

Capítulo 16. Fertilización del cultivo de arroz

Juan Hirzel C.

Antecedentes nutricionales del cultivo

Nitrógeno

El nitrógeno (N) debe ser suministrado de manera constante al cultivo para lograr una cosecha adecuada, especialmente durante la formación y desarrollo de la panícula. El rendimiento final está definido por el número de panículas por m² y también por el número de granos por panícula. A su vez, el número de panículas depende del número de macollas, quedando definido dentro de los primeros 10 d posteriores al máximo número de macollas. Los componentes anteriores están influenciados por la disponibilidad de N durante estos estados de desarrollo (Kumura, 1956; Singh y Murayama, 1963). Por su parte, el número de espiguillas por panícula se relaciona estrechamente con el contenido de N que presenta la vaina foliar durante las semanas previas a floración (Kumura, 1956; Shimizu, 1967). Finalmente, el N influirá en una eficiente asimilación de carbohidratos por parte del grano, y en un correcto llenado del mismo.

El N es absorbido durante las primeras fases de crecimiento de la planta de arroz en la forma amoniacal (NH₄⁺) (Grist, 1975; Tinarelli, 1989), mientras que en las fases cercanas a madurez es preferido en forma de nitrato (NO₃⁻). El N en forma de amonio es favorable hasta el estado de iniciación de panículas (Tanaka et al., 1959). Posteriormente se ve favorecida la absorción de nitrato, sobre todo durante la fase de formación embrionaria de la panícula, estimulando el incremento en el número de flores de la panícula y en el peso de los granos (Atanasiu y Samy, 1985; Tinarelli, 1989). El N amoniacal, por su parte, aumenta el número de macollas y el número de panículas por planta (Atanasiu y Samy, 1985). Si bien en condiciones de suelo inundado es preferible aplicar las formas amoniacaes de N, o que deriven en amonio (urea), dependiendo de la profundidad de laboreo, en los primeros 5 a 10 cm de suelo se presenta una condición aeróbica que permitiría la transformación de amonio a nitrato, proceso que es acelerado por la acumulación de temperatura. No obstante, lo señalado anteriormente, en nuestro país no hay evidencia científica en las variedades modernas que indique las ventajas de realizar aplicaciones de N a la forma de nitrato posteriores a la siembra.

Los excesos de N, sobre todo asociados a fenómenos climáticos anormales durante la fase reproductiva, especialmente bajas temperaturas (Tinarelli, 1989), generan desórdenes de crecimiento y distribución interna de este nutriente que favorecen el crecimiento vegetativo, pudiendo retardar la cosecha y reducir el rendimiento (Hirzel et al., 2011; Hirzel y Rodríguez, 2013).

En relación a la distribución interna de N en la planta de arroz, estudios realizados con N¹⁵ indican que entre 3 y 5 % se encuentra en las raíces, entre el 30 y 44 % en las estructuras vegetativas aéreas, entre el 37 y 40 % en la panícula, y entre el 7 y 13 % se encuentra en las estructuras senescentes (Sheehy et al., 2004).

Fósforo

Este elemento debe estar disponible durante todo el ciclo de crecimiento de la planta de arroz. Si bien los niveles de disponibilidad encontrados en el análisis de suelo (método Olsen) suelen mostrar valores inferiores a los considerados críticos para la mayoría de otras especies vegetales, la práctica de fertilización con dosis moderadas de fósforo (P) al momento de la siembra (40-60 kg P₂O₅ ha⁻¹) permite contar con un suministro normalmente adecuado para el cultivo. Esto se debe a que la dinámica de este nutriente en suelos inundados coincide con una mayor solubilidad del

P naturalmente presente en los suelos por incrementos de pH bajo inundación, lo cual solubiliza los fosfatos de hierro (Fe) y aluminio (Al), y aumenta la reducción del Fe y, por tanto, su solubilidad (Tinarelli, 1989).

En términos generales, el P favorece el crecimiento radical y mejora la absorción de agua y otros nutrientes. Adicionalmente, aumenta la resistencia a períodos de menor disponibilidad de agua. Un suministro adecuado de P mejora la floración y fecundación de granos, aumenta la precocidad del cultivo, y eleva el peso de los 1.000 granos (Atanasiu y Samy, 1985). La mayor absorción de P se presenta durante el período de desarrollo vegetativo y se reduce después de la formación embrionaria de la panícula (Tinarelli, 1989). A su vez, la absorción es favorecida por incrementos de temperatura, con un óptimo de 30 °C.

De acuerdo a la condición de pH que presentan los suelos usados para el cultivo de arroz en Chile (leve a moderadamente ácidos) y al valor de la unidad fertilizante (costo de 1 kg de P_2O_5), la fuente de P más usada es el superfosfato triple (de reacción neutra). Por su parte, en suelos de pH mayor a 6,0 se puede emplear el fosfato diamónico, sobre todo en las mezclas formuladas para la siembra de este cultivo. No se debe descuidar la adecuada aplicación de P al cultivo, dado que una deficiencia durante los estados vegetativos tempranos (macolla) puede generar una reducción en la síntesis proteica y, a su vez, un menor rendimiento potencial (Tinarelli, 1989). Para ello, es fundamental contar con análisis de suelo al menos cada 3 años, dado que los cambios en los niveles de fertilidad de los suelos son paulatinos, excepto cuando se realizan enmiendas químicas u orgánicas, como también fertilizaciones de corrección.

Potasio

Este elemento juega un rol importante al inicio del crecimiento vegetativo, principalmente durante la formación de macollas, teniendo una influencia directa en la determinación del número final de panículas. Durante la fase de maduración favorece la síntesis y translocación de hidratos de carbono de bajo peso molecular, interviene en la activación de procesos de fosforilación (transporte de energía) para activar el transporte de compuestos nitrogenados solubles hacia los granos en formación, evitando su acumulación en otros tejidos, y favoreciendo también el peso de los 1.000 granos (Trolldenier, 1979; Tinarelli, 1989). Además, el potasio (K) aumenta la resistencia de la planta a diversas enfermedades como, por ejemplo, a la pudrición de tallos detectada en Chile (Alvarado et al., 1991; Ortega et al., 1991; 1992), y también a condiciones climáticas adversas (altos niveles de radiación solar y temperatura, o baja temperatura durante la macolla y la floración), presentando un rol importante en la economía de uso y pérdida del agua por transpiración desde la planta (Tinarelli, 1989).

El K estimula también la división celular, participa del transporte de fotones durante la fotosíntesis, dirige la síntesis de almidón, inulina, aminoácidos y proteínas, también modifica la permeabilidad de las células e interfiere en los mecanismos de plasmólisis y turgencia, y junto al P y magnesio (Mg) participan activamente del metabolismo de los hidratos de carbono (Tinarelli, 1989).

El fertilizante potásico más usado en nuestro país para el cultivo de arroz es el muriato de potasio (KCl), el cual presenta una alta concentración de K_2O y un bajo costo por unidad fertilizante. Si bien en las décadas anteriores no se aplicaba K en el cultivo de arroz, se comenzó a aplicar por la presencia de pudrición del tallo. La sucesiva extracción por el ciclo de cultivo y el aumento paulatino en el rendimiento alcanzado, han provocado una reducción en los niveles de disponibilidad de este elemento en el suelo. De esta forma, en la actualidad se usan dosis de K_2O entre 48 y 60 kg ha^{-1} (80-100 kg de muriato de potasio), sin encontrar respuestas de rendimiento a dosis superiores.

Azufre

Este elemento es importante durante todo el ciclo de crecimiento de la planta de arroz, incidiendo fuertemente en la calidad del grano, ya que forma parte de algunos aminoácidos esenciales, del metabolismo del N, y en la síntesis de proteínas y de hidratos de carbono. Está relacionado con la reducción de nitratos, cataliza la formación de clorofila junto al cobre (Cu) y hierro (Fe), interviene como transportador de hidrógeno (H), contribuye a regular el ciclo de los ácidos tricarbónicos, y forma parte de los radicales del tipo sulfuro (SH) (Tinarelli, 1989). Las cantidades de azufre (S) absorbidas por el cultivo son relativamente bajas en comparación a otros nutrientes (N y K), siendo cubiertas por el aporte natural de los suelos (mineralización de la materia orgánica), por lo cual es poco común aplicar fertilizantes azufrados en el cultivo de arroz. Por otra parte, el uso de superfosfato triple entrega pequeñas cantidades de S (1 % por kilogramo de fertilizante) que pueden variar entre 0,8 y 1,3 kg S ha⁻¹ (80 a 130 kg de superfosfato triple ha⁻¹). Sin embargo, es necesario evaluar periódicamente la disponibilidad de este nutriente a través de un análisis químico de suelo.

Calcio y magnesio

El calcio (Ca) contribuye a la rigidez de las plantas y aumenta la resistencia a la tendedura. Por su parte, el magnesio (Mg) se localiza en los anillos pirrónicos que constituyen la clorofila, participando como catalizador en las actividades enzimáticas de las nitrato-reductasas o enzimas autoinducidas que requieren presencia de molibdeno (Mo) (Tinarelli, 1989).

Estos elementos son extraídos en pequeña cantidad por la planta de arroz. Cuando se realiza la labor de incorporación del residuo en pie o la quema de rastrojos (ingreso de cenizas al suelo) en la preparación de suelo, se devuelve gran parte del Ca y Mg extraído por el cultivo de arroz anterior, como también de K (Tinarelli, 1989). El contenido de estos nutrientes en el suelo está relacionado con el pH, aumentando el nivel de disponibilidad cuando el pH es más alto. Por ello, en la mayoría de los suelos donde se cultiva arroz (pH entre 5,5 y 6,5) existen niveles de Ca y Mg suficientes para alcanzar rendimientos rentables. No obstante, en experimentos de aplicación de cal en dosis de 2.000 kg ha⁻¹ realizados por INIA, se ha obtenido un incremento en rendimiento del cultivo y se ha observado una menor presencia de malezas ciperáceas (Pedreros, 2010, comunicación personal, Universidad de Concepción).

Silicio

Este elemento es tan importante como el Mg, Ca y S. La extracción de silicio (Si) que realiza la planta de arroz es superior a la de cualquier otro elemento mineral, presentando una concentración que puede fluctuar entre el 2 % y 9 % de la materia seca de la planta (Tinarelli, 1989). Se deposita principalmente en las células epidérmicas de las hojas, formando una doble capa silíceas que es responsable de la resistencia a enfermedades. Estudios realizados en Japón señalan una extracción promedio de 433 kg Si ha⁻¹. En términos cuantitativos, por cada 1.000 kg de rendimiento a cosecha, la planta de arroz extrae 100 kg de Si, de los cuales gran parte se concentra en la cáscara de arroz (Atanasiu y Samy, 1985).

El Si está involucrado en todo el ciclo de crecimiento de la planta de arroz, afectando, principalmente, en la fase entre formación de panícula y maduración del grano. Este elemento promueve el desarrollo en longitud y la actividad oxidativa del sistema radical, protegiendo, además, a las plantas de la toxicidad de Fe y manganeso (Mn) producidas en condiciones anaeróbicas del suelo inundado. Por último, un buen nivel de Si en el suelo mejora la disponibilidad de P para el cultivo de arroz.

