutt, C. W. 1999. Nitrogen mineralization from soil organic matter and crop residues: Field validation of laboratory predictions. *Soil Sci. SOCA. m. J.* 63:134-141.
31. Huang, J., F. He, K. Cui, R. Buresh, B. Xu, W. Gong, & S. Peng. 2008. Determination of optimal nitrogen rate for rice varieties using a chlorophyll meter. *Field Crops Research* 105:70-80.
32. International Rice Research Institute (IRRI). 2002. *Rice Almanac: source book for the most important economic activity on earth*. (3rd ed.) CABI publishing. Oxon, UK.
33. Jensen, L. S., I. S. Pedersen, T. B. Hansen, & N. E. Nielsen. 2000. Turnover and fate of ¹⁵N-labelled cattle slurry ammonium-N applied in the autumn to winter wheat. *European Journal of Agronomy* 12:23-35.
34. Jenkinson, D., R. Fox and J. Rayner. 1985. Interactions between fertilizernitrogen and soil nitrogen- the so-called 'priming' effect. *J. soil Sci.* 36 (3)425-444.

35. Jing, Q., B. Bouman, H. van Keulen, H. Hengsdijk, W. Cao, & T. Dai. 2008. Disentangling the effect of environmental factors on yield and nitrogen uptake of irrigated rice in Asia. *Agricultural System* 98:177-188.
36. Johnston, A.E., S.P. McGrath, P.R. Poulton & P.W. Lane. 1989. Accumulation and loss of nitrogen from manure, sludge and compost: long-term experiments at Rothamsted and Woburn. In *Nitrogen in Organic Wastes Applied to Soils*. Eds J Hansen and K Henriksen, pp. 126-139.
37. Jokela, W. E., & G.W. Randall. 1997. Fate of fertilizer nitrogen as affected by time and rate of application on maize. *Soil Science Society of America Journal* 61:1695-1703.
38. Keerthisinghe, G., K. Mengel, S.K. De Datta. 1984. The release of nonexchangeable ammonium (¹⁵N-labeled) in wetland rice soils. *Soil Sci Soc. Am. J.* 48:291-294.
39. Kolberg, R. L., D.G. Westfall & G.A. Peterson. 1999. Influence of cropping intensity and nitrogen fertilizer rates on in situ nitrogen mineralization. *Soil Sci. SOCA. m. J.* 63:129-134.
40. Li, G. C., X.G. Han, J.H. Huang & J.W. Tang. 2001. A review of affecting factors of soil nitrogen mineralization in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sznica (in Chinese)*. 21:1187-1 195.
41. Manguiat, I.J., I. Watanabe, G.B. Mascarina & J.G. Tallada. 1996. N Mineralization in Tropical Wetland Rice Soils. I. relationship with temperature and soil properties. *Soil Science and Plant Nutrition* 42(2): 229-238.
42. Matsunami, M., T. Matsunami & Makie Kokubun. 2009. Growth and yield of new rice for Africa (NERICAs) under different ecosystems and nitrogen levels. *Plant Prod. Sci.* 12:381-389.
43. Mulnavey, L. R. 1996. Nitrogen inorganic forms. In: *Methods of Soil Analysis, Part 3: Chemical Methods*, ed. J. M. Bartels, pp. 1123-1184. Madison, WI: American Society of Agronomy.
44. Nieder, R., D. K. Benbi & H. W. Scherer. 2010. Fixation and defixation of ammonium in soils: a review. *Biology and Fertility of Soils*, 47(1), 1-14.

45. Ntanos, D.A. & S.D. Koutroubas. 2001. Dry matter and N accumulation and translocation for Indica and Japonica rice under Mediterranean conditions. *Field Crops Res.* 74, 93-101.
46. ODEPA. 2013. Cultivos anuales: Superficie, producción y rendimientos. Available at: <http://www.odepa.gob.cl/odepaweb/servlet/contenidos.ServletDetallesScr?idcla=12&idcat=2&idn=1736>.
47. Petersburgsky, A.V. & P.M. Smirnov. 1966. Ammonium fixation by some soils in the USSR and the availability of this ion to plants. *Plant Soil* 25:119-128.
48. Rasmussen, P. E., C.L. Douglas Jr, H.P. Collins & S.L. Albrecht. 1998. Long-term cropping system effects on mineralizable nitrogen in soil. *Soil Biol. Biochem.* 30:1829-1837.
49. Rees, R. & K. Castle. 2002. Nitrogen recovery in soils amended with organic manures combined with inorganic fertilisers. *Agronomie*, 22, 739-746.
50. Reichardt, W., K. Inubishi & J. Tiedje. 2000. Microbial processes in C and N dynamics. pp: 101-146 In: G. J. D. Kirk and D. C. Oik (Eds.). *Carbon and nitrogen dynamics in flooded soils*. International rice research institute. Los Baños Philippines.
51. Rodriguez, A., W. Hoogmoed, & L. Brussaard. 2008. Soil quality assessment in rice production systems: Establishing a minimum data set. *Journal of Environmental Quality* 37:623-630.
52. Rojas Walker, C. 2008. Relación entre rendimientos relativos de arroz inundado y amonio mineralizado en 20 experimentos de dosis ANA en arroz: Informe 2008. P 1-34. Tucapel-UC Proyecto FONTEC.
53. Sahrawat, K. 2006. Organic matter and mineralizable nitrogen relationships in wetland rice soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 37:787-796.
54. Sainz, H. R., H. E. Echeverría, & P. A. Barbieri. 2004. Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize. *Agronomy Journal* 96:1622-1631.

