



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
CARRERA DE INGENIERIA AGRONÓMICA



TRABAJO DE TITULACIÓN

Componente práctico del Examen de Grado de carácter Complexivo,
presentado al H. Consejo Directivo de la Facultad, como requisito
previo para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

TEMA:

“La toxicidad por aluminio, como microelemento limitante para la
producción agrícola”

AUTOR:

Víctor Manuel Sánchez Muñoz

TUTORA:

Ing. Agr. Maribel Vera Suárez, MAE.

Babahoyo - Los Ríos - Ecuador

2020



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE BABAHOYO
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
CARRERA DE INGENIERIA AGRONÓMICA



TRABAJO DE TITULACIÓN

Componente práctico del Examen de Grado de carácter Complexivo,
presentado al H. Consejo Directivo de la Facultad, como requisito
previo para obtener el título de:

INGENIERO AGRÓNOMO

“La toxicidad por aluminio, como microelemento limitante para la
producción agrícola”

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN

Ing. Jhon Izquierdo Morán, MAE.
PRESIDENTE

Ing. Agr. Orlando Olvera Contreras, MAE.
VOCAL

Ing. Agr. Roberto Medina Burbano, MAE.
VOCAL

La responsabilidad por la investigación, análisis, resultados, conclusiones y recomendaciones presentadas y sustentadas en este Trabajo de Titulación son de exclusividad del autor.

Víctor Manuel Sánchez Muñoz

DEDICATORIA

Se la dedico a Dios quien supo guiarme por el buen camino, por darme fuerza para seguir adelante y no desmayar ante las adversidades por enseñarme a afrontar cada dificultad que se me presentara.

A mis padres por su apoyo incondicional me han dado todo lo que soy como persona valores principios mi coraje para seguir adelante.

A mi familia porque por ellos soy lo que soy.

AGRADECIMIENTO

Primero agradezco a Dios por haberme permitido culminar con éxito mi carrera universitaria.

Agradezco a mis padres y hermanos por el apoyo brindado por ser una guía lo largo de mi vida por educarme como un hombre de valores principios.

A mi novia por estar presente en los momentos más difíciles siempre apoyándome en cada decisión.

RESUMEN

El presente documento trató sobre la toxicidad por aluminio, como microelemento limitante para la producción agrícola. La toxicidad por aluminio, puede causar en las plantas alteraciones en el crecimiento, efectos sobre la permeabilidad de la membrana y alteraciones nutricionales y de contenido vacuolar, por tanto pueden provocar ciertas variaciones metabólicas y fisiológicas producidas en las células radiculares como sitio primario de la acción del metal, obteniendo así, una idea general y coherente de lo que se propone como funcionamientos de ciertos mecanismos de tolerancia en estas variedades y una explicación a algunos de los efectos producidos por el aluminio. Por lo detallado se determinó que los estudios relacionados con la toxicidad de aluminio están centrados especialmente en cultivos como arroz, maíz, trigo y hortalizas; es posible lograr la reducción de los efectos tóxicos del Al^{3+} y mantener una nutrición equilibrada de las plantas cultivadas, mediante la aplicación de cal al suelo; la toxicidad por Al^{3+} es el factor más limitante del crecimiento y desarrollo de las plantas en suelos ácidos, sobre todo si el pH es $< 5,0$; la elongación radicular establece una definición clara en cuanto a la tolerancia de las diferentes variedades al metal; las diferentes concentraciones de aluminio afectan la elongación de la raíz; la concentración de aluminio radicular es claramente superior a la encontrada en la parte aérea de la planta y los niveles de aluminio del suelo tuvieron efecto sobre la producción.

Palabras claves: aluminio, producción, raíces, toxicidad.

SUMMARY

This document dealt with aluminum toxicity, as a limiting microelement for agricultural production. Aluminum toxicity can cause growth alterations in plants, effects on membrane permeability and nutritional and vacuolar content alterations, therefore it can cause certain metabolic and physiological variations produced in root cells as the primary site of action. of metal, thus obtaining a general and coherent idea of what is proposed as the functioning of certain tolerance mechanisms in these varieties and an explanation of some of the effects produced by aluminum. Due to the details, it was determined that the studies related to aluminum toxicity are focused especially on crops such as rice, corn, wheat and vegetables; It is possible to achieve the reduction of the toxic effects of Al^{3+} and to maintain a balanced nutrition of the cultivated plants, by applying lime to the soil; Al^{3+} toxicity is the most limiting factor for plant growth and development in acid soils, especially if the pH is < 5.0 ; root elongation establishes a clear definition regarding the tolerance of the different varieties to metal; the different concentrations of aluminum affect the elongation of the root; the root aluminum concentration is clearly higher than that found in the aerial part of the plant and the levels of aluminum in the soil had an effect on production.

Keywords: aluminum, production, roots, toxicity.

CONTENIDO

RESUMEN	vi
SUMMARY	vii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	3
MARCO METODOLÓGICO	3
1.1. Definición del tema caso de estudio	3
1.2. Planteamiento del problema	3
1.3. Justificación	4
1.4. Objetivo	4
1.4.1. General	4
1.4.2. Específicos	4
1.5. Fundamentación teórica	4
1.6. Hipótesis	18
1.7. Metodología de la investigación	18
CAPÍTULO II	19
RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	19
2.1. Desarrollo del caso	19
2.2. Situaciones detectadas (hallazgo)	19
2.3. Soluciones planteadas	19
2.4. Conclusiones	20
2.5. Recomendaciones (propuesta para mejorar el caso)	21
BIBLIOGRAFÍA	22

INTRODUCCIÓN

Los micronutrientes juegan un papel tan importante tanto como los macronutrientes en la nutrición mineral de la planta. Por ello, su determinación y estudio resulta fundamental en la programación de un manejo y fertilización adecuada de los suelos (Chamorro 2020).

