

ESTUDIO DE LA DISPONIBILIDAD DEL FÓSFORO Y BORO APORTADOS POR LAS AGUAS DEPURADAS EN LA ISLA DE GRAN CANARIA: METODOLOGÍA Y RESULTADOS PRELIMINARES

V. Mendoza-Grimón¹, R. Rodríguez-Martín², J.R. Fernández Vera¹, M.P. Palacios Díaz¹, J.M. Hernández Moreno²

¹Agronomía. Prod. Animal. ULPGC. 35416. Arucas. Las Palmas. mpino@infovia.ulpgc.es

²Edafología. Universidad de La Laguna. jhmoreno@ull.es

RESUMEN. El fósforo y el boro son dos nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. En los análisis rutinarios de las aguas depuradas no se discriminan las especies químicas en las que se aportan dichos nutrientes. La asimilabilidad es diferente para las distintas especies cultivadas y su capacidad de adsorción en el suelo varía, por lo que este estudio resulta imprescindible para corregir los programas de abonado y determinar el riesgo potencial de la reutilización de las aguas depuradas. La metodología tradicional de análisis de suelos utiliza métodos destructivos mientras que la metodología propuesta en este estudio utiliza pelos radicales, que son muestreadores de solución de suelo no destructivos y que permiten obtener varias tomas *in situ*. Se realiza un estudio de optimización de los métodos analíticos y un ensayo de calibración para determinar el efecto debido al muestreador utilizado, con un suelo regado con agua de riego convencional (AR) y con otro regado con agua depurada (AD). Se han determinado el fósforo y boro inorgánico y total en: (a) el extracto saturado convencional, (b) la solución del suelo extraída a través de los pelos inmersos en dicha solución y (c) la solución extraída por los muestreadores colocados en una muestra de suelo saturado *in situ*. Se presentan los resultados obtenidos en una parcela de experiencias regada con agua depurada y convencional, y cultivada con alfalfa y pasto del Sudán, tras diferentes periodos después del riego.

Para las determinaciones de fósforo se ha utilizado el método del ácido ascórbico y el método de la azometina para el boro. Las concentraciones de fósforo soluble obtenidas en el suelo regado con agua depurada son inferiores a las obtenidas en suelo regado con agua convencional. En el boro la tendencia es la contraria (más boro soluble en el suelo regado con AD).

Las concentraciones de boro y fósforo inorgánico medidas en la solución del extracto saturado del suelo (a) fueron similares a las obtenidas en la solución extraída a través de los pelos inmersos en dicha solución (b) en las muestras AR. Este hecho parece indicar que los pelos radicales no afectan a la composición química de las soluciones extraídas. Ambas concentraciones tienden a ser superiores a las medidas en las soluciones extraídas por los pelos radicales introducidos en suelo saturado (c). Por tanto el efecto de la intensidad de extracción cuando se obtiene la

solución del suelo (tensión elevada cuando se obtiene el extracto saturado con bomba en el laboratorio y aproximadamente de -50kPa cuando se obtiene la solución con los pelos radicales) es superior al ejercido por efecto de la composición del polímero orgánico hidrófilo del pelo radical. Hay que destacar que esta tendencia sólo se muestra significativa en el suelo regado con AR, y que la variabilidad de los resultados es mayor para las muestras obtenidas con el AD.

Las concentraciones de B extraídas a mayor humedad (extracto saturado c: 100%) tienden a ser inferiores en suelo AD que las extraídas cuando el suelo tiene un contenido inferior de humedad. Esta tendencia no se observa en el suelo regado con AR, al presentar niveles inferiores de B soluble y menor tendencia a la inmovilización. Para el fósforo inorgánico la tendencia es contraria, posiblemente por un fenómeno de inmovilización en el tiempo.

En las soluciones obtenidas directamente en campo se obtienen valores superiores de B en el suelo regado con AD y, dentro de éste en los pelos introducidos en la zona radicular del pasto del Sudán superiores a la alfalfa y suelo desnudo. Sin embargo, las concentraciones de fósforo inorgánico tienden a ser superiores en las muestras obtenidas en el suelo regado con AR que en el regado con AD (tanto en las muestras de laboratorio como en campo). Esto parece indicar una tendencia a la inmovilización de las formas de fósforo aportadas ya que el AD aporta formas de fósforo fácilmente inmovilizables y compuestos orgánicos que contribuyen a la inmovilización de dicho nutriente.

