

Biodisponibilidad de boro derivado de tres fuentes de boro en dos tipos de suelo*

Boron Bioavailability Derived from Three Sources in Two Soil Types of Boron



MARCEL BARBIER
Especialista en Desarrollo,
Development Specialist, Rio Tinto,
U.S.A.

CITACIÓN: Barbier, M. (2019). Biodisponibilidad de boro derivado de tres fuentes de boro en dos tipos de suelo. *Palmas*, 40 (Especial, tomo I), 158-167.

PALABRAS CLAVE: boro, biodisponibilidad, nutrición vegetal.

KEYWORDS: Boron, bioavailability, plant nutrition.

*Artículo original recibido en español.

Nota: este estudio fue realizado por U.S. Borax y Fundación ABC.

Resumen

El boro (B) es un elemento esencial para las plantas ya que participa en muchos procesos fisiológicos. Sus efectos sobre la productividad de las mismas depende de la cantidad de B biodisponible en la solución del suelo. Así mismo, la solubilidad de la fuente de B está directamente relacionada con su biodisponibilidad para las plantas. Para determinarla, después de la aplicación de diferentes fuentes, se estableció un experimento en columnas de suelo, donde se evaluaron dos tipos de suelo con diferentes texturas y contenido de B: Arenoso (299 g kg^{-1} de arcilla y $0,2 \text{ mg dm}^{-3}$ de B) y arcilloso (727 g kg^{-1} de arcilla y $0,4 \text{ mg dm}^{-3}$ de B). Las fuentes de B fueron tratamientos con dos fuentes de baja solubilidad (ulexita en polvo y en grano) y tres fuentes de alta solubilidad (ácido bórico y tetraborato de sodio grano fino [Fertibor] y grano grueso [Granubor]). El diseño experimental fue de bloque completamente al azar con cuatro repeticiones. Cada unidad experimental tenía $0,0157 \text{ m}^3$ de suelo contenido en un tubo de PVC (0,7 m altura por 0,1 m diámetro). El suelo en las columnas fue saturado a 60 % de agua en el espacio poroso y después las fuentes de B se aplicaron sobre la superficie del suelo. Seguido, se

inició el suministro semanal de agua desionizada a través de un sistema de goteo, con dosis de 0,5 ml y 0,8 ml en los suelos arenoso y arcilloso, respectivamente. Al final de cada semana, estudio que se hizo en un periodo de 40 semanas, fue analizado el contenido de B en la solución percolada. Este análisis mostró una mayor biodisponibilidad de B proveniente de los tratamientos de las fuentes de alta solubilidad, con más de 90 % del B liberado durante las primeras 10 semanas del estudio en ambos suelos. Después de 30 semanas, el B liberado alcanzó más de 95 % del total del B que fue aplicado a las columnas. En promedio, se estimó que durante las primeras 10 semanas, una cantidad de 9,3 mm de agua es liberada por cada punto porcentual de B. Por el contrario, las fuentes de B menos solubles para ambos suelos, mostrando un máximo de 47 % de B total liberado después de 40 semanas. Al término del experimento, se analizó el contenido de B en el suelo. En el arenoso, se encontró que era más alto en los tratamientos de las fuentes de menor solubilidad, mientras que en el arcilloso, todos los tratamientos mostraron un mayor contenido de B en el control que no lo recibió, sin hallar diferencias entre las fuentes de B. Las fuentes de alta solubilidad de B liberaron casi el 100 %, en tanto que las menos solubles liberaron menos de 50 % de B. El boro restante en el suelo tratado con fuentes menos solubles no liberaron el B a través de una gran cantidad de agua percolada (promedio de 3.300 mm). Los aspectos importantes a tener en cuenta son: poder mejorar la biodisponibilidad de B, la fuente correcta de B y el momento exacto de aplicación.

