

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO
Spongospora subterranea, EVALUADO EN PLANTAS**

NILSON JOVANI ALAYÓN MARIN

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

FACULTAD DE CIENCIAS

MAESTRÍA EN CIENCIAS – QUÍMICA

MEDELLÍN

2013

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO
Spongospora subterranea, EVALUADO EN PLANTAS**

NILSON JOVANI ALAYÓN MARIN

Proyecto para optar al título de Magíster en Ciencias - Química

Director de Tesis

Raúl Darío Zapata, PhD.

Asesora de Tesis

Elizabeth Gilchrist Ramelli

Doctora en Ciencias Agrarias

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**FACULTAD DE CIENCIAS
MAESTRÍA EN CIENCIAS - QUÍMICA
MEDELLÍN**

2013

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

Agradecimientos

Agradezco a mi padre celestial por la oportunidad y el respaldo brindado para avanzar en mi formación profesional, de igual manera a mi esposa Yuliet Viviana Candela por su apoyo y colaboración constante, de manera muy especial agradezco a mis padres por su colaboración a lo largo de mi existencia.

Quiero expresar mi infinita gratitud a Dra, Elizabeth Gilchrist Ramelli, docente de la Facultad de Ciencias de la Universidad de la Salle y de igual forma al Dr, Raúl Darío Zapata docente de la Facultad de Ciencias de la Universidad Nacional, ambos desde su dirección, me han dado su respaldo y comprensión continua durante el proceso de elaboración, ejecución y finalización de la investigación, ya que sin ellos no se hubiera logrado la culminación de este trabajo de investigación.

También quisiera expresar mis agradecimientos al grupo de investigación BIODS de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín; quienes con su colaboración, su ayuda y el préstamo de sus instalaciones permitieron la elaboración de este trabajo de investigación.

Por ultimo pero no menos importante, debo dar gracias a todas las personas que de alguna manera sea personal o científica y de forma desinteresada me han colaborado y respaldado en la propuesta de investigación.

EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS

Resumen

El **aluminio (Al)** es un elemento químico de mayor abundancia en la corteza terrestre que en su forma oxidada de Al^{+3} presenta una elevada toxicidad, es uno de los principales factores que limitan la productividad de los cultivos en los suelos ácidos alrededor del mundo y también con su actividad química afecta algunos patógenos del suelo; uno de estos es el protozoario *Spongospora subterranea* f. sp. *subterranea*, es un parásito obligado que se replica en raíces y tubérculos de papa causando la sarna polvosa. Esta enfermedad se ha difundido a escala global debido al comercio de tubérculos y semilla infectada por la ausencia de tratamientos efectivos. En este trabajo se investigó la actividad química del aluminio como ion Al^{+3} libre presente en solución, como parte de una estrategia de control de *Spongospora subterranea*. Su actividad química fue evaluada a partir de tratamientos químicos en solución con cloruro de aluminio $AlCl_3$ y sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$ en diferentes concentraciones y con control del pH, en plántulas de tomate *Lycopersicon esculentum*, plántulas de papa *Solanum tuberosum* variedad Diacol Capiro y en los quistosoros de *Spongospora subterranea*, determinando si afecta o favorece el crecimiento de plántulas y disminuye la concentración y los efectos de los quistosoros de *S. subterranea*; se determinó que la toxicidad del aluminio disminuyó significativamente la superficie de la raíz y del tallo, en las concentraciones de cloruro de aluminio $AlCl_3$, al igual que el crecimiento de las plantas, aunque no afectó el número de quistosoros de *S. subterranea* en la solución. La especiación permitió reconocer la actividad química que presenta el aluminio, siendo más específica cuando se aplicaba cloruro de aluminio $AlCl_3$, ya que el sulfato favorecía la formación de complejos metálicos y pares iónicos en solución, mientras que con el cloruro de aluminio favorece la presencia del catión (Tabla 9, 10 y 12). En el ensayo de campo el crecimiento de las plantas fue menor a 10.000 ppm de $Al_2(SO_4)_3$ en las parcelas inoculadas con el patógeno.

Palabras claves: *Spongospora subterranea*, *Solanum tuberosum*, *Lycopersicon esculentum*, actividad química, toxicidad, crecimiento de la planta, quistosoros.

EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS

Summary

Aluminum (Al) is the most abundant chemical element in the earth's crust in its oxidized form Al^{+3} has a high toxicity, is one of the major factors limiting crop productivity in acid soils worldwide and chemical activity also affects some soil pathogens, one of which is the protozoan *Spongospora subterranea* f. sp. *subterranea*, is an obligate parasite that replicates in roots and tubers of potato causing powdery scab. This disease has spread globally through trade in infected seed tubers and the absence of effective treatments. In this work, we investigated the chemical activity of aluminum as Al^{+3} free ion present in solution, as part of a control strategy *Spongospora subterranea*. Its chemical activity was evaluated from chemical treatments in solution with aluminum chloride $AlCl_3$ and aluminum sulfate $Al_2(SO_4)_3$ at different concentrations and pH control in tomato seedlings *Lycopersicon esculentum*, *Solanum tuberosum* potato seedlings Diacol variety Capiro and the cystosori of *Spongospora subterranea*, determining if it affects or promotes seedling growth and decreases the concentration and effects of cystosori of *S. subterranea*, it was determined that aluminum toxicity significantly decreased the surface of the root and stem, in the concentrations of aluminum chloride $AlCl_3$, as the growth of plants, but did not affect the number of *S. cystosori subterranea* in the solution. Speciation allowed recognize chemical activity effects of aluminum, being more specifically when applied aluminum chloride $AlCl_3$, as the sulfate favored the formation of metal complexes and ion pairs in solution, while the aluminum chloride favors the presence of cation (Table 9, 10 and 12). In the ground test the plant growth was less than 10,000 ppm of $Al_2(SO_4)_3$ in the plots inoculated with the pathogen.

Keywords: *Spongospora subterranea*, *Solanum tuberosum*, *Lycopersicon esculentum*, chemical activity, toxicity, plant growth, cystosori.

EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS

Lista de Figuras.....	7
Lista de Tablas.....	8
INTRODUCCIÓN.....	9
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	10
2. MARCO TEORICO.....	11
2.1. <i>Spongospora subterranea</i>	11
2.2 EL ALUMINIO EN SOLUCIÓN.....	13
2.4 SOLUCIONES NUTRITIVAS.....	30
2.5 TOXICIDAD DEL ALUMINIO.....	31
2.6 TOXICIDAD EN PLANTAS.....	32
2.7 TOXICIDAD EN RAICES.....	34
2.8 TOXICIDAD EN MICROROGANISMOS.....	35
3 OBJETIVOS.....	35
3.1 Objetivo general.....	35
3.2 Objetivos específicos.....	35
4. METODOLOGÍA.....	36
4.1 Evaluar si la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre afecta o favorece el crecimiento de plantas de tomate.....	36
4.2 Determinar si la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre disminuye la concentración y los efectos de los quistosoros de <i>Spongospora subterranea</i> en plantas de tomate.....	36
4.3 Establecer el efecto de los quistosoros de <i>Spongospora subterranea</i> y la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre en el crecimiento de plantas de tomate.....	37
4.4 Identificar si la aplicación de Aluminio, en un suelo infectado con quistosoros de <i>Spongospora subterranea</i> , favorece el crecimiento de las plantas de papa.....	38
5. ANALISIS ESTADISTICO.....	40
6. RESULTADOS Y DISCUSION.....	40
a. Evaluar si la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre, afecta o favorece el crecimiento de plantas de tomate.....	41
b. Determinar si la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre disminuye la concentración y los efectos de los quistosoros de <i>Spongospora subterranea</i> en plantas de tomate.....	44
c. Establecer el efecto de los quistosoros de <i>Spongospora subterranea</i> y la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre en el crecimiento de plantas de tomate.....	46
d. Identificar si la aplicación de Aluminio, en un suelo con quistosoros de <i>Spongospora subterranea</i> , favorece el crecimiento de las plantas de papa.....	48
7. CONCLUSIONES.....	50
8. BIBLIOGRAFIA.....	52
9. Anexos.....	56

Lista de Figuras

Figura 1. Ciclo de vida de <i>Spongospora subterranea</i> (modificado de Harrison <i>et al.</i> , 1997).	11
Figura 2. Países donde se ha reportado la sarna polvosa de la papa.	12
Figura 3. Distribución del aluminio en la solución del suelo en suelos ácidos. Los números identifican procesos de intercambio (1), precipitación (2, 3 y 4) y complejación con materia orgánica (5).	18
Figura 4. Relación entre el Al^{+3} en la solución del suelo y el Al intercambiable en tres Ultisoles venezolanos (Zapata, 1988).	19
Figura 5. Estructura del quelato de Al^{+3} con el ácido cítrico.	23
Figura 6. Relación entre la actividad del Al^{+3} en la solución del suelo o en soluciones nutritivas y la longitud de la raíz primaria del algodón (Pearsons, 1971).	32
Figura 7. Efectos del pH del suelo en la actividad del ión aluminio (Aluminium) en la solución del suelo y en la producción de Alfalfa-Lucerne (Cregan <i>et al.</i> 1980).	33
Figura 8. Diseño de los experimentos objetivos 6.1 y 6.2 con plántulas de tomate.	37
Figura 9. Diseño del experimento en campo.	39
Figura 10. Efecto de los quistosoros de Ss y la actividad química del aluminio libre Al^{+3} , evaluado en el crecimiento de plantas de tomate <i>Lycopersicon esculentum</i> a un pH de 4.0 en concentraciones crecientes de $AlCl_3$	46

