

CONCENTRACIÓN DE CATIONES EN FRIJOL COMÚN EN RESPUESTA A ALUMINIO

Cations Concentration in Common Bean in Response to Aluminum

Rodolfo Landa Contreras¹, Libia I. Trejo Téllez^{1†}, Fernando C. Gómez Merino¹,
Bernardo Villar Sánchez² y Cecilia García Osorio¹

RESUMEN

En México, diversas variedades de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), son cultivadas en suelos ácidos con altos contenidos de aluminio soluble (Al^{3+}), sin que haya sido evaluada su tolerancia a este elemento. En esta investigación se estudió el efecto de 3 niveles de Al^{3+} (0, 50 y 100 μM) en la solución nutritiva, sobre la concentración de los cationes potasio, calcio y magnesio (K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}) *in planta*, en 3 variedades mexicanas de frijol negro (Jamapa, Medellín y Grijalva). Después de 23 días de tratamiento, las plantas fueron divididas en hojas, tallos y raíces y se determinó la concentración de los cationes en estos órganos. El factor concentración de Al^{3+} afectó significativamente la concentración de los cationes en hojas, tallos y raíces. El factor variedad no mostró efecto sobre la concentración de Ca^{2+} en los órganos evaluados, mientras que la concentración de K^+ y Mg^{2+} sí mostraron diferencias estadísticas debidas al factor variedad. La interacción de los factores en estudio ocasionó diferencias estadísticas significativas en la concentración de Ca^{2+} en los 3 órganos evaluados. La presencia de Al^{3+} en la solución nutritiva redujo de manera considerable la concentración de K^+ en tallos y raíces en las 3 variedades, siendo más evidente en la variedad Medellín. La concentración de Ca^{2+} mostró tendencia similar a la de K^+ en presencia de Al^{3+} en las variedades Jamapa y Medellín; por el contrario, la concentración de este elemento fue incrementada en hojas de la variedad Grijalva cuando fue tratada con 100 μM de Al^{3+} . El Mg^{2+} no disminuyó su concentración en tejidos por la adición de Al^{3+} ; contrariamente,

en la variedad Grijalva su contenido en hoja en el tratamiento con 100 μM Al^{3+} superó a la del testigo en 23%. Los resultados obtenidos permiten concluir que la variedad Grijalva presentó menor susceptibilidad a Al^{3+} y la Medellín fue menos tolerante a este elemento.

Palabras clave: *Phaseolus vulgaris*, toxicidad por aluminio, potasio, calcio, magnesio.

SUMMARY

In Mexico, different varieties of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) are cultivated on acid soils with high contents of soluble aluminum (Al^{3+}), but these varieties have not been evaluated for their tolerance to Al. Therefore, in this research the effect of three concentrations of Al^{3+} (0, 50 and 100 μM) in the nutrient solution on the concentration of potassium, calcium and magnesium (K^+ , Ca^{2+} and Mg^{2+}) cations *in planta*, in 3 Mexican varieties of common bean (Jamapa, Medellín and Grijalva) was assessed. After 23 days of Al treatment, plants were harvested and divided into leaves, stems and roots, and cation concentrations contained in each organ was determined. Concentration of Al^{3+} significantly affected cation concentration in leaves, stems and roots. The factor variety did not affect Ca^{2+} concentration in any plant organ studied, while K^+ and Mg^{2+} concentrations showed significant differences due to the factor variety. Interaction between factors significantly affected Ca^{2+} in the 3 organs evaluated. Al^{3+} concentration drastically reduced concentration of K^+ in both stems and roots, which was more notable in Medellín. Ca^{2+} concentration showed a similar tendency as that observed in K^+ in the presence of Al in both varieties Jamapa and Medellín; conversely, Ca^{2+} concentration increased in leaves of the variety Grijalva when it was treated with 100 μM de Al^{3+} . Mg^{2+} concentration did not decrease in any organ as an effect of Al; instead, in the variety Grijalva its concentration in leaves of plants treated with 100 μM Al^{3+} was 23%

¹ Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. 56230 Montecillo, estado de México.

[†] Autor responsable (tlibia@colpos.mx)

² INIFAP, Campo experimental Centro Chiapas. Km 3 Carretera Internacional. Ocozacoatlá de Espinoza. 29140 Chiapas, México.

Recibido: abril de 2008. Aceptado: julio de 2009.

Publicado en Terra Latinoamericana 28: 119-127.

higher than that showed in control plants. We conclude that the variety Grijalva was less affected by Al^{3+} concentration in the nutrient solution and that the variety Medellín was less tolerant to Al.

Index words: *Phaseolus vulgaris*, aluminum toxicity, potassium, calcium, magnesium.