Abstract

Boron (B) is an essential element for plants and is involved in many physiological processes. B effect on plant productivity relies on its bioavailability in the soil solution. The solubility of the B source is directly associated with B bioavailability in plants. In order to determine B bio-availability after the application of various sources, an experiment was set up in soil columns, where two types of soil with different textures and B content were evaluated: Sandy soil (299 g kg^{-1} of clay and 0.2 mg dm^{-3} of B) and clay soil (727 g kg^{-1} of clay and 0.4 mg dm^{-3} of B). B sources were treatments with two low-solubility sources (powder and granulated ulexite) and three high-solubility sources (boric acid and fine-grained [Fertibor], and coarse-grained [Granubor]) sodium tetraborate. The experimental design was a completely randomized block with four repetitions. Each experimental unit had 0.0157 m^3 of soil contained in a PVC pipe (0.7 m high by 0.1 m in diameter). The porous space of the soil in the columns was saturated with 60% water, and B sources were subsequently applied on the soil surface. The weekly supply of deionized water started later, using a drip system. Dosage rates were 0.5 ml and 0.8 ml in sandy and clay soils, respectively. The B content of the percolated solution was analyzed at the end of each week. This study was conducted in a 40-week time period. The analysis of percolated solutions showed a higher B bioavailability as a result of treatments with high-solubility sources, with over 90% of B released within the first 10 weeks in both soils. After 30 weeks, the B released was over 95% of the total B applied in the columns. In average, it was estimated that during the first 10 weeks, an amount of 9.3 mm of water per each percentage point of B is released. On the contrary, in average, less soluble B sources in both soil types showed 47% of total B released after 40 weeks. At the conclusion of the experiment, the B content of the soil was analyzed. Sandy soil was found to have a higher B content in the treatments of the less soluble sources, while in clay soil all treatments showed higher B content in the control that did not receive B. However, no differences were found between B sources. Highly soluble B sources released almost 100% of B, while less soluble sources released less than 50% of B.

Introducción

U.S. Borax, parte del Grupo Rio Tinto, es una empresa líder a nivel global en el suministro y desarrollo de boratos refinados, abasteciendo el 30 % de la demanda mundial de este tipo de productos. Desde sus instalaciones de alta tecnología ubicadas en California, U.S. Borax atiende a más de 500 clientes con más de 1.700 centros de distribución a nivel global. Para la agricultura provee los boratos refinados con mayor pureza en el mercado global. Por su parte, la Fundación ABC es una institución de carácter particular sin ánimo de lucro, que realiza investigación aplicada para desarrollar y adaptar nuevas tecnologías, con el objetivo de promover soluciones tecnológicas para el agronegocio en los estados de Sao Paulo y Paraná en Brasil.

Desde la época de Babilonia, hace más de 6.000 años, se conocían los compuestos de boro, los cuales también eran conocidos en Egipto, China, Tíbet y Arabia. Las palabras Buraq del árabe y Burah del persa dan origen a la palabra bórax. El boro elemental fue reportado por primera vez a inicios del siglo XIX (1807), cuando Davy, Gay-Lussac y Thénard prepararon boro por la reducción de trióxido de boro con potasio y por electrólisis de ácido bórico humedecido. Con estos métodos se consiguieron productos con una pureza de 50 %. Alrededor de 1850 se obtuvieron productos de boro impuros similares al diamante y al

grafito, tales como el borato de aluminio (AlB12) y un complejo de boro, aluminio y carbón. Años después, se logró un boro con un mayor grado de pureza (hasta casi 90 %) a través de la reducción del trióxido bórico con magnesio. Este producto era castaño claro y considerado amorfo. La extracción de minerales con contenido de boro se inició en 1872 en el Valle de la Muerte, California. Su extracción a escala industrial inició a partir de 1927, cuando se empezó la excavación de la primera mina abierta en la costa oeste de los Estados Unidos.

La necesidad del boro (B) como un nutriente para las plantas fue demostrada por primera vez por la botánica Katherine Warington (1923). Desde entonces, se han reportado diversos estudios respecto a la necesidad del B como nutriente en diversos tipos de plantas. Los primeros síntomas de deficiencia de boro en palma de aceite fueron descritos por Kovachich en el Congo, entre 1952 y 1953.

Existen varios minerales que contienen boro partiendo desde las rocas ígneas y metamórficas hasta las sedimentarias, y que son usados en la fabricación de fertilizantes. Los minerales que tienen boro y oxígeno se llaman boratos. Existen diferentes tipos pero los utilizados en la industria de fabricación de fertilizantes son borato de sodio, borato de sodio y calcio, borato de calcio y borato de calcio y magnesio. La principal diferencia entre ellos no es el contenido de

Figura 1. Minerales que contienen boro y son usados para fabricar fertilizantes.

| Borato de sodio | | Borato de sodio y calcio | Borato de calcio | Borato de calcio y magnesio |
|---|--|---|--|--|
|  |  |  |  |  |
| Tincal o Bórax $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ Soluble en agua (2,65 g/100ml) 35 % $\text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 11\% \text{ B}$ | Kernita $\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ Parcialmente soluble en agua (1,90 g/100ml) 48 % $\text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 15\% \text{ B}$ | Ulexita $\text{NaCaB}_5\text{O}_9 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ Ligeramente soluble en agua (1,09 g/100ml) 32 a 42 % $\text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 8-15\% \text{ B}$ | Colemanita $\text{Ca}_2\text{B}_6\text{O}_{11} \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ Insoluble en agua (0,47 g/100ml) 40 a 48 % $\text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 15\% \text{ B}$ | Hidroboraquita $\text{CaMgB}_6\text{O}_{11} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ Insoluble en agua (0,08 g/100ml) 48 % $\text{B}_2\text{O}_3 \rightarrow 15\% \text{ B}$ |