Lista de Tablas

Tabla 1. Especiación química del Al total en el extracto saturado de un suelo que se le ha aplicado carbonato de calcio, carbonato de magnesio y yeso (modificado de Pavan y Bingham 1982).....	18
Tabla 2. Efecto del aumento de la concentración de $CaCl_2$ en los valores del potencial de aluminio en el suelo (Lindsay, 1979).....	20
Tabla 3. Crecimiento relativo de raíces de algodón en soluciones con diferentes concentraciones de aluminio y ácidos orgánicos según la clasificación de Hue <i>et al</i> (1986).....	23
Tabla 4. Modelos computacionales de equilibrio usados en investigación geoquímica. (Sposito, 2008).....	25
Tabla 5. Concentraciones totales de iones, pares iónicos y actividades de la solución del suelo iniciales y después de cada cálculo de especiación (Adams, 1971).....	28
Tabla 6. Tamaño de ión (a_j) en A° para la ecuación de Debye-Huckel.....	28
Tabla 7. Solución nutritiva de Hoagland para plantas de papa.....	38
Tabla 8. Efecto de la concentración y actividad del Al^{3+} en el crecimiento de plantas de tomate <i>Solanum Lycopersicun</i> en presencia de dos fuentes a un pH de 3,5.....	41
Tabla 9. Especies de aluminio presentes en solución, a partir de concentraciones variables de $Al_2(SO_4)_3$ y $AlCl_3$ a un pH de 3,5 evaluadas en plántulas de tomate <i>Solanum Lycopersicun</i>	43
Tabla 10. Especies de aluminio presentes en solución y efecto en la concentración de quistosoros, a partir de concentraciones crecientes de $Al_2(SO_4)_3$ y $AlCl_3$ a un pH de 3.5	44
Tabla 12. Especies de aluminio presentes en solución, a partir de concentraciones crecientes de $AlCl_3$ a un pH de 4,0 evaluadas en plantas de tomate <i>Solanum Lycopersicun</i>	47
Tabla 13. Efecto de la aplicación de concentraciones crecientes de $Al_2(SO_4)_3$, en el crecimiento de plantas de papa infectadas con quistosoros de <i>Spongospora subterranea</i>	48

INTRODUCCIÓN

La sarna polvosa de la papa disminuye la producción de tubérculos, decreciendo la producción de las plantas (Gilchrist *et al.*, 2009). La enfermedad es causada por el protozoo *Spongospora subterranea* forma especial *subterranea*, (Harrison *et al.*, 1997). La sarna polvosa afecta directamente la raíz de las plantas y los tubérculos disminuyendo el rendimiento y la calidad del producto. La sarna polvosa se ha expandido por todo el mundo y no existen tratamientos biológicos, químicos y/o naturales para su erradicación y control. El comercio de tubérculos, (semilla contaminada), ha alcanzado las principales zonas productoras de papa del mundo, y se ha consolidado por la ausencia de tratamientos efectivos (Harrison *et al.*, 1997; Merz, 2008; Merz y Falloon, 2009). Por la gran difusión de la enfermedad en las zonas productoras de papa, encontrar suelos no contaminados, en donde se quiera generar semilla no contaminada, requerirá expandir la frontera agrícola sobre áreas naturales. En regiones del mundo de gran biodiversidad como Colombia, esto puede ser poco probable, por lo que es prioritario investigar estrategias eficientes para detener la enfermedad, sin afectar zonas de vida o ecosistemas vulnerables, (Nakayama *et al.* 2007; Gilchrist *et al.* 2009), siendo la actividad toxica del Al^{+3} una estrategia de la reducción del porcentaje de infección y por ende limitar de esta forma su propagación e impacto ambiental.

El objetivo de este trabajo es investigar la manera cómo influye o cómo puede afectar la actividad toxica del Al^{+3} como ión libre en soluciones nutritivas, sobre la sarna polvosa en plántulas de tomate *Lycopersicon esculentum*, y plantas de papa *Solanum tuberosum* variedad Diacol Capiro, esta variedad es el huésped principal de la enfermedad (Gilchrist *et al.*, 2009; Merz, 2010). Las plantas de tomate son ideales para la propagación del patógeno y se considera la actividad del Al^{+3} como una alternativa para controlar el proceso de infección de *S. subterranea* en papa.

Existen dificultades técnicas teniendo en cuenta que el aluminio Al^{+3} como ión libre es tóxico para las plantas (Lee, 1971; Delhaize *et al.*, 1995; Amenós *et al.*, 2009), para el estudio es necesario establecer diferentes condiciones en el laboratorio y en el campo que permitan definir el efecto sobre la planta y así poder realmente conocer si la severidad de la infección disminuirá. Bajo estas circunstancias, se quiere comprobar que el Al^{+3} como ión libre, puede afectar la sarna polvosa y de esta manera disminuir su impacto sobre el crecimiento de las plantas y consecuentemente su diseminación.

Además es de vital importancia implementar modelos de análisis a nivel computacional como, SOILSOLN.BAS (Wolt, 1989), SPECIES (Barak, 1992); ya que la formación de iones complejos que el aluminio puede formar en la solución del suelo podría afectar los efectos que se esperan sobre el patógeno. De esta manera se podrá validar el comportamiento del aluminio Al^{+3} como ion libre en soluciones nutritivas y en la solución del suelo, en sus diferentes formas iónicas y también establecer las posibles asociaciones que podrá tener en cada una de sus actividades químicas específicas, que

como ion libre podría favorecer o afectar al patógeno o al hospedero (Lee, 1971; Delhaize *et al.*, 1995; Zapata, 2004; Parker, 2006; Amenós *et al.*, 2009).

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los efectos de la sarna polvosa en papa pueden causar una reducción de la producción de tubérculos del 40% (Gilchrist *et al.*, 2009), pero este porcentaje puede disminuir con el aumento de la concentración de ion libre Al^{+3} en la solución, ya que su actividad tóxica podría interferir con los efectos del patógeno sobre la planta (Gilchrist *et al.*, 2009). Sin embargo, Al^{+3} como ion libre en la solución del suelo es tóxico para las plantas (Lee, 1971; Zapata, 2004) aunque se han observado mecanismos de tolerancia (Delhaize y Ryan, 1992), adicionalmente el comportamiento químico característico del aluminio al formar iones complejos en la solución del suelo, podría ser una limitante de su actividad (Sposito, 2008). El patógeno *S. subterranea* no fue detectado en suelos con altas concentraciones Al^{+3} (Nakayama *et al.*, 2007). Esto sugiere que el aluminio puede ser tóxico para *S. subterranea*, como lo es para otros parásitos de la papa como *Phytophthora infestans* (Andrivon, 1995) y *Streptomyces scabies* (Mizuno y Yoshida, 1993). De esta forma, mantener una alta concentración de Al^{+3} como ion libre en la solución del suelo en niveles no tóxicos para la planta, podría formar parte de una estrategia de control de la sarna polvosa.

Para realizar el estudio bajo condiciones controladas de laboratorio se tendrá en cuenta la especiación del aluminio en la solución, condicionando su actividad de acuerdo al pH de la solución y su concentración en la forma de ion libre Al^{+3} (Sposito 2008; Fassbender 1982, Zapata 2004); se consideraran las plantas de tomate como una alternativa para reproducir la infección de *S. subterranea* (Merz, 1989). En este sistema, se ha estudiado la interacción de los quistosoros y las zoosporas, estructuras de resistencia y unidades infectivas, respectivamente de *S. subterranea* con las raíces de las plantas de tomate y se ha confirmado que afecta directamente la raíz de su huésped (Merz, 1997).

Qu *et al.* (2006), establecen en sus investigaciones que la infectividad de *S. subterranea* se da sobre plantas de tomate y tabaco. Utilizando cebadores específicos para *S. subterranea*, amplificaron secuencias de ADN por medio de una reacción en cadena de la polimerasa (Polymerase Chain Reaction, PCR) y confirmaron la existencia de plasmodios y zoosporangios en las raíces de las dos especies evaluadas.

Teniendo en cuenta que se ha confirmado desde años atrás y por varios grupos de investigación (Merz, 1997; Nilsen y Larsen, 2004; Qu *et al.*, 2006) que el tomate *Lycopersicon esculentum* es un hospedero adecuado que permite la investigación en laboratorio de la infección causada por *S. subterranea*, se evaluará el efecto del Al^{+3} como ión libre en soluciones nutritivas y en un suelo tipo Andisol (Jaramillo *et al.* 1994), se evaluará este efecto en papa *Solanum tuberosum* variedad Didacol capiro. Se espera obtener disminución de la infección de *S. subterranea*, en ambos sistemas sin afectar las plantas por el efecto del aluminio tóxico.

2. MARCO TEORICO

2.1. *Spongospora subterranea*.

Spongospora subterranea forma especial *subterranea*,) es un parásito obligado que necesita de las plantas para replicarse (Harrison *et al.* 1997). Esto determina una estrecha relación entre el parásito y el huésped (Figura 1), el ciclo de replicación comienza cuando sus zoosporas biflageladas, las cuales nadan en el agua del suelo, encuentran raíces y tubérculos para infectar (Merz, 1992). Previo a la infección, la zoospora se enquista, y penetra la célula del huésped con la ayuda de un aparato único en los Plasmodioforales, llamado “rohr” y “stachel” (Merz, 2008). Una vez dentro de las células vegetales, las zoosporas presentan una división nuclear cruciforme que origina un plasmodio multinucleado (Harrison *et al.*, 1997; Merz y Falloon, 2009). Los plasmodios generan nuevas zoosporas, denominadas primarias, las cuales se agrupan y enquistan formando una gruesa pared celular (Merz y Falloon, 2009) o pueden originar las zoosporas secundarias que diseminan la infección hacia otras raíces, estolones y tubérculos (Harrison *et al.*, 1997). Los grupos de zoosporas producidas en los plasmodios multinucleados se enquistan y forman grupos denominados quistosoros que deforman las células del huésped y originan las agallas y las pústulas en raíces y tubérculos, respectivamente (Harrison *et al.*, 1997). Los quistosoros son unidades de resistencia que pueden permanecer latentes entre 10 y 18 años como sugieren Merz *et al.* 2005 y Qu *et al.* 2006.

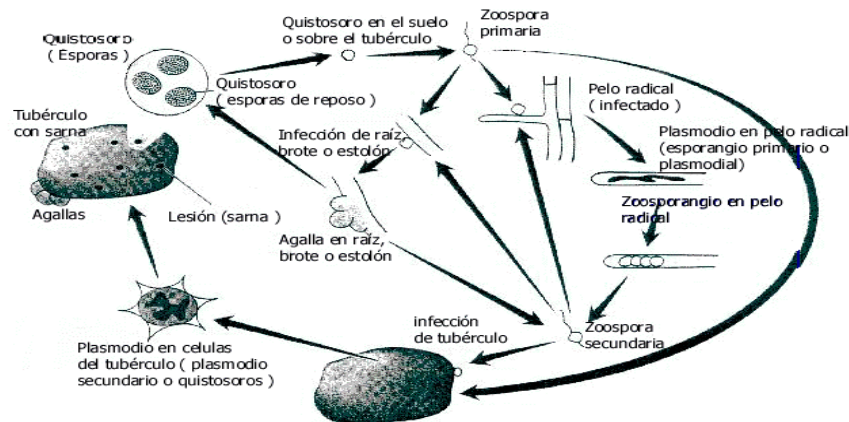


Figura 1. Ciclo de vida de *Spongospora subterranea* (modificado de Harrison *et al.*, 1997).