Como sucedía con el B, las concentraciones de P en la zona radicular de alfalfa son inferiores a las del pasto del Sudán.

ABSTRACT. Phosphorus and Boron are essential micronutrients for plant growth and their availability depends on their chemical speciation in reclaimed water irrigation and in soil solution. However, routine analysis seldom include speciation. For fertilization management and to evaluate the potential hazards associated with reclaimed water irrigation, the speciation is important. On the other hand, the sampling methodology used in this study includes rhizon samplers which are non-destructive and perform a first step of P and B speciation through

filtration. A calibration essay was done in order to determine the effect of the solution sampler on P and B speciation in a soils irrigated with conventional water (CW) and reclaimed water (RW). Analysis of total and inorganic P and B were determined in solutions corresponding to: (a) conventional saturated paste, (b) rhizon extracts from (a), and (c) rhizon extracts from the samplers located directly in the soils.

RW provided significant amounts of P and B. Around 50% of the total P from RW were not available. P immobilization in soils irrigated with RW induced less P availability. Soil water content affected soluble B concentrations.

1. Introducción

El fósforo y el boro son dos nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas. En los análisis rutinarios de las aguas depuradas no se discriminan las especies químicas en las que se aportan dichos nutrientes. La asimilabilidad es diferente para las distintas especies cultivadas y su capacidad de adsorción en el suelo varía (Gupta, 1979; Goldberg et al., 1993; Keren et al., 1985; Keren y Bingham, 1985), por lo que este estudio resulta imprescindible para corregir los programas de abonado y determinar el riesgo potencial de la reutilización de este recurso.

La metodología tradicional de análisis de suelos utiliza métodos destructivos mientras que la metodología propuesta en este estudio utiliza muestreadores de solución de suelo no destructivos y que permiten obtener varias tomas *in situ*, lo que presenta indudables ventajas (Rhoades y Oster, 1986; Starr, 1985). La tensión ejercida por estos muestreadores (52.6 ± 1.4 kPa) fue calibrada en un ensayo anterior (Palacios *et al.*, 1999). Este valor de tensión garantiza que el movimiento de solutos sea similar al que ocurre en condiciones naturales en la zona radicular. En dicho trabajo se describen las principales características de estos muestreadores. Los pelos radiculares se utilizaron siguiendo las recomendaciones del fabricante (Eijkelkamp, 1998). Aunque existen trabajos anteriores realizados con estos tomamuestras (Haesebroeck *et al.*, 1997; Knight *et al.*, 1997; Argo *et al.*, 1997) en el citado estudio realizado por este equipo se puso de manifiesto la problemática para la interpretación de los datos obtenidos para el fósforo y no se realizaron medidas de B.

2. Material y métodos

Se realizó un estudio de optimización de los métodos analíticos y un ensayo de calibración para determinar el efecto debido al muestreador utilizado, con un suelo regado con agua de riego convencional (AR) y con otro regado con agua depurada (AD). El muestreador es un tubo sellado en un extremo compuesto por una membrana de polímero

orgánico hidrófilo de 10 cm de longitud y 2.5 mm de diámetro, conectado a un tubo de PVC transparente flexible de 10 cm de longitud, al que le sigue un conector macho donde se enrosca una jeringa especialmente diseñada, que permite recoger la solución del suelo. En el interior del polímero poroso y hasta llegar a una longitud de 5 cm en el tubo de PVC, se encuentra una guía de acero inoxidable, que proporciona cierta rigidez al pelo para su introducción en el suelo, rigidez que resulta insuficiente para su uso en campo.