Microelementos

El Fe participa en la formación de clorofila, previene la clorosis y forma parte de actividades enzimáticas. Los excesos de Fe pueden inhibir la absorción de K (Tinarelli, 1989). El boro (B) contribuye a la absorción del N y participa en el metabolismo del Ca, estimula la actividad meristemática y la formación del polen (Tinarelli, 1989). El zinc (Zn) estimula el desarrollo inicial de las plantas, y su deficiencia puede afectar el rendimiento potencial del cultivo.

En los suelos arroceros de nuestro país, existe un buen nivel de disponibilidad de Fe y Mn, lo que incluso puede provocar competencia con otros microelementos catiónicos (Zn y Cu). Los resultados de análisis de suelo realizados por INIA, considerando el diagnóstico de microelementos, han indicado, en general, bajos niveles de B, Zn y en algunas situaciones Cu, en valores inferiores a 1 parte por millón (ppm o mg kg^{-1}). A su vez, resultados de algunos experimentos de fertilización han mostrado un efecto positivo en el rendimiento del cultivo, cuando se ha considerado la aplicación de B y Zn en la fertilización inicial realizada a la siembra (Alvarado e Hirzel, ensayos regionales de arroz 2002-2003), lo cual ha contribuido a que estos elementos se incluyan en las mezclas formuladas por las empresas de fertilizantes.

Necesidades nutricionales del cultivo

El manejo técnico desarrollado para el cultivo de arroz ha permitido mejorar los rendimientos alcanzados en este rubro agrícola. Un ejemplo de ello es la introducción de las variedades 'Diamante-INIA', 'Brillante-INIA', 'Ámbar-INIA', 'Zafiro-INIA' y 'Cuarzo INIA', que han contribuido a mejorar el rendimiento del grano y también la calidad industrial. Por lo tanto, este cultivo es dependiente de la fertilización, debido a la mayor extracción de nutrientes asociada a altos rendimientos.

Las diferencias en el material genético y condiciones edafoclimáticas hacen necesario desarrollar manejos nutricionales dirigidos a nuestras variedades locales, dado que no es replicable la experiencia extranjera en este respecto. A modo de ejemplo, en el Cuadro 1 se presenta una relación entre el rendimiento obtenido por el cultivo de arroz y la cantidad de nutrientes necesaria para alcanzar ese rendimiento (que representa el contenido de nutrientes en toda la planta), en función de la información existente en el extranjero. Como se puede observar en el Cuadro 1 y de acuerdo a la información disponible, existe una variabilidad de requerimientos nutricionales que puede llegar hasta un 30 % para el N, 50 % en el P, 60 % para el K, 30 % para el Ca, y 100 % para el Mg, lo cual estará en función del material genético empleado y de la condición edafoclimática del cultivo.

Cuadro 1. Necesidades nutricionales del cultivo de arroz (grano + tallo + hojas) según nivel de rendimiento.

Nutrientes considerados	Necesidades nutricionales (kg de nutriente) para 5 niveles de rendimiento de grano				
	3,0 t	4,5 t	6,0 t	7,5 t	9,0 t
Nitrógeno (N)	48 – 64	72 – 96	96 – 128	120 – 160	144 – 193
Fósforo (P)	9 – 13	13 – 20	18 – 26	22 – 33	26 – 40
Potasio (K)	55 – 88	83 – 133	110 – 176	138 – 220	156 – 256
Calcio (Ca)	17 - 22	25 – 34	34 - 45	42 – 56	50 – 68
Magnesio (Mg)	6 - 12	9 – 17	12 - 23	15 - 29	26 – 35
Azufre (S)	5,3	7,9	10,6	13,3	16

Fuente: Atanasiu y Samy (1985), Cordero-Vásquez y Murillo-Vargas (1990).

A nivel nacional existe escasa información de las necesidades nutricionales de esta especie, que a la vez incluya las variedades comerciales de mayor uso. No obstante, en la Figura 1 se presentan las necesidades nutricionales de la variedad 'Diamante-INIA' para un nivel de alto rendimiento, lo cual sirve de orientación general para conocer las necesidades de este cultivo.

Considerando los antecedentes de la Figura 1 para obtener un rendimiento aceptable (superior a 6 t ha^{-1}), la planta de arroz necesita absorber importantes cantidades de algunos nutrientes (N y K, principalmente), los cuales son parcialmente repuestos por la fertilización. En términos productivos, las necesidades nutricionales corresponden a $1,2 \text{ kg}$ de N; $0,84 \text{ kg}$ de P_2O_5 ; $2,2 \text{ kg}$ de K_2O ; $0,62 \text{ kg}$ de CaO; y $0,56 \text{ kg}$ de MgO por cada 100 kg de rendimiento. Como información adicional y también de manera orientativa, las necesidades de micronutrientes para esta variedad corresponden a 640 g de Fe; 188 g de Mn; $5,6 \text{ g}$ de Zn; $1,2 \text{ g}$ de B; y $1,5 \text{ g}$ de Cu por cada 100 kg de rendimiento.

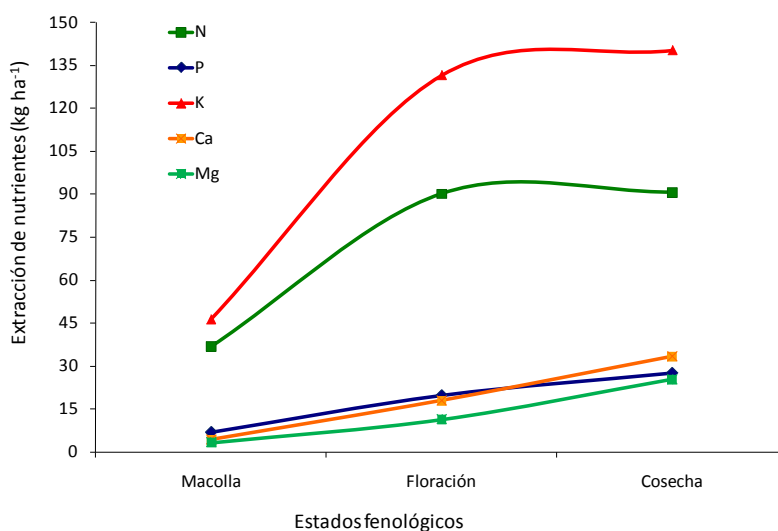


Figura 1. Evolución de la extracción de nutrientes en el cultivo de arroz variedad 'Diamante-INIA', para un rendimiento de $7,5 \text{ t ha}^{-1}$. Ensayos regionales INIA, Parral, Región del Maule, temporada 2002-2003.

Si bien las necesidades nutricionales del cultivo de arroz son altas para algunos nutrientes como el K, generalmente desde el campo sólo se extrae el grano cosechado, dejando el residuo en pie para su incorporación o quema en la próxima preparación de suelo. Por su parte, la incorporación de residuos permite reponer parte del K, Ca, S, y de los microelementos; sin embargo, cuando se realizan labores de quema de residuos previo al siguiente cultivo, se produce una pérdida del N y S contenido en los residuos, a través del proceso de volatilización hacia la atmósfera.

En la Figura 2 se presenta la distribución de nutrientes en la planta de arroz, considerando el grano y el residuo, lo cual permite estimar los aportes nutricionales generados con la incorporación de residuos y, a su vez, fundamenta la importancia de realizar esta labor. Como se observa, la incorporación de residuos de arroz al suelo permite retornar parte del K, Ca y Mg extraído por el cultivo de arroz anterior, lo cual reduce notablemente las necesidades nutricionales del cultivo siguiente.

Reservas nutricionales en el suelo

El análisis de suelo es una herramienta de diagnóstico fundamental para el manejo del cultivo de arroz, ya que permite evaluar la condición de fertilidad de cada suelo y, así, determinar de manera

más adecuada las dosis de cada uno de los nutrientes involucrados en la fertilización de este cultivo. Si bien el análisis de suelo entrega un índice de disponibilidad de nutrientes, y de algunas variables que se relacionan con la fertilidad natural del suelo (materia orgánica), existe una relación directa con el resultado en rendimiento que se obtiene en el cultivo.

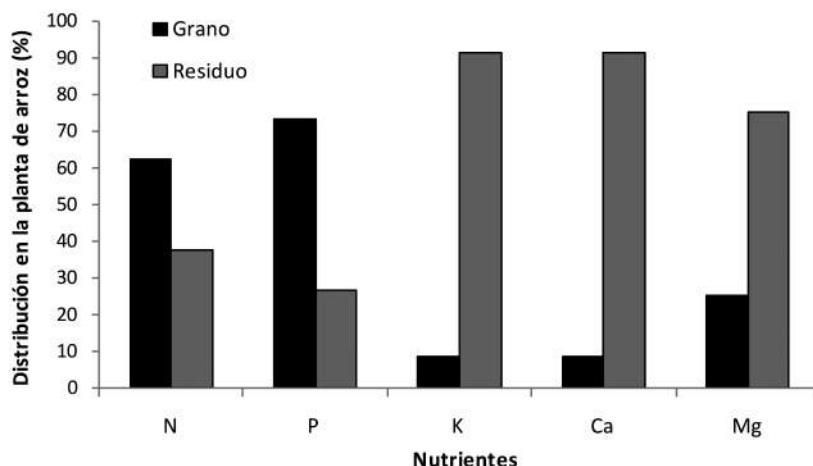


Figura 2. Distribución de nutrientes en la planta de arroz (grano y residuo aéreo). Adaptado de Cordeiro-Vásquez y Murillo-Vargas (1990).

Los niveles de nutrientes encontrados en suelos arroceros, de un universo de 54 muestras colectadas al azar, para los principales parámetros y elementos considerados en el análisis de fertilidad, se presentan en las Figuras 3, 4, 5, 6, y 7, para la determinación de pH, contenido de materia orgánica y niveles de N, P y K, respectivamente (Laboratorio de Suelos de INIA, 2003). Como se puede apreciar en las Figuras 3 a 7, la mayoría de las muestras consideradas tienen un pH entre 5,5 y 6,4 (leve a moderadamente ácido); los contenidos de materia orgánica fluctúan entre 1,6 y 3,5 %; el P disponible es inferior a 10 mg kg^{-1} ; y los niveles de K son inferiores a 100 mg kg^{-1} . Por su parte, el contenido de N mineralizable es muy variable, lo cual obedece a las fracciones o grupos activos y de reserva de este elemento en el suelo (Duxbury et al., 1991; Angus et al., 1994; Scott et al., 2005; Wienhold, 2007; Khorsandy y Nourbakhsh, 2008), como también a la génesis del suelo (Bushong et al., 2007; Hirzel et al., 2012; Hirzel y Stolpe, 2015), sin existir aún valores referenciales acotados para este parámetro, por lo cual las recomendaciones de dosis de N pueden ser mejoradas.