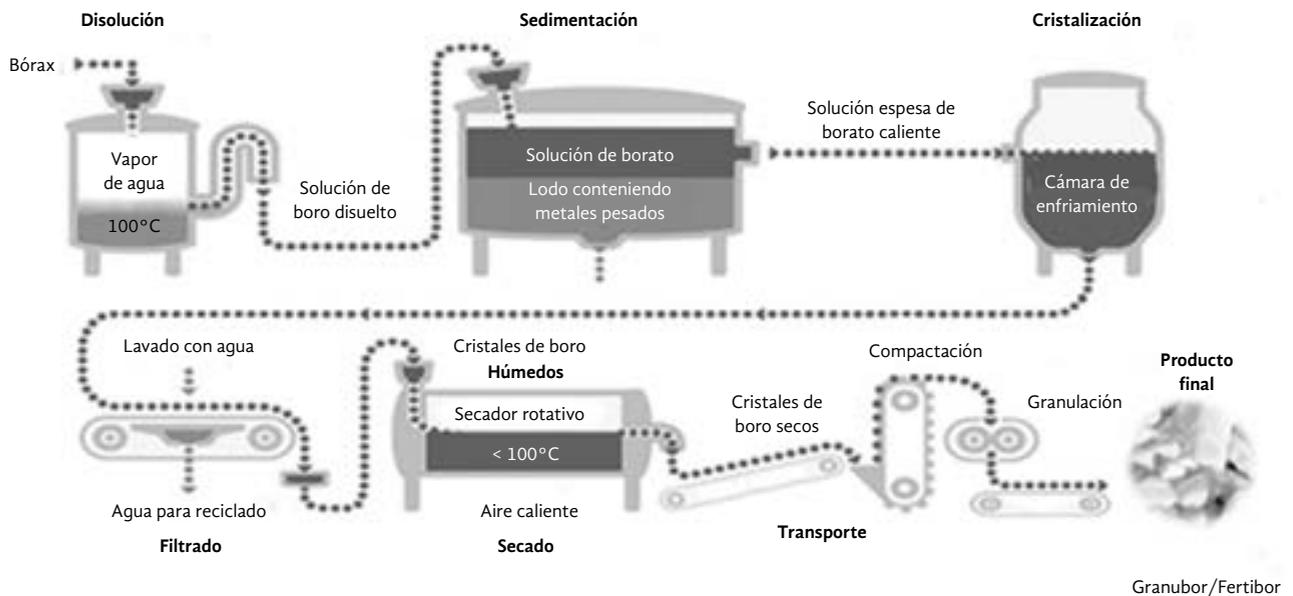
diversos elementos, sino la solubilidad en agua. Los boratos de sodio lo son pero de estos el bórax o tincal es el más soluble (2,65 g/100ml de agua), seguido de la kernita (1,90 g/100ml de agua), la ulexita (1,09 g/100ml de agua), la colemanita (0,47 g/100 ml de agua) y finalmente la hidroboracita (0,08 mg/100ml de agua) como se muestra en la Figura 1.

El tipo de roca generalmente no controla la solubilidad del boro en la solución del suelo. Esta lo hace por las reacciones de adsorción como el pH de la solución, el contenido de materia orgánica, los tipos de arcilla y la humedad y temperatura del suelo. Dichas reacciones son las que determinan que cantidad de B soluble en agua estará disponible para la absorción por las plantas. Los minerales son extraídos de las minas junto con suelo y otros materiales no deseados. Luego, se separan por tamaño y se benefician para poder ser comercializados. En el caso de los minerales como la ulexita y la colemanita e hidroboracita que son poco solubles, no son refinados. Un borato, es una molécula que contiene boro y oxígeno. Un borato refinado, además de haber sido sometido a un

proceso de refinamiento, pasa por un proceso en el que se remueven las impurezas como metales pesados y otros elementos.