Se han determinado boro inorgánico y fósforo inorgánico, hidrolizable y total en: (a) la solución del extracto saturado (convencional), (b) la solución extraída a través de los pelos inmersos en dicha solución del suelo y (c) la solución extraída por los muestreadores colocados en una muestra de suelo saturado *in situ*. Se realizaron extracciones a diferentes humedades del suelo, representando (c) el 100% y (d) el 85% (dos días después de saturar la muestra). También se realizaron extracciones en campo, tanto en la parcela regada con AR como en AD, situando los pelos en la zona radicular de un cultivo de Pasto del Sudán, alfalfa y en suelo desnudo. Se colocó un tensiómetro para medir la humedad del suelo cuando se tomaban las muestras. Para las determinaciones de fósforo se utilizó el método del ácido ascórbico (UNE-77047, 1983 y SM 4500 PE), precedidas de digestiones ácidas para la determinación del total e hidrolizable y el método de la azometina para el boro (AFNOR, 1990).

3. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos (medias \pm desviaciones estándar) en el experimento de calibración en el laboratorio se presentan en las tablas 1 y 2.

En la tabla 2 se presentan los datos de fraccionamiento de AD y AR. En el caso de AD se observa una reducción significativa de P total asociada a una disminución de las fracciones inorgánica y orgánica. Este hecho puede atribuirse a la exclusión de formas particuladas orgánicas y/o organominerales al pasar por la pared de las membranas ($0.45 \mu\text{m}$).

La modificación del equilibrio de especiación podría explicar el aumento de las formas hidrolizables (polifosfatos +P orgánico adsorbido). Los aportes de P por el AD son significativos representando las formas hidrolizables (3) alrededor de un 10% del total. El P orgánico aportado supone cerca del 40% del total, cantidad que resulta determinante a la hora de realizar la corrección del abonado. Para el AR las cantidades aportadas son muy bajas y nos encontramos dentro del límite de sensibilidad de la técnica colorimétrica utilizada. Las diferencias se corresponden fundamentalmente con P orgánico (probablemente por contaminación del estanque a cielo abierto). La Tabla 1 muestra los datos de B y del fraccionamiento de P en la disolución del suelo convencional y en las obtenidas a través de los pelos en el extracto de saturación y directamente en los suelos.

Tabla 1. Concentraciones de boro inorgánico y fósforo inorgánico (1), hidrolizable (3) (2:hidrolizable medido – 1:inorgánico) y total (4) en (a) la solución del extracto saturado (convencional), (b) la solución extraída a través de los pelos inmersos en dicha solución del suelo y (c) la solución extraída por los muestreadores colocados en una muestra de suelo saturado in situ. Se realizan extracciones a diferentes estados de humedad del suelo, representando c el 100% y d las medidas realizadas sobre muestras tras 48 horas de realizada la saturación del suelo (85%).

B y P (mg/L)	Fracción analizada	Solución extracto saturado (a)		Solución extracto saturado extraída con pelos (b)		Solución extraída con pelos en suelo (24 horas) (c)		Solución extraída con pelos en suelo (48 horas) (d)	
		AD	AR	AD	AR	AD	AR	AD	AR
B	Inorg.	2.06±0.04	2.29±0.04	2.11±0.06	2.34±0.02	2.02±0.14	2.00±0.14	2.39±0.04	2.19±0.06
P (1)	Inorg.	0.26	0.53±0.05	0.30±0.05	0.51±0.06	0.28±0.04	0.22±0.04	0.17±0.01	0.26±0.06
P (3)	Hidrol.	0.34	0.33±0.06	0.59±0.09	0.35±0.05	0.12±0.03	0.51±0.12	0.42±0.06	0.47±0.08
P (4)	Total	0.87±0.03	1.06±0.04		0.89±0.06	0.81±0.03	0.89±0.04	0.79±0.02	0.86±0.01

Tabla 2. Concentraciones de fósforo inorgánico (1), hidrolizable + inorgánico (2), hidrolizable (3) y total (4) en Agua Depurada (AD) y Agua de Riego convencional (AR) medidas directamente (e) y tras ser absorbidas utilizando los pelos radicales (f).