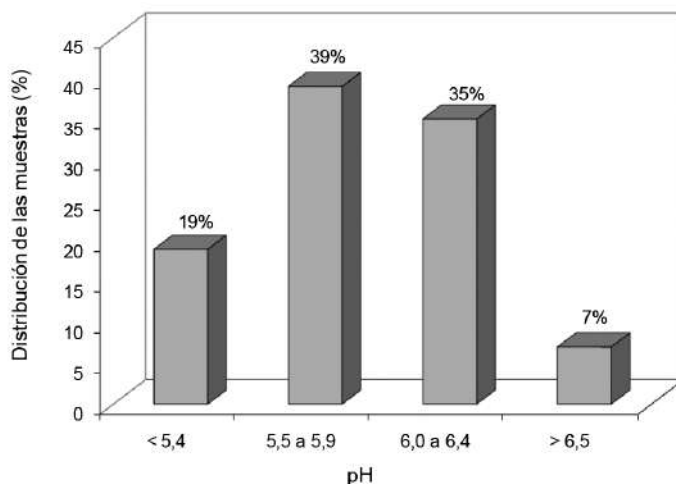


Figura 3. Distribución de muestras de suelos arroceros según rangos de pH, para suelos provenientes de las Regiones del Maule y de Ñuble (ex Biobío), Chile.

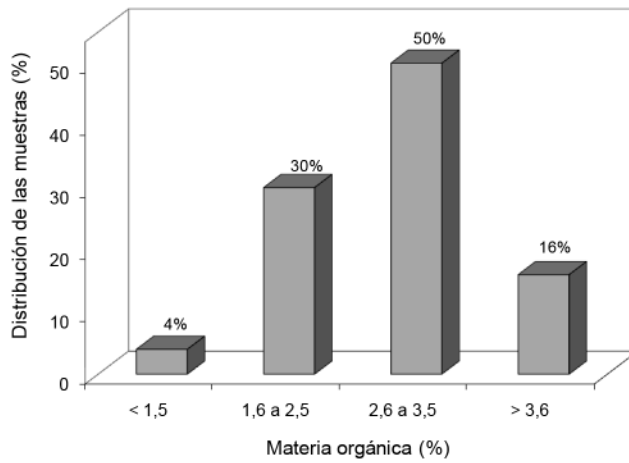


Figura 4. Distribución de muestras de suelos arroceros según rangos de materia orgánica, para suelos provenientes de las Regiones del Maule y de Ñuble (ex Biobío), Chile.

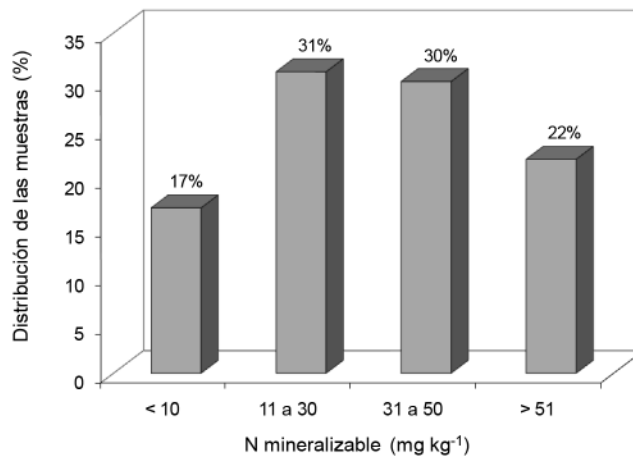


Figura 5. Distribución de muestras de suelos arroceros según rangos de concentración de nitrógeno mineralizable, para suelos provenientes de las Regiones del Maule y de Ñuble (ex Biobío), Chile.

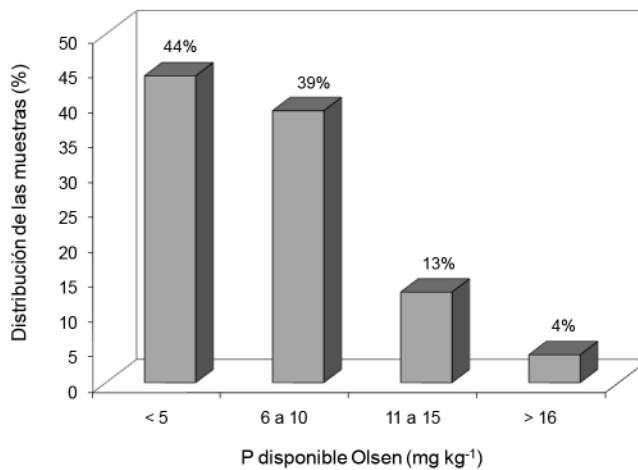


Figura 6. Distribución de muestras de suelos arroceros según rangos de concentración de fósforo disponible (Olsen), para suelos provenientes de las Regiones del Maule y Ñuble (ex Biobío), Chile.

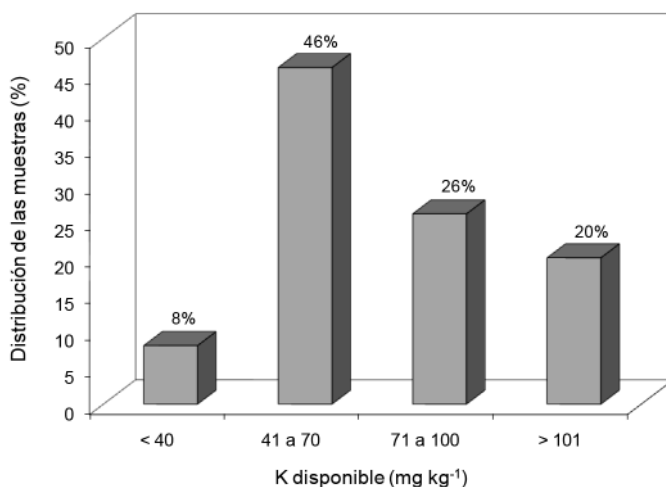


Figura 7. Distribución de muestras de suelos arroceros según rangos de concentración de potasio disponible, para suelos provenientes de las Regiones del Maule y de Ñuble (ex Biobío), Chile.

Respecto de la metodología de determinación de la capacidad de aporte de N del suelo y su relación con las necesidades de N por el cultivo de arroz en condiciones de inundación permanente, estudios realizados en Chile indican que el método de incubación anaeróbica sin agitación, permite lograr un mejor ajuste entre la dosis de N a emplear en cultivos de campo (Hirzel y Rodríguez, 2013; Hirzel y Stolpe, 2015; Hirzel et al., 2015). Para siembras del cultivo en seco y posterior inundación, no hay estudios de ajuste de métodos que permitan estimar la capacidad de aporte de N desde el suelo y la necesidad real del cultivo en campo.

El análisis de otros elementos como Ca, Mg, S, B, Cu y Zn, no es considerado en el análisis de rutina para fertilidad de suelos, cuyos niveles de disponibilidad en suelos arroceros fueron discutidos anteriormente.

Otro elemento de suma importancia en el cultivo de arroz es el Si -como fue señalado previamente-, el cual no está considerado en los programas de fertilización usados en Chile, debido a que el material original de nuestros suelos arroceros y el agua de riego contienen suficientes cantidades de Si. No obstante, es necesario evaluar efecto de aplicaciones foliares de Silicio, lo cual ha tenido efectos positivos en otras especies como arándanos y cerezos.

Resultados experimentales en el manejo de fertilización del cultivo

Una de las principales herramientas de manejo de la fertilización, junto con el análisis de suelo, es la realización de prácticas de manejo adecuadas en la preparación del mismo, las cuales permiten mejorar la disponibilidad y eficiencia de uso de los nutrientes en el cultivo, principalmente del N, lo cual puede verse reflejado en un mayor rendimiento (Bouldin, 1986). Al respecto, Kundu et al. (1996) señalaron que al aumentar la profundidad de preparación de suelos (arado cincel), se produjo un aumento en el aporte de N que fluctuó entre 4 y 10 kg ha⁻¹. Este aumento en la profundidad de preparación de suelos potencia el crecimiento radical del cultivo y también su productividad, generando un beneficio en la segunda temporada de cultivo consecutivo, aunque en menor medida.

El manejo de la fertilización en el cultivo del arroz obedece a las necesidades nutricionales ya señaladas, y a las propiedades químicas del suelo. Si bien la capacidad de aporte nutricional

desde el suelo está directamente relacionada con sus reservas, la dinámica de algunos nutrientes, como el N y P en condiciones inundadas, presenta algunas diferencias respecto a las condiciones sin inundación, las cuales normalmente generan una mayor disponibilidad de estos nutrientes. Por ejemplo, para el N las condiciones anaeróbicas generadas bajo inundación favorecen una actividad microbiana con bajos requerimientos de este nutriente, lo cual se traduce en una mayor disponibilidad de N al cultivo (Atanasiu y Samy, 1985). En contraste a lo anterior, para siembras en seco el aporte natural de N desde el suelo es menor; por tanto, para lograr el rendimiento potencial en una determinada condición agroclimática se requiere de una mayor dosis de N.

El análisis de las propiedades químicas del suelo para el cultivo de arroz es el mismo que se realiza para suelos no inundados, excepto para determinar la disponibilidad de N, para lo cual se debe realizar un análisis de mineralización de este nutriente en condiciones parcialmente anaeróbicas (incubación de suelos en condiciones controladas de temperatura y humedad) por un período determinado. Como ya se señaló, este análisis ha sido correlacionado positivamente con el rendimiento por muchos autores (Angus et al., 1994; Wilson et al., 1994; Bushong et al., 2007; Soon et al., 2007; Rodríguez et al., 2008; Hirzel y Rodríguez, 2013; Hirzel et al., 2015).

Aplicaciones de nitrógeno

Este método determina la cantidad de N (amonio, principalmente, dado que la concentración de nitrato en condiciones inundadas controladas presenta poca variación) que es potencialmente mineralizable o que estará disponible en el suelo bajo condiciones inundadas, cuando todos los factores que afectan la disponibilidad de este nutriente, se encuentran dentro de su rango óptimo. Si bien la cantidad de N que se encontrará disponible en condiciones de campo (particularmente para el cultivo de arroz), será inferior a lo obtenido en condiciones de laboratorio, este análisis permite categorizar suelos en función de su nivel de respuesta a la aplicación de N, que representa la mayor o menor necesidad de aplicar este nutriente al cultivo de arroz. Al respecto, Rojas-Walker (2008) observó una estrecha asociación entre los rendimientos relativos de arroz y los contenidos de N-NH₄ parcialmente mineralizado en 20 sitios experimentales, distribuidos en el área arrocería de Talca a Ñuble ($R = 0,93$). Por ejemplo, en la Figura 8 se presenta el N amoniacal mineralizado en dos suelos cultivados con arroz, cuando han sido sometidos a condiciones controladas de humedad y temperatura. Los suelos evaluados corresponden a diferentes clases taxonómicas, asociadas a la edad y evolución de cada uno de ellos. De esta forma, el suelo de menor desarrollo o más nuevo (Inceptisol de la zona de San Carlos, serie Quilmen) presenta una menor estabilidad en las fracciones de N de reserva, generando una mayor entrega potencial de N disponible al cultivo de arroz. De manera contraria, el suelo de mayor desarrollo o más evolucionado (Vertisol de la zona de Parral, serie Quella) presenta una mayor estabilidad en las fracciones de N de reserva y, por tanto, una menor capacidad potencial de entrega de este nutriente hacia el cultivo. Resultados similares fueron obtenidos también por Rodríguez y Rojas (1977) en un estudio para evaluar el efecto del número de años de cultivo de arroz sobre la disponibilidad del elemento, tanto en un suelo de la serie Quella como San Carlos.