La sarna polvosa fue descubierta por primera vez en 1841 en Braunschweig, Alemania (Karling, 1942), siendo reportada en 1846 en el Reino Unido y en 1913 en Norteamérica (Harrison *et al.*, 1997). En Colombia, y en particular en Antioquia, es conocida desde 1937 (Castaño, 1978). En la actualidad, esta enfermedad se ha expandido por las principales zonas productoras de papa del mundo debido a la falta de tratamientos efectivos, al comercio de tubérculos-semilla infectados y al uso de suelos contaminados

EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS

(Harrison *et al.*, 1997; Merz, 2008; Merz y Falloon, 2009). En la figura 2 se muestran los países donde la sarna polvosa de la papa ha sido reportada.

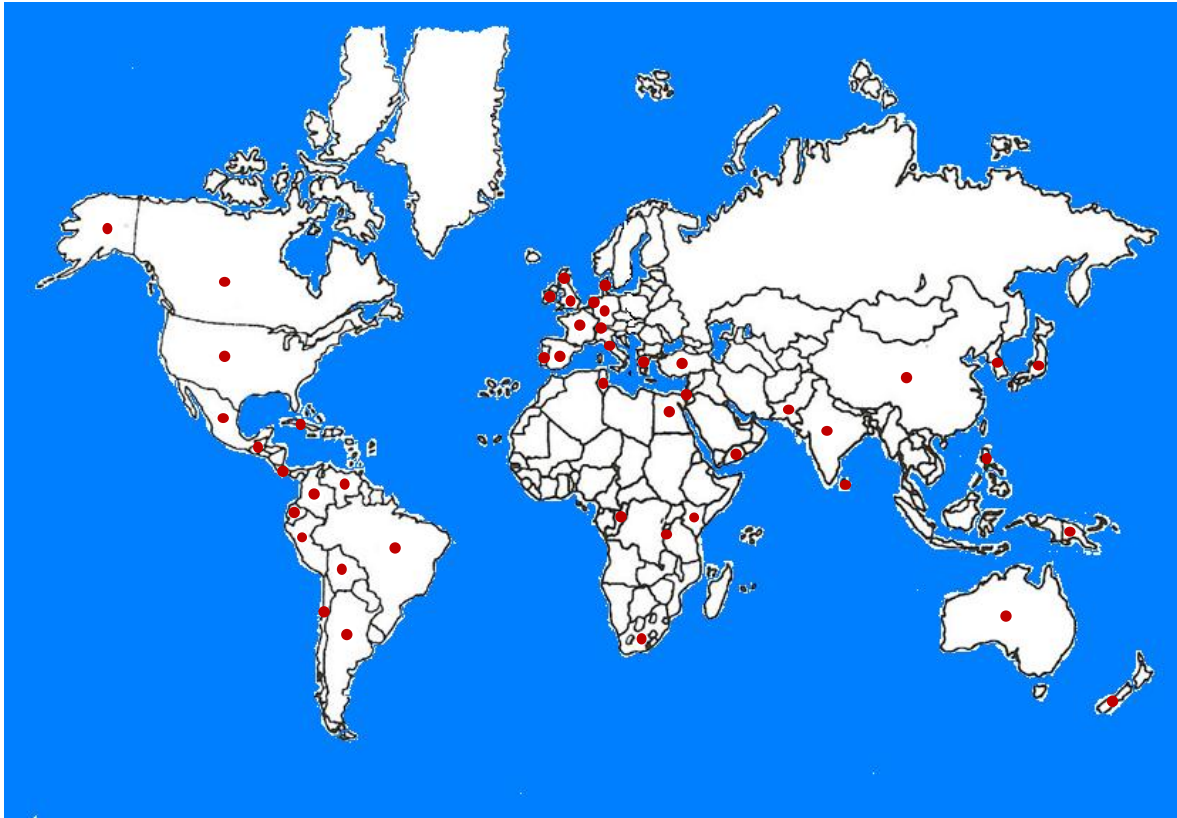


Figura 2. Países donde se ha reportado la sarna polvosa de la papa.

Según la Cadena Agroalimentaria de la papa de Colombia, la roña o sarna polvosa está dentro de los siete principales problemas fitosanitarios de las zonas productoras de papa en Colombia (Cevipapa, 2009). La sarna polvosa es la principal enfermedad del cultivo en los suelos del departamento de Antioquia, su presencia se ha registrado en los municipios de La Unión, Carmen de Viboral, Marinilla, San Vicente y Santa Rosa de Osos¹. La sarna polvosa causa daños directos sobre raíces y tubérculos e indirectos al transmitir el virus mop top de la papa (PMTV) (Jones y Harrison, 1969; Harrison *et al.*, 1997; Andersen *et al.*, 2002; Merz y Falloon, 2009), y favorece la entrada de otros microorganismos patógenos y oportunistas a los tubérculos (Karling, 1942; Falloon, 2008).

1. Comunicación personal de Sonia Jaramillo, miembro del grupo de investigación Biodes, experta en manejo del cultivo de la papa, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, 2010.

Las plantas de tomate han sido consideradas una alternativa para reproducir la infección de *S. subterranea* (Merz, 1989; 1997). Teniendo en cuenta que es una solanaceae, estudios realizados por Qu *et al.* (2006), confirman que las plantas de tomate y de tabaco son hospederos específicos que permiten que *S. subterranea*, infecte sus raíces promoviendo la multiplicación del plasmodio y favoreciendo la liberación de zoosporas, es decir cumpliendo con el ciclo infectivo de la enfermedad sobre su huésped, detectadas en las raíces por PCR sólo 2 días después de la inoculación.

2.2 EL ALUMINIO EN SOLUCIÓN.

El aluminio tóxico para las plantas es aquel que se encuentra en la solución del suelo como ion libre o complejo de solvatación ($(Al^{+3})(H_2O)_6$), el cual se ha tratado de correlacionar con el Al^{+3} intercambiable. La intensidad de la fitotoxicidad se ha visto que está altamente correlacionada con la actividad del Al^{+3} y no con la concentración (Adams y Lund, 1966; Lance Persons, 1969; Pavan y Bingham, 1982).

La actividad del Al^{+3} está asociado a la presencia de ligandos en la solución y del pH. Se ha encontrado que no existe un pH crítico único para todos los suelos por debajo del cual las raíces no crecen normalmente. Un nivel de pH que detenga el crecimiento de las raíces completamente en un suelo, puede tener poco o ningún efecto en su crecimiento en otro suelo. La concentración de H^+ no es un factor limitante en el crecimiento de las raíces de las plantas en suelos ácidos, cosa que se ha confirmado en estudios en soluciones nutritivas (Adams, 1971). La relación entre pH y actividad de Al^{+3} resulta de la especiación, ya que a un pH menor de 5.5 predomina la forma tóxica de aluminio en la solución como se observa en la figura 3.

Una forma muy generalizada para determinar la toxicidad de aluminio en el suelo es mediante la determinación del Al intercambiable, extraído con una solución de KCl 1N (Kamprath, 1970), representada por el grupo 2 de acidez (Zapata, 2002). Persons (1971) cree que estos valores no son útiles, debido a las diferencias entre suelos a los cuales ocurre toxicidad a un nivel dado de Al intercambiable. Los problemas de toxicidad de aluminio se visualizan más claramente cuando se relacionan con la actividad del Al^{+3} .

Un adecuado entendimiento de los mecanismos que controlan la distribución del aluminio entre las fases sólida y líquida del suelo es necesario para identificar los suelos con problemas de toxicidad de aluminio y determinar su manejo más adecuado. En la figura 3 se esquematizan las reacciones y procesos que tiene el Al^{+3} , ión libre, en la solución del suelo y en la forma como otros componentes del suelo interactúan con él.

El Al^{+3} en solución es un ion libre que actúa como ácido de Lewis solvatado con seis ligandos de H_2O formando el complejo $Al(H_2O)_6^{+3}$. Cuando se incrementa el pH, los protones son removidos de las aguas de coordinación dando una serie de productos de hidrólisis.

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

Igual sucede en presencia de otros ligandos. Por lo tanto el Al^{+3} no existe totalmente en solución como ion libre, sino que sufre una cantidad de reacciones en solución con las diferentes bases de Lewis, formando pares iónicos como lo muestran las siguientes reacciones:

- (1) $Al^{+3} + OH^{-} \leftrightarrow Al(OH)^{+2}$
- (2) $Al^{+3} + 2OH^{-} \leftrightarrow Al(OH)_2^{+}$
- (3) $Al^{+3} + 3OH^{-} \leftrightarrow Al(OH)_3^{\circ}$
- (4) $Al^{+3} + 4OH^{-} \leftrightarrow Al(OH)_4^{-}$
- (5) $Al^{+3} + SO_4^{-2} \leftrightarrow Al(SO_4)^{-}$
- (6) $Al^{+3} + SO_4^{-2} \leftrightarrow Al(SO_4)^{+}$
- (7) $Al^{+3} + F^{-} \leftrightarrow AlF^{+2}$
- (8) $Al^{+3} + 2F^{-} \leftrightarrow AlF_2^{+}$
- (9) $Al^{+3} + 3F^{-} \leftrightarrow AlF_3$
- (10) $2Al^{+3} + 2OH^{-} \leftrightarrow Al_2(OH)_2^{+4}$
- (11) $3Al^{+3} + 4OH^{-} \leftrightarrow Al_3(OH)_4^{+5}$
- (12) $13Al^{+3} + 28OH^{-} \leftrightarrow Al_{13}(OH)_{24}^{+7} + 4H^{+}$
- (13) $2Al(OH) + Si(OH)_4 \leftrightarrow (Al)_2(Si(OH)_3) + H_2O$
- (14) $2Al(OH) + H_2PO_4^{-} \leftrightarrow (Al)_2OH_2PO_3 + OH^{-}$

Las especies solubles de aluminio pueden ser divididas en dos grandes grupos: a) monómeros, reacciones desde (1) hasta (9) y b) polímeros, ecuaciones desde (10) hasta (14). La proporción soluble de cada especie en cada una de las categorías puede ser estimada termodinámicamente a través de su constante de equilibrio.