55. SAS Institute. 1989. Usage and Reference. Version 6. 501 p. SAS. Institute Inc., Cary, North Carolina, USA.
56. Scherer, H.W. 1982. Fixed $\text{NH}_4\text{-N}$ in relation to EUF-extractable K. *Plant Soil* 64:67-71.
57. Scott, D., A. McLarren, & J. Burger. 2005. Rapid indices of potential nitrogen mineralization for intensively managed hardwood plantations. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36:1421-1434.
58. Soon, Y., A. Haq, & M. Arshad. 2007. Sensitivity of nitrogen mineralization indicators to crop and soil management. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38:2029-2043.
59. Sørensen, P. & Amato M. 2002. Remineralisation and residual effects of N after application of pig slurry to soil. *Eur. J. Agron.*, 16, 81-95.
60. Souza S.R., L.M. Mariam, Stark & Manlio, S. Fernandes .1998. Nitrogen remobilization during the reproductive period in two Brazilian rice varieties, *Journal of Plant Nutrition*, 21:10, 2049-2063.
61. Srpska, M. & N. Sad. 2005. Aerobic and anaerobic incubation - biological indexes of soil nitrogen. *Proceedings of the Serbian Cultural Society of Natural Sciences.* 109:45-57.
62. Stanford, G. & S. Smith. 1972. Nitrogen mineralization potentials of soils. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36 (3):465-472.
63. Standford, G., & S. J. Smith. 1978. Oxidative release of potentially mineralizable soil nitrogen by acid permanganate extractions. *Soil Science* 126:210-218.
64. Stolpe, N. 2006. Descripciones de los principales suelos de la VIII región de Chile. Universidad de Concepción. Facultad de Agronomía. Departamento de Suelos y Recursos Naturales. Chillán, Chile.
65. Stucki J.W., D.C. Golden, C.B. Roth. 1984. Effects of reduction and reoxidation of structural iron on clay swelling. *Clays Clay Miner* 32:350-356.

66. Su, C. G., B. Yin, Z.L. Zhu & Q.R. Shen. 2005. Gaseous loss of nitrogen from fields and wet deposition of atmospheric nitrogen and their environmental effects. *Soils (in Chinese)* 37:113-120.
67. Tate, R. 1995. The Nitrogen Cycle: Soil-Based Processes. pp: 255-283 In: R. Tate (Ed.). *Soil Microbiology*. John Wiley & Sons. New York, USA.
68. Taylaran, R., S. Ozawa, N. Miyamoto, T. Ookawa, T. Motobayashi, & T. Hirasawa. 2009. Performance of a High-Yielding Modern Rice Cultivar Takanari and Several Old and New Cultivars Grown with and without Chemical Fertilizer in a Submerged Paddy Field. *Plant Prod. Sci.* 12:365-380.
69. USDA. 2010. Spanish Keys to Soil Taxonomy, 11th Edition. United States Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, USDA, Washington, DC.
70. Vanotti M.B. & L.G. Bundy. 1994. An alternative rationale for corn nitrogen fertilizer recommendations. *J. Prod. Agric.* 7:243-249.
71. Wang, G., Dobermann, A., Witt, C., Sun, Q., Fu, R., 2001. Performance of site-specific nutrient management for irrigated rice in southeast China. *Agronomy Journal* 93, 869-878.
72. Waring, S. A. & Bremner, J. M. 1964. Ammonium production in soil under waterlogged conditions as an index of N availability, *Nature* 201, p. 951-952. London.
73. Wienhold, B. 2007. Comparison of laboratory methods and an in situ method for estimating nitrogen mineralization in an irrigated silt-loam soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 38:1721-1732.
74. Williams, W.A., D.S. Mikkelsen, K.E. Mueller, J.R. Ruckman. 1968. Nitrogen immobilization by rice straw incorporated in lowland rice production. *Plant Soil* 28:49-60.
75. Wilson, C. E., R. J. Norman, & B. R. Wells. 1994a. Chemical estimation of nitrogen mineralization in paddy rice soils: I. Comparison to laboratory indices. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 25:573-590.

76. Wilson, C. E., R. J. Norman, & B. R. Wells. 1994b. Chemical estimation of nitrogen mineralization in paddy rice soils: I. Comparison to laboratory indices. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 25:573-590.
77. Xiang-Long, P., L. Yuang-Ying, L. Sheng-Guo, F. Li-Chun, S. Tian-Sing, & G. Yan-Wen. 2007. Effects of site-specific nitrogen management on yield and dry matter accumulation of rice from cold areas of northeastern China. *Agricultural Sciences in China* 6:715-723.
78. Yan, De-Zhi, Wang De-Jian, Sun Rui-Juan & Lin Jing-Hui. 2006. N Mineralization as Affected by Long-Term N and Its Relationship with Crop N Uptake. *Soil Science Society of China*. 16(1):125-130.
79. Zhang, Y. M., D. L. Chen, J.B. Zhang, R. Edis, C. Hu & A. Zhu. 2004. Ammonia volatilization and denitrification losses from an irrigated maize-wheat rotation field in the north China plain. *Pedosphere*. 14:533-540.
80. Zhang, Y. S., & H. W. Scherer. 1999. Ammonium fixation by clay minerals in different layers of two paddy soils after flooding. *Biology and Fertility of Soils*, 29(2), 152-156.
81. Zhang, Y.H., J.B. Fan, Y.L. Zhang, D.S. Wang, Q.W. Huang, and Q.R. Shen. 2007. N Accumulation and Translocation in Four Japonica Rice Cultivars at Different N Rates. *Soil Science Society of China*. 17(6): 792-800.