INTRODUCCIÓN

El aluminio (Al) es considerado uno de los factores que reduce el crecimiento y rendimiento de plantas desarrolladas en suelos ácidos con valores de pH menores a 5 (Samac y Tesfaye, 2003). Se calcula que un 40% de la superficie cultivable del planeta y aproximadamente el 70% del suelo utilizado para la producción de alimentos son suelos ácidos y, por tanto, sujetos a la toxicidad por este metal (Sumner y Noble, 2003). Poscherieder *et al.* (1992) establecieron que la toxicidad por aluminio (Al^{3+}) reduce de manera significativa la absorción y translocación de elementos esenciales para el desarrollo de la planta, principalmente cationes como el potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), lo que repercute sobre el rendimiento. Liu y Luan (2001) mencionan que la inhibición de la absorción de K^+ por presencia de Al^{3+} en *Arabidopsis thaliana*, es causada por un bloqueo de la superficie interna de la membrana plasmática, lo que conduce a la disminución del 50% de la absorción de este elemento cuando las plantas son tratadas con una concentración de $10 \mu\text{M}$ de Al^{3+} ; una concentración de $50 \mu\text{M}$ Al^{3+} , la reduce en un 79%. En lo que a Ca^{2+} respecta, se ha demostrado que el ión Al^{3+} lo desplaza en lugares de unión en el citoplasma. El desplazamiento de Ca^{2+} y sustitución de éste por Al^{3+} en la pared celular puede ser suficiente para producir alteraciones en el desarrollo normal de la célula (Schofield *et al.*, 1998).

Se ha reportado que especies de plantas tanto monocotiledóneas como dicotiledóneas presentan diferentes concentraciones de Mg^{2+} en tejido cuando crecen en condiciones de estrés por Al^{3+} (Keltjens y Tan, 1993). En vástagos de avena, Grimme (1983) reportó disminución del 30% en la concentración de Mg^{2+} cuando las plantas fueron tratadas con aluminio, en comparación con las plantas testigo; de la misma manera, en plántulas de abeto rojo (*Picea abies* Karst.) se observó una fuerte inhibición en la absorción y translocación de Mg^{2+} cuando fueron tratadas con 1 mM de Al^{3+} en la solución nutritiva (van Praag *et al.*, 1997). El paso inicial en la interacción

Al^{3+} - Mg^{2+} toma lugar probablemente en el apoplasto radical. En ausencia de Al^{3+} , altas cantidades de Mg^{2+} se unen a los sitios de intercambio en las paredes corticales de la raíz, conocidos como sitios de intercambio catiónico de la raíz. Como consecuencia, la concentración de Mg^{2+} incrementa en los alrededores del lado exterior del plasmalema. Cuando existen niveles externos altos de Al^{3+} , una gran parte del Mg^{2+} unido en el complejo de intercambio de la raíz es desplazado por estos iones, lo que conduce a la deficiencia de Mg^{2+} (Marschner, 1995). Además, el ión Al^{3+} puede interferir en procesos fisiológicos en los que participa el Mg^{2+} debido a que su similitud en radio iónico es una característica aún más importante que su diferencia en cargas dentro de reacciones biológicas (da Silva *et al.*, 2005).

Debido a que el frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es una de las especies más cultivadas en zonas tropicales de México con alta incidencia de suelos ácidos y toxicidad por Al^{3+} , y no existen reportes sobre las respuestas de variedades mexicanas a este elemento, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto del Al^{3+} (en 3 concentraciones, adicionadas a la solución nutritiva) sobre la concentración de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en hojas, tallos y raíces de 3 variedades mexicanas de frijol negro.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización Geográfica del Área Experimental

El presente trabajo se realizó en el invernadero del área de Nutrición Vegetal del Colegio Postgraduados, en Montecillo, estado de México, localizado a $19^\circ 29' \text{ LN}$, $98^\circ 53' \text{ LO}$ y una altitud de 2250 m. El clima es clasificado como $\text{C}(\text{w}_0)(\text{w})\text{b}(\text{i})\text{g}$, con temperatura media anual de 15°C y una oscilación térmica de 5.8°C (García, 1988).

Descripción del Material Vegetal

El criterio de selección de las 3 variedades de frijol empleadas fue su adaptación a climas tropicales, donde de manera predominante se encuentran suelos ácidos, y en consecuencia, concentraciones tóxicas de Al^{3+} en nuestro país. Las 3 variedades seleccionadas (Jamapa, Medellín y Grijalva) son de raza mesoamericana y el color de su testa es negro.

Experimento y Diseño de Tratamientos

En este experimento se consideraron 2 factores de estudio: a) variedad de frijol y b) concentración de Al^{3+} en la solución nutritiva. Cada uno de estos factores fue ensayado en 3 niveles: Jamapa, Grijalva y Medellín para las variedades y 0, 50 y 100 μM para el factor concentración de aluminio, lo que generó 9 tratamientos; los tratamientos fueron distribuidos completamente al azar. Una planta fue considerada como unidad experimental, teniéndose 8 plantas por tratamiento, las cuales fueron establecidas en 2 macetas de 3 L de capacidad (4 plantas por maceta). Con los datos obtenidos se realizó un análisis de varianza usando el programa de análisis estadístico SAS (SAS, 1985), empleando el procedimiento ANOVA y una prueba de comparación de media por Tukey ($P \leq 0.05$ y $P \leq 0.01$).

Manejo del Cultivo

Las semillas de las variedades de frijol fueron sembradas en charolas de plástico conteniendo aproximadamente 30 cm^3 de agrolita. Las plantas fueron regadas con agua destilada hasta la aparición de las hojas cotiledonares. Los 10 días posteriores fueron regadas con la solución de Hoagland y Arnon (Hoagland y Arnon, 1950) a 1/3 de concentración.