Los oligoelementos o microelementos, configuran un grupo de elementos esenciales en la nutrición vegetal, necesarios en pequeñas cantidades en comparativa con otros elementos. En el caso del Aluminio (Al), parece ser un elemento esencial en el crecimiento de las plantas, si bien las cantidades utilizadas son sumamente pequeñas y, por contraste, la reserva de los suelos es inagotable. Algunos suelos de reacción ácida contienen tanto aluminio en forma soluble que suelen ser tóxicos para el crecimiento de los vegetales. Sin embargo, para ciertos cultivos, el correcto nivel de Aluminio en estado asimilable por la planta es fundamental para su perfecto desarrollo (AEFA 2020).

La concentración de Al^{3+} en las plantas cultivadas usualmente es más alta en las raíces que en los tejidos aéreos. El primer síntoma perceptible cuando se presenta toxicidad por Al^{3+} es la reducción del crecimiento radicular en longitud, efecto que en las plantas empieza una hora después de la exposición de las raíces a Al^{3+} , asociado con un incremento del diámetro de los ápices radiculares; las raíces laterales resultan seriamente afectadas y de esta manera se disminuye considerablemente el volumen de la raíz (Casierra 2017).

Hay que destacar que las correcciones de estrés en las plantas, causadas por el aluminio, pueden realizarse mediante la aplicación de materia orgánica, aplicación de ácidos orgánicos, uso de fertilizante foliar a base de fósforo y selección de plantas tolerantes.

El pH del suelo por debajo de 5.5 podría tener como resultado rendimientos reducidos y hacerle daño al cultivo. En tales condiciones de pH, la disponibilidad de micronutrientes como el manganeso, aluminio y hierro aumenta y el problema de toxicidad de los micronutrientes podría ocurrir. Por otro lado, en pH

bajo, disponibilidad de otros nutrientes esenciales, tales como K, Ca y Mg se reduce y puede dar lugar a deficiencias. La técnica más comúnmente utilizada para elevar el pH del suelo es la aplicación de cal agrícola. La solubilidad de cal es relativamente baja, por lo que si se aplica sólo a la superficie del suelo, es probable que sólo afecte a la capa superior del suelo, no más de unos pocos centímetros de profundidad (Smart 2020).

El presente documento pretende desarrollar los efectos perjudiciales que causa el aluminio, como microelemento limitante para la producción agrícola.

CAPÍTULO I

MARCO METODOLÓGICO

1.1. Definición del tema caso de estudio

El presente documento trató sobre la toxicidad por aluminio, como microelemento limitante para la producción agrícola.

La toxicidad por aluminio, puede causar en las plantas alteraciones en el crecimiento, efectos sobre la permeabilidad de la membrana y alteraciones nutricionales y de contenido vacuolar, por tanto pueden provocar ciertas variaciones metabólicas y fisiológicas producidas en las células radiculares como sitio primario de la acción del metal, obteniendo así, una idea general y coherente de lo que se propone como funcionamientos de ciertos mecanismos de tolerancia en estas variedades y una explicación a algunos de los efectos producidos por el aluminio.

1.2. Planteamiento del problema

La baja productividad de los cultivos es una de las principales problemáticas que afecta a los agricultores, siendo necesario buscar alternativas que conlleven a solucionar los distintos factores que afectan al sector agrícola.

Es necesario recalcar que la mayoría de los agricultores para la producción de sus cultivos no realizan análisis de suelo, lo que repercute en que no se tomen los correctivos necesarios buscar soluciones que incrementen la productividad por no saber la composición del suelo y la cantidad de nutrientes disponibles en el mismo.

El aluminio puede causar toxicidad influyente en las plantas, destacando que la utilización de variedades tolerantes a la acidificación, que además posean un alto potencial de rendimiento, no solucionan las situaciones críticas, donde se requiere un manejo integrado que involucre enmiendas, fuentes nitrogenadas no

acidificantes y una rotación de cultivos adecuada.

En suelos ácidos, el aluminio causa efecto negativo de la modificación en la apariencia externa de las raíces de las plantas expuestas a aluminio es que al hacerse éstas más gruesas se reduce considerablemente el área de contacto de la epidermis con la solución del suelo, limitando así la toma de agua y de nutrientes, con lo cual, la expresión del potencial productivo de las plantas se vería seriamente comprometido.

1.3. Justificación

Antes de iniciar la siembra de los cultivos, es de importancia determinar la estructura del suelo donde se desarrollarán sus raíces, las que sirven para sostén y nutrición de las plantas.

Si el suelo posee una elevada composición de Al, se le puede adicionar productos que permitan bajar la carga de Al.

1.4. Objetivo

1.4.1. General

Conocer la toxicidad por aluminio, como microelemento limitante para la producción agrícola.

1.4.2. Específicos

- Describir las alteraciones fisiológicas que produce el aluminio en las plantas.
- Detallar algunas opciones para contrarrestar la toxicidad en las plantas, causada por la aplicación de aluminio.

1.5. Fundamentación teórica

En el mundo, aproximadamente el 30 % de la superficie agrícola, y el 50 % de la superficie potencialmente arable está formada por suelos ácidos. De esta cifra, el 41 % se encuentra en América, el 26 % en Asia, el 17 % en África, el 10 %

en Europa, y el 6 % en Oceanía. El 81 % de los suelos tropicales de América son ácidos y con alta concentración de aluminio soluble (Méndez *et al.* 2016).

El aluminio es uno de los elementos más abundantes en el planeta; aproximadamente el 7% de la masa de la tierra está formada por aluminio. No esencial para el crecimiento de las plantas, el aluminio disponible o soluble puede ser tóxico para ellas, mientras que otras formas como aluminosilicatos y precipitados o formas de este metal elemental unido a ligandos no son fitotóxicas. Existen pruebas de suelo para determinar su nivel, siendo relevante evaluar el aluminio (Al^{+3}) disponible o soluble (Smart 2019).

La toxicidad por aluminio es el efecto más importante en los suelos ácidos y constituye el mayor factor limitante del crecimiento y la producción vegetal. Para la mayoría de las plantas, la raíz es el órgano más afectado por este ión, por lo que se han planteado diversas hipótesis acerca de los mecanismos de toxicidad en esta parte de la planta (Álvarez *et al.* 2015).