El proceso de refinamiento de los boratos más solubles como el bórax o tincal y kernita (Figura 2) inicia a través de la disolución del mineral molido usando vapor de agua caliente, el cual no alcanza una temperatura mayor a 100 °C. En seguida se forma una solución de boro disuelto que pasa luego a un tanque de sedimentación, donde se remueve el lodo que contiene metales pesados. Posteriormente, del tanque de sedimentación sale una solución espesa de borato caliente que es transportada a una cámara de enfriamiento. En esta cámara se forman cristales de boro que luego son llevados para ser lavados con agua a temperatura ambiente y pasar por un proceso de filtrado para terminar de remover coloides menores. En el último paso de refinamiento, los cristales de boro húmedo llegan a un secador rotativo con aire caliente a una temperatura menor de 100 °C. Finalmente, estos son transportados a una compactadora y granuladora, donde se forman los granos del tetraborato de sodio.

Figura 2. Proceso de beneficio y refinamiento del borato de sodio.



A diferencia, el proceso de beneficiado de los minerales menos solubles como la ulexita es muy simple. El mineral molido se lava con agua y luego la solución va a un sistema de filtrado para remover coloides. El mineral molido y lavado pasa por un secador rotativo donde el material es calcinado a una temperatura entre 625 y 830 °C. Finalmente, este material es enviado a granulación y empaque para su venta (Figura 3).

Las fábricas que producen boratos para el mercado usan una mezcla de ácido nítrico más ácido clorhídrico, como medio de solución para extraer el contenido total de boro en un material. Luego, reportan en las etiquetas de los fertilizantes el contenido de boro total, más no el de boro soluble en agua. Cuando la extracción se hace con agua caliente, se extrae el contenido máximo de boro que un mineral puede ofrecer. Mediante la extracción con agua caliente se muestra que solo el borato de sodio refinado ofrece cerca del 100 % de boro que puede estar disponible en la solución del suelo, mientras las fuentes de borato de sodio y calcio tienen menos del 50 %.

Las plantas solo absorben el boro en forma de ácido bórico, principalmente a través de las raíces. Posteriormente, el ácido bórico es transportado vía xilema hacia todos los meristemas que se encuentran en continuo crecimiento. El boro entra con varios otros nutrientes que son absorbidos por el flujo de masa, principalmente nitrógeno y azufre. Estos viajan por el xilema junto con el agua hacia las zonas de mayor demanda de cada nutriente, hasta que las fracciones no usadas son evapotranspiradas por los estomas de las hojas.

Materiales y métodos

En este estudio se buscó analizar el comportamiento de liberación de boro a través de dos diferentes tipos de suelo a través de un diseño experimental al azar. Cada unidad estuvo compuesta por un tubo de PVC de 0,1m (4 pulgadas) de diámetro y 0,7m (27¼ pulgadas) de altura, con un volumen equivalente a 0,0157 m³ igual a 15,7 litros. Se utilizaron dos suelos con diferentes tipos de textura: uno de arena amarilla conteniendo 62,4 % de arena, 7,7 % de limo y 29,9 % de arcilla, y otro de arcilla roja con 14,1 % de arena, 13,2 % de limo y 72,7 % de arcilla. El suelo arenoso tenía 24 g dm⁻³ de materia orgánica, un pH de 4,7 y una capacidad de intercambio catiónico de 71,7 mmolc dm⁻³. El suelo arcilloso registró parámetros de 49 g dm⁻³ de materia orgánica, un pH de 4,1 y una capacidad de intercambio catiónico de 169,6 mmolc dm⁻³.

Las fuentes de boro usadas fueron: ácido bórico, tetraborato de sodio y pentaborato de sodio, las cuales fueron sometidas a un proceso de evaluación para determinar el porcentaje de ácido bórico en ácido cítrico al 2 % y el porcentaje de boro en agua tibia. El porcentaje de boro soluble en ácido cítrico al 2 % fue de 18,49 % para el ácido bórico; 16,14 % para el tetraborato de sodio; y 10,97 % para el pentaborato de sodio y calcio. Por su parte, el porcentaje de boro en agua tibia para el ácido bórico fue de 18,64 %, 13,80 % para el tetraborato de sodio y 5,41 % para el pentaborato de sodio y calcio.

Figura 3. Proceso de beneficio de borato de sodio y calcio.



Se llevaron a cabo doce tratamientos en total, seis para cada tipo de suelo, a los cuales se suministró una dosis proporcional a 2 kg de boro por hectárea, con excepción del primero. El segundo recibió tetraborato de sodio en forma de grano grueso (2,8 mm); el tercero, pentaborato de sodio y calcio en forma de grano grueso en polvo (2 mm) proveniente de Argentina y granulado proveniente de Brasil; el cuarto, pentaborato de sodio y calcio en forma de grano grueso (2 mm) de origen Bolivia; el quinto, ácido bórico en polvo; y el sexto, tetraborato de sodio en forma de gránulos finos.