Para complementar la información entregada, en la Figura 9 se presenta la respuesta en rendimiento de grano del cultivo de arroz, permanentemente inundado, frente a la aplicación de dosis crecientes de N. En esta figura se puede apreciar que la mayor respuesta al N aplicado (ganancia de rendimiento de grano frente a la adición de N), se presenta en el suelo Vertisol (serie Quella) (5,4 y 6,7 t de incremento para las dosis de 80 y 160 kg N ha⁻¹, respectivamente, en relación al control sin aplicación de N) que a su vez presentó la menor concentración de N mineralizado (Figura 8). En tanto, en el suelo Inceptisol la respuesta a las dosis de N se mani-

festó en un incremento de 2,2 y 4,4 t para las dosis de 80 y 160 kg N ha⁻¹, respectivamente. Si bien hay diferencias en la potencialidad de rendimiento de ambos suelos por sus características físico-químicas y sus condiciones climáticas, la menor respuesta obtenida en el suelo Inceptisol está asociada a la mayor concentración de N amoniacal, obtenida al incubar este suelo en condiciones anaeróbicas (Figura 8). Lo anterior corrobora el planteamiento que indica que la dosificación de N en el cultivo de arroz se debe relacionar con el potencial de rendimiento de este cultivo y la mineralización de N del suelo, determinada con la incubación en condiciones parcialmente anaeróbicas (método de N incubado para suelos arroceros).

El uso de dosis de N mayores a las necesidades del cultivo puede generar desórdenes en el desarrollo fenológico, aumentando el período vegetativo y produciéndose el inicio del período reproductivo en forma más tardía, lo que puede aumentar la esterilidad floral debido a las bajas temperaturas que se pueden producir en ese período, dado que en la fase final del cultivo las temperaturas ambientales comienzan a disminuir, afectando negativamente la madurez de los granos y el rendimiento comercial. Al respecto, es común encontrar situaciones productivas en las cuales no se ha conseguido una adecuada madurez del grano, asociado a un uso incorrecto en la dosis de N (dosis mayores a lo necesario para la situación edafoclimática particular).

Por otra parte, cuando se reduce el tiempo de desarrollo del cultivo, también disminuye el potencial de rendimiento y, con ello, las necesidades de N. En consecuencia, siembras tardías del arroz deben ir asociadas a una reducción en la dosis de N a emplear, dado que el cultivo tendrá un menor período de desarrollo antes que comiencen a descender las temperaturas ambientales. Esta misma situación se puede producir en un año frío, como el ocurrido en 2009-2010, donde las mayores aplicaciones de N tuvieron un efecto negativo sobre el rendimiento. Por ello, es importante enfatizar la necesidad de realizar análisis de suelo, con especial interés en el N mineralizable para suelos arroceros, para optimizar la dosis de N a emplear y, a la vez, evitar errores productivos asociados a una mala dosificación de este nutriente.

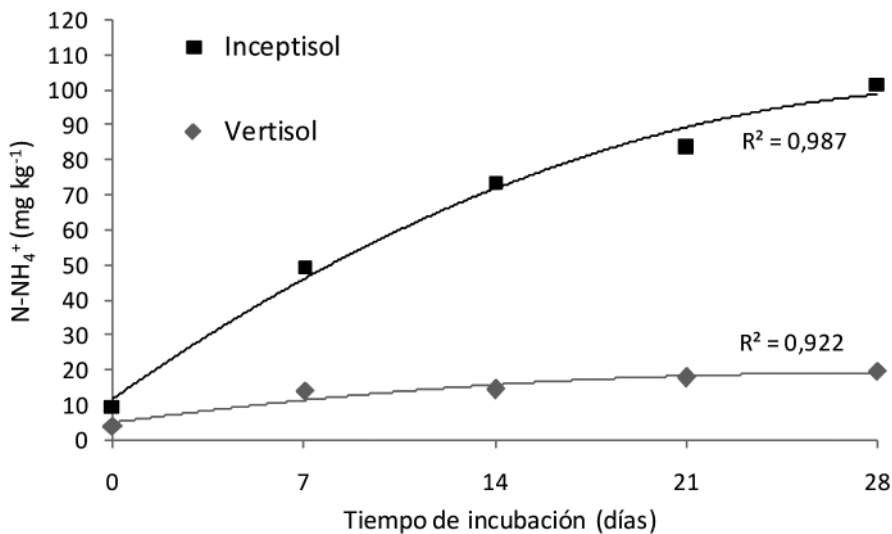


Figura 8. Nitrógeno amoniacal mineralizado en condiciones anaeróbicas en dos suelos arroceros de las Regiones del Maule y de Ñuble (ex Biobío), Chile.

El suelo Inceptisol corresponde a la serie Quilmén en San Carlos y el suelo Vertisol corresponde a la serie Quella en Parral.

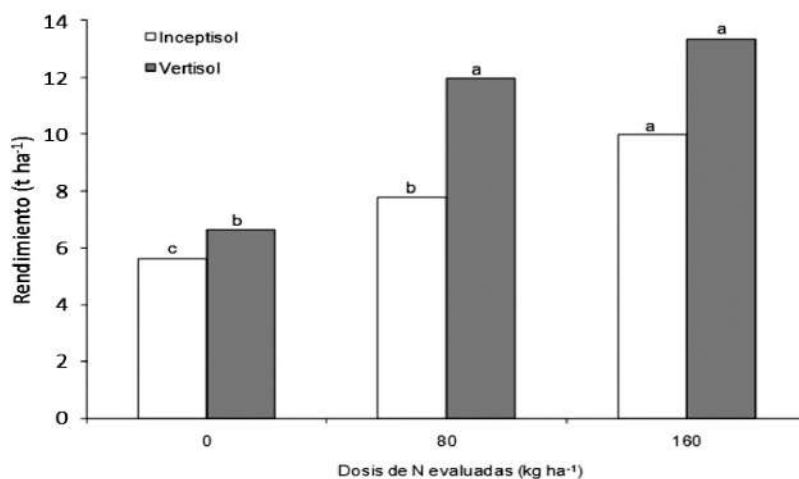


Figura 9. Efecto de diferentes dosis de nitrógeno en el rendimiento de grano de la variedad 'Diamante-INIA' en dos suelos arroceros de las Regiones del Maule y Ñuble (ex Biobío), Chile. Letras distintas sobre las barras para un mismo tipo de suelo indican diferencia estadística según test de Tukey ($p < 0,05$).

A juicio de muchos autores, en el cultivo de arroz, el N es el principal nutriente asociado con el rendimiento (Rojas y Alvarado, 1982; Angus et al., 1994; Wilson et al., 1994; Sahrawat, 2006; Bouman et al., 2007; Lin et al., 2007; Jing et al., 2008), al igual que para la mayoría de las especies de interés agronómico.

Para optimizar la aplicación de fertilizantes nitrogenados en un cultivo, es necesario conocer la capacidad de mineralización desde el suelo (Angus et al., 1994), dado que la absorción de N proviene, principalmente, desde las reservas (mineralización de materia orgánica, ciclos dinámicos de la biomasa microbiana, y $N-NH_4^+$ fijado en las arcillas) (Jokela y Randall, 1997; Jensen et al., 2000; Sainz et al., 2004; Sahrawat, 2006) y de la fertilización nitrogenada (Wienhold, 2007), y sólo una pequeña fracción deriva del agua de riego y otras fuentes ambientales y bióticas.

La cantidad de N suministrada desde el suelo y su absorción por la planta durante diferentes ciclos de cultivos son altamente dinámicas y difíciles de estimar, y además representan sólo una pequeña fracción del N total en el suelo (Scott et al., 2005; Wienhold, 2007). En el caso del cultivo de arroz, la respuesta a la aplicación de N es también variable y responde a factores genéticos (diferentes cultivares), factores de suelo (propiedades físicas y químicas), clima (temperatura durante todo el ciclo de cultivo) y manejo (láminas de agua, dosis y parcialización del N), como ha sido presentado por diferentes autores (Atanasiu y Samy, 1985; Hirzel et al., 2012; Hirzel y Rodríguez, 2013; Myers, 2004; Jing, 2007; Rojas-Walker, 2008).

Estudios recientes en Chile indican que el cultivo de arroz en condiciones inundadas responde a dosis de N que varían entre 100 y 200 kg ha⁻¹, aplicadas previo a la siembra (Artacho et al., 2009); sin embargo, para un uso eficiente del N, éste debe ser parcializado (Rojas-Walker, 2008). Al respecto, estudios realizados por el INIA en suelos arroceros de las Regiones del Maule y de Ñuble, indican que el cultivo de arroz en condiciones permanentemente inundadas, responde a dosis de N de entre 80 y 160 kg ha⁻¹ (aplicado en tres parcialidades: siembra, inicio de macolla e inicio de panícula), en tanto que para siembras en seco se logra una respuesta al N con dosis mayores.

En general, la respuesta a la aplicación de N está relacionada a las variaciones climáticas de cada temporada (temperaturas adecuadas hacen más eficiente el uso del N) y a la condición edafoclimática de cada zona, como se puede observar en las Figuras 10 a 13. Rojas-Walker (2010, datos no publicados) ha observado altas correlaciones entre los rendimientos promedios del cultivo de

arroz y la suma de la evapotranspiración potencial ocurrida 20 d antes y 20 d después de la época de floración. Este parámetro, probablemente también se relaciona con los grados días ocurridos en la temporada.

Los resultados experimentales obtenidos para siembras de arroz en condiciones permanentemente inundadas indican, a su vez, que el rendimiento se maximiza con dosis de N entre 150 y 160 kg ha⁻¹ según la temporada y localidad, con dosis del orden de 1,5 a 1,8 kg N por 100 kg. Sin embargo, la dosis de N que permite optimizar la inversión en fertilizante nitrogenado (mayor relación beneficio/costo) es siempre inferior a la señalada como adecuada para obtener el rendimiento máximo, y estará asociada al precio del quintal de arroz y al precio del fertilizante nitrogenado (urea), y normalmente corresponde a dosis entre 1,2 y 1,6 kg N 100 kg a obtener, según el resultado del análisis de suelo.