P (mg/L)	Fracción analizada	Solución medida directamente(e)		Solución extraída con pelos (f)	
		AD	AR	AD	AR
1	Inorg.	1.39±0.06	0.01±0.00	1.05±0.05	0.02±0.00
2	Hidrol+ing	1.62±0.05	0.10±0.01	1.59±0.08	0.11±0.00
3=2-1	Hidrol.	0.22±0.03	0.08±0.01	0.54±0.04	0.10±0.00
4	Total	2.66±0.03	0.27±0.02	1.89±0.06	0.39±0.04
5	orgánico	1.04	0.17	0.3	0.28

Las concentraciones de B y P inorgánicos medidas en la solución del extracto saturado del suelo (a) en el caso de AR fueron similares a las obtenidas en la solución extraída a través de los pelos inmersos en dicha solución (b), presentando por lo tanto una tendencia paralela a la obtenida en el ensayo directo con AR. En cambio, la fracción inorgánica disminuyó en (c). Por tanto el efecto de la intensidad de extracción cuando se obtiene la solución del suelo (tensión elevada cuando se obtiene el extracto saturado con bomba en el laboratorio y aproximadamente de -50 kPa cuando se obtiene la solución con los pelos radicales) es superior al ejercido por efecto de la composición del polímero orgánico hidrófilo del pelo radical. Este hecho indica que se accede a diferentes tamaños capilares en los que las diferencias de retención implican diferencias en la concentración de los iones, sobre todo para nutrientes poco móviles como el fósforo, lo que coincide con la bibliografía existente (Hinsinger, 1998) ya comentado por Palacios et al. (1999). Este hecho no parece manifestarse en las muestras del suelo regado con AD, donde los valores de P inorgánico fueron muy similares en los ensayos (a), (b) y (c), lo que sugiere que la especiación del fósforo en las disoluciones del suelo es diferente que en las aguas depuradas. Estos resultados plantean la duda de si el efecto del pelo se debe a una acción de la propia membrana o a la alteración del equilibrio de especiación.

Las concentraciones de B en suelo AD extraídas en extracto saturado, c (tabla 1) tienden a ser inferiores que las extraídas con inferior de humedad (d), (figura 1). Esta

tendencia no se observa en el suelo regado con AR en el que las inferiores concentraciones permanecen sensiblemente constantes. Los resultados obtenidos en niveles superiores de B soluble (suelo regado con AD) coinciden con la bibliografía, lo que demuestra el efecto de la humedad en la posible fitotoxicidad por B (Perkins, 1995).

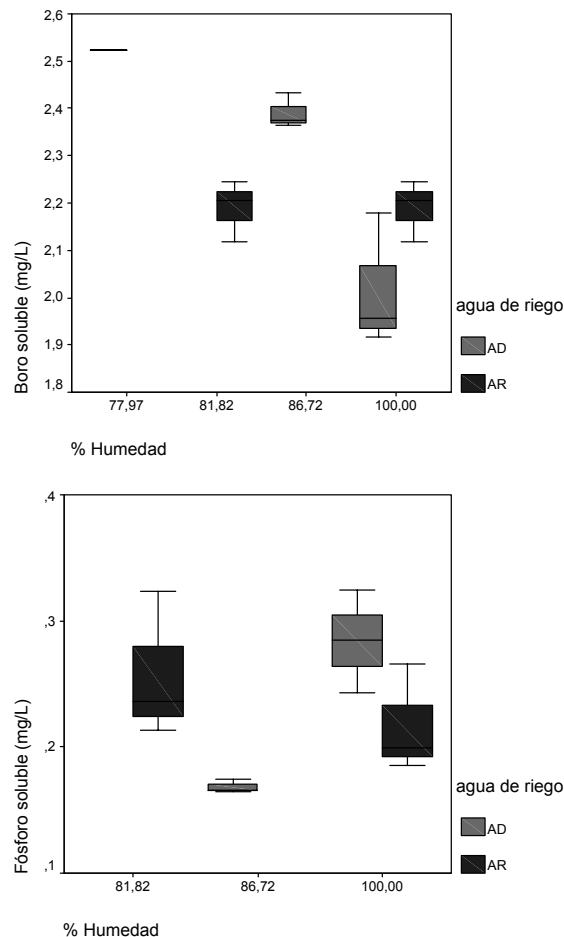


Fig. 1. Concentraciones de B y fósforo inorgánico soluble ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) medidas en las soluciones extraídas por los pelos radicales en suelo saturado (c) con contenidos de humedad decrecientes, en agua de riego convencional (AR) y en agua depurada (AD), representando el 100% al extracto saturado.