A cada columna se le añadieron cinco cm de arena lavada y desinfectada en un autoclave. Se colocaron 50 cm de suelo y luego se saturaron con 1.000 ml de agua desionizada. Posteriormente se adicionaron las fuentes de boro y se cubrieron con otros cinco cm de arena lavada y desinfectada. Por un periodo de 40 semanas, en forma consecutiva, cada semana se adicionaron 500 ml de agua desionizada a cada columna con el suelo arenoso y 800 ml a las de suelo arcilloso. Así mismo, cada semana se colectaron las soluciones percoladas, las cuales fueron analizadas para determinar el contenido de boro en la solución.

Con base en los análisis realizados, se determinó el porcentaje de boro liberado y biodisponible en la solución. A la media de los resultados obtenidos de cada tratamiento se restó los datos obtenidos del

control que no recibieron boro. Esta diferencia se dividió dentro del porcentaje total de boro adicionado al inicio del estudio. El porcentaje acumulado de cada semana fue calculado y según los resultados obtenidos se diagramaron las curvas de liberación.

Resultados

La Figura 4 muestra las curvas de liberación en el suelo arenoso con pH 4,7, simulando una precipitación acumulada de 2.546 mm en 40 semanas, muestran que el ácido bórico llegó a liberar el total del boro adicionado en la semana 12 del estudio, el tetraborato de sodio de gránulos finos en la semana 19, el tetraborato de sodio de granos gruesos en 40 semanas y en el caso del pentaborato de sodio, solo se logró recuperar el 47 y el 41 % del boro adicionado inicialmente para las fuentes de Argentina y Bolivia, respectivamente.

La Figura 5 muestra las curvas de liberación en el suelo arcilloso con pH 4,1, simulando una precipitación acumulada de 4.074 mm en 40 semanas. Esta figura permite evidenciar que ácido bórico llegó a liberar el total del boro adicionado en la semana 20, el tetraborato de sodio de gránulos finos en la semana 26, el tetraborato de sodio de granos gruesos en 39 semanas. En el caso del pentaborato de sodio, solo se logró recuperar el 35 % del boro adicionado inicialmente para ambas fuentes.

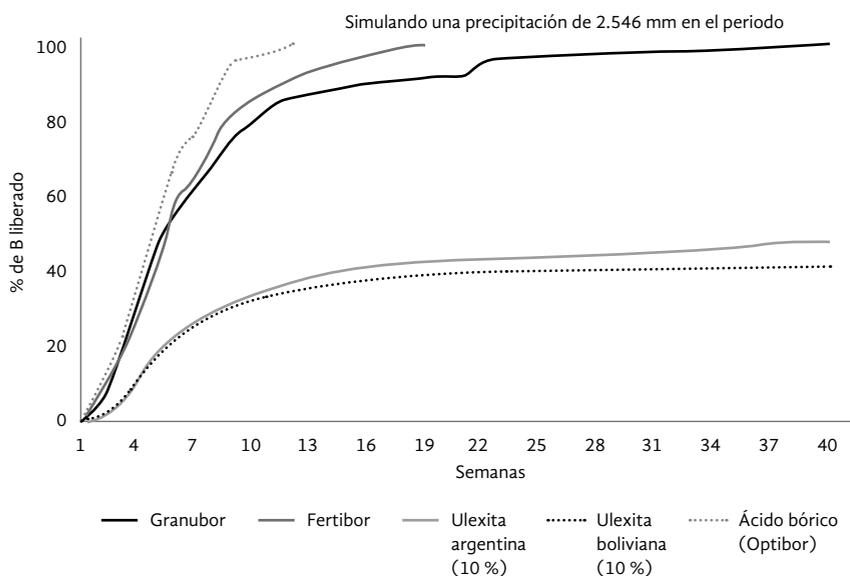
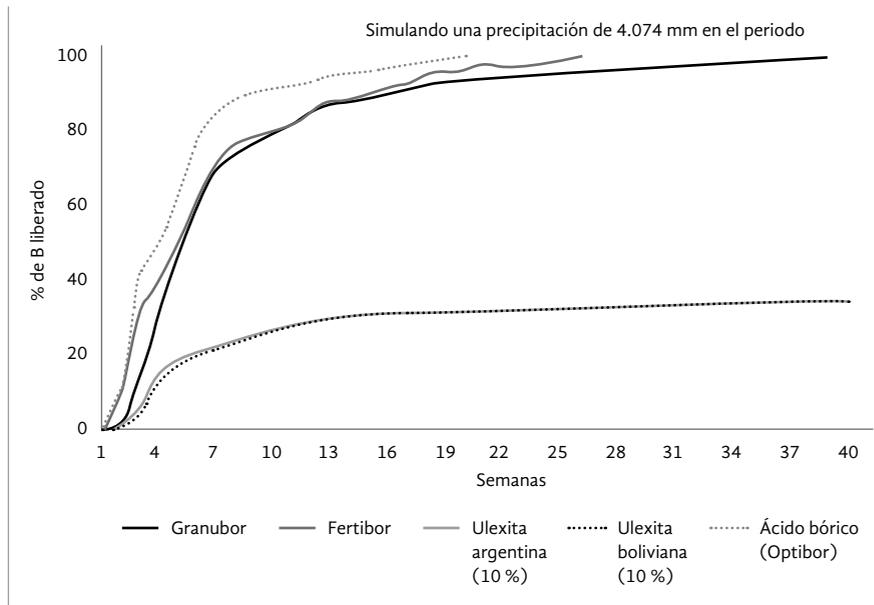