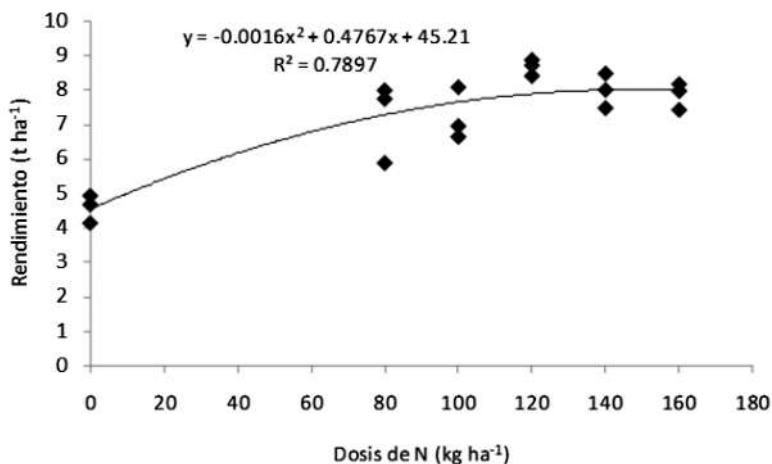


Figura 10. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno aplicado en tres parcialidades (siembra, macolla e inicio de panícula) en el rendimiento de grano de arroz variedad 'Diamante-INIA' en condiciones de inundación permanente. Parral, Región del Maule, temporada 2007-2008.

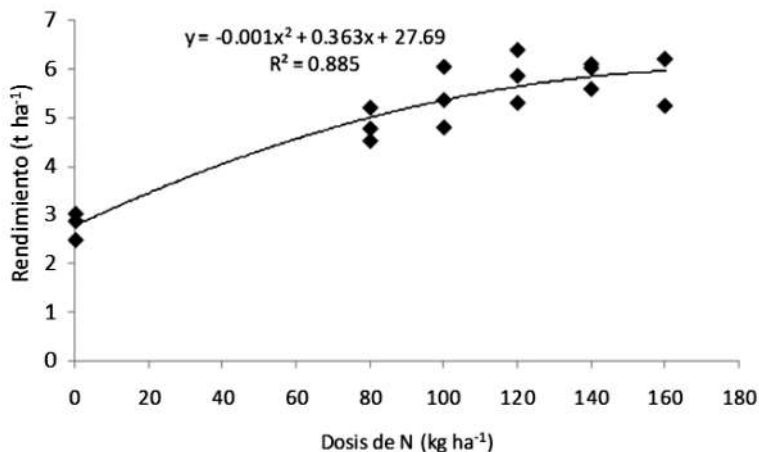


Figura 11. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno aplicado en tres parcialidades (siembra, macolla e inicio de panícula) en el rendimiento de grano de arroz variedad 'Diamante-INIA' en condiciones de inundación permanente. Parral, Región del Maule, temporada 2008-2009.

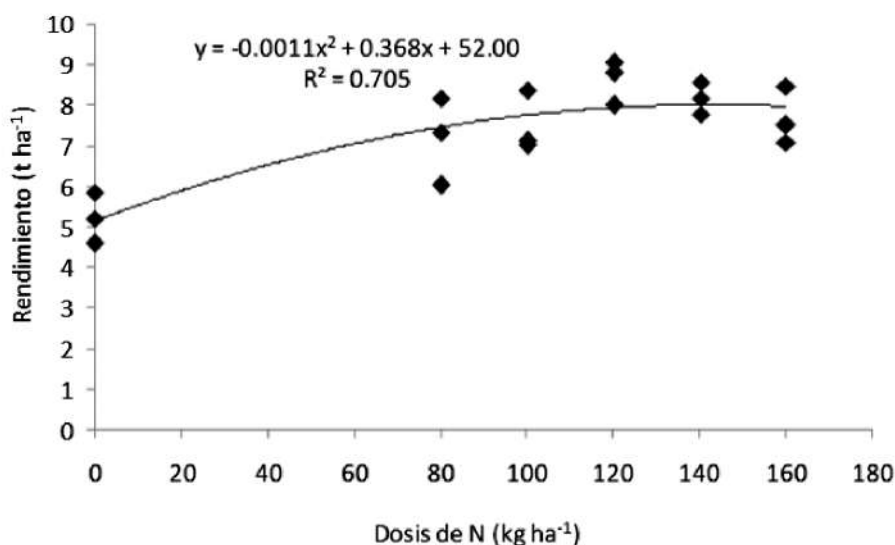


Figura 12. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno aplicado en tres parcialidades (siembra, macolla e inicio de panícula) en el rendimiento de grano de arroz variedad 'Diamante-INIA', en condiciones de inundación permanente. San Carlos, Región de Ñuble (ex Biobío), temporada 2007-2008.

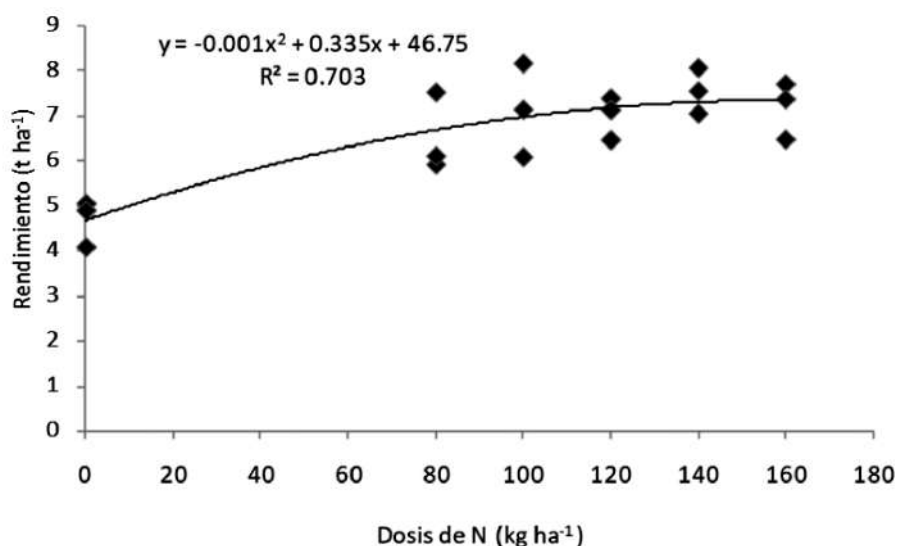


Figura 13. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno aplicado en tres parcialidades (siembra, macolla e inicio de panícula) en el rendimiento de grano de arroz variedad 'Diamante-INIA' en condiciones de inundación permanente. San Carlos, Región de Ñuble (ex Biobío), temporada 2008-2009.

En términos de parcialización del N, dada la dinámica de este nutriente en el suelo (transformaciones biológicas y químicas que afectan la recuperación de este nutriente por la planta y los procesos de pérdida), los estudios antes señalados indican que el mayor rendimiento se ha logrado con dos y tres parcialidades; aplicaciones a la siembra e inicio de panícula; o a la siembra, macolla e inicio de panícula, como se puede observar en las Figuras 14 a 17. Esta estrategia de fertilización concuerda con las recomendaciones del RiceCheck de Australia, que sugieren un fraccionamiento

del N equivalente a un 67 % de pre-inundación y a un 33 % en la etapa de inicio de panícula, y nunca más de 60 kg N ha^{-1} al inicio de panícula (Ricecheck, 2006). Rojas (2010, comunicación personal, Instituto de Investigaciones Agropecuarias) indica que los mayores rendimientos logrados en la variedad 'Diamante-INIA' corresponden a la aplicación de un 50 % del N en pre-inundación, 25 % al inicio de macolla y 25 % al inicio de panícula. La predicción de la dosis basal de pre-inundación puede inferirse del análisis de amonio parcialmente mineralizable del suelo y el fraccionamiento a macolla e inicio de panícula, con el apoyo del análisis foliar y una herramienta práctica sugerida inicialmente por Dobermann y Fairhurst (2000) y Mutters (2000), Universidad de California. Al respecto, en estudios efectuados con la variedad 'Diamante-INIA', Rojas-Walker (2008) detectó que los valores críticos para N total de la hoja bandera e índices de transmisión como índices de clorofila, corresponden a 3,1 % y 33,5 %, respectivamente.

El número de parcializaciones (dos o tres) será determinado por el productor, en función de la oportunidad de siembra y las labores a realizar durante el cultivo, además de la predicción de temperaturas que puedan ocurrir durante la floración y llenado del grano. De esta forma, para siembras oportunas y superficies de cultivo manejables, lo adecuado será realizar tres parcializaciones de N (siembra, macolla e inicio de panícula), en tanto para siembras un poco tardías o en superficies muy amplias de cultivo, se puede perder oportunidad en la realización de labores y, por tanto, resultará conveniente realizar dos parcializaciones (siembra e inicio de panícula). El ajuste de la dosis de N podrá apoyarse en herramientas tecnológicas tales como el análisis foliar y la lectura del índice de clorofila, con el apoyo de equipos como el medidor de clorofila SPAD-502 (Rojas-Walker, 2008).

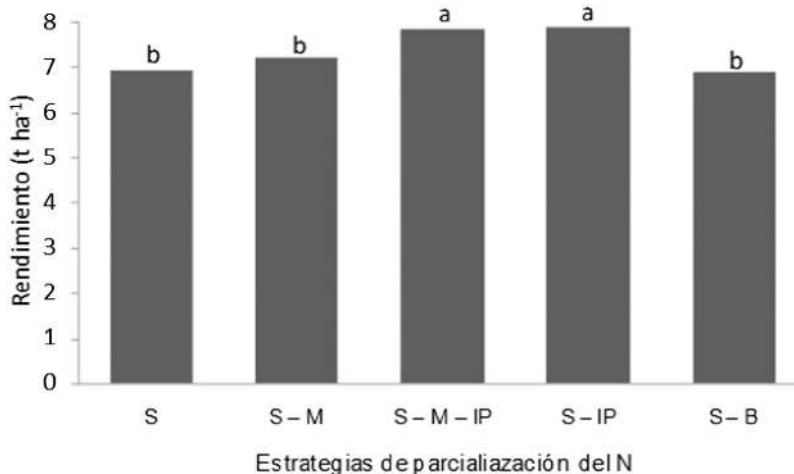


Figura 14. Efecto de diferentes estrategias de parcialización del nitrógeno en el rendimiento de grano de arroz variedad 'Diamante-INIA' en condiciones de inundación permanente, con una dosis de 100 kg N ha^{-1} . Parral, Región del Maule, temporada 2007-2008. Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según test de diferencia mínima significativa DMS ($p < 0,05$).

S = N aplicado 100 % a la siembra.

S - M = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de macolla.

S - M - IP = N aplicado 33 % a la siembra, 33 % al estado de macolla, 34 % al estado de inicio de panícula.

S - IP = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de inicio de panícula.

S - B = N aplicado 50% a la siembra y 50 % al estado de bota en el arroz.