También a principios de siglo se comenzó a estudiar el aluminio en relación a su fitotoxicidad. El estudio de esta relación, últimamente ha cobrado gran importancia debido a dos importantes razones: en primer lugar porque diversos metales, entre ellos el aluminio, se han descrito como fuertes limitadores del crecimiento de las plantas provocando, por tanto, fuertes pérdidas económicas y en segundo lugar, porque los vegetales como productores primarios son la vía de entrada a la cadena alimentaria para el hombre (Garzón 2015).

El síntoma que revela toxicidad por presencia de aluminio en las plantas es el menor desarrollo de las raíces, generalmente el crecimiento de las raíces se reduce aproximadamente a la mitad de lo normal, pero esto varía de un cultivo a otro. La reducción de masa radicular y longitud de raíces significa menor absorción de nutrientes, así como también la capacidad de absorber suficiente cantidad de agua (Smart 2019).

El aluminio ha empezado a llamar la atención como “elemento tóxico”. Este hecho está vinculado con los crecientes daños que en muchos lugares del mundo

están sufriendo los bosques, los que en parte se originan por la liberación de aluminio en los suelos, facilitada por la creciente acidificación de los mismos. La toxicidad del aluminio ha sido poco estudiada, a pesar de que se poseen datos que demuestran algunas preocupaciones en cuanto a la severidad de este elemento. Las concentraciones de aluminio provoca alteraciones al diluirse en aguas superficiales ácidas, además puede provocar daños físicos y fisiológicos a las plantas (Satizábal *et al.* 2014).

Es generalmente conocido que el crecimiento de plantas en suelos ácidos es afectado por el aluminio soluble a pH bajos, el cual reduce el crecimiento del sistema radicular, además de producir síntomas de deficiencia de nutrientes, con una consecuente disminución de la producción. Los suelos ácidos constituyen el 40 % del suelo arable mundial (Toneatti y Rivera 2016).

El exceso de Al^{3+} en el suelo puede conducir a otros problemas nutricionales como: color pálido o descolorido, crecimiento marchito o raquítrico, tallos finos o débiles y manchas necróticas. El aluminio se encuentra más disponible para las plantas en suelos ácidos (suelos con pH muy bajo). Aquellos cultivos que prefieren suelos ácidos son más tolerantes al aluminio. Suelos con pH por debajo de 6 (especialmente menor a 5), son mucho más propensos a tener exceso de aluminio y por lo tanto contienen niveles tóxicos para la mayoría de los cultivos (Smart 2019).

El aluminio, considerado ya uno de los más fuertes reductores del crecimiento vegetal en suelos ácidos, incrementa mucho su disponibilidad en zonas de pH por debajo de 5, o bien en suelos orgánicos con un pH próximo a 7. Así, el pH del suelo es uno de los factores más importantes que determinan la disponibilidad del metal. Ciertas estimaciones indican que un 40 % del terreno cultivable del planeta y quizá un 70 % del suelo utilizado para la producción de alimentos, son zonas ácidas y, por tanto, sujetas a la toxicidad por este metal. En zonas ácidas, el aluminio es uno de los factores más importantes que determinan las especies de plantas y su distribución (Garzón 2015).

El aluminio es el elemento metálico más abundante en la corteza terrestre y

constituye cerca de 8 % de su peso. Este elemento es demasiado reactivo para ser encontrado en forma libre, además, en condiciones ligeramente ácidas o neutras ($\text{pH} > 6$), se encuentra unido a los silicatos y a los óxidos minerales y, por tanto, no representa mayores riesgos de toxicidad para los seres vivos; sin embargo, en condiciones fuertemente ácidas, el aluminio se libera a partir de formas insolubles, con lo cual se incrementa su disponibilidad en el suelo y las posibilidades de causar toxicidad a los seres vivos. La química particular, dependiente del pH que presenta el aluminio, puede ser una de las razones por las cuales, a pesar de su abundancia en los sustratos, este elemento no parece ser utilizado con algún propósito biológico conocido y, generalmente, se le reconoce como un elemento no esencial para los seres vivos (Casierra y Cárdenas 2017).

El Al se encuentra ampliamente distribuido en la naturaleza. Una proporción natural de 8% de la superficie terrestre lo ubica en el primer lugar de abundancia relativa entre los metales y el tercero entre todos los elementos de la corteza (Nesse *et al.* 2015).

La respuesta de las plantas a la toxicidad por Al^{3+} depende del grado de tolerancia que exhiba la especie, de la concentración de este elemento en el medio y de otras características del medio como la formación de precipitados insolubles, los efectos protectores de iones, la fuerza iónica de la solución y la presencia de quelantes. En general, el Al^{3+} interfiere con la división y elongación celular, modifica la estructura y el funcionamiento de las membranas plasmáticas, aumenta la rigidez de la pared celular, disminuye la respiración, interfiere con la actividad de varias enzimas, reduce la toma de agua e interfiere con la toma, transporte y metabolismo de varios nutrientes, de manera que las consecuencias del estrés por Al^{3+} se presentan a nivel bioquímico y fisiológico (Méndez *et al.* 2016).

Diferentes componentes y procesos celulares pueden ser afectados por el aluminio y entre los más importantes se encuentran, el núcleo y la división celular y la dinámica del citoesqueleto. En un estudio en el cultivo del maíz la reducción del número de células proliferativas inducidas por aluminio estuvo acompañada por un acortamiento en la región de división celular. Varios años después se observó

la rápida entrada del ión a las células y su localización cercana a los núcleos celulares, en células radicales de soya. A partir de estos resultados las investigaciones centraron su atención en el núcleo celular, teniendo en cuenta que el aluminio podía inhibir la división celular mediante su interacción con algunos componentes nucleares y esto permitió sugerir que la toxicidad letal podía estar asociada con esta interacción (Álvarez *et al.* 2015).