Figura 4. Curvas de liberación de B en suelo arenoso con pH 4,7.

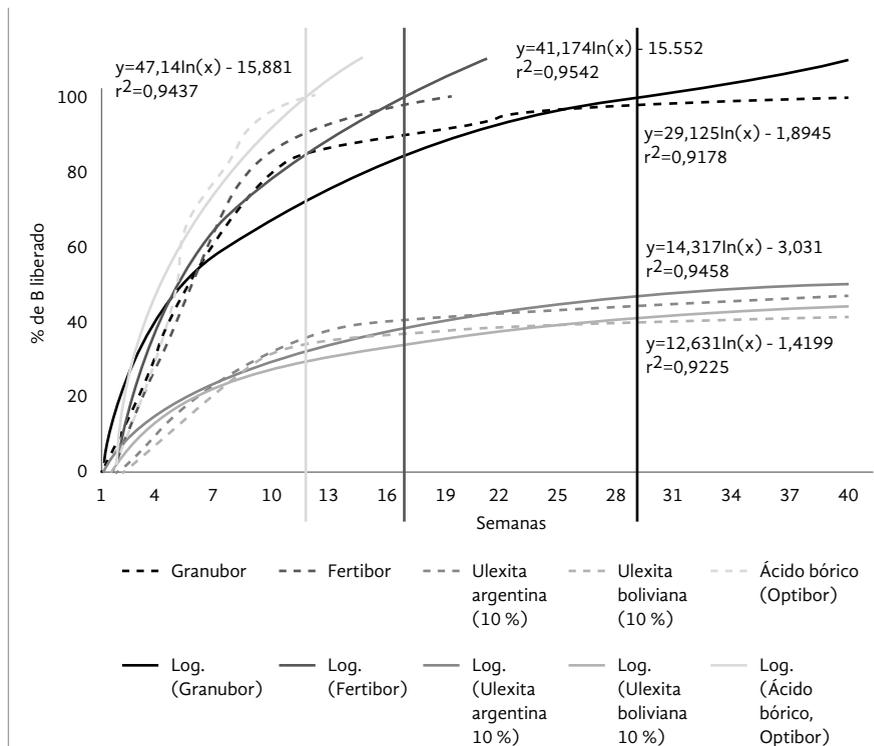
Figura 5. Curvas de liberación de B en suelo arcilloso con pH 4,1.



Utilizando la herramienta de diseño de tendencias incluida en el *software* Microsoft PowerPoint, se calcularon las curvas de regresión de tendencia logarítmica que son las que mejor se ajustaron a la distribución de los valores obtenidos. Posteriormente, se cruzaron líneas verticales para determinar el momento en el que se podría esperar que

bajo una situación similar se pudiese liberar el 100 % del boro adicionado inicialmente. La diagramación solo fue posible para las fuentes del ácido bórico y el tetraborato de sodio, ya que las de pentaborato de sodio y calcio no llegaron a liberar el contenido total de boro en el término de tiempo del estudio (Figura 6).

Figura 6. Tendencia logarítmica de liberación de B en suelo arenoso, pH 4,7.



De igual forma, se diagramaron las curvas de tendencia de regresión lineal para las fuentes evaluadas en el suelo arcilloso, lo cual solo fue posible para las fuentes del ácido bórico y el tetraborato de sodio, puesto que las fuentes de pentaborato de sodio y calcio tampoco llegaron a liberar el contenido total de boro en el término de tiempo del estudio (Figura 7).