Las concentraciones de B soluble obtenidas en una parcela de experiencias regada con agua depurada y cultivada con alfalfa y pasto del Sudán, tras diferentes periodos después del riego se presentan en la figura 2. Las muestras se obtuvieron siempre con una tensión del suelo entre -5 y -20 kPa. Se obtuvieron valores superiores en el suelo regado con AD y, dentro de éste en los pelos introducidos en la zona radicular del pasto del Sudán y la alfalfa. Aunque este efecto de solubilización realizado por la rizosfera de las diferentes especies vegetales es conocido para otros elementos (Hinsinger, 1998; Marschner, 1999), no se encuentran muchas referencias específicas para el B. Sí existen trabajos que encuentran un mayor contenido de B foliar en hojas de alfalfa que en hojas de maíz y trigo cultivados en el mismo suelo (Gupta, 1979), lo que parece contrario a nuestros resultados. Sin embargo, sí es conocido el efecto del pH en la disponibilidad de este elemento (Barrow, 1989; Goldberg, 1993; Keren y Bingham, 1985, Goldberg y Forster, 1991) Como la acidez contribuye a la solubilización de B, las especies vegetales (gramíneas) con mayor capacidad para acidificar su rizosfera (Hinsinger, 1998; Marschner, 1999) tenderán a contener concentraciones superiores de B soluble, lo que coincide con nuestros resultados en campo.

Cuando se promedian todos los resultados, las concentraciones de boro soluble obtenidas en el suelo regado con agua depurada son superiores a las obtenidas en suelo regado con agua convencional. Para el fósforo la tendencia es la contraria (más fósforo soluble en el suelo regado con AR) (figura 3), lo que coincide con la tendencia observada en el laboratorio. Este hecho nos sugiere que existe algún tipo de inmovilización del fósforo inorgánico aportado con el AD.

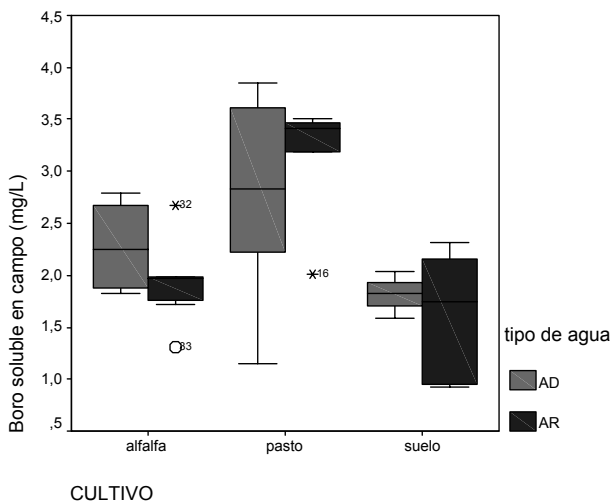


Fig. 2. Concentraciones de B inorgánico soluble ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) medidas en las soluciones extraídas por los pelos radicales introducidos en la zona de desarrollo radicular en suelo desnudo, suelo cultivado con Pasto del Sudán y cultivado con alfalfa, regados con agua de riego convencional (AR) y agua depurada (AD).