Establecimiento de Plántulas en Hidroponía

Plántulas de 10 días de edad y de una altura promedio de 9 cm fueron establecidas en macetas de 3 L de capacidad, sostenidas con hule espuma en los orificios de las tapas de las macetas. A la solución nutritiva empleada (Cuadro 1), se le adicionó una mezcla de micronutrientes (Cuadro 2), en la cual Mn, Cu y Zn fueron suministrados en forma de sulfatos; B como H_3BO_3 ; Fe se suministró como quelato (Fe-EDTA) según lo descrito por Steiner y van Winden (1970). Las plantas fueron mantenidas bajo estas condiciones por 5 días (fase de aclimatación), para posteriormente dar inicio con los tratamientos (adición del Al^{3+} a la solución nutritiva en cada una de las concentraciones a evaluar). El aluminio fue abastecido a las soluciones nutritivas en forma de cloruro de aluminio hexahidratado ($\text{AlCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). El pH de las soluciones fue ajustado a 4.2 para garantizar que el Al permaneciera en su forma iónica Al^{3+} . La solución nutritiva fue renovada cada 10 días, mientras que el pH se ajustó cada tercer día.

Cuadro 1. Concentración nutrimental de la solución empleada en el experimento.

Íon	NO_3^-	H_2PO_4^-	SO_4^{2-}	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NH_4^+
$\text{mol}_c \text{ m}^{-3}$	1	0.005	1.25	0.5	1	0.25	1

Concentración Nutrimental en Tejido Vegetal

Después de 23 días de tratamiento, las plantas fueron divididas en hojas, tallos y raíces; posteriormente las muestras fueron secadas en una estufa de aire forzado (48 h, 65 °C). Después del secado de las muestras, éstas se molieron usando un molino tipo Wiley de acero inoxidable provisto de un tamiz malla 40. Las concentraciones de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} fueron determinadas mediante digestión húmeda del material seco con una mezcla de ácidos perclórico y nítrico (Alcántar y Sandoval, 1999). Posteriormente los extractos obtenidos se leyeron en un equipo de espectrometría de emisión atómica de inducción con plasma acoplado en un equipo ICP-AES VARIAN™ modelo Liberty II.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Concentración de Potasio

La significancia estadística de las concentraciones de K^+ en los órganos evaluados en función de la concentración de Al^{3+} en la solución nutritiva se presenta en el Cuadro 3. El factor concentración de Al^{3+} ocasionó diferencias estadísticamente significativas ($P \leq 0.05$) sobre la concentración de este elemento en hojas y altamente significativas en tallos y raíces ($P \leq 0.01$). El factor variedad ocasionó únicamente diferencias estadísticas significativas en la concentración de K^+ en tallo ($P \leq 0.05$); en este órgano la interacción de factores ocasionó diferencias estadísticas altamente significativas ($P \leq 0.01$).

Las concentraciones de K^+ obtenidas en hojas, tallos y raíces de las 3 variedades de frijol sometidas a diferentes concentraciones de Al^{3+} en la solución nutritiva son mostradas en la Figura 1. Las concentraciones

Cuadro 2. Concentraciones de micronutrientes adicionados a la solución nutritiva.

Micronutriente	Mn	Cu	B	Zn	Fe
mg L^{-1}	1.6	0.11	0.865	0.023	5

Cuadro 3. Efecto de los factores de estudio (concentración de Al^{3+} y variedad) y su interacción sobre la concentración nutrimental de potasio (K^+) en hojas, tallos y raíces de plantas de frijol.

Fuente de variación	Grados de libertad	Hojas	Tallos	Raíces
Concentración de Al^{3+}	2	*	**	**
Variedad	2	NS	*	NS
Concentración de Al^{3+} X variedad	4	NS	**	NS

NS = no significativo; * = significativo ($\alpha = 0.05$); ** = altamente significativo ($\alpha = 0.01$).

promedio de este elemento en las 3 variedades de frijol en el tratamiento testigo fueron de 27.9, 28.1 y 34.4 $g\ kg^{-1}$ para hojas, tallos y raíces, respectivamente. Estas concentraciones son similares a las reportados por Tuma *et al.* (2004) para frijol en hojas (24 $g\ kg^{-1}$) y en tallos (32 $g\ kg^{-1}$); además de coincidir en que la concentración de K en frijol es mayor en tallos que en hojas, lo anterior como respuesta a la función fisiológica de este nutrimento en los procesos de transporte en plantas.

En la Figura 1 también se observa que la variedad Medellín mostró mayor susceptibilidad a la presencia de aluminio. El tratamiento con 100 $\mu M\ Al^{3+}$ redujo la concentración de K^+ en casi 17.5% en hojas, en comparación con el testigo; en tallos dicha reducción fue de 44.7% (Figura 1a y b).

La variedad Jamapa mostró resultados similares a la variedad Medellín. La concentración de K^+ en raíces (Figura 1c), se redujo considerablemente por la presencia de Al^{3+} en la solución nutritiva (26 y 46% para las soluciones conteniendo 50 y 100 $\mu M\ Al^{3+}$, respectivamente). En esta variedad, los tallos de plantas tratadas con 100 μM de Al^{3+} , mostraron reducción en 47% en la concentración de este catión, en comparación con los tallos de plantas testigo.