La concentración y actividad de Al^{+3} en la solución del suelo no solo depende de los mecanismos de distribución entre las fases sólida y líquida, sino también de su comportamiento en la solución con los ligandos presentes. El grado de complejación depende del pH y de la concentración relativa de los diferentes ligandos que esta tenga. Una idea aproximada de la habilidad de los ligandos solubles para complejar el Al^{+3} puede ser vista del ejemplo siguiente. Para la reacción:



La distribución relativa de especies es:

$$\frac{AlSO_4^{+}}{\{Al^{+3}\}(SO_4^{-2})} = 10^{3.2}$$

Esta expresión puede ser reordenada para expresar la relación entre las dos especies de Al.

$$\frac{AlSO_4^{+}}{Al^{+3}} = 10^{3.2} (SO_4^{-2})$$

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

La ecuación anterior indica que si la actividad del SO_4^{-2} es mayor de $10^{-3.2}$ M el par iónico $AlSO_4^+$ podría ser mayor del 50% del aluminio total soluble, (Al_t), disminuyendo de esta forma la toxicidad del Al^{+3} por la presencia de SO_4^{-2} . La presencia de ligandos disminuye la concentración de la forma tóxica Al^{+3} .

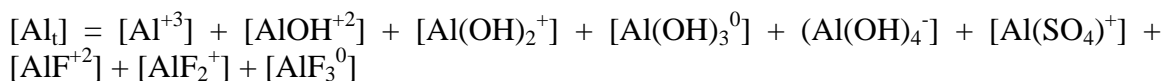
La actividad del Al^{+3} en la solución del suelo es el resultado neto de dos grupos generales de reacciones: a) competencia entre ligandos por el aluminio. Estos ligandos, bases duras de Lewis, (sulfatos, fosfatos, fluoruro, ácidos orgánicos, etc.) pueden estar solubles o adsorbidos en partículas sólidas y se precipitan formando compuesto de aluminio, b) Reacciones del aluminio intercambiable en competencia con otros cationes por los sitios de intercambio en los coloides.

Las formas monoméricas son predominantes a pH menor de 4 y a un pH cercano a 4.9, más del 80% del aluminio total soluble está hidrolizado. En la solución del suelo el grado de hidrólisis puede ser disminuida por la presencia de aniones como nitratos, cloruros y sulfatos (Lindsay, 1979) y de aniones orgánicos citrato, oxalatos, etc. (Stevenson, 1982; Kwong y Huang, 1977).

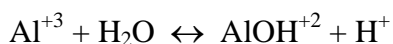
Los sulfatos, fosfatos y fluoruros decrecen la concentración total de aluminio soluble. La concentración de sulfatos debería ser menor que 10^{-3} M para disminuirlo en un 50%. Una concentración mayor de 0.1M debería ser necesaria para que todo el aluminio este como $AlSO_4^+$. La aplicación de fertilizantes fosfatados, cuando estos se fabrican con flouoroapatito, también puede aplicar fluoruros al suelo. En suelos no cultivados la concentración de F^- puede ser de 10^{-5} M, suficiente para reducir drásticamente la actividad del Al_t . La formación de complejos con ligandos orgánicos depende del tipo y concentración del anión orgánico, de la proporción de sitios para formar enlaces, del pH, de la fuerza iónica de la solución del suelo y de la presencia de otros cationes que pueden competir con el Al^{+3} (Stevenson, 1982).

Lindsay (1979), presenta el siguiente ejemplo de especiación del Al extraído con una solución 0.01M de $CaCl_2$. Se extraen 50 g de suelo con 100 ml de solución. Las concentraciones encontradas fueron de 0.05 ppm de Al, (F^-) = 10^{-5} M, (SO_4^{-2}) = 10^{-3} M y el pH de la solución fue de 6.3. La actividad del Al^{+3} en la solución y la del sólido que controla su actividad se calcula de la manera siguiente:

Las 0.05 ppm de Al se distribuyen entre las diferentes bases de Lewis (hidroxilos, sulfatos y fluoruros) presentes en la solución y como Al^{+3} libre según lo muestra la ecuación:



Cada uno de los sumandos a la derecha de la ecuación se pueden remplazar por la respectiva constante, la concentración del Al^{+3} libre y la concentración de la base, de la forma siguiente:



**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

$$K_1 = \frac{(AlOH^{+2})}{(Al^{+3})(H^+)}$$

$$(AlOH^{+2}) = K_1(Al^{+3})(H^+)$$

$$[AlOH^{+2}] = (AlOH^{+2})/\gamma$$

$$[AlOH^{+2}] = (AlOH^{+2})/\gamma = K_1(Al^{+3})/(H^+)$$

Donde γ es el coeficiente de actividad de la especie.

Al remplazar en la ecuación por cada uno de las especies:

$$[Al^{+3}] = \frac{(Al^{+3})}{\gamma} + \frac{10^{5.02}(Al^{+3})}{\gamma(H^+)} + \frac{10^{9.30}(Al^{+3})}{\gamma(H^+)^2} + \frac{10^{14.99}(Al^{+3})}{\gamma(H^+)^3} + \frac{10^{23.33}(Al^{+3})}{\gamma(H^+)^4}$$

$$+ \frac{10^{6.98}(Al^{+3})(F^-)}{\gamma} + \frac{10^{12.60}(Al^{+3})(F^-)^2}{\gamma} + \frac{10^{16.65}(Al^{+3})(F^-)^3}{\gamma} + \frac{10^{3.20}(Al^{+3})(SO_4^{2-})}{\gamma}$$

El coeficiente de actividad en el denominador es diferente para cada una de las especies de la ecuación.

A la ecuación se le extrae el factor común (Al^{+3}) y se despeja:

$$(Al^{+3}) = \frac{[Al_{total}^{+3}]}{REM}$$

$$REM = \frac{1}{\gamma} + \frac{10^{5.02}}{\gamma(H^+)} + \frac{10^{9.30}}{\gamma(H^+)^2} + \frac{10^{14.99}}{\gamma(H^+)^3} + \frac{10^{23.33}}{\gamma(H^+)^4}$$

$$+ \frac{10^{6.98}(F^-)}{\gamma} + \frac{10^{12.60}(F^-)^2}{\gamma} + \frac{10^{16.65}(F^-)^3}{\gamma} + \frac{10^{3.20}(SO_4^{2-})}{\gamma}$$

La ecuación anterior se utiliza para calcular la actividad del Al^{+3} en la solución extractora:

Para los valores dados de actividades de (F^-), (SO_4^{2-}) y (H^+) = 10^{-pH} se tiene:

$$(Al^{+3}) = 10^{-9.78}M.$$

Para identificar la fase sólida que controla la actividad del Al^{+3} en este suelo se calcula el potencial de aluminio:

$$\text{Log}(Al^{+3}) + 3pH = K$$

$$\text{Log}(10^{-9.78}) + 3 \times 6.3 = 9.12$$

Este valor de potencial de aluminio es intermedio entre el valor que produce la gibsitita ($\text{Log } 8.04$) y un hidróxido de aluminio amorfo ($\text{Log } 9.66$).

Los ácidos húmicos y fúlvicos tienen una alta capacidad de complejar el Al^{+3} . Esta capacidad complejante se debe a la cantidad de grupos ácidos que al desprotonarse facilitan la formación de enlaces con el Al^{+3} . Es por esto que al aumentar el pH la

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

capacidad complejante de las sustancias húmicas aumenta (McBride, 1994). El calcio, cuando está en mayor concentración que el aluminio, compite por los humatos (Stenvenson, 1982). Algunos aniones orgánicos que están unidos al aluminio pueden desaparecer en el tiempo, ya que la parte orgánica puede ser destruida por los microorganismos. Lo anterior hace que el aluminio precipite como hidróxido, si el pH del suelo es mayor a 5.5.

El aluminio puede formar polímeros con los hidroxilos, con los fosfatos y con los silicatos. Las posibilidades de reacción son bien conocidas, pero sus mecanismos aún no son bien entendidos (McBride, 1994; Sposito, 1989). La ocurrencia y formas de los polímeros de aluminio parecen estar afectadas por el pH, la presencia de otros iones, el grado y método de neutralización, la temperatura y el tiempo de maduración del polímero (Hsu, 1977). La formación de hidroxipolímeros de aluminio y fosfato ocurre en un rango de pH entre 4.1 y 4.8 y concentraciones de Al y fosfato menores que 25 μM y menos de 910 μM , respectivamente. Los silicatos de aluminio pueden ocurrir a pH menor de 5.5. En un rango entre 4.0 y 5.6 ya que el $Si(OH)_4$ solo reacciona con formas hidroxiladas de aluminio (Hsu, 1977).

El cálculo de las diferentes especies que forma el ión Al^{+3} en solución es prácticamente imposible de determinar manualmente. Ejemplo de este tipo de cálculo realizado manualmente, sacrificando un poco la precisión, lo presenta Adams (1971). Actualmente, con la ayuda de los programas ya mencionados (GECHEM, SOILSOLN, SPECIES, MINTEQUA), es posible hacer la especiación de los componentes de una solución del suelo o de un extracto acuoso. Los datos necesarios para hacer las especiaciones químicas provienen del análisis de los componentes iónicos de la solución. Es necesario que la suma de cationes sea ligeramente igual a la suma de aniones. Desviaciones de esta diferencia produce errores termodinámicos que invalidan los resultados. Pavan *et al* (1984) hace la especiación del extracto saturado de dos suelos con aplicaciones de cal y yeso que les han aplicado cal y yeso, los datos se presentan en el tabla 1.

El suelo con el tratamiento con yeso tuvo la concentración más alta de Al^{+3} total, con un 36% de la forma tóxica Al^{+3} , menor que en el suelo que no tuvo ningún tratamiento. El sulfato que aporta el yeso compleja al Al^{+3} como $AlSO_4^+$ y lo lleva a una forma no tóxica. Cuando al suelo se le aplican carbonatos disminuye la actividad del Al^{+3} y se forman especies hidrolizadas como $Al(OH)_3$ insolubles. La toxicidad de aluminio es eliminada cuando el pH aumenta o cuando se aplican ligandos inorgánicos u orgánicos. Por lo que el encalamiento, la adición de yeso o fosfatos, de materia orgánica y de enmiendas silíceas solubles eliminan la toxicidad del Al^{+3} .