El Al natural se encuentra en el suelo formando parte de la estructura química de los aluminosilicatos presentes en muchos minerales y rocas. Estos compuestos son muy estables y, por lo tanto, insolubles en el medio ambiente natural. La acción combinada de factores atmosféricos promueve cambios físicos y químicos que suscitan la ruptura de las rocas superficiales. Así se originan minerales arcillosos que luego se transforman en óxidos e hidróxidos de aluminio, más solubles. Por otra parte, debe considerarse que, debido a la acción del hombre, el Al puede existir en altas concentraciones en los alrededores de los sitios donde se desechan residuos de ciertas industrias, refinerías, fundiciones, canteras y minas. Se ha calculado que un 70% de las tierras cultivables tienen suficiente acidez como para ocasionar problemas de toxicidad originada por la solubilización de Al (Nesse *et al.* 2015).

El aluminio tiene la capacidad de alterar el metabolismo celular dependiente del Ca^{2+} , dado que permite la acumulación de niveles de Ca^{2+} en el citoplasma por encima de los valores normales o impide que se mantenga el Ca^{2+} en formas transitorias en el citoplasma y, de esta manera, se alteran algunos procesos metabólicos de vital importancia para el vegetal, como la división y la elongación celular (Casierra y Cárdenas 2017).

Dentro de los factores abióticos que más influyen en el desarrollo del sistema radical, se pueden mencionar, la temperatura, el contenido de agua y de oxígeno, así como una elevada concentración de elementos químicos, entre los que se encuentran el aluminio (Álvarez *et al.* 2015).

El Al^{3+} puede unirse a los grupos fosfato de los fosfolípidos o a las proteínas de las membranas celulares, disminuir su cantidad, y cambiar así las

propiedades de fluidez, alterando entonces todos los procesos de transporte (dificulta el de cationes y facilita el de aniones) y la actividad enzimática asociada a membranas. Asimismo, tiene la capacidad de unirse a la pared celular, alterar su estructura y aumentar su rigidez mediante el entrecruzamiento de las pectinas. Cerca del 95 % del aluminio asociado a las raíces de las plantas se encuentra en la pared celular y es el responsable del rápido e irreversible desplazamiento y sustitución del calcio en el apoplasto. Una vez en el citoplasma, el aluminio afecta la homeostasis de los iones H^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ . La exposición al Al^{3+} afecta inicialmente el proceso de elongación celular, y se puede unir a los grupos fosfato del ADN, provocando un incremento de la estabilidad de la molécula que reduce su capacidad de replicación, por tanto inhibe la síntesis de ADN y la división celular en las raíces expuestas (Méndez *et al.* 2016).

El área de contacto de las raíces con el suelo es una zona de una gran actividad biológica, donde se desarrollan muchos tipos de microorganismos, los cuales son más activos en ese sitio que en el resto del volumen de suelo, y sintetizan muchos ácidos orgánicos alifáticos y fenoles. La secreción de ácidos orgánicos en plantas expuestas a Al^{3+} , se considera un mecanismo de vital importancia para desarrollar tolerancia a este metal. Los canales transportadores de aniones, un tipo de proteína presente en la membrana, regula la secreción de ácidos mediante la activación de los canales por interacción directa del aluminio ya sea con el canal proteico o con un receptor específico en la membrana (Casierra y Cárdenas 2017).

El aluminio es el metal más abundante en la corteza terrestre y está localizado fundamentalmente como complejos alumino-silicato, los cuales liberan fácilmente Al^{3+} , un ion fitotóxico que actúa sobre la acidificación del suelo. En suelos ácidos el aluminio es el elemento que más influye negativamente sobre la producción de las cosechas, afectando más del 40 % de la agricultura mundial (Álvarez *et al.* 2016).

Los síntomas de fitotoxicidad por aluminio no dependen únicamente de una concentración crítica del elemento en el sustrato (Cárdenas *et al.* 2018).

La toxicidad por Al^{3+} limita el crecimiento de las plantas, principalmente a través de sus efectos adversos sobre el crecimiento y desarrollo de las raíces, en las cuales, el primer sitio de afectación son los ápices, siendo la cofia y las zonas meristemática y de elongación las que acumulan más aluminio y registran la mayor sensibilidad al daño físico en comparación con los tejidos maduros. Bajo estrés por aluminio, el sistema radical presenta un color pardusco, con raíces gruesas, quebradizas, cortas y muy ramificadas. En estas condiciones, las plantas exploran un volumen muy reducido de suelo y se vuelven ineficientes en la toma y transporte de agua y elementos esenciales (Méndez *et al.* 2016).

La respuesta de las plantas a la toxicidad por aluminio puede variar, dependiendo del grado de tolerancia que exhiba la especie en cuestión para este metal y de la concentración en que se encuentre este elemento en el medio (Álvarez *et al.* 2016).

La toxicidad por aluminio induce la exudación de ácido cítrico en raíces, la deficiencia de fósforo promueve la secreción de ácido oxálico, pero en ambos casos puede suceder la exudación de ácido málico (Casierra y Cárdenas 2017).

Por eso, aunque la presencia de aluminio es un factor muy importante en la expresión de la respuesta al daño causado por este elemento, otras características del medio, como el pH, la formación de precipitados insolubles, los efectos protectores de iones, la fuerza iónica de la solución, la presencia de quelatantes, y el genotipo de la planta, pueden también actuar en la modificación de la respuesta de los vegetales al aluminio. Muchos de estos factores químicos se pueden comprender mejor si se tiene en cuenta los efectos que causa la especiación de aluminio, la que varía según el pH, ya que las especies tóxicas de aluminio están en función del pH y afectan en distinto grado a especies vegetales y cultivares dentro de una misma especie, siendo Al^{+3} la especie más tóxica, conocida como 'Al lábil' (Cárdenas *et al.* 2018).

Cambios en la morfología radical han sido observados ante la presencia de aluminio. Este elemento afecta importantes procesos como la división y elongación

celular, lo que conlleva a una reducción del crecimiento radical. Esta inhibición del crecimiento en las raíces promueve el desarrollo de un sistema radical ramificado, para lograr el exitoso funcionamiento de la planta (Álvarez *et al.* 2016).