En forma contraria a los resultados de tallo y raíz, la variedad Jamapa presentó la menor reducción en la concentración de K^+ por efecto de la concentración de Al^{3+} en la solución nutritiva, siendo sólo 1.15% menor en el tratamiento de 100 μM de Al^{3+} a la concentración registrada en las plantas que no fueron tratadas con Al^{3+} . Asimismo, en esta variedad la adición de 50 $\mu M\ Al^{3+}$ incrementó la concentración de este catión en 3.47% en hojas, en comparación con el testigo.

Es importante destacar que en la variedad Grijalva la mayor concentración de Al^{3+} en la solución nutritiva incrementó ligeramente la concentración de K en raíces (1.7% mayor a la del testigo).

El potasio es el catión más abundante en la célula vegetal y presenta una alta movilidad dentro de la planta (Fox y Guerinot, 1998). Incrementos en la concentración de K^+ en hojas y raíces por la presencia de Al^{3+} , como en el caso de las variedades Jamapa y Grijalva, han sido previamente reportados en *Trifolium repens* L. (Lee y Pritchard, 1984), y en raíces de arroz (Tanoi *et al.*, 2006). Estos últimos resultados permitieron concluir que la absorción de K no ocurre por procesos de difusión dentro de las células, sino por transporte activo mediado por transportadores tales como el transportador $H^+:K^+$

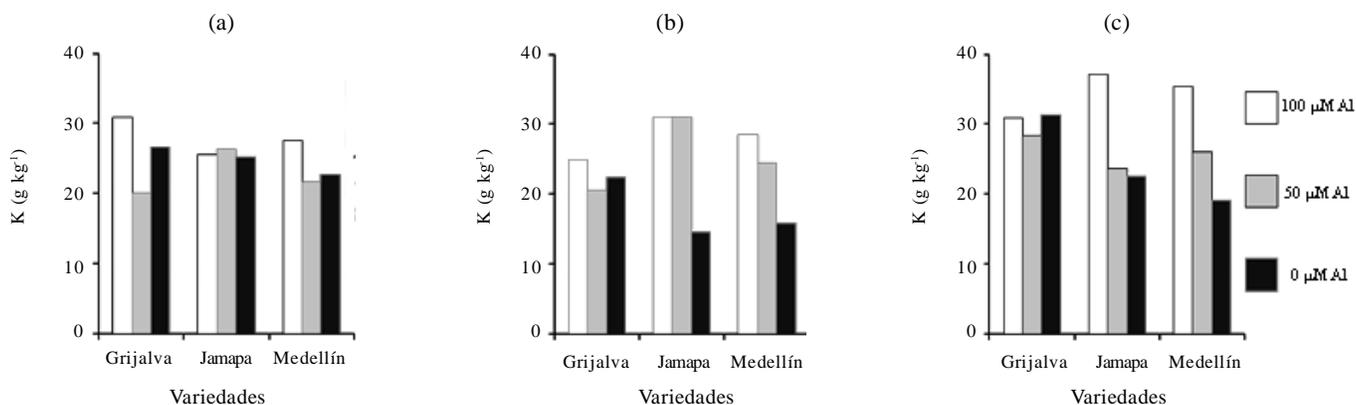


Figura 1. Concentración de potasio (K^+) en hojas (a), tallos (b) y raíces (c) de 3 variedades de frijol (Grijalva, Jamapa y Medellín) tratadas con tres concentraciones de aluminio (0, 50 y 100 μM).

o por gradiente de protones (H^+), el cual es promovido por la presencia de Al^{3+} . Por el contrario, las reducciones en la concentración de K^+ a nivel celular, son debidas según Liu y Luan (2001), a la inhibición de la entrada de este elemento causada por el bloqueo de canales de absorción de K localizados en la membrana plasmática interna (K_m) provocada por el Al^{3+} , cuando éste se encuentra en el citosol.

Concentración de Calcio

El Cuadro 4 muestra la significancia estadística de los factores de estudio y la interacción de éstos sobre la concentración de Ca^{2+} en hojas, tallos y raíces de frijol. La variedad no influyó sobre la concentración de Ca^{2+} en los órganos evaluados ($P > 0.05$). Por el contrario, la concentración de Al^{3+} y la interacción de ésta con el factor variedad ocasionó diferencias altamente significativas ($P \leq 0.01$) en la concentración de Ca^{2+} en hojas, tallos y raíces.

El Ca se encuentra en tejido foliar en concentraciones menores a las del K, las cuales oscilan entre 0.1 y 2% de la materia seca (Fox y Guerinot, 1998). En el caso particular de las variedades de frijol evaluadas en esta investigación, los contenidos promedio registrados de este nutrimento en el testigo fueron de 22.5 g kg^{-1} tanto para hojas como para tallos, y 6 g kg^{-1} para raíces (Figura 2).