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

Tabla 1. Especiación química del Al total en el extracto saturado de un suelo que se le ha aplicado carbonato de calcio, carbonato de magnesio y yeso (modificado de Pavan y Bingham 1982).

Tratam.	Al^{+3} total	Al^{+3}	$AlSO_4^+$	$AlOH^{+2}$	$Al(OH)_2^+$	$Al(OH)_3^0$	Al-P
	μmoles/Litro						
Ninguno	58.9	31.9	2.5	6.0	0.9	0	16.5
$CaCO_3$	44.0	12.7	0	3.1	2.2	1.1	24.8
$MgCO_3$	18.6	5.0	0.5	0.6	0.6	1.2	10.7
Yeso	70.8	26.0	25.6	5.5	1.4	0	12.2

Al-P representa $AlH_2PO_4^{+2}$ y $AlHPO_4^+$

Uno de los más importantes desarrollos recientes de la Química de Suelos ha sido el poder entender el destino de los iones presentes en el suelo o aportados a este. Es así como, la composición de la solución del suelo y de las aguas de drenaje son un fiel reflejo de los procesos representados en la figura 3. Por ejemplo, el Al^{+3} en la solución, liberado de los minerales primarios por la meteorización, puede estar en equilibrio con la forma intercambiable, o precipitar formando compuestos insolubles como gibsita, variscita, jurbanita, etc.

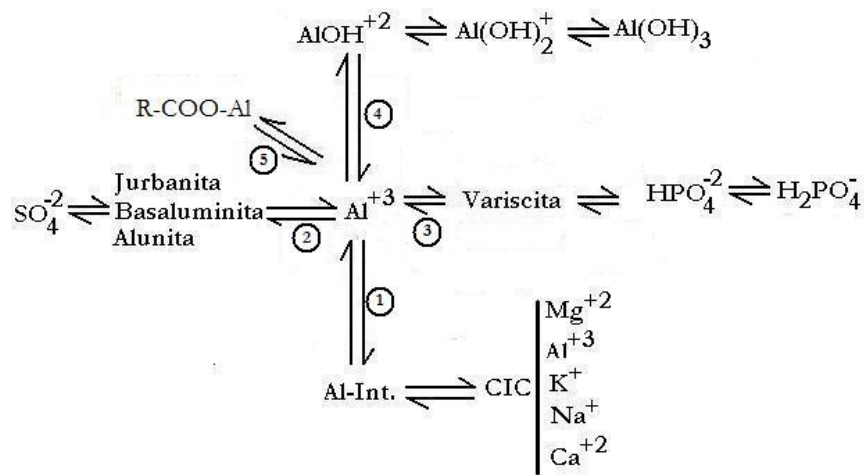


Figura 3. Distribución del aluminio en la solución del suelo en suelos ácidos. Los números identifican procesos de intercambio (1), precipitación (2, 3 y 4) y complejación con materia orgánica (5).

Los procesos esquematizados en la figura 3 pueden estar representados por las siguientes reacciones:

1.- Reacciones de equilibrio de intercambio:

Los iones de la solución del suelo están en equilibrio con los iones adsorbidos o intercambiables. En la figura 4 se grafica el Al intercambiable en función de la actividad

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

del Al^{+3} en la solución del suelo y se obtiene una relación del aluminio y los diferentes ambientes químicos. Para explicar esta relación se puede usar el modelo de la doble capa difusa o modelo de Boltzmann (Lindsay, 1979):

$$(Al^{+3})_{Soluc.} = (Al^{+3})_{interc.} \exp \frac{3\varepsilon\psi_s}{\kappa T}$$

Donde $(Al^{+3})_{Soln}$ y $(Al^{+3})_{Intr}$ son las actividades del Al en solución e intercambiable, respectivamente. ε es la constante dieléctrica del medio, ψ_s es el potencial eléctrico superficial y κ es la constante del Boltzmann.

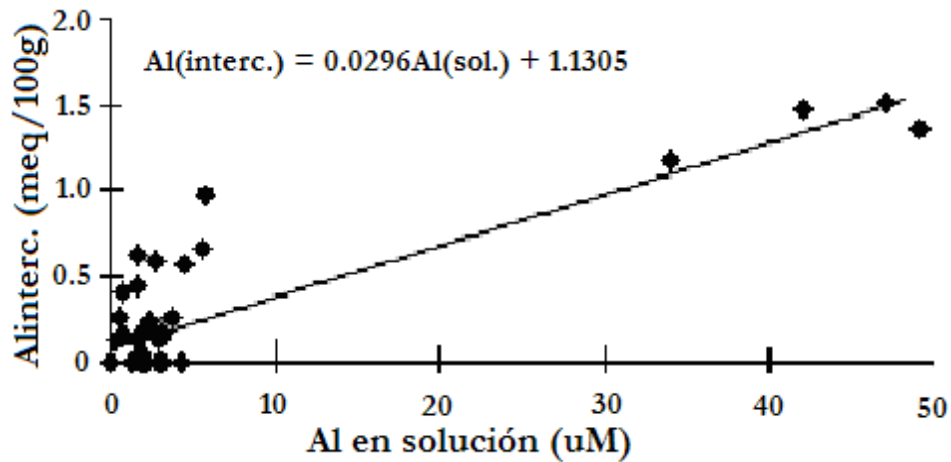


Figura 4. Relación entre el Al^{+3} en la solución del suelo y el Al intercambiable en tres Ultisoles venezolanos (Zapata, 1988).

Aplicando la ecuación de la doble capa difusa al intercambio Al^{+3} y H^+ y asumiendo que el potencial superficial no cambia se tiene:

$$\frac{(Al^{+3})_{Intrec.}^{1/3}}{(H^+)_{Interc.}} = \frac{(Al^{+3})_{soluc.}^{1/3}}{(H^+)_{soluc.}}$$

Tomando el logaritmo al lado derecho de la ecuación la relación queda de la forma siguiente:

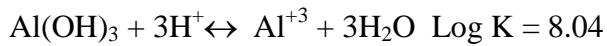
$$\log \frac{(Al^{+3})}{(H^+)} = \log Al^{+3} + 3pH$$

Lo anterior significa que en un suelo se debe mantener constante la relación o el potencial aluminico, hasta tanto la relación entre las actividades de Al^{+3} y de H^+ en el coloide, se mantenga constante o no cambie apreciablemente (Lindsay, 1979; Sposito, 1981, Schofield, 1947). Estas actividades tenderán a mantenerse constantes, si el equilibrio no es perturbado al modificar las actividades de los iones, por la presencia de una fuente diferente de aluminio. Lindsay (1979), comprobó la constancia de la ecuación. Para tal fin equilibró un suelo ácido con soluciones de normalidad creciente de $CaCl_2$ y determinó

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

el valor del potencial aluminico, como se muestra en la tabla 2. Cuando la fuente de aluminio en el suelo cambia, el potencial aluminico igualmente cambia.

Lindsay (1979) confirmo la tendencia de los suelos de mantener un valor constante del potencial de aluminio como lo predice el modelo de Boltzmann. En el supuesto caso que este presente gibsita como el solido que controla la actividad del Al^{+3} , el potencial aluminico tendria un valor de:



$$\text{Log Al}^{+3} \text{ pH} = 8.04$$

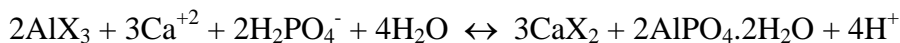
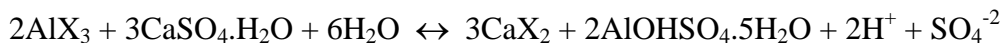
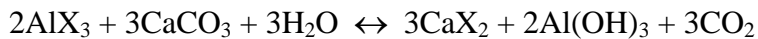
Los valores de potencial de aluminio del cuadro muestran que esta insaturado con relacion a la gibsita, lo cual sugiere que es un mineral mas soluble que la gibsita que controla la actividad del aluminio en la solucion del suelo.

Tabla 2. Efecto del aumento de la concentracion de $CaCl_2$ en los valores del potencial de aluminio en el suelo (Lindsay, 1979).

$CaCl_2$ (mM)	pH	(Al^{+3}) (mM)	$\text{LogAl} + 3\text{pH}$
1	3.94	0.09	7.55
5	3.79	0.39	7.55
10	3.75	0.68	7.55
50	3.71	1.77	7.55
100	3.70	2.37	7.51

2.- Reacciones de precipitacion.

En suelos acidos la adiccion de sales o bases portadoras de bases de Lewis, reaccionan con el Al^{+3} presente en la solucion del suelo y en equilibrio con la forma intercambiable. Las reacciones pueden ser las siguientes, tomando al coloide (X) como un anion monovalente con una carga negativa por mol:

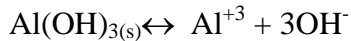


Cuando a un suelo acido se le adiciona carbonato, sulfato o fosfato de calcio, se presentan las anteriores reacciones respectivamente, cada reaccion sucedera completamente como resultado de la formacion de un compuesto insoluble como la gibsita, la jurbanita o la variscita, respectivamente. El remplazo del aluminio intercambiable por el calcio es virtualmente completo por lo insolubles que resultan los compuestos precipitados, es decir, la reaccion se desplaza completamente a la derecha. En la reaccion se forman complejos solubles como, $(Al(OH)^+)$ y no compuestos insolubles. La diferencia radica en

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

los tipos de bases de Lewis que son los sulfatos, los hidroxilos y los cloruros, y en este caso, el $CaCl_2$ resulta ser un pobre corrector de la toxicidad del aluminio intercambiable.