El aluminio es un elemento sólido en condiciones normales, de color blanco plateado, dúctil, y muy maleable. Cristaliza en forma cúbica. Se puede encontrar libre o combinado en la naturaleza. Es un metal trivalente, pertenece al grupo III A del tercer periodo de la tabla periódica y tiene un peso atómico de 25.98 y un número atómico de 13. Debido a su baja densidad ($2.699 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ a 20°C), no se incluye en el grupo de metales pesados (Garzón 2015).

El efecto de las altas concentraciones de aluminio sobre el crecimiento y el desarrollo radicales debería estar asociado a alteraciones en los mecanismos que determinan la división celular, por tanto, si se tiene en cuenta que los ciclos celulares en los meristemas de las raíces duran aproximadamente entre 18 y 24 horas es poco probable que la reducción de la división celular sea la responsable de la inhibición tan rápida del crecimiento radical, efecto que se expresa a partir de la primera hora de exposición de las raíces a aluminio. Sin embargo, una inhibición sustancial en el crecimiento de las raíces, que se extiende a lo largo de horas, e incluso días, tendría que estar asociada con la reducción de la multiplicación celular (Casierra y Cárdenas 2017).

Las plántulas jóvenes son más susceptibles que las plantas ya desarrolladas a la toxicidad causada por Al^{+3} . Aunque aparentemente el Al^{+3} no afecta la germinación de las semillas, se sabe que disminuye el crecimiento de las nuevas raíces y la estabilización de las plántulas. Sin embargo, con respecto a esta afirmación, los resultados varían mucho entre especies, e incluso entre cultivares (Cárdenas *et al.* 2018).

Para entender la toxicidad por aluminio sobre los vegetales, es necesario elucidar su localización tanto a nivel de tejido como a nivel celular, lo cual constituye una de las mayores controversias y dificultades encontradas en la mayoría de las investigaciones llevadas a cabo sobre este tema. Existen numerosos lugares de acción potenciales del aluminio, cuya identificación ayudaría a la selección de

genotipos con mayor resistencia a este metal (Garzón 2015).

Los estudios de la estructura radical y sus modificaciones ante el estrés por aluminio son escasos, donde no se han publicado resultados en este sentido, razones por las cuales resulta interesante estudiar los cambios en la morfología de las radículas de plántulas de arroz, germinadas con diferentes niveles de aluminio en el medio (Álvarez et al. 2016).

Como consecuencia de la reducción del pH en la solución, el aluminio se hace activo y se convierte en un elemento altamente tóxico para las células vegetales, a lo cual, las plantas responden liberando ácidos orgánicos que contribuyen a reducir los efectos tóxicos del aluminio sobre las células (Casierra y Cárdenas 2017).

La inhibición del crecimiento radicular observada ante la exposición al aluminio pudiera deberse a que el metal interfiere directa o indirectamente en el proceso de división celular, ejerciendo su efecto tóxico sobre este, lo cual ha sido probado en ápices radicales de varias especies (Álvarez et al. 2016).

Estudios demuestran que al hacer el análisis de la germinación de las semillas de maíz, se observó una disminución en las semillas expuestas a Al^{3+} con respecto a las semillas germinadas sin elemento, sin embargo entre todo los tratamientos con Al^{3+} , el comportamiento fue muy similar y de hecho no hubo diferencia estadísticamente significativa. En maíz, la germinación de las semillas se redujo 9,0; 10,3 y 12,0 % respectivamente, cuando las semillas se expusieron a concentraciones de 0,5; 1 y 2 meq de Al^{3+} (Cárdenas et al. 2018).

Resultados preliminares demuestran la importancia del estudio del estrés por aluminio en plantas de arroz; sobre todo si se tiene en cuenta que cualquier alteración que se produzca en la raíz repercutirá en la integridad de la planta (Álvarez et al. 2016).

Como la inhibición de la elongación de la raíz es uno de los primeros

síntomas visibles en la planta tras la aplicación externa de aluminio, éste órgano es uno de los más estudiados a la hora de analizar la distribución y efectos del aluminio. La mayoría de estudios indican que la concentración de aluminio en la raíz depende de la diferente sensibilidad de las plantas al aluminio y que la disminución del crecimiento se relaciona con el contenido de éste en la raíz, ya que muchas plantas más tolerantes poseen mecanismos de exclusión del metal (Garzón 2015).

La fitotoxicidad de los metales en el suelo no depende de la concentración total sino de su biodisponibilidad. Entre los factores más relevantes para la disponibilidad podemos mencionar el pH, el potencial de óxido reducción, la capacidad de intercambio catiónico y la materia orgánica. La mayoría de los metales son más solubles en suelos ácidos y solamente la disponibilidad del molibdeno (Mo) suele aumentar con el pH. Por regla general, en un suelo ácido, la forma de catión libre del aluminio (Al^{3+}) suele ser la forma más tóxica (Ruíz *et al.* 2018).

En general, se acepta que el aluminio se acumula en los ápices de las raíces, incluyendo la caliptra y las zonas meristemáticas y de elongación, como han mostrado estudios realizados por diversos autores, aplicando técnicas de tinción con hematoxilina en diferentes variedades de trigo. A partir de estos estudios se ha observado una característica acumulación de aluminio en la epidermis y en las células externas del córtex (Garzón 2015).

En los suelos ácidos la liberación de aluminio (Al), de los minerales que contienen Al, es acelerado y este incremento se vuelve fitotóxico, lo mismo sucede con un incremento en la concentración de hidrogeniones (H^+) o un incremento en la concentración de manganeso. El efecto adverso del suelo ácido sobre el crecimiento de la planta en muchos casos, está directamente relacionado a la toxicidad de los iones de Al disueltos (Ruíz *et al.* 2018).

El aluminio como catión polivalente en condiciones ácidas tiene la capacidad para unirse fuertemente a las cargas negativas de la capa de Donnan. Usando espectrometría de masas, demostraron que el aluminio se acumula

preferentemente en las células de la capa externa de la raíz, con una rápida absorción en los primeros 30 minutos seguida de una disminución del radio de absorción. Tras 18 horas de tratamiento, el aluminio se podía observar también en las capas más internas de la raíz siempre en una concentración menor (Garzón 2015).