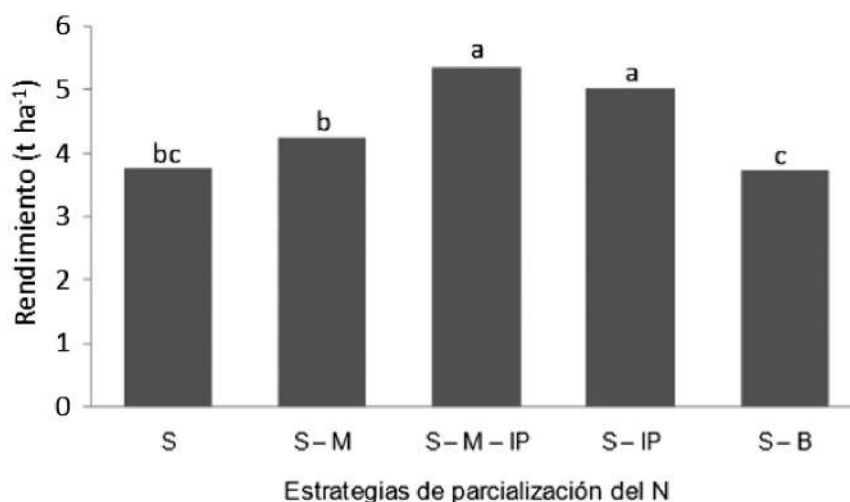


Figura 15. Efecto de diferentes estrategias de parcialización del nitrógeno en el rendimiento de grano de arroz variedad 'Diamante-INIA', en condiciones de inundación permanente, con una dosis de 100 kg N ha⁻¹. Parral, Región del Maule, temporada 2008-2009. Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según test de diferencia mínima significativa DMS ($p < 0,05$).

S = N aplicado 100 % a la siembra.

S - M = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de macolla.

S - M - IP = N aplicado 33 % a la siembra, 33 % al estado de macolla, 34 % al estado de inicio de panícula.

S - IP = N aplicado 50% a la siembra y 50 % al estado de inicio de panícula.

S - B = N aplicado 50% a la siembra y 50 % al estado de bota en el arroz.

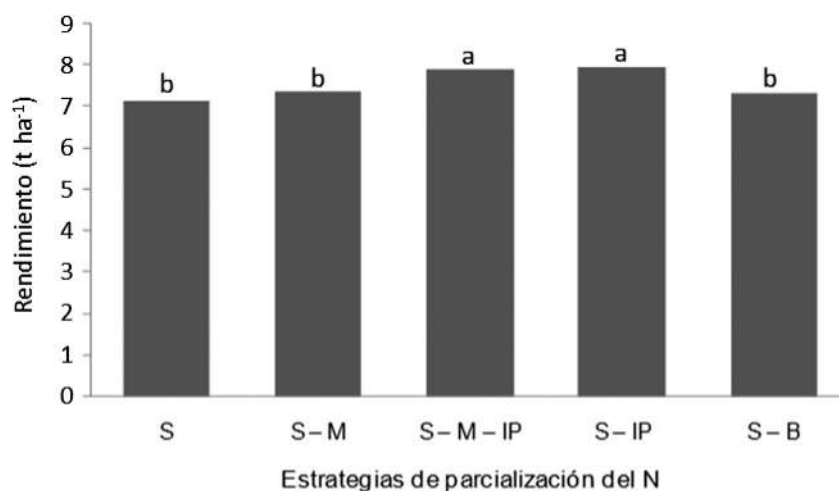


Figura 16. Efecto de diferentes estrategias de parcialización del nitrógeno en el rendimiento de grano de arroz variedad 'Diamante-INIA' en condiciones de inundación permanente, con una dosis de 100 kg N ha⁻¹. San Carlos, Región de Ñuble (ex Biobío), temporada 2007-2008. Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según test de diferencia mínima significativa DMS ($p < 0,05$).

S = N aplicado 100 % a la siembra.

S – M = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de macolla.

S – M – IP = N aplicado 33 % a la siembra, 33 % al estado de macolla, 34 % al estado de inicio de panícula.

S – IP = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de inicio de panícula.

S – B = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de bota en el arroz.

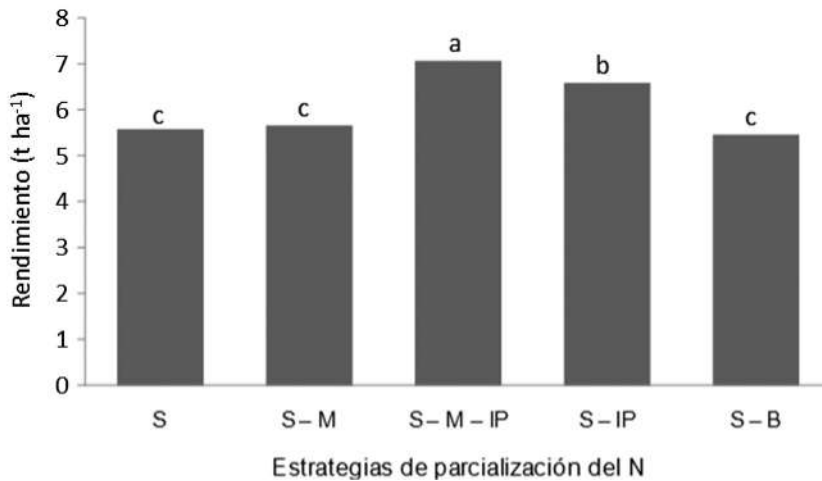


Figura 17. Efecto de diferentes estrategias de parcialización del nitrógeno en el rendimiento de grano de arroz variedad 'Diamante-INIA' en condiciones de inundación permanente, con una dosis de 100 kg N ha⁻¹. San Carlos, Región de Ñuble (ex Biobío), temporada 2008-2009. Letras distintas sobre las barras indican diferencia estadística según test de diferencia mínima significativa DMS ($p < 0,05$).

S = N aplicado 100 % a la siembra.

S – M = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de macolla.

S – M – IP = N aplicado 33 % a la siembra, 33 % al estado de macolla, 34 % al estado de inicio de panícula.

S – IP = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de inicio de panícula.

S – B = N aplicado 50 % a la siembra y 50 % al estado de bota en el arroz.

Aplicaciones de P y K

Otros nutrientes importantes para el cultivo del arroz corresponden al fósforo (P) y potasio (K), cuyo efecto fue evaluado por Ortega (1989), quien indicó respuesta en rendimiento del cultivo hasta dosis de 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ y una respuesta incierta en el caso del K aplicado, en función de la concentración de este nutriente en el suelo. Dosis de P mayores a 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ no generaron incrementos de rendimiento en el cultivo de arroz. Para el caso de siembra en seco, estudios recientes realizados por INIA indican que la respuesta a la aplicación de P y K se maximiza con dosis de 30 kg de P₂O₅ y con una baja respuesta a la aplicación de K, como se presenta en otro de los capítulos de este libro.

Desde un punto de vista de la sustentabilidad, al trabajar con incorporación de residuos en el cultivo de arroz, el uso de dosis de P mayores a 45 kg P₂O₅ ha⁻¹, permite generar un incremento en la reser-

va de P del suelo, para rendimientos inferiores a $7,5 \text{ t ha}^{-1}$, considerando una extracción neta (sólo la extracción del grano) de $0,6 \text{ kg P}_2\text{O}_5 \text{ } 100 \text{ kg}^{-1}$ de arroz producido (Figuras 1 y 2). Del mismo modo, la incorporación de residuos genera una importante recuperación del K previamente extraído, por lo cual el uso de dosis mayores a $20 \text{ kg K}_2\text{O ha}^{-1}$ permite generar un incremento en la reserva de este nutriente en el suelo para rendimientos inferiores a $7,5 \text{ t ha}^{-1}$, considerando una extracción neta de $0,26 \text{ kg K}_2\text{O } 100 \text{ kg}^{-1}$ de arroz producido (Figuras 1 y 2). Un efecto similar al aporte de P y K se genera con la quema de residuos en pie, dado que estos nutrientes forman parte de las cenizas depositadas en el suelo.

En aquellas situaciones en las cuales no se realice incorporación del P y K contenido en los residuos, ya sea por incorporación directa de los residuos o a través de prácticas de quema del residuo en pie, la extracción de P y K puede superar los 63 y 165 kg ha^{-1} de P_2O_5 y K_2O , respectivamente, para un rendimiento indicativo de $7,5 \text{ t}$ (Figura 1). Por ello, el uso de dosis inferiores a estas extracciones genera una reducción en las reservas de estos nutrientes en el suelo para las condiciones de rendimiento señaladas. Al respecto, estudios realizados por INIA indican que la concentración de P en los suelos arroceros se ha incrementado levemente durante los últimos 20 años, en tanto que la concentración de K y también el contenido de materia orgánica se han reducido.

Otros parámetros químicos de los suelos arroceros que tienen mucha importancia en el rendimiento son pH (grado de acidez o alcalinidad del suelo y también medida indirecta de la reserva nutricional de algunos nutrientes) y las concentraciones de B y Zn. Al respecto, estudios demostrativos realizados por INIA indican efectos positivos en el rendimiento de grano frente a la aplicación de carbonato de calcio, B y Zn al suelo, como se puede observar en las Figuras 18, 19, y 20, respectivamente, para siembras en condición de inundación permanente. Para condiciones de siembra en seco y aplicaciones de encalado en presiembra o de aplicaciones foliares de Zn y B, no hubo respuesta al encalado y algunas respuestas a la aplicación foliar de los micronutrientes Zn y B (Figuras 21 y 22).

No obstante, aunque es necesario contar con un mayor número de estudios, en las dosis a emplear para estos nutrientes, como también para el encalado, se debe considerar la determinación de estos parámetros químicos (B, Zn y pH) en el análisis de suelo y, posteriormente, determinar la necesidad y dosis de aplicación. Adicionalmente, estos estudios indicaron que la aplicación de carbonato de calcio en los suelos arroceros incrementó la disponibilidad de P, B y Zn una vez concluido el período de cultivo.

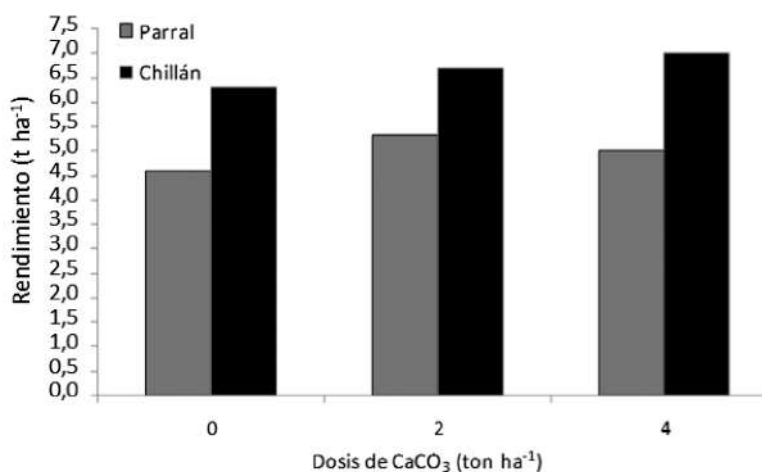


Figura 18. Efecto de la aplicación de carbonato de calcio sobre el rendimiento de grano de arroz variedad 'Diamante-INIA' en condiciones de inundación permanente, fertilizado con 100 kg N , $60 \text{ kg P}_2\text{O}_5$ y $60 \text{ kg K}_2\text{O}$. Localidades de Parral, Región del Maule, y Chillán, Región de Ñuble, temporada 2002-2003.