Los minerales que tengan los mayores potenciales químicos determinaran las concentraciones de cada uno de los iones que los conforman (Sposito, 1989). En el caso de la disolución de gibsita:



La constante de solubilidad, K_{so} , de esta reacción sería:

$$K_{so} = 10^{-34} = (Al^{+3})(OH)^3$$

Las actividades reales del Al^{+3} y el OH^- definen el Producto de Actividad Iónico (PAI) de la solución:

$$PAI = (Al^{+3})(OH)^3$$

La saturación relativa de la solución o del agua de drenaje con respecto a la precipitación de la gibsita está dada por la relación PAI/K_{so} . Esta relación se define como el Índice de Saturación (IS) e indica, para el caso de la gibista, el grado de saturación del Al^{+3} y del OH^- en la solución:

$PAI/K_{so} > 1$ Solución supersaturada con respecto al compuesto seleccionado (K_{so})

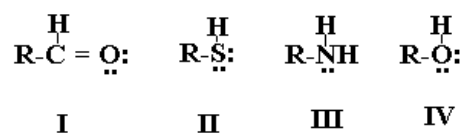
$PAI/K_{so} = 1$ Solución saturada con respecto al compuesto seleccionado (K_{so})

$PAI/K_{so} < 1$ Solución insaturada con respecto al compuesto seleccionado (K_{so})

Los índices de saturación se pueden calcular para diferentes sólidos y de esta forma conocer qué tipo de mineral está controlando la actividad de un ion. Otra lectura que se le puede dar al Índice de Saturación es poder confirmar si determinado mineral está presente en el suelo.

3.- Reacciones de complejación.

El humus del suelo contiene una cantidad y variedad de grupos ácidos, algunos de los cuales tienen especificidad por la complejación del Al^{+3} (Stevenson, 1982). Ejemplos de ligandos en la materia orgánica del suelo con pares de electrones libres para formar enlaces covalentes con los cationes metálicos están representados por las estructuras químicas: I, II, III y IV (Stevenson, 1982).



Los grupos carbonilos son los complejantes más eficientes. El orden de decrecimiento de afinidad de ligandos orgánicos por los cationes es el siguiente:

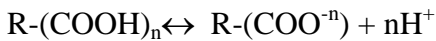
**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**



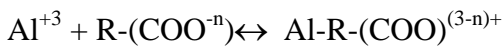
En la reacción de complejación por grupos carbonilos influyen las siguientes condiciones:

- El valor de la constante de acidez (K_a) de los grupos funcionales. Entre menor sea el pK_a mayor es el grado de disociación.
- La estabilidad del enlace depende del tipo de base de Lewis del agente complejante. Generalmente los grupos fenólicos forman enlaces más estables con el Al^{+3} que los grupos ácidos carboxílicos.

En el proceso de complejación se requiere que los grupos ácidos estén disociados:



Los ligandos orgánicos (COO^{-n}) forman uno o más enlaces de coordinación con el Al^{+3} :



La reacción completa de complejación es:



La constante condicional de complejación es:

$${}^c K = \frac{(Al-R-(COO)^{(3-n)+})(H^+)^n}{(Al^{+3})(R-(COOH)_n)}$$

La forma logarítmica de la constante condicional sería igual a:

$$\text{Log } {}^c K = \text{Log} \frac{(Al-R-(COO)^{(3-n)+})}{(R-(COOH)_n)} = pAl - npH$$

El cociente entre las forma disociada y no disociada del ácido orgánico podría tomarse constante para un caso particular de las sustancias húmicas de un suelo dado. Tomando lo anterior como cierto la ecuación queda de la forma:

$${}^c K' = pAl - npH$$

${}^c K'$ es una constante definida por los parámetros del lado derecho de la ecuación. McBride (1994) reporta valores de n igual a dos para una variedad de estudios de solubilidad de Al . Esto sugiere que el catión forma complejos con un grupo funcional que tiene dos protones disociables o con dos bases, cada una con un protón.

Comparando la solubilidad de la gibsit, con la solubilidad del Al en las aguas de recogida en los lisímetros, cuadro 5.10, permite suponer que quien controla la solubilidad de este catión es una reacción de complejación. Y se explicaría porque la actividad del Al^{+3} está sobresaturada con relación a la gibsit, como se observó en la figura 5.9.

$$8.3 = pAl - 3pH$$

EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS

$$C_K' = pAl - npH$$

Hay una marcada evidencia de la presencia de ligandos, tanto orgánicos como inorgánicos y bases de Lewis que reducen la toxicidad de aluminio (Adams y Lund 1966, Pavan y Bingham, 1982). Esta disminución de la toxicidad es debida a la acción que estos ligandos ejercen sobre la actividad del Al^{+3} . (Sposito, 1989).

Hue *et al* (1986) clasificaron los ácidos orgánicos según el efecto sobre la eliminación de la toxicidad del Al^{+3} en: fuerte (cítrico, oxálico, tartárico) ver figura 5, moderado (málico, malónico, salicílico) y débil (succínico, láctico, fórmico, acético, ptálico). Esta clasificación se basa en la capacidad que tienen los ligandos de formar complejos polidentados. El efecto de estos ácidos sobre el crecimiento de raíces de algodón se presenta en el tabla 3.

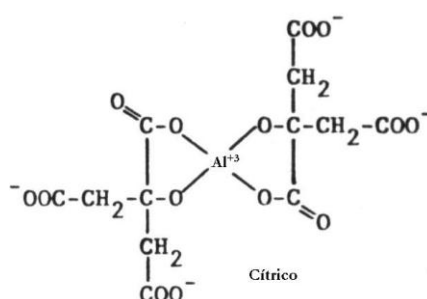


Figura 5. Estructura del quelato de Al^{+3} con el ácido cítrico.

Tabla 3. Crecimiento relativo de raíces de algodón en soluciones con diferentes concentraciones de aluminio y ácidos orgánicos según la clasificación de Hue *et al* (1986).

Concentración orgánicos ($\mu\text{mol/L}$)	Ácidos	Crecimiento de raíces (%)*	Concentración Al (μmolL^{-1})
Cítrico (fuerte)			
5		90c**	57b
10		102c	87b
25		105 ^a	96a
50		97 ^a	100a
Málico (moderado)			
10		72c	60b
25		98c	75b
50		103c	85b
Succínico (débil)			
10		55c	46b
25		60b	44a
50		64c	44b

*El (%) es calculado con relación al blanco sin aluminio.

**Números seguidos por la misma letra en la columna no son significativamente diferentes al 5% de probabilidad.

2.3 EQUILIBRIOS DE ESPECIACIÓN.

La formación de complejos solubles y sus disociaciones, es en general, considerado un proceso instantáneo en las aguas naturales (Sposito, 1989). Complejos soluble como CH_2COOFe^{+2} tiene una vida media de formación de 20 segundos, $FeCl^{+2}$ de 11 segundos, y AlF^{+2} de 3 segundos de vida media. Debido a esta rapidez de formación de los complejos solubles se puede aplicar los conceptos de equilibrio químico.

La determinación de las actividades, o concentración, de los iones libres de la solución proveen una herramienta muy útil para conocer las reacciones químicas dadas en ella. Únicamente al H^+ , se le puede determinar directamente su actividad, utilizando electrodos, para los demás iones se deben hacer cálculos a través de aproximaciones matemáticas.

Los pasos necesarios para calcular la actividad son varios, (1) se inicia con el análisis de la solución, (2) se identifican las especies más importantes que se forman, (3) se redefinen las ecuaciones químicas de estas especies y se aplica un método matemático para resolver estas ecuaciones. Todos los cálculos se pueden hacer a mano, pero actualmente se tienen programas que facilitan esta operación. Más adelante se presenta el ejemplo de un cálculo de actividades para que se comprenda mejor el concepto de actividades.

Los análisis químicos más comunes que se le hacen a la solución son: pH, y las concentraciones totales de carbono orgánico disuelto (COD), Si, K, Na, Ca, Mg, Al, NH_4 , F^- , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{-2} , HCO_3^- , CO_3^{-2} y PO_4^{-2} . Adicionalmente, la alcalinidad (HCO_3^- , CO_3^{-2}) puede ser calculada por titulación. A menudo, en la solución son también analizados los elementos trazas, incluyendo a Fe, Mn, Pb, Zn y Cu. Para minimizar los cambios que pueden tener la solución, está es analizada inmediatamente después de muestreada, particularmente son muy sensibles los parámetros pH, alcalinidad, COD, Al, F, NH_4 , NO_3 y PO_4 .

Los solutos analizados generalmente consisten de un número de especies, los cuales a menudo difieren en su composición. Por lo que es muy común hacer la respectiva especiación de ellos, siendo necesario determinar la actividad de todos los iones presentes en la solución, necesaria para determinar las sustancias que controlan la solubilidad en la solución.

Un catión en la solución puede formar con los diferentes ligandos una amplia variedad de especies debido a reacciones de hidrólisis, complejación y óxido reducción. Los métodos de análisis solo determinan la concentración total del ion en la solución, es necesario calcular su actividad de ion libre en la solución por procedimientos termodinámicos. Esto es posible a través de la aplicación de asociación iónica o de modelos de especiación (Stumm y Morgan, 1996; Sposito y Mattigod, 1980; Wolf, 1994).

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

La complejidad de la química de la solución, es el resultado de los numerosos equilibrios simultáneos generados. Por ejemplo el ión Ca^{+2} en solución está en equilibrio simultáneo con complejos sólidos como: $CaHPO_4 \cdot 2H_2O_{(s)}$, $CaCO_{3(s)}$, $CaSO_4 \cdot 2H_2O_{(s)}$, en intercambios eléctricos con Ca^{+2} en el complejo de cambio y con pares iónicos como $CaHPO_4$, $CaCO_3^\circ$, $CaCl_2^\circ$ y $Ca(NO_3)^\circ$. Es así como la actividad del Ca^{+2} en solución es afectado por otros electrolitos. Esta interacción es obviamente muy compleja. Sin embargo cuando se conoce la actividad del ión en la solución, todos sus equilibrios son definibles con ayuda de las constantes termodinámicas de los equilibrios. El uso de programas de especiación son de gran ayuda para establecer la interacción (tabla 4):

Tabla 4. Modelos computacionales de equilibrio usados en investigación geoquímica (Sposito, 2008).