Entre variedades se observan efectos distintos causados por la presencia de Al^{3+} sobre la concentración de Ca^{2+} . Es evidente por un lado, la disminución de la concentración de Ca en las variedades Jamapa y Medellín al ser tratadas con Al (Figura 2), respuesta debida a los trastornos ocasionados por el bloqueo de canales en la membrana externa de la célula causados por el Al^{3+} ; se argumenta también que el Al es capaz de bloquear los canales ubicados en la membrana interna (Rout *et al.*, 2001). Jones *et al.* (1998) reportaron que la concentración de Ca en el citosol disminuyó significativamente en células de tabaco después de ser tratadas con Al. Además, se ha reportado que plantas

en presencia de Al^{3+} presentan menor concentración de Ca que aquellas deficientes en este nutrimento (Rengel y Elliot, 1992). En forma contraria a las reducciones en la concentración de Ca^{2+} como consecuencia del tratamiento con Al^{3+} anteriormente mencionadas, en la variedad Grijalva el tratamiento con $100 \mu\text{M}$ de Al^{3+} incrementó la concentración de este catión en hojas y tallos; lo que conduce a afirmar la existencia de mecanismos intrínsecos de cada variedad para recuperarse del estrés por Al, como lo indican Watanabe y Okada (2005), quienes demostraron que la tolerancia no solo a Al, sino también a estroncio (Sr) y bario (Ba) en arroz, exhibe amplias diferencias entre cultivares. Los mecanismos de tolerancia a Al que hasta ahora han sido documentados en plantas son muy variados. Existen evidencias experimentales que indican que plantas monocotiledóneas y varias especies de plantas dicotiledóneas excluyen la entrada de Al^{3+} a las células de la raíz a través de la exudación de ácidos orgánicos como citrato, malato y oxalato, los cuales inmovilizan al Al^{3+} en la superficie de la raíz formando complejos estables no tóxicos con éste (Delhaize *et al.*, 1993; Kollmeier *et al.*, 2001; Liu *et al.*, 2007). Kochian *et al.* (2004) afirman que algunas especies de plantas poseen canales selectivos de cationes que no permiten la entrada de Al a la célula o bien que impiden el transporte de este elemento a la parte aérea; en consecuencia, en estas plantas no se inhibe la absorción de cationes.

Concentración de Magnesio

El factor concentración de Al^{3+} y la interacción de éste con el factor variedad afectaron en forma altamente significativa ($P \leq 0.01$) la concentración de Mg^{2+} en hojas. Esta misma respuesta se presentó en tallos, en donde adicionalmente existió efecto significativo de la variedad ($P \leq 0.05$). Ambos factores (concentración de Al^{3+} y variedad) tuvieron efecto altamente significativo sobre la concentración de Mg^{2+} en raíces, pero no sus interacciones (Cuadro 5).

Cuadro 4. Efecto de la concentración de aluminio (Al^{3+}) y variedad de frijol y su interacción sobre la concentración de calcio (Ca^{2+}) en hojas, tallos y raíces de plantas de frijol.

Fuente de variación	Grados de libertad	Hojas	Tallos	Raíces
Concentración de Al^{3+}	2	**	**	**
Variedad	2	NS	NS	NS
Concentración de Al^{3+} X variedad	4	**	**	**

NS = no significativo; ** = altamente significativo ($\alpha = 0.01$).

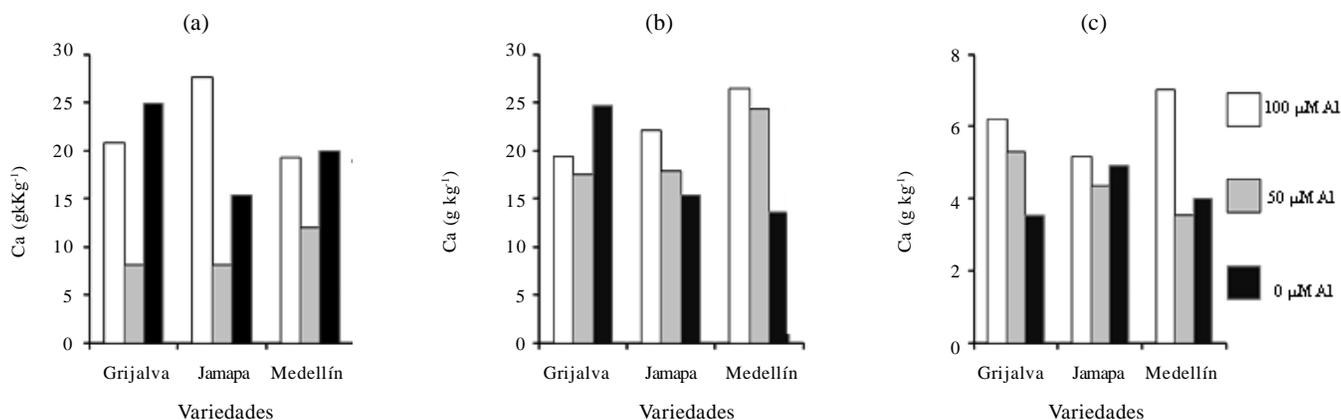


Figura 2. Concentración de calcio (Ca^{2+}) en hojas (a), tallos (b) y raíces (c) de 3 variedades de frijol (Grijalva, Jamapa y Medellín) tratadas con tres concentraciones de aluminio (0, 50 y 100 μM).