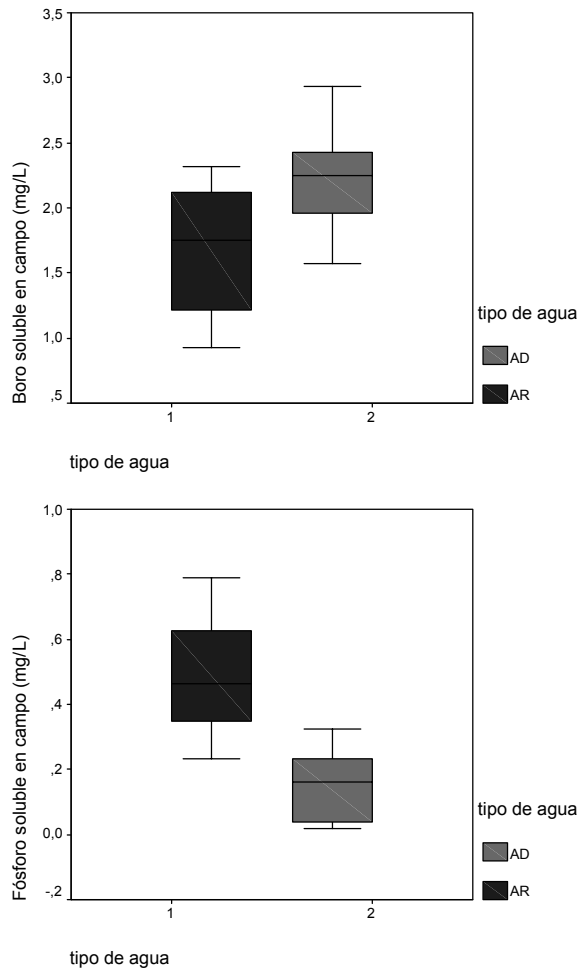


Fig. 3. Concentraciones de B y fósforo inorgánico soluble ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) medidas en las soluciones extraídas por los pelos radicales en campo, en la parcela regada con agua de riego convencional (AR) y en agua depurada (AD). Las muestras se obtuvieron siempre con una tensión del suelo inferior a 20 kPa

El estudio de las muestras de P en campo a lo largo del tiempo se presenta en la figura 4. Las concentraciones de P total ya no son significativamente superiores en el suelo regado con AR, aunque si las del P inorgánico. Se observa que el fósforo soluble representa un alto porcentaje del total en la parcela regada con AR, lo que no ocurre en el suelo AD. Este hecho confirma que el AD aporta formas de fósforo no directamente asimilables (Fig. 4 (a)). Transcurridas 24 horas tras el riego (Fig. 4 (b)), la concentración de fósforo soluble disminuye en la parcela regada con AD, lo que confirma su inmovilización (la pérdida de datos en la parcela AR impide realizar una interpretación totalmente fiable).

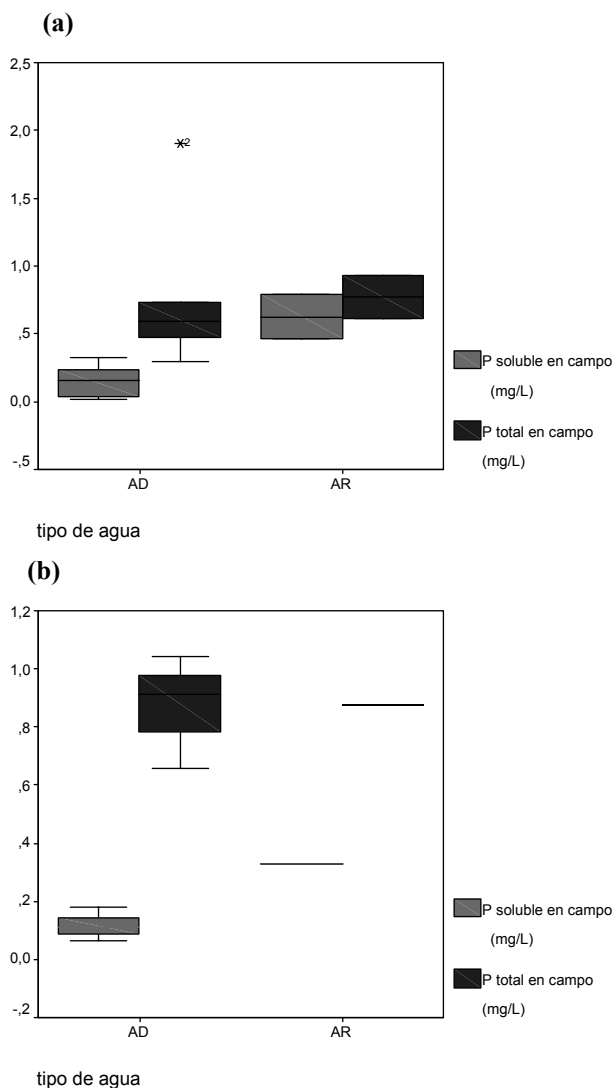


Fig. 4. Concentraciones de Fósforo soluble y total extraídos por los pelos radicales en campo (media de todas las parcelas) a distintos momentos de succión con el pelo: a) succión realizada tras el riego y b) succión realizada 24 horas después del riego.