Modelos de especiación química	Modelos de especiación química
REDEQL (McDuff <i>et al.</i> , 1973) 1 and Morgan)	WATCHEM (Barnes y Clarke, 1969)
REDEQL2(McDuff <i>et al.</i> , 1973) 1 and Morgan)	WATEQ (Truesdall y Jones, 1974)
MINEQL (Westall <i>et al.</i> , 1976)	WATEQ2 (Ball <i>et al.</i> , 1979)
GEOCHEM (Sposito y Mattigod, 1980)	WATEQ3 (Ball <i>et al.</i> , 1981)
GEOCHEM-PC (Parker <i>et al.</i> , 1995)	SOILCHEM (Sposito y Coves, 1988)
REDEQL.EPA (Ingle <i>et al.</i> , 1978)	MINTEQ (Felmy <i>et al.</i> , 1984)
MICROQL (Westall, 1979)	REDEQL.UMD. (Harris <i>et al.</i> , 1981)

La determinación de la actividad, o concentración, de los iones libres de la solución provee una poderosa herramienta interpretativa de las reacciones químicas en el suelo. Solo un limitado número de actividades se pueden determinar directamente en la solución, es el caso de pH, pero el resto tienen que ser determinados a través de cálculos de aproximación. Los pasos necesarios para la determinación de la actividad de un ion incluye la obtención y análisis de la solución, identificación de las especies relevantes que se pueden formar, arreglo de las ecuaciones de equilibrio con sus respectivas constantes, y las reacciones de formación de las especies. Posteriormente, la solución analítica de la serie de ecuaciones generadas y el cálculo de las actividades. Ejemplo de la solución manual de las ecuaciones para el cálculo de actividad se dan más adelante.

El problema central del análisis termodinámico de los iones en solución es controlar la concentración del ión de interés. De la termodinámica se sabe que la fase sólida que controla la actividad de un ión es aquella que produce el valor más pequeño de actividad de éste en la solución. Esto es debido a que el potencial químico del ión es más pequeño mientras más pequeña sea su actividad. La fase sólida es capaz de producir la más pequeña actividad en la solución del suelo, siendo el reservorio más estable del ión, como precipitado. La tendencia del ión es a difundirse a la región de menor potencial químico.

El procedimiento general para disoluciones con un mayor número de electrolitos es:

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

- 1- Se escriben las ecuaciones de balance de masa para cada ligando (anión y catión) en términos de todas las especies conocidas que experimentalmente se sabe que existen en una solución.
- 2- Se escribe la reacción química para cada una de las especies y su correspondiente constante de estabilidad.
- 3- Se escriben las ecuaciones de balance de masa en función de las constantes de estabilidad, concentración total de los ligandos, concentración libre de los cationes y pH. Lo cual producen un grupo de ecuaciones algebraicas no lineales.
- 4- Estas ecuaciones tienen que ser resueltas numéricamente para cada ion libre y para cada coeficiente de distribución. Luego se calcula la actividad de cada especie en solución. Este procedimiento se hace sencillo con ayuda de computadores.

Los datos de entrada de GEOCHEM (Sposito y Mattigod, 1980) y otros programas, son básicamente de concentración de cationes, ligandos y el pH de la solución. Si se desea, la solución se puede tratar como un sistema abierto, especificando la presión de los gases que están en equilibrio con la solución (CO_2 , N_2 , O_2) y en algunos casos, las condiciones redox. En alguna parte del programa se almacenan las constantes termodinámicas necesarias para el cálculo. GEOCHEM almacena estos constantes de equilibrio en condiciones normales para combinaciones entre 36 cationes y 64 ligandos que son de interés en la solución del suelo.

SPECIES (Barak, 1990) es un programa para enseñar los equilibrios en la solución del suelo, en lo que tiene que ver con la actividad de los iones y sus especies. El programa es escrito en una hoja de cálculo que puede ser usada en LOTUS 123 u otro programa similar. El programa es fácil de manipular, SOILSOLN (Wolt, 1989) es un programa con características similares a SPECIES, escrito en lenguaje Básico.

Con la información obtenida del análisis de la solución del suelo, se puede conocer la fase sólida que controla la actividad de unos iones en ella. Con el valor de actividad encontrado, además, de otra variable relevante, por ejemplo el pH, se puede ir a un diagrama de relación de actividades o a un diagrama de predominancia y determinar el sólido, que al solubilizarse, produce la actividad del ion medido en la solución del suelo.

Otra forma de presentar la información obtenida en el análisis termodinámico de la solución del suelo, consiste en graficar la actividad del ion libre y de las demás especies que el ion forma en solución versus al valor de pH. Este diagrama se llama Diagrama de solubilidad (Sposito, 1981; Lindsay, 1979).

Los programas para el cálculo de actividades de especies en la solución del suelo, generalmente, tienen una salida que presenta información del porcentaje en que se distribuye la concentración total del metal en forma libre y en las demás especies. Si el programa se corre a distintos valores de pH estos porcentajes cambian. Al graficar se produce el diagrama de solubilidad respectivo.

Para calcular la actividad del Al^{+3} es necesario tener el análisis de los aniones y cationes en la solución y mediante el uso de un programa, ver tabla 4. Se realiza la especiación;

EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS

que consiste en identificar cada una de las especies químicas, iones libres y pares iónicos en la solución (Sposito, 1989).

Adams (1974), presenta un esquema paso a paso para ilustrar como se calcula la actividad del ion libre usando la composición analítica de una solución. Es un ejercicio interesante que ayuda a entender cómo funcionan los programas de especiación.

Los análisis totales de aniones y cationes de la solución del suelo se presentan en la Tabla 5. La concentración de fosfato es muy baja para haberla medido. Se supone que la concentración catiónica está balanceada por los aniones: SO_4^{-2} , Cl^- y NO_3^- .

Paso 1: Cálculo de la fuerza iónica (I).

La fuerza iónica inicialmente se mide asumiendo que se tiene la concentración iónica verdadera. La fuerza iónica se calcula con la ecuación:

$$I = 0.5 \sum C_i Z_i^2$$

Con los datos de la tabla 5 se calcula la fuerza iónica:

$$I = 0.5 (1.76(2)^2 + 0.74(2)^2 + 2.44(2)^2 + 2.61 + 5.00 + 15.49 + 1(2)^2 + 0.419(3)^2) = 23.6 \text{ mM}$$

$$I = 0.0236 \text{ M}$$

Paso 2: Cálculo de los coeficientes de actividades.

El coeficiente de actividad de cada ion f_i , se calcula con la ecuación de Devye-Huckel o con la de Davies (Sposito, 1989):

$$\text{Log}f_i = \frac{AZ^2\sqrt{I}}{(1 + Ba\sqrt{I}_i)}$$

Donde A y B son constantes dependientes de la temperatura, a_i es un parámetro dependiente del tamaño del ion (Adams, 1971) y están dados en el Tabla 6.

La actividad del ión i, (i) se calcula con la ecuación:

$$(i) = f[i]$$

donde [i] es la concentración de cada ión. Para el Ca^{+2} el cálculo de actividad es:

$$-\text{Log}f_{Ca} = \frac{0.509(2)^2\sqrt{0.0236}}{1 + 0.325(6)\sqrt{0.0236}} = 0.241$$

$$f_{Ca} = 0.574$$

$$(Ca^{+2}) = 0.574 \times 1.76 = 1.01 \text{ mM}$$

Las demás actividades de los iones libres calculadas de igual forma se encuentran en las columnas adicionales en la tabla 5.

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

Tabla 5. Concentraciones totales de iones, pares iónicos y actividades de la solución del suelo iniciales y después de cada cálculo de especiación (Adams, 1971).

Especie	1ra aprox		2da aprox		Aprx.final	
	Conc	Actividad	Conc.	Actividad	Conc.	Actividad
pH		4.85		4.85		4.85
Ca^{+2}	1.76	1.01	1.65	1.96	1.68	0.98
Mg^{+2}	0.74	0.44	0.70	0.42	0.71	0.43
Mn^{+2}	2.44	1.41	2.29	1.34	2.33	1.35
K^{+}	2.61	2.23	2.60	2.23	2.60	2.23
NH_4^{+}	5.00	4.26	4.97	4.25	4.98	4.26
$NO_3 + Cl^{-}$	15.49	13.25	15.49	13.30	15.49	13.29
SO_4^{-2}	1.00	0.55	0.66	0.37	0.75	0.42
Al^{+3}	0.0419				0.0255	0.0085
I (M)	0.0236		0.0221		0.0225	
$CaSO_4^{\circ}$		0.11		0.08		0.08
$MgSO_4^{\circ}$		0.04		0.03		0.03
KSO_4^{-}		0.15		0.11		0.11
$NH_4SO_4^{-}$		0.01		0.01		0.01
$AlSO_4^{+}$				0.0057		0.0057
$Al(OH)^{+2}$				0.0107		0.0063

Tabla 6. Tamaño de ión (a_i) en Å para la ecuación de Debye-Huckel. (Adams, 1971).

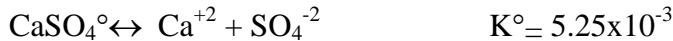
Ion	a_i
H^{+}, Al^{+3}, Fe^{+3}	9
Mg^{+2}	8
$Li^{+}, Ca^{+2}, Cu^{+2}, Zn^{+2}, Mn^{+2}, Fe^{+2}$	6
Sr^{+2}, Be^{+2}	5
$Na^{+}, CO_3^{-2}, HCO_3^{-}, H_2PO_4^{-},$ $SO_4^{-2}, HPO_4^{-2}, PO_4^{-3}$	4.5
OH^{-}, F^{-}	4.0
K^{+}, Cl^{-}, NO_3^{-}	3.5
Rb^{+}, Cs^{+}, NH_4^{+}	3.0
	2.5

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

Paso 3: Cálculo de la concentración de cada par iónico.

La concentración de $CaSO_4^\circ$, $MgSO_4^\circ$, $MnSO_4^\circ$, KSO_4^- , $NH_4SO_4^-$ son calculados usando las actividades iónicas del paso 2 y la constante de disociación tomadas de Lindsay (1979).

Para el par iónico $CaSO_4^\circ$



$$5.25 \times 10^{-3} = \frac{(Ca^{+2})(SO_4^{2-})}{(CaSO_4^\circ)}$$

$$CaSO_4^\circ = \frac{(0.00101)(0.00055)}{0.00525} = 0.00011M$$

El paréntesis significa actividad y el corchete representa concentración. Las concentraciones de los distintos pares iónicos se calculan de igual manera con sus respectivas constantes y sus valores de concentración se presentan en el Tabla 5.

Paso 4. Corrección de las concentraciones iónicas:

Se hace una estimación de la concentración de cada ión sustrayendo de la primera concentración medida la primera estimación del par iónico.