La Figura 3 presenta los resultados obtenidos de concentración de Mg^{2+} en hojas, tallos y raíces de 3 variedades de frijol tratadas con niveles distintos de Al^{3+} . Las concentraciones de Mg reportadas por Tuma *et al.* (2004) en tejido foliar de frijol es de 6.4 g kg^{-1} y en tallo de 4.2 g kg^{-1} . Estos resultados coinciden sólo con los encontrados en hojas en esta investigación, con una concentración promedio (considerando las 3 variedades) en el tratamiento sin aluminio de 6.2 g kg^{-1} . En el caso de tallo, la concentración de Mg^{2+} registrada en este experimento fue similar a la de hojas (6.2 g kg^{-1}), y por lo tanto superior a la reportada por Tuma *et al.* (2004). Las concentraciones de este nutriente fueron menores a las registradas para K^+ y Ca^{2+} .

Las variedades evaluadas mostraron respuestas diferenciales a la presencia de Al^{3+} , si se considera la concentración de Mg^{2+} . En las variedades Grijalva y Medellín, se registraron incrementos en la concentración de este catión en hojas, cuando las plantas fueron tratadas con 100 $\mu\text{M Al}^{3+}$, éstos son del orden del 23.4 y 19.8%, respectivamente, en comparación con el testigo; por el contrario, la variedad Jamapa, redujo en el mismo tratamiento la concentración de este elemento en hojas en casi 31.5%.

La variedad Grijalva mostró una baja reducción en la concentración de Mg^{2+} en el tallo cuando fue tratada con 50 μM de Al^{3+} (13.1% menor a la concentración registrada en las plantas testigo), y con la mayor concentración de Al^{3+} (100 μM), la concentración de este catión fue superior en 26% a la de los tallos de plantas que no fueron tratadas con aluminio.

En raíces la presencia de aluminio, independientemente de su concentración, disminuyó la concentración de Mg^{2+} ; en el tratamiento con la mayor concentración de Al^{3+} evaluada la concentración de Mg^{2+} fue menor en 55, 21 y 24.8% en comparación con el testigo en las variedades Grijalva, Jamapa y Medellín, respectivamente.

Estos resultados permiten aseverar que las concentraciones de Mg^{2+} mostradas en hoja presentan una relación inversa con las concentraciones en raíces cuando las plantas fueron tratadas con la mayor concentración de Al^{3+} ; lo anterior, conduce a afirmar que la translocación de este elemento a hojas no fue afectada por la presencia de Al^{3+} . En este sentido, se ha propuesto que el magnesio y el calcio son cationes que se encuentran involucrados en la reducción de la actividad del aluminio a nivel de la membrana

Cuadro 5. Efecto de la concentración de aluminio (Al^{3+}) y variedad y su interacción sobre la concentración nutrimental de magnesio (Mg^{2+}) en hojas, tallos y raíces de plantas de frijol.

Fuente de variación	Grados de libertad	Hojas	Tallos	Raíces
Concentración de Al^{3+}	2	**	**	**
Variedad	2	NS	*	**
Concentración de Al^{3+} X variedad	4	**	**	NS

NS = no significativo; * = significativo ($\alpha = 0.05$); ** = altamente significativo ($\alpha = 0.01$).

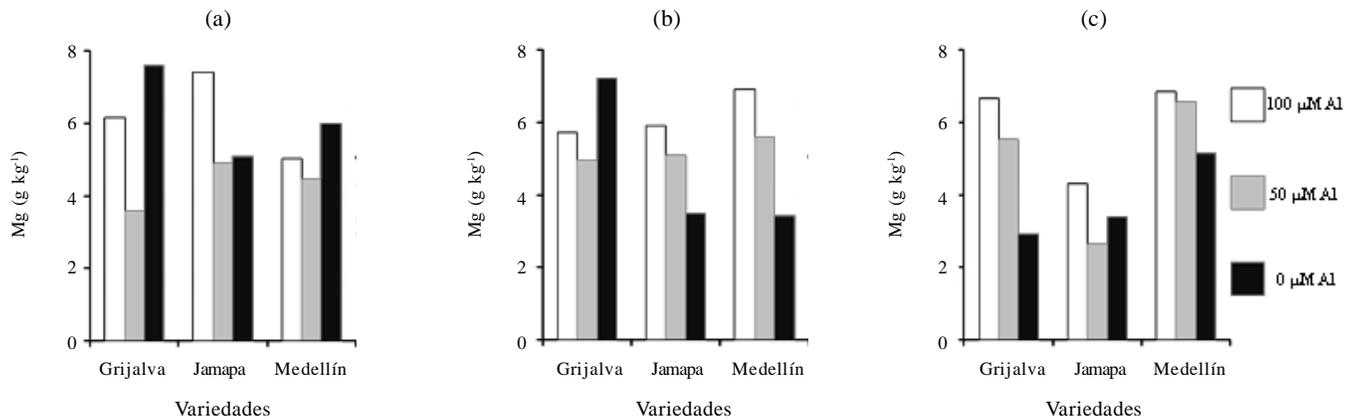


Figura 3. Concentración de magnesio (Mg^{2+}) en hojas (a), tallos (b) y raíces (c) de 3 variedades de frijol (Grijalva, Jamapa y Medellín) tratadas con tres concentraciones de aluminio (0, 50 y 100 μM).