A diferencia del ácido bórico, el tetraborato de sodio tiene dos moléculas de sodio que sustentan la disociación gradual de este compuesto. Inicialmente, cada molécula de tetraborato de sodio se disuelve en la solución del suelo en tres moléculas de ácido bórico, hidróxido de sodio y agua, para posteriormente disolverse en otra molécula llamada tetrahidroxiborato de sodio, que enseguida se disuelve en la solución del suelo en otra molécula de ácido bórico, hidróxido de sodio y más agua. Las cuatro moléculas de boro contenidas en el tetraborato de sodio son liberadas en la solución del suelo como ácido bórico y estará biodisponible para la absorción de las plantas junto con el agua.

De igual forma, a diferencia del tetraborato de sodio, el pentaborato de sodio tiene una molécula más de boro pero una menos de sodio y una de calcio en su lugar. Este compuesto inicialmente logra liberar dos

moléculas de ácido bórico en la solución del suelo, hidróxido de sodio y agua. No obstante, la mayor parte de esta molécula contiene calcio, lo cual hace que las tres moléculas de boro permanezcan fuertemente ligadas a la misma y no puedan ser liberadas en la solución del suelo para estar disponibles para las plantas.

Al final del estudio se analizó el contenido de boro que quedó en el suelo en cada uno de los tratamientos evaluados. El testigo en el suelo arenoso que no recibió boro fue el que menos contenido presentó, disminuyendo en 54 mg dm^{-3} . Este fue seguido por el ácido bórico que incrementó la concentración de boro en el suelo en 40 mg dm^{-3} , al igual que el tetraborato de sodio que en promedio aumentó en 48 mg dm^{-3} y, finalmente, por el pentaborato de sodio que lo hizo en 168 mg dm^{-3} . A diferencia del análisis del suelo arenoso, en el caso del suelo arcilloso el contenido de boro en el testigo que no recibió boro no presentó diferencia con respecto al análisis hecho al inicio del estudio. La fuente de ácido bórico incrementó el contenido de boro en el suelo en 95 mg dm^{-3} con respecto al muestreo inicial, seguido del tetraborato de sodio, que aumentó en 107 mg dm^{-3} , y por el pentaborato de sodio, que aumentó en 180 mg dm^{-3} .

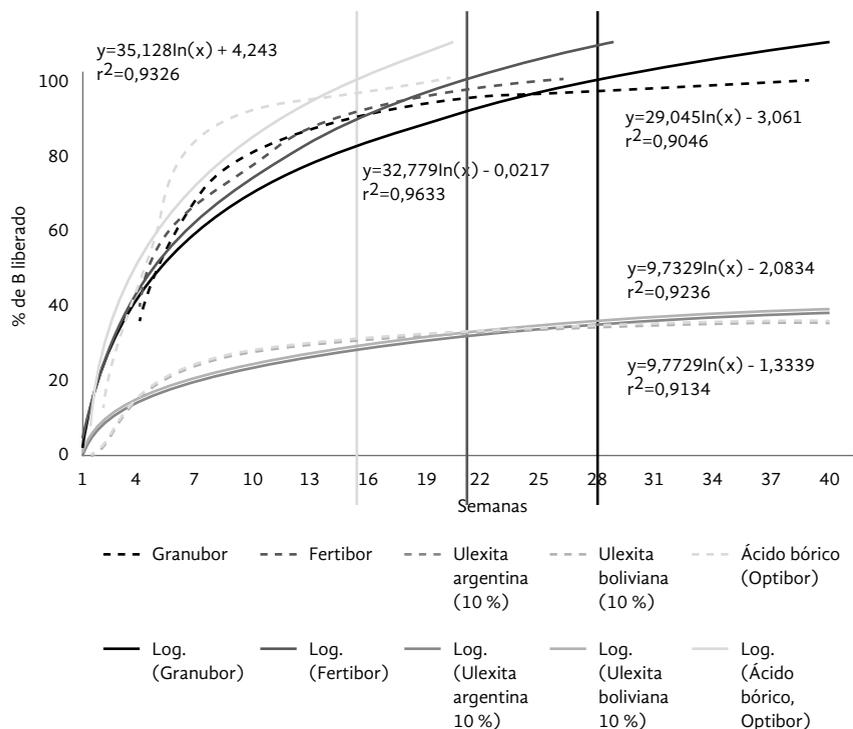


Figura 7. Tendencia logarítmica de liberación de B en suelo arcilloso, pH 4,1.