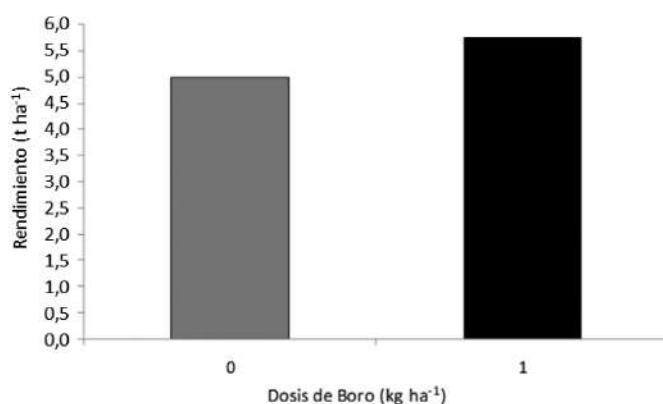


Figura 19. Efecto de la aplicación de boro sobre el rendimiento de grano de arroz variedad 'Diamante-INIA' en condiciones de inundación permanente, fertilizado con 100 kg N, 60 kg P₂O₅ y 60 kg K₂O. Parral, Región del Maule, temporada 2002-2003.

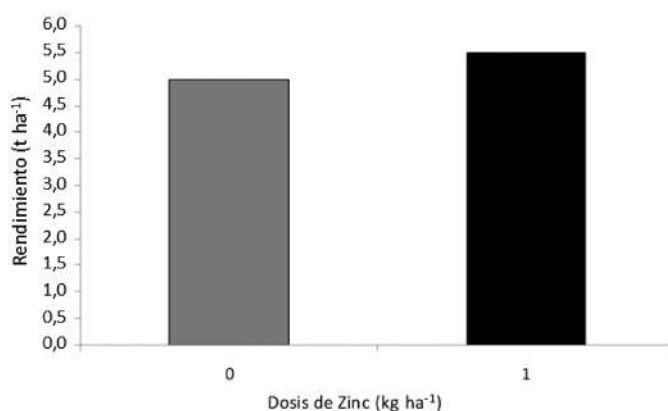


Figura 20. Efecto de la aplicación de zinc sobre el rendimiento de grano de arroz variedad 'Diamante-INIA' en condiciones de inundación permanente, fertilizado con 100 kg N, 60 kg P₂O₅ y 60 kg K₂O. Parral, Región del Maule, temporada 2002-2003.

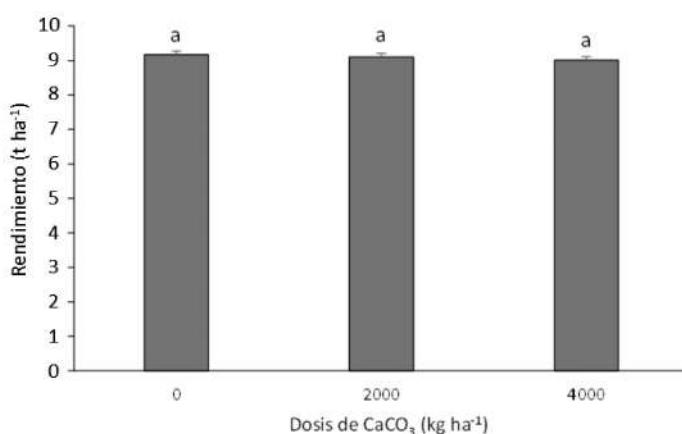


Figura 21. Efecto de dosis crecientes de carbonato de calcio (CaCO₃) aplicado en presiembra, sobre el rendimiento de la variedad 'Digua CI' en condiciones de siembra en seco, como promedio de dos temporadas (2016-2017 y 2017-2018) y dos localidades (Parral y San Carlos). n = 180. Letras distintas sobre las columnas indican diferencia significativa según test de Tukey (p<0.05). Las barras sobre las columnas indican el error estándar de la media.

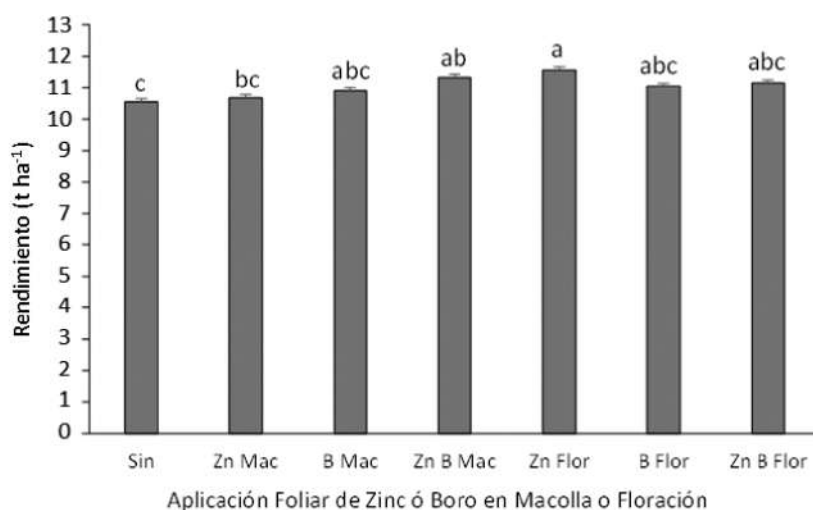


Figura 22. Efecto de aplicaciones foliares individuales o combinadas de Zinc (Zn) y Boro (B) en estados de macolla (Mac) o floración (Flor), sobre el rendimiento de la variedad 'Digua CI', en condiciones de siembra en seco, como promedio de dos temporadas (2016-2017 y 2017-2018) y dos localidades (Parral y San Carlos). $n = 84$. Letras distintas sobre las columnas indican diferencia significativa según test de Tukey ($p < 0.05$). Las barras sobre las columnas indican el error estándar de la media.

Guía de fertilización del cultivo de arroz

Como una forma de entregar antecedentes que sirvan de guía general para la fertilización del cultivo de arroz en condiciones de inundación permanente y para diferentes niveles de rendimiento, desde los Cuadros 2 y 3 se presenta información con los nutrientes a aplicar, el parámetro de fertilidad de suelos usado como indicador para determinar la dosis de nutriente, y diferentes rangos de valores para estos parámetros, con lo cual se sugieren dosis referenciales de cada nutriente. Los criterios para determinar las dosis referenciales están basados en antecedentes experimentales, además de la experiencia científica y empírica de los autores. Dicha visión comprende la gestión de la fertilización del cultivo para variadas condiciones de suelo de nuestro país, la opinión de colaboradores técnicos, factores económicos, y también un criterio de sustentabilidad de los recursos edáficos que permita mantener o incrementar la fertilidad y capacidad productiva de los suelos.

Para aquellas situaciones en las cuales se debe aplicar una enmienda calcárea como medida correctiva de la acidez del suelo, es necesario considerar que las dosis señaladas serán altas en relación a los otros nutrientes, y que su principal fuente de aplicación es el carbonato de calcio (CaCO_3).

Las recomendaciones de fertilización sugeridas para los restantes nutrientes de los Cuadros 2 y 3, se han definido en base a los rangos de fertilización utilizados por el Sistema de Recomendación de Fertilización para el cultivo de arroz que utiliza en forma rutinaria el Laboratorio Central de Análisis de Suelos de INIA, en Chillán.

Cuadro 2. Guía de fertilización del cultivo de arroz en condiciones de inundación permanente en suelos de las Regiones del Maule y Ñuble, para un rendimiento potencial alto (7,1 a 10,0 t ha⁻¹).

Nutriente a aplicar	Parámetro de suelo o de manejo usado como indicador de dosis	Valor de referencia usado en la recomendación	Dosis referencial del nutriente (kg ha ⁻¹)
N*	N mineralizable (mg kg ⁻¹)	< 20	110 – 120
		21 – 40	90 – 100
		> 41	70 – 85
P ₂ O ₅ **	P Olsen (mg kg ⁻¹)	< 5	70 – 80
		6 – 12	55 – 60
		> 12	40 – 45
K ₂ O**	K intercambiable (cmol ₊ kg ⁻¹)	< 0,3	70 – 80
		0,3 – 0,5	55 – 60
		> 0,5	40 – 50
CaCO ₃ ***	pH	< 5,5	1.000 – 2.000
		5,5 - 6,0	0 – 1.000
		> 6,0	0
MgO****	Mg intercambiable (cmol ₊ kg ⁻¹)	< 0,8	15 – 20
		0,8 – 1,2	10 – 15
		> 1,2	0 – 10
S	S disponible (mg kg ⁻¹)	< 8	15 – 20
		8 – 12	10 – 15
		> 12	0 – 10
B	B disponible (mg kg ⁻¹)	< 0,5	1 – 1,5
		0,5 – 1	0,5 – 1
		> 1	0 – 0,5
Zn	Zn disponible (mg kg ⁻¹)	< 0,5	1 – 1,5
		0,5 – 1	0,5 – 1
		> 1	0 – 0,5

*El N debe ser parcializado en 2 o 3 momentos durante el cultivo (siembra e inicio de panícula, o siembra, inicio de macolla e inicio de panícula) para maximizar la eficiencia de uso de este nutriente y maximizar el rendimiento del cultivo de arroz.

**En el caso de haber incorporado residuos, se puede usar entre 60 % y 70 % de la dosis sugerida para P, y entre 30 % y 40 % de la dosis sugerida para K.

***La dosis de CaCO₃ corresponde a carbonato de calcio puro. Debe ser convertido a Cal comercial de acuerdo al poder relativo de neutralización (PRNT) del producto utilizado.

****Para el MgO, en el caso de encalar usando CaCO₃*MgCO₃ (Magnecal), el aporte de MgO de la Magnecal en cualquier dosis que permita corregir pH, supera la dosis referencial de MgO indicada en este cuadro, por tanto, no es necesario aplicar MgO en la mezcla de siembra.

Cuadro 3. Guía de fertilización del cultivo de arroz en condiciones de inundación permanente en suelos de las Regiones del Maule y Ñuble, para un rendimiento potencial medio (5,0 a 7,0 t ha⁻¹).