plasmática o bien en la reducción de la competencia por los sitios de unión en el apoplasto radial (Kinraide, 1998). Específicamente en soya, Silva *et al.* (2001) demostraron que bajas concentraciones de magnesio (intervalos micromolares) fueron altamente efectivas en disminuir los efectos tóxicos del aluminio; no obstante, estos resultados no pudieron ser explicados por cambios en el potencial y en la actividad del Al^{3+} a nivel de la superficie de la membrana plasmática de la raíz como lo indica el modelo de Gouy-Chapman-Stern, lo que sugiere que el Mg^{2+} no actúa como un catión indiferente cuando es adicionado a bajas concentraciones, y supone la existencia de un mecanismo que va más allá de efectos estrictamente electrostáticos en la superficie de la raíz. Por otro lado, en presencia de complejos orgánicos de Al^{3+} , existe menos Mg^{2+} remplazado de los sitios de unión en el apoplasto y en consecuencia la asimilación del Mg^{2+} es inhibida en menor grado (Kochian *et al.*, 2004). Yang *et al.* (2007) han demostrado que el Mg aún en concentraciones bajas (10 μM), favorece el eflujo de citrato inducido por la presencia de aluminio en raíces de *Vigna umbellata* ([Thunb.] Ohwi & Ohashi). Estos mecanismos incluyen la expresión diferencial de genes que codifican proteínas que regulan la entrada y el transporte de Al^{3+} en la célula vegetal (Kochian *et al.*, 2004), lo cual debería ser explorado en próximas investigaciones con frijol, especie que ha sido clasificada como muy sensible a bajos valores de pH y con una amplia gama de diferencias genotípicas en lo que a sensibilidad a protones respecta (Rangel *et al.*, 2005).

El análisis de los resultados aquí observados lleva a recomendar la realización de nuevos estudios, en los cuales se cambien las concentraciones de Ca y Mg en el medio de crecimiento para evaluar el efecto real

que estos cationes tienen en la inactivación de los iones Al^{3+} . Adicionalmente, se sugiere la identificación de mecanismos de tolerancia a Al^{3+} como exudación de ácidos orgánicos, acumulación de Al^{3+} en raíces, y las relaciones de acumulación de Al^{3+} y cationes ($Al^{3+}/(K^+ + Ca^{2+} + Mg^{2+})$), entre otros, los cuales deben ser evaluados en la variedad Grijalva con concentraciones de Al^{3+} mayores a 100 μM en soluciones nutritivas con menor fuerza iónica, lo que además permitirá definir si los mecanismos de tolerancia a Al^{3+} son ocasionados por factores genéticos o por procesos celulares.

CONCLUSIONES

- Los factores variedad, concentración de aluminio (Al^{3+}) y sus interacciones afectaron la concentración de cationes en hojas, tallos y raíces de frijol. El Al^{3+} modificó significativamente la concentración de potasio (K^+) en hojas, y de manera altamente significativa la concentración de este catión en tallos y raíces. Sin embargo, el factor variedad sólo afectó la concentración de K^+ en tallo. La interacción de ambos factores fue significativa únicamente para la concentración de K^+ en tallos.

- La concentración de Al^{3+} afectó de manera altamente significativa la concentración de calcio (Ca^{2+}) en los 3 órganos analizados; sin embargo, el factor variedad no tuvo efecto sobre la concentración de este elemento en los órganos analizados, aunque si lo fue la interacción entre estos factores. La concentración de magnesio (Mg^{2+}) fue afectada de manera altamente significativa por el factor concentración de Al^{3+} en los 3 órganos analizados; en tanto que el factor variedad afectó la concentración de este elemento solo en tallos y raíces;

mientras que la interacción entre los 2 factores de estudio afectó la concentración de este elemento en hojas y tallos, pero no en raíces. Se observó que la variedad Grijalva fue la menos afectada por la presencia de Al^{3+} en la solución nutritiva. En esta variedad, la concentración de Mg^{2+} en hoja fue incrementada en plantas tratadas con aluminio en comparación con el testigo.

AGRADECIMIENTO

Los autores agradecen al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) por haber facilitado las variedades de frijol evaluadas y a la Línea Prioritaria de Investigación No. 5 Biotecnología Microbiana, Vegetal y Animal del Colegio de Postgraduados por las facilidades de equipo brindadas para la realización de este trabajo.