Con frecuencia, los suelos ácidos presentan poco P aprovechable, una baja capacidad de intercambio de bases y una alta capacidad de lixiviación. De este modo hay que añadir casi todos los nutrientes para mantener la fertilidad en estos suelos. La acidez aumenta la disponibilidad de Fe, Mn y Al, pero con frecuencia estos elementos son tóxicos para la planta. Por lo general, es necesario encalar el terreno para elevar el pH del suelo y superar los problemas de toxicidad. La selección de plantas tolerantes a estos elementos es un método alternativo para resolver algunos problemas de toxicidad (Ruíz *et al.* 2018).

Los suelos ácidos tropicales poseen baja fertilidad natural, siendo las deficiencias de fósforo y las condiciones climáticas los factores que más limitan su potencialidad agrícola. Los suelos ácidos poseen variaciones en sus propiedades que limitan la generación de prácticas que propicien la producción óptima de los cultivos (López *et al.* 2017).

Los mecanismos de resistencia al Al pueden ser agrupados en dos categorías. Uno está basado en la exclusión del Al de la células de la raíz, y el otro depende de mejorar la resistencia de las plantas una vez que ellos ingresen al citosol. Entre los mecanismos de exclusión, el rol de eflujos de ácidos orgánicos ha sido bien documentado en varias especies. Otro mecanismo potencial de exclusión incluye un incremento en el pH de la rizósfera, la salida de fósforo de la célula, la secreción de proteína unido a los iones de Al y la permeabilidad selectiva de la membrana plasmática para reducir la captación de Al en el citosol (Ruíz *et al.* 2018).

La variabilidad de los suelos ácidos, es principalmente debida a variaciones en la disponibilidad de calcio, magnesio, fósforo, potasio, azufre y micronutrientes, así como en la clase textural y el contenido de aluminio en el complejo de intercambio. Esta situación ha originado líneas de investigación

tendientes a desarrollar tecnologías para disminuir las limitaciones y aumentar la productividad de estos suelos (López *et al.* 2017).

Los suelos ácidos presentan altos contenidos de aluminio, manganeso e hidrógeno, elementos susceptibles de causar fitotoxicidad. El aluminio comúnmente llamado el Al^{+3} , ha sido reconocido como el limitante principal para el crecimiento de los vegetales en suelos ácidos. Se produce una disminución del desarrollo y crecimiento de las plantas, lo que sumado a las deficiencias nutricionales producto de una serie de reacciones entre los distintos elementos, especialmente calcio, magnesio, fósforo y molibdeno hacen de este tipo de suelo un sustrato con serias limitaciones para la productividad vegetal (Toneatti y Rivera 2016).

El síntoma inicial de la toxicidad por aluminio, en las plantas, es la inhibición en la elongación de la raíz, la cual puede ser observada a los 30 días después de exponerla al Al en una raíz sensitiva a este metal. El ápice de la raíz parece ser el lugar primario para la toxicidad porque se expone los 2 o 3 mm de ápice de la raíz. Cuando las raíces crecen en suelo ácidos, el apoplasto o la pared celular es la primera parte de la planta que entra en contacto con el Al. Hay evidencia que la acumulación primaria de aluminio se produce en la pared celular, como se demostró en las raíces de cebada, en la cual el 85-90 % del total de aluminio acumulado estuvo fuertemente unido a la pared celular (Ruíz *et al.* 2018).

Tradicionalmente la solución a los problemas de toxicidad por aluminio, ha sido la aplicación de enmiendas calizas, práctica que tiene ciertas limitaciones, respecto de su efectividad y un costo que es necesario solventar e incluir en los costos de producción (Toneatti y Rivera 2016).

La esencialidad del aluminio no ha sido demostrada en las plantas, aunque a pequeñas concentraciones puede estimular el crecimiento en algunas especies. Más destacados son los efectos tóxicos del aluminio, sobre todo actualmente como consecuencia del descenso del pH del suelo por la contaminación (i Ollé 2015).

La conducta de los suelos ácidos está íntimamente ligada con la química

del aluminio. El aluminio comprende el 7.1 % de la corteza terrestre y está presente en minerales primarios, en minerales secundarios y en óxidos e hidróxidos de aluminio (Toneatti y Rivera 2016).

La acidez del suelo es uno de los factores que más limitantes de la productividad de los cultivos en muchas zonas del trópico. El problema es de especial relevancia para el cultivo del maíz dada su gran importancia como cultivo de gran consumo mundial. Por ello el maíz se ha convertido en una especie modelo de investigación dentro de las gramíneas, de los mecanismos de toxicidad del aluminio y de tolerancia a este tipo de suelos de pH bajo donde el aluminio, presente en gran cantidad en el medio, puede pasar a formas solubles, disponibles para las plantas disminuyendo el crecimiento de las que no están adaptadas a estas condiciones. La respuesta primaria al estrés por aluminio es la inhibición de la elongación radicular (Forcadell 2017).

El aluminio es uno de los mayores componentes del suelo y los iones de aluminio libre solubilizados a pH inferior a 5,0 son la mayor limitante para el crecimiento vegetal. Sin embargo no todas las formas de aluminio son tóxicas, las formas solubles son las que están implicadas en la toxicidad de suelos ácidos (Toneatti y Rivera 2016).

La acidez incide directamente en la fertilidad de los suelos, ocasionando un mayor o menor grado de solubilidad de los elementos nutrientes para las plantas y afectando de este modo la producción agrícola. Además, la acidez incide en otros fenómenos fisicoquímicos, como la capacidad de intercambio catiónico, la absorción de elementos y la presencia de aluminio en forma tóxica para las plantas (Zapata 2014).

En general los cationes trivalentes son tóxicos para las plantas y el Al^{+3} es considerado la mayor forma fitotóxica, aunque algunos estudios han implicado a las formas di y monovalente en la toxicidad (Toneatti y Rivera 2016).