Suena bien pensar cuánto puede incrementarse el contenido de boro en el suelo al aplicar una determinada fuente. Sin embargo, lo importante es entender cuándo es que el boro proveniente de una determinada fuente podrá estar disponible para la absorción por las plantas. Retomando el cálculo de la fórmula de la tendencia de regresión logarítmica, se debería esperar que, independiente del suelo, a partir del ácido bórico se pueda obtener el boro liberado en su totalidad en el transcurso de 12 a 15 semanas; en el caso del tetraborato de sodio en gránulos finos de 17 a 21 semanas y en el del tetraborato de sodio de grano grueso alrededor de 29 semanas. En cuanto al pentaborato de sodio y calcio se tendría que esperar un periodo extremadamente largo (entre 25 hasta 466 años) para obtener la disponibilidad total del boro dejado en el suelo (Tabla 1)

Conclusiones

El ácido bórico y el tetraborato de sodio liberan mayor cantidad de boro biodisponible que el pentaborato de sodio y calcio. El contenido de boro en el ácido bórico se liberó en su totalidad en 12 semanas de transcurrido el estudio en el suelo arenoso y en 15 semanas en el arcilloso. En el tetraborato de sodio de gránulo fino se liberó en su totalidad en 19 semanas

en el suelo arenoso y en 26 semanas en el arcilloso. En el tetraborato de sodio de grano grueso se liberó en su totalidad en 40 semanas en el suelo arenoso y en 39 semanas en el arcilloso. Por el contrario, el pentaborato de sodio y calcio, en promedio, mostraron un máximo de 47 % de boro total liberado después de 40 semanas para ambos suelos. El contenido de boro en el suelo de los tratamientos de fuentes menos solubles no liberaron el boro a través de una gran cantidad de agua percolada (promedio de 3.300 mm), y se concluye que el mismo se liberará en un tiempo demasiado prolongado debido a la forma molecular en que esta fuente pueda estar en el suelo.

Recomendaciones

Para poder mejorar la biodisponibilidad de boro es importante tener en cuenta la fuente correcta y el momento adecuado de aplicación. El tetraborato de sodio de grano grueso presenta una liberación más gradual sobre el tetraborato de sodio de grano fino. Contar con estudios a un plazo mayor en el cultivo de palma de aceite donde se incluyan otras variables como la absorción por los principales tejidos de la palma (hojas y raíces) y ganancia de biomasa, es un asunto que se encuentra ya en proceso.

Tabla 1. Relación del tiempo necesario para obtener la biodisponibilidad total de B en distintas fuentes.

| Suelo | Fuente | Marca Comercial | R ² | Fórmula de la tendencia logarítmica | Tiempo calculado para liberar el 100 % de B | |
|-----------|--------------------------------------|-------------------|----------------|-------------------------------------|---|-----------|
| | | | | | x = Semanas | AAA MM DD |
| Arenoso | Ácido bórico (polvo) | Ácido bórico | 0,9437 | $y=47,14\ln(x) - 15.881$ | 12 | 02 23 |
| Arcilloso | Ácido bórico (polvo) | Ácido bórico | 0,9326 | $y=35,128\ln(x) + 4.243$ | 15 | 03 14 |
| Arenoso | Borato de sodio (grano fino) | Fertibor | 0,9178 | $y=41,174\ln(x) - 15.552$ | 17 | 03 28 |
| Arcilloso | Borato de sodio (grano fino) | Fertibor | 0,9633 | $y=32,779\ln(x) + 0,0217$ | 21 | 04 25 |
| Arenoso | Borato de sodio (granulado) | Granubor | 0,9437 | $y=29,125\ln(x) + 1.8945$ | 29 | 06 21 |
| Arcilloso | Borato de sodio (granulado) | Granubor | 0,9046 | $y=29,045\ln(x) + 3.061$ | 29 | 06 21 |
| Arenoso | Borato de sodio y calcio (granulado) | Ulexita Argentina | 0,9458 | $y=14,317\ln(x) - 3,031$ | 1,335 | 25 08 07 |
| Arenoso | Borato de sodio y calcio (granulado) | Ulexita Bolivia | 0,9225 | $y=12.631\ln(x) - 1.4199$ | 3,070 | 59 00 14 |
| Arcilloso | Borato de sodio y calcio (granulado) | Ulexita Argentina | 0,9236 | $y=9,7329\ln(x) + 2,0834$ | 23,405 | 450 00 13 |
| Arcilloso | Borato de sodio y calcio (granulado) | Ulexita Bolivia | 0,9134 | $y=9,7729\ln(x) - 1,3339$ | 24,250 | 466 01 15 |

Referencias

U.S. Borax, Inc. (2012). El boro en suelos y nutrición de plantas. Una guía práctica a la fertilización con boro. Chicago: U.S. Borax, Inc.

Warrington, K. (1923). The effect of boric acid and borax on the broad bean and certain other plants. *Ann. Bot.*, 37, 629-671.

Woods, W. G. (1994). An Introduction to boron: history, sources, uses and chemistry. *Environmental Health Perspectives*, 102, 5-11.