Nutriente a aplicar	Parámetro de suelo o de manejo usado como indicador de dosis	Valor de referencia usado en la recomendación	Dosis referencial del nutriente (kg ha ⁻¹)
N*	N mineralizable (mg kg ⁻¹)	< 20	85 – 95
		21 – 40	70 – 80
		> 41	55 – 65
P ₂ O ₅ **	P Olsen (mg kg ⁻¹)	< 5	60 – 65
		6 – 12	45 – 55
		> 12	30 – 40
K ₂ O**	K intercambiable (cmol ₊ kg ⁻¹)	< 0,3	45 – 60
		0,3 – 0,5	35 – 40
		> 0,5	0 – 30
CaCO ₃ ***	pH	< 5,5	1.000 – 2.000
		5,5 - 6,0	0 – 1.000
		> 6,0	0
MgO****	Mg intercambiable (cmol ₊ kg ⁻¹)	< 0,8	12 – 15
		0,8 – 1,2	8 – 12
		> 1,2	0 – 8
S	S disponible (mg kg ⁻¹)	< 8	12 – 15
		8 – 12	8 – 12
		> 12	0 – 8
B	B disponible (mg kg ⁻¹)	< 0,5	0,8 – 1,2
		0,5 – 1	0,4 – 0,8
		> 1	0 – 0,4
Zn	Zn disponible (mg kg ⁻¹)	< 0,5	0,8 – 1,2
		0,5 – 1	0,4 – 0,8
		> 1	0 – 0,4

*El N debe ser parcializado en 2 o 3 momentos durante el cultivo (siembra e inicio de panícula, o siembra, inicio de macolla e inicio de panícula) para maximizar la eficiencia de uso de este nutriente y maximizar el rendimiento del cultivo de arroz.

**En el caso de haber incorporado residuos, se puede usar entre 60 % y 70 % de la dosis sugerida para P y entre 30 % y 40% de la dosis sugerida para K.

***La dosis de CaCO₃ corresponde a carbonato de calcio puro. Debe ser convertido a Cal comercial de acuerdo al poder relativo de neutralización (PRNT) del producto utilizado.

****Para el MgO, en el caso de encalar usando CaCO₃*MgCO₃ (Magnecal), el aporte de MgO de la Magnecal en cualquier dosis que permita corregir pH, supera la dosis referencial de MgO indicada en este cuadro, por lo tanto, no es necesario aplicar MgO en la mezcla de siembra.

Referencias

- Alvarado, R., Madariaga, R., Gómez, A. 1991. Pudrición del tallo en arroz: Respuesta varietal. *Inv. Prog. Agrop. Quilamapu (Chile)* 50:32-35.
- Angus, J.F., Ohnishi, M., Horie, T., et al. 1994. A preliminary study to predict net nitrogen mineralization in a flooded rice soil using anaerobic incubation. *Aust. J. Exp. Agric.* 34:995-999.
- Artacho, P., Bonomelli, C., Meza, F. 2009. Nitrogen application in irrigated rice growth in Mediterranean conditions: Effects on grain yield, dry matter production, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency. *J. Plant Nutr.* 32(9):1574-1593.
- Atanasiu, N., Samy, J. 1985. Nutrición de la planta: fertilizantes y abonos orgánicos para el arroz. En: *Arroz uso eficaz de los fertilizantes*. Conzett + Huber AG., Zúrich, Suiza.
- Bouldin, D.R. 1986. The chemistry and biology of flooded soils in relation to the nitrogen economy in rice fields. *Fert. Res.* 9:1-14.
- Bouman, B.A.M., Humphreys, E., Tuong, T.P., et al. 2007. Rice and water. *Adv. Agron.* 92:187-237.
- Bushong, J.T., Norman, R.J., Ross, W.J., et al. 2007. Evaluation of several indices of potentially mineralizable soil nitrogen. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38:2799-2813.
- Cordero-Vásquez, A., Murillo-Vargas, J. 1990. Removal of nutrients by rice cultivar CR 1821 under flood irrigation. *Agron. Costarricense* 14(1):79-83.
- Dobermann, A., Fairhurst, T. 2000. Rice: Nutrient disorders and nutrient management. Potash and Phosphate Institute (PPI), Potash and Phosphate Institute of Canada (PPIC), and International Rice Research Institute (IRRI). Oxford Graphic Printers Pte Ltd., Singapore.
- Duxbury, J.M., Lauren, J.G., Fruci, J.R. 1991. Measurement of the biologically active soil nitrogen fraction by a ^{15}N technique. *Agric. Ecosyst. Environ.* 34:121-129.
- Grist, D.H. 1975. Rice. 5th ed. Longman, London, UK.
- Hirzel, J., Cordero, K., Fernández, F., et al. 2012. Soil potentially mineralizable nitrogen and its relation to rice production and nitrogen needs in two paddy rice soils of Chile. *J. Plant Nutr.* 35:396-412.
- Hirzel, J., Pedreros, A., Cordero, K. 2011. Effect of nitrogen rates and split nitrogen fertilization on grain yield and its components in flooded rice. *Chil. J. Agric. Res.* 71:437-444.
- Hirzel, J., Rodríguez, F. 2013. Increasing nitrogen rates in rice and its effect on plant nutrient composition and nitrogen apparent recovery. *Chil. J. Agric. Res.* 73:385-390.
- Hirzel, J., Stolpe, N. 2015. Anaerobic incubation without shaking over a prolonged period as a method to determine mineralizable nitrogen in rice soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 46:2018-2032.
- Hirzel, J., Stolpe, N., Rodríguez, F. 2015. Optimizing the nitrogen rate in the rice crop in relation to soil mineralized nitrogen with anaerobic incubation without shaking to different times and temperatures. *Afr. J. Agric. Res.* 10:4010-4024.
- Jensen, L.S., Pedersen, I.S., Hansen, T.B., et al. 2000. Turnover and fate of ^{15}N -labelled cattle slurry ammonium-N applied in the autumn to winter wheat. *Eur. J. Agron.* 12:23-35.
- Jing, Q. 2007. Improving resources use efficiency in rice-based cropping systems: Experimentation and modeling. 145 p. Ph.D. thesis. Wageningen Universitat, Wageningen, The Netherlands.
- Jing, Q., Bouman, B., van Keulen, H., et al. 2008. Disentangling the effect of environmental factors on yield and nitrogen uptake of irrigated rice in Asia. *Agric. Syst.* 98(3):177-188.
- Jokela, W.E., Randall, G.W. 1997. Fate of fertilizer nitrogen as affected by time and rate of application on maize. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61:1695-1703.

- Khorsandy, N., Nourbakhsh, F. 2008. Prediction of potentially mineralizable N from amidohydrolase activities in a manure-applied, corn residue-amended soil. *Eur. J. Soil Sci.* 44:341-346.
- Kumura, A. 1956. Studies on the effect of internal nitrogen concentration of rice plant on the constitutional factor of yield. *Proc. Crop Sci. Soc. Jpn.* 24:177-180.
- Kundu, D.K., Ladha, J.K., Lapitan-de Guzman, E. 1996. Tillage depth influence on soil nitrogen distribution and availability in a rice lowland. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60:1153-1159.
- Lin, D., Fan, X., Hu, F., et al. 2007. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea in rice fields of the Taihue Lake Region. China. *Podosphere* 17(5):639-645.
- Mutters, R. 2000. Producing high quality rice for the export market. *Proceedings of the California Plant and Soil Conference. Farming in Crisis-Sustaining Agriculture in California*, Stockton, California. 19-20 February. California Chapter of American Society of Agronomy and California Fertilizer Association, California, USA.
- Myers, A. 2004. The rice plant: Growth, development, and genetic improvement. p. 30-48. In Champagne, E. (ed.) *Rice: Chemistry and technology*. 3rd ed. American Association of Cereal Chemists, St. Paul, Minnesota, USA.
- Ortega, R. 1989. Fertilización del cultivo. En Alvarado, R. (ed.) *Manual de producción de arroz. Serie Quilamapu N°20*. p. 59-76. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA), Chillán, Chile.
- Ortega, R., Alvarado, A., Belmar, C. 1992. Efecto de la fertilización N-P-K en la selectividad de producción del tallo (*Sclerotium hydrophilum* Sacc.) en arroz. *Agric. Téc. (Chile)* 52(2):156-161.
- Ortega, R., Madariaga, R., Alvarado, R., et al. 1991. Pudrición del tallo en arroz: Fertilización potásica. *Inv. Prog. Agrop. Quilamapu (Chile)* 49:19-24.
- Ricecheck. 2006. Ricecheck recommendations. A guide for rice crop management for improving yields, grain quality and profits and environmental sustainability. New South Wales Department of Primary Industries, Orange, NSW, Australia.
- Rodríguez, A., Hoogmoed, W., Brussaard, L. 2008. Soil quality assessment in rice production systems: establishing a minimum data set. *J. Environ. Qual.* 37:623-630.
- Rodríguez, J., Rojas, C. 1977. Efecto de los años de cultivo de arroz en la disponibilidad de nitrógeno del suelo. Respuesta a la fertilización nitrogenada. *Cien. Inv. Agr. (Chile)* 5(1-2):17-22.
- Rojas, C., Alvarado, R. 1982. Fertilización nitrogenada y fosfatada en arroz en la región centro-sur de Chile. Efecto sobre los rendimientos en grano. *Agric. Téc. (Chile)* 42:15-22.
- Rojas-Walker, C. 2008. Relación entre rendimientos relativos de arroz inundado y amonio mineralizado en 20 experimentos de dosis de ANA en arroz: Informe 2008. p. 1-34. Tucapel-UC Proyecto FONTEC.
- Sahrawat, K. 2006. Organic matter and mineralizable nitrogen relationships in wetland rice soils. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 37:787-796.
- Sainz H.R., Echeverría, H.E., Barbieri, P.A. 2004. Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize. *Agron. J.* 96:1622-1631.
- Scott, D., McLarren, A., Burger, J. 2005. Rapid indices of potential nitrogen mineralization for intensively managed hardwood plantations. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 36:1421-1434.
- Sheehy, J.E., Mnzava, M., Cassman, K.G., et al. 2004. Uptake of nitrogen by rice studied with a ¹⁵N point-placement technique. *Plant Soil* 259:259-265.
- Shimizu, T. 1967. Processes of yield formation in rice plants from the point of dry matter production (in Japanese). *Dry Matter Prod. Crops* 4:12-26.
- Singh, J.N., Murayama, N. 1963. Analytical studies on the productive efficiency of nitrogen in rice. *Soil Sci. Plant Nutr.* 9:25-35.

- Soon, Y., Haq, A., Arshad, M. 2007. Sensitivity of nitrogen mineralization indicators to crop and soil management. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38:2029-2043.
- Tanaka, A., Patnaik, S., Abichandani, C.T. 1959. Studies on the nutrition of rice plant. III. Partial efficiency of nitrogen absorbed by rice plant at different stages of growth in relation to yield of rice (*O. sativa*, var. *indica*). *Proc. Indian Acad. Sci. Sec. B* 49:207-216.
- Tinarelli, A. 1989. *El arroz*. 575 p. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.
- Trolldenier, G. 1979. Nitrogenaseaktivitaet in der Rhizosphaere von Sumpfreis in Abhaengigkeit von der Mineralstoffernaehrung. *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft. Goettingen* 29:334-337.
- Wienhold, B. 2007. Comparison of laboratory methods and an *in situ* method for estimating nitrogen mineralization in an irrigated silt-loam soil. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 38:1721-1732.
- Wilson, C.E., Norman, R.J., Wells, R.J. 1994. Chemical estimation of nitrogen mineralization in paddy rice soils. I. Comparison to laboratory indices. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 25(5&6):573-590.