Además de diversas estrategias de manejo de suelos ácidos, otra táctica posible, es la generación de genotipos tolerantes a la toxicidad por aluminio. Estas

aproximaciones son tanto convencionales, mediante procesos de hibridación mendeliana o mutaciones, como moleculares, con el uso de selección asistida con marcadores, y biotecnológicas, con el uso de transferencia de genes mediada por ingeniería genética. Un elemento esencial en la aplicación de aproximaciones moleculares y biotecnológicas, es la identificación de genes que confieran tolerancia al aluminio. Para ello es necesario entender en el nivel molecular, tanto los efectos de la toxicidad, como los mecanismos de tolerancia (Carreño y Chaparro 2015).

La manera de evaluar el pH es por medio de análisis de suelo. El umbral en el que el aluminio disponible o soluble (Al^{+3}), en el suelo puede comenzar a dañar los cultivos es de aproximadamente 0.5 ppm. Son pocos los cultivos que toleran más de 1 ppm (Smart 2019).

Los efectos del aluminio en el crecimiento de las plantas, disminución de la producción, absorción y distribución en partes vegetativas y reproductivas no son todavía comprendidos completamente. La inhibición del crecimiento de las raíces es un síntoma visual de la toxicidad por aluminio, siendo los síntomas más tempranos. Los tallos en contraste a la situación observada por la toxicidad por manganeso, son menos afectados. El menor desarrollo radicular se produce debido al bloqueo de la expansión celular más que en la división celular (Toneatti y Rivera 2016).

La reducción de aluminio en el suelo se logra a veces con yeso. Los cationes de calcio (Ca^{+2}) del yeso compiten con los cationes de aluminio (Al^{+3}), haciéndolos menos absorbibles por las plantas. Esta estrategia de neutralización del suelo corre el riesgo de contaminar cuencas hídricas. La reducción del contenido de aluminio en la capa superficial del suelo se logra generalmente con la adición de cal agrícola elevando el pH a 5.5 o más. Sin embargo si el Al es excesivamente abundante en el subsuelo o la capa superficial, este representa un serio riesgo para los cultivos (Smart 2019).

En los suelos ácidos la toxicidad por aluminio es una de las limitaciones para la producción de los cultivos. El aluminio en el suelo puede estar unido por ligandos,

o estar presente en otras formas no fitotóxicas como los aluminosilicatos y precipitados como silicatos de aluminio, que se encuentran mezclados con metales tales como sodio, potasio, hierro, calcio o magnesio. No obstante, en condiciones de suelos ácidos (pH 5.5 - 4.5, o < 4.5) los iones aluminio (Al^{3+}) se solubilizan y pueden penetrar células radiculares, lo cual inhibe el crecimiento de las raíces y dificulta la absorción de agua y nutrientes esenciales como el fósforo y calcio (Carreño y Chaparro 2015).

1.6. Hipótesis

Ho= La toxicidad por aluminio, es un limitante para la producción agrícola.

Ha= La toxicidad por aluminio, como microelemento no es un limitante para la producción agrícola.

1.7. Metodología de la investigación

La presente información que se desarrolló como componente práctico para el trabajo de titulación se realizó de acuerdo a las investigaciones recopiladas de artículos científicos, textos, revistas académicas, periódicos, ponencias, congresos y páginas virtuales.

La búsqueda posteriormente fue sometida a las técnicas de análisis, síntesis y resumen donde se trató lo referente a la toxicidad por aluminio, como microelemento limitante para la producción agrícola.

CAPÍTULO II

RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

2.1. Desarrollo del caso

El presente documento detalla la toxicidad por aluminio, como microelemento limitante para la producción agrícola.

La toxicidad por aluminio es el efecto más importante en los suelos ácidos y constituye el mayor factor limitante del crecimiento y la producción vegetal. Para la mayoría de las plantas, la raíz es el órgano más afectado por este ión, por lo que se han planteado diversas hipótesis acerca de los mecanismos de toxicidad en esta parte de la planta.

2.2. Situaciones detectadas (hallazgo)

El aluminio es uno de los mayores componentes del suelo y los iones de aluminio libre solubilizados a pH inferior a 5,0 son la mayor limitante para el crecimiento vegetal.

Las investigaciones centraron su atención en el núcleo celular, teniendo en cuenta que el aluminio podía inhibir la división celular mediante su interacción con algunos componentes nucleares y esto permitió sugerir que la toxicidad letal podía estar asociada con esta interacción.

La exposición de diferentes variedades de Zea maíz a un pH ácido y a aluminio, da como resultado una disminución progresiva de los niveles de DNA con relación a los existentes en el control a pH 6,0, contribuyendo así a la disminución en la germinación.

2.3. Soluciones planteadas

En general, se acepta que el aluminio se acumula en los ápices de las raíces,

incluyendo la caliptra y las zonas meristemáticas y de elongación, como han mostrado estudios realizados por diversos autores, aplicando técnicas de tinción con hematoxilina en diferentes variedades de trigo. A partir de estos estudios se ha observado una característica acumulación de aluminio en la epidermis y en las células externas del córtex.

Verificar los primeros síntomas externos del efecto tóxico de las plántulas debido a la inhibición del crecimiento longitudinal de la raíz, lo que se determina como indicador temprano, para diferenciar entre genotipos sensibles y tolerantes al aluminio.

En aquellos suelos con pH bajo, una prueba de aluminio soluble o disponible es recomendable.

2.4. Conclusiones

Por lo detallado anteriormente se concluye:

Los estudios relacionados con la toxicidad de aluminio están centrados especialmente en cultivos como arroz, maíz, trigo y hortalizas.

Es posible lograr la reducción de los efectos tóxicos del Al^{3+} y mantener una nutrición equilibrada de las plantas cultivadas, mediante la aplicación de cal al suelo, ya que los carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio o magnesio neutralizan los iones H^+ y Al^{3+} en la solución del suelo cuando la enmienda reacciona con el agua.