LITERATURA CITADA

- Alcántar, G. C. y M. Sandoval V. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal. Guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Publicación Especial No. 10 de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo A. C. Chapingo, México.
- Da Silva, I. R., A. Ferrufino, C. Sanzonowicz, T. J. Smyth, D. W. Israel, and T. E. Carter-Junior. 2005. Interactions between magnesium, calcium, and aluminum on soybean root elongation. *Rev. Bras. Cienc. Solo* 29: 747-754.
- Delhaize, E., P. R. Ryan, and P. J. Randall. 1993. Aluminum tolerance in wheat (*Triticum aestivum* L.). 2. Aluminum-stimulated excretion of malic acid from root apices. *Plant Physiol.* 103: 695-702.
- Fox, T. C. and M. L. Guerinot. 1998. Molecular biology of cation transport in plants. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 49: 669-696.
- García, E. 1988. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. 4a Edición. Instituto de Geografía. UNAM. México, D.F.
- Grimme, H. 1983. Aluminium induced magnesium deficiency in oats. *Z. Pflanzenernaeh. Bodenk.* 146: 666-676.
- Hoagland, D. R. and I. Arnon. 1950. The water culture method for growing plants without soil. *Calif. Agr. Expt. Sta. Circ. No. 347.* Berkeley, CA, USA.
- Jones, D. L., L. V. Kochian, and S. Gilroy. 1998. Aluminum induces a decrease in cytosolic calcium concentration in BY-2 tobacco cell cultures. *Plant Physiol.* 116: 81-89.
- Keltjens, W. G. and K. Tan. 1993. Interactions between aluminium, magnesium and calcium with different monocotyledonous and dicotyledonous plant species. *Plant Soil* 155: 458-488.
- Kinraide, T. B. 1998. Three mechanisms for the calcium alleviation of mineral toxicities. *Plant Physiol.* 118: 513-520.
- Kochian, L. V., O. A. Hoekenga, and M. A. Piñeros. 2004. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Ann. Rev. Plant Biol.* 55: 459-93.
- Kollmeier, M., P. Dietrich, C. S. Bauer, W. J. Horst, and R. Hedrich. 2001. Aluminum activates a citrate-permeable anion channel in the aluminum-sensitive zone of the maize root apex: a comparison between an aluminum-sensitive and an aluminum-resistant cultivar. *Plant Physiol.* 126: 397-410.
- Lee, J. and W. Pritchard. 1984. Aluminium toxicity expression nutrient uptake, growth and root morphology of *Trifolium repens* L. cv. "Grasslands Huia". *Plant Soil* 82: 101-116.
- Liu, K. and S. Luan. 2001. Internal aluminum block of plant inward potassium channels. *Plant Cell* 13: 1453-1465.
- Liu, N. G., B. B. Mo, X. L. Yan, and H. Shen. 2007. Physiological mechanisms of soybean and rice in responses to aluminum stress. *Ying Yong Sheng Tai Xue Bao* 18: 853-858.
- Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. Academic Press. London, UK.
- Poschenrieder, Ch., N. Massot, P. Guevara y J. Barceló. 1992. Aluminio: II. Mecanismos de toxicidad en hombre, animales y plantas. *Cir. Far.* 50: 27-42.
- Rangel, A. F., M. Mobin, I. M. Rao, and W. J. Horst. 2005. Proton toxicity interferes with the screening of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes for aluminium resistance in nutrient solution. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168: 607-616.
- Rengel, Z. and D. C. Elliot. 1992. Mechanism of aluminum inhibition of net $^{45}Ca^{2+}$ uptake by *Amaranthus* protoplasts. *Plant Physiol.* 98: 632-638.
- Rout, G. R., S. Samantaray, and P. Das. 2001. Aluminium toxicity in plants: a review. *Agronomie* 21: 3-21.
- Samac, D. A. and M. Tesfaye. 2003. Plant improvement for tolerance to aluminum in acid soils. A review. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 75: 189-207.
- SAS. 1985. SAS user's guide: Statistics. 8th ed. SAS Institute. Cary, NC, USA.
- Schofield, R. M. S., J. Pallon, G. Fiskesjö, G. Karlson, and K. G. Malmqvist. 1998. Aluminium and calcium distribution patterns in aluminium-intoxicated roots of *Allium cepa* do not support the calcium displacement hypothesis and indicate signal mediated inhibition of root growth. *Planta* 205: 175-180.
- Silva, I. R., T. J. Smyth, D. W. Israel, C. D. Raper, and T. W. Ruffy. 2001. Magnesium is more efficient than calcium in alleviating aluminum rhizotoxicity in soybean and its ameliorative effect is not explained by the Gouy-Chapman-Stern model. *Plant Cell Physiol.* 42: 538-545.
- Steiner, A. A. and H. van Winden. 1970. Recipe for ferric salts of ethylenediaminetetraacetic acid. *Plant Physiol.* 46: 862-863.
- Sumner, M. E. and A. D. Noble. 2003. Soil acidification: the world story. pp. 1-28. *In: Z. Rengel (ed.). Handbook of soil acidity.* Marcel Dekker. New York, NY, USA.
- Tanoi, K., J. Hojo, K. Suzuki, Y. Hayashi, H. Nishiyama, and T. M. Nakanishi. 2006. Analysis of potassium uptake by rice (*Oryza sativa*) roots treated with aluminum using a positron emitting nuclide, ^{38}K . *Soil Sci. Plant Nutr.* 51: 715-717.
- Tůma, J., M. Skalický, L. Tůmová, P. Bláhová, and M. Rosůlková. 2004. Potassium, magnesium and calcium content in individual parts of *Phaseolus vulgaris* L. plant as related to potassium and magnesium nutrition. *Plant Soil Environ.* 50: 18-26.
- Van Praag, H. J., F. Weissen, P. Dreze, and M. Cogneau, M. 1997. Effects of aluminium on calcium and magnesium uptake and translocation by root segments of whole seedlings of Norway spruce (*Picea abies* Karst.). *Plant Soil* 189: 267-273.

Watanabe, T. and K. Okada. 2005. Interactive effects of Al, Ca and other cations on root elongation of rice cultivars under low pH. *Ann. Bot.* 95: 379-385.

Yang, J. L., J. F. You, Y. Y. Li, P. Wu, and S. J. Zheng. 2007. Magnesium enhances aluminum-induced citrate secretion in rice bean roots (*Vigna umbellata*) by restoring plasma membrane H⁺-ATPase activity. *Plant Cell Physiol.* 48: 66-73.