4. Conclusiones

La utilización de estos pelos resulta adecuada sobre todo para estudios que requieran muestreos repetitivos. Las diferencias encontradas respecto a la metodología tradicional parecen obedecer más a diferencias en la intensidad de extracción que a la influencia de la composición de la membrana del pelo.

El AD aporta una cantidad significativa de P. Las formas hidrolizables representan alrededor de un 10% del total, y el P orgánico supone cerca del 40%. Cuando se riega con AD se inmovilizan las formas directamente asimilables. Estos hechos resultan críticos para realizar la corrección del abonado.

Por el contrario las concentraciones de boro soluble obtenidas en el suelo regado con AD son superiores a las obtenidas en suelo regado con AR. La especie cultivada afecta a las concentraciones de nutrientes encontradas, incrementándose los nutrientes solubles en la rizosfera de las gramíneas.

Agradecimientos. Los autores agradecen al Consejo Insular de Aguas y a la Granja Agrícola Experimental de Gran Canaria la financiación y apoyo recibidos. Así mismo se agradece a semillas Rocalba y a la empresa de material de riego Netafim por los materiales suministrados.

Referencias

AFNOR. (1990). Dosage du bore par spectrométrie d'absorption moléculaire. Méthode à l'azométhine. *Asociation Française Normalization T 90- 041*. 4ª ed.

Argo and McGrath, S. 1997. Zinc and Cadmium uptake by the hyper accumulator *Thlaspi caerulescens* in contaminated soils and its effects on the concentrator and chemical speciation of metals in soil solution. *Plant and Soil* 197, 71-78

Barrow, N. J. (1989). Testing a mechanistic model. The effect of pH and electrolyte concentration on borate sorption by a soil. *Journal of Soil Sci.*, 1989, 40:427-435.

Eijkelkamp, 1998. Operating instructions. M2.19.21.E Rhizon soil moisture sampler. Giesbeek, The Netherlands. 7 pp

Goldberg, S., and H. S. Forster (1991). Boron sorption on calcareous soils and reference calcites. *Soil Sci.* 152:304-310.

Goldberg, S., H. S. Forster, and E. L. Heick. (1993). Boron adsorption mechanisms on oxides, clay minerals, and soils inferred from ionic strength effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57:704-708.

Gupta, U. C. (1979). Boron nutrition in crops. *Adv. Agron.*, 31:273-307

Haesebroeck and Boeye. 1997. Experimental Investigation of drought induced acidification in a rich fen soil. *Biogeochemistry* 37, 15-32

Hinsinger, P. (1998). How do plant root acquire mineral nutrients? Chemical process involved in the rhizosphere. *Adv. Agronomy*, 64: 225-265.

Keren R. y F. T. Bingham. (1985). Boron in water, soils, and plants. *Adv. Soil Sci.* 1:229-276

Keren R., F. T. Bingham, y J. D. Rhoades. (1985). Effect of clay content in soil on Boron uptake and yield of wheat. *Am. J.* 49:1466-1470.

Keren R., F. T. Bingham, y J. D. Rhoades. (1985). Plant uptake of soil boron as affected by boron as affected by boron distribution between the liquid and the solid phases in soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45:478-482

Knight and Biernabau 1997 Evaluating Rhizon SMS as a method for extracting Nutrient Solution and analyzing media for Container grown crops. *Hort Technology* 7p 404-408

Marschner, H. (1999). Mineral Nutrition of Higher Plants. Academic Press, San Diego. 889 pp.

Palacios, MP., Pardo, A., Del-Nero E., Rodríguez, F., 1999. Estudio comparativo de la solución extraída por pelos radicales, cápsulas cerámicas y el extracto saturado, en condiciones de laboratorio. Estudios en Zona no Saturada. Tenerife.

Perkins, P. V. (1995). The consideration of soil boron adsorption and soil solution boron concentration as affected by moisture content. *Geoderma* 66: 99-111

Rhoades, J. D. and J. D. Oster, 1986. Methods of soil analysis. 1. *Agronomy*, 9, 985-1006.

Starr, M. R., 1985. Variation in the quality of tension lysimeter soil water samples from a Finnish forest soil. *Soil Sci.*, 140, 453-461.

SM 4500 PE. Stándar Method (17Ed.)

UNE-77047, 1983. Una Norma Española