La toxicidad por Al^{3+} es el factor más limitante del crecimiento y desarrollo de las plantas en suelos ácidos, sobre todo si el pH es $< 5,0$. Su efecto produce síntomas morfológicos y fisiológicos principalmente identificables en la raíz, de modo que los mecanismos de tolerancia implican diferencias en la estructura y función de este órgano.

La elongación radicular establece una definición clara en cuanto a la

tolerancia de las diferentes variedades al metal. Siendo las diferencias más notables en dicotiledóneas que en monocotiledóneas.

Las diferentes concentraciones de aluminio afectan la elongación de la raíz, como también disminuyen sus pesos frescos y sus pesos secos (la concentración de 100 μ M de Al es la que mayor daño causó a las raíces y pH 4,5 inhibe la elongación de la raíz).

La concentración de aluminio radicular es claramente superior a la encontrada en la parte aérea de la planta y se relaciona estrechamente con el nivel de aluminio en el suelo, en cambio, las concentraciones de aluminio foliar (ppm) no marcan una tendencia clara. Además, los ecotipos de mayor producción son los que contienen menor concentración de aluminio en sus raíces.

Los niveles de aluminio del suelo tuvieron efecto sobre la producción de materia seca, observándose un detrimento en el peso de las raíces al aumentar los niveles de saturación de aluminio en el suelo.

2.5. Recomendaciones (propuesta para mejorar el caso)

Entre las recomendaciones se plantea:

Manejar aplicaciones de riego para favorecer la asimilación del corrector de acidez.

Efectuar pruebas de aluminio soluble o disponible en el suelo, para determinar su contenido.

Aplicar el uso combinado de cultivares tolerantes al aluminio y enmiendas o compuestos orgánicos ya que suele ser la estrategia más eficaz para mejorar la producción agrícola en suelos ácidos.

BIBLIOGRAFÍA

- AEFA. 2020. Aluminio, oligoelemento o microelemento. Disponible en <https://aefa-agronutrientes.org/glosario-de-terminos-utiles-en-agronutricion/aluminio>
- Álvarez Bello, I., Reynaldo Escobar, I., Sánchez Testillano, P., Risueño, M. D. C. (2015). Efectos del aluminio en la división y el alargamiento celular en plántulas de arroz (*Oryza sativa* L.). *Cultivos Tropicales*, 33(1), 35-40.
- Álvarez, I., Sam, O., Reynaldo, I. (2015). Cambios inducidos por el aluminio en la morfogénesis radicular del arroz. *Cultivos tropicales*, 26(1), 21-25.
- Cárdenas-Hernández, J. F., Casierra-Posada, F., Roa, H. A. (2018). Efecto del aluminio sobre la germinación de semillas de trigo (*Triticum aestivum* L.) y de maíz (*Zea mays* L.). *Orinoquia*, 12(1), 45-56.
- Carreño, A., Chaparro-Giraldo, A. (2015). Tolerancia al aluminio en especies vegetales: mecanismos y genes. *Universitas Scientiarum*, 18(3), 283-310.
- Casierra Posada, F., Cárdenas Hernández, J. F. (2017). Influencia del aluminio sobre el crecimiento de la raíz en Coliflor (*Brassica oleracea* L., var. Botrytis, Hib.'Nevada F1').
- Casierra, F., Aguilar, O. (2017). Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, 1(2), 246-257.
- Chamorro, B., Echeverría, C., Guerrero, R., Gamboa, J. (2020). Aluminio, boro, cobre, cobalto, hierro, manganeso y zinc disponibles en suelos volcánicos de la sabana de Tuquerres, departamento de Nariño, Colombia. *Revista de Ciencias Agrícolas*, 4(1), 23-35.
- Forcadell, M. A. (2017). *Respuestas primarias a la toxicidad por aluminio en raíces de plantas de maíz con diferente resistencia* (Doctoral dissertation, Universitat Autònoma de Barcelona).
- Garzón López, T. (2015). Estudio de la compartimentación celular en plantas modelo sometidas a estrés por aluminio. Universitat Autònoma de Barcelona.
- I Ollé, M. L. (2015). *Respuestas diferenciales de cultivares de Zea mays L. a la toxicidad por aluminio* (Doctoral dissertation, Universitat Autònoma de Barcelona).

- López, M., España, M., Toro, M. (2017). Eficiencia de absorción de fósforo en cultivares de sorgo de diferente tolerancia a la toxicidad de aluminio efficiency of phosphorus absorption in you will cultivate of sorghum of different tolerance from the aluminum toxicity. *Agronomía Trop*, 57(3), 205-218.
- Méndez, Y. R., Chacón, L. M., Corzo, M. H., Angulo, H. M. R. (2016). La toxicidad por aluminio (Al³⁺) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. *Revista Palmas*, 37(1), 11-23.
- Nesse, A., Garbossa, G., Pérez, G., Vittori, D., Pregi, N. (2015). Aluminio: ¿ culpable o inocente?. *Química Viva*, 2(1), 9-16.
- Ruíz, J. C., Rebaza, L. C., Villalobos, K. H., Silva Pereda, L., Cunya, F. V. (2018). Efecto del aluminio y el pH en el crecimiento de raíces de *Phaseolus vulgaris* var. caballero en condiciones de laboratorio. *REBIOL*, 36(2), 4-15.
- Satizábal, A., Andrade, M., Zuñiga, M. (2014). Toxicidad aguda del aluminio sobre *Daphnia magna* en aguas con diferentes niveles de dureza. *Actualidades Biológicas*, 21(71), 131-142.
- Smart. 2019. Aluminio en el suelo: evitando su toxicidad. Disponible en <https://www.smart-fertilizer.com/es/articles/aluminum-in-soil/>
- Smart. 2020. Como elevar el pH del suelo. Disponible en <https://www.smart-fertilizer.com/es/articles/soil-ph/>
- Toneatti, M., Rivera, N. R. (2016). Ensayos de Tolerancia al Aluminio de *Bromus stamineus* y *Bromus lithobius* Recolectados en el Sur de Chile. *Información tecnológica*, 17(1), 9-17.
- Zapata Hernández, R. D. (2014). Química de la acidez del suelo. *Facultad de Ciencias*.