La segunda estimación para Ca^{+2} sería.

$$\begin{aligned} [Ca^{+2}] &= (Ca^{+2})_{\text{medido}} - [CaSO_4^\circ] \\ &= 1.76 - 0.11 = 1.65 \text{ mM} \end{aligned}$$

La segunda estimación para el SO_4^{-2} sería,

$$[SO_4^{-2}] = [SO_4^{-2}]_{\text{medido}} - ([CaSO_4^\circ] + [MgSO_4^\circ] + [MnSO_4^\circ] + [KSO_4^-] + [NH_4SO_4^-])$$

$$[SO_4^{-2}] = 1.00 - (0.11 + 0.04 + 0.15 + 0.01 + 0.03)$$

$$[SO_4^{-2}] = 0.66 \text{ mM}$$

Cada uno de los complejos del sulfato se calcularon de forma idéntica como se calculó $CaSO_4^\circ$.

Paso 5. Corrección de la fuerza iónica.

Con las concentraciones encontradas en el paso 4, se calcula la nueva fuerza iónica.

$$I = 0.5(1.65(2)^2 + 0.70(2)^2 + 2.29(2)^2 + 2.60 + 4.97 + 15.49 + 0.66(2)^2)$$

$$I = 22.1 \text{ mM} = 0.0221 M$$

En este nuevo cálculo la fuerza iónica pasó de 0.0236M a 0.0221M.

Paso 6. Cálculo de las actividades con la nueva fuerza iónica.

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

Se calcula un nuevo coeficiente de actividad, f_i , para cada ión y con este coeficiente se calcula una segunda actividad usando la segunda concentración calculada. Para el Ca^{+2} el procedimiento es el siguiente:

$$\text{Log}f_i = \frac{0.509(2)^2 \sqrt{0.0221}}{1 + 0.325(6)\sqrt{0.0221}} = 0.2346$$

$$f_i = 0.583$$

$$(Ca^{+2}) = 0,583 \times 1.65 = 0.96 \text{ mM}$$

Paso 7. Revisar la concentración de pares iónicos.

Se calcula de nuevo la concentración de cada par iónico con la nueva actividad calculada. Para $CaSO_4^\circ$ es :

$$[CaSO_4^\circ] = \frac{(0.96)(0.37)}{0.525} = 0.068 \text{ mM}$$

$$[Ca^{+2}] = [Ca^{+2}]_{\text{correg.}} - [CaSO_4^\circ]$$

$$[Ca^{+2}] = 1.65 - 0,068 = 1,58 \text{ mM}$$

Paso 8. Proceso iterativo (proceso sucesivo de ecuaciones para su análisis):

Los pasos 2, 3 y 4 son repetidos usando los nuevos valores de I, $[C_i]$ y (i) cada vez, hasta que los valores de actividad (i) permanezcan inalterados en sucesivos cálculos.

Adams (1974) aceptó que el anterior cálculo es un tratamiento termodinámico incompleto pero aceptable. Ejemplos de estos cálculos aplicados al Al^{+3} se pueden estudiar en Lindsay (1979).

2.4 SOLUCIONES NUTRITIVAS

Es una solución usada en hidroponía que aporta todos los elementos esenciales a las plantas que se cultiva. Estos elementos son H, Cl, O, N, P, K, Zn, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Mn, B y Mo. Por lo general, el cultivo en soluciones es útil para la investigación, ya que elimina el efecto del sustrato o posible contaminación de la solución con los elementos que provienen de los sustratos.

Todos los elementos nutritivos esenciales para la planta son tomados o asimilados en forma de iones, estos iones pueden ser cationes o aniones. En la tabla 6 aparece un listado de elementos químicos que constituyen la solución nutritiva utilizada como fuente de nutrientes fundamental, que son absorbidos por la planta. En la tabla figuran todos los elementos nutritivos considerados esenciales para la planta. Además se han incluido aquellos iones que, aunque no son vitales para las plantas, se encuentran en las aguas de riego y por lo tanto han de tenerse en cuenta en la elaboración de las soluciones nutritivas.

Conviene dejar claro desde un principio que no existe en la actualidad información suficiente para determinar soluciones nutritivas estandarizadas por especies, variedades, estados de desarrollo, condiciones climáticas o métodos de cultivo. Incluso es muy probable que nunca exista esa información tan precisa y minuciosa porque en definitiva la variabilidad de los factores de producción es tan grande que las soluciones nutritivas optimizadas podrían ser infinitas.

Estas soluciones son utilizadas en la fertirrigación, preparadas con agua de riego y con los nutrientes que son aportados por los fertilizantes. Los iones de estos reaccionan con el agua de riego y con los otros iones presentes en los fertilizantes. Así, el NH_4^+ del nitrato de amonio rompe la molécula de agua acidificando la solución. Los iones HPO_4^{-2} pueden reaccionar con Ca^{+2} del agua de riego y formar un precipitado de esta sal. Estos son solo dos ejemplos de las diferentes reacciones que pueden suceder en la preparación de soluciones nutritivas.

Las reacciones más importantes son aquellas que ocurren en medio acuoso, como es el caso de las que suceden con los fertilizantes cuando se aplican con agua. Para entender estas reacciones, es necesario conocer en detalle los equilibrios que involucran. Como las reacciones son reversibles tienden hacia un estado de equilibrio, ya mencionados.

2.5 TOXICIDAD DEL ALUMINIO

Los cationes metálicos en el suelo pueden ser beneficiosos o tóxicos para el medio ambiente. Aunque el exceso de metales puede producir algunos efectos sobre las plantas en general, hay muchos casos de los efectos específicos de los metales individuales en diferentes plantas (es decir, tanto macro como micro flora-). La biota requiere algunos de estos elementos en cantidades traza, pero puede ser sensible a una concentración más alta de metal. La toxicidad de los metales en plantas ha sido reportada en muchos trabajos (Foy, 1992; Delhaize y Ryan, 1995).

El aluminio (Al) no es considerado como un elemento esencial como nutriente, pero a veces en concentraciones bajas posibilita el crecimiento de plantas o induce otros efectos (G.R. Rout 2000; Pietraszewska. 2001). La toxicidad por aluminio es un factor importante limitante de crecimiento para las plantas en suelos ácidos, por debajo de pH 5,0.

Los factores químicos del suelo limitan el crecimiento de raíces en suelos ácidos, disminuyen la producción de cultivos, influenciados por el Al, Mn y diversos cationes, y también la deficiencia o falta de disponibilidad de Ca, Mg, P, Mo, y Si. Estos efectos son aún más complicados por las interacciones de Al con otros iones en diferentes genotipos de plantas y bajo condiciones de estrés (Foy, 1992; Karanja, 1988).

La citotoxicidad de Al ha sido bien documentada en las plantas (Delhaize y Ryan, 1995; Horst *et al*, 1999; Rout 2000). Se conoce que las plantas cultivadas en suelos ácidos, debido a la solubilidad del Al a pH bajo tienen reducción de los sistemas de raíces y

exhiben una variedad de síntomas por deficiencias de nutrientes, con una consecuente disminución del rendimiento. En muchos países con suelos naturalmente ácidos, que constituyen aproximadamente el 40% del suelo cultivable del mundo (LeNoble *et al.*, 1996), la toxicidad de Al es un problema agrícola importante, y es intensamente estudiado en sistemas vegetales, los efectos del aluminio sobre el crecimiento de las plantas, rendimiento de los cultivos, la absorción de nutrientes y distribución en las partes vegetativas y reproductivas.

2.6 TOXICIDAD EN PLANTAS

El aluminio tóxico para las plantas es aquel que se encuentra en la solución como ion libre o complejo de solvatación ($(Al^{+3})(H_2O)_6$), el cual se ha tratado de correlacionar con el Al^{+3} intercambiable. La intensidad de la fitotoxicidad se ha visto que está altamente correlacionada con la actividad del Al^{+3} y no con la concentración, ver figura 6. (Adams y Lund, 1966; Lance Persons, 1969; Pavan y Bingham, 1982). Para calcular la actividad del Al^{+3} es necesario tener el análisis de los aniones y cationes en la solución mediante el uso de un programa computacional, ver tabla 4. Se hace la especiación, que consiste en identificar cada una de las especies químicas, iones libres y pares iónicos en la solución (Sposito, 1989).

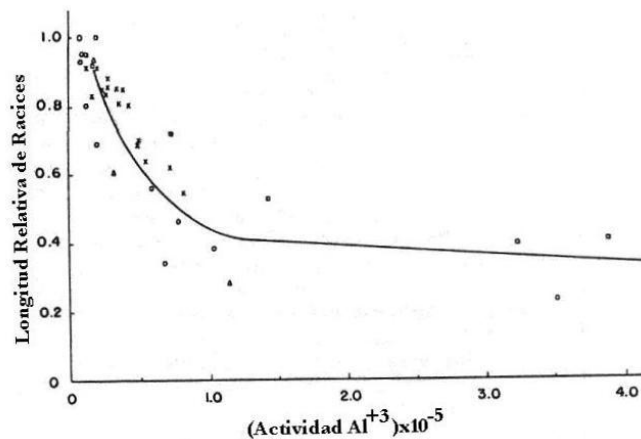


Figura 6. Relación entre la actividad del Al^{+3} en la solución del suelo o en soluciones nutritivas y la longitud de la raíz primaria del algodón (Pearsons, 1971).

Anteriormente se mostró, según Adams (1971), un esquema paso a paso para ilustrar como se calcula la actividad del ion libre, usando la composición analítica de una solución del suelo. Es un ejercicio interesante que ayuda a entender cómo funcionan los programas de especiación.

Investigaciones más recientes permiten establecer el punto específico de acción de la toxicidad del aluminio en plantas de maíz. Teniendo en cuenta que el aluminio en forma iónica Al^{+3} presenta toxicidad en el desarrollo de las plantas (Delhaize *et al.* 1998; Sposito 2008), se puede afirmar que la toxicidad del aluminio limita el desarrollo de las

EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS

plantas, al afectar directamente el ciclo del fósforo, puesto que es un mineral indispensable para el desarrollo de las raíces. El Al^{+3} sustituye los protones del ácido fosfórico tomando el anión fosfato y precipitándolo como $Al_2(PO_4)_3$ (Sposito 2008). Esto refleja los trastornos que causa el aluminio en la planta y en el metabolismo del fósforo. En ocasiones se observan manchas de color amarillo pálido en las hojas de algunas gramíneas como los cereales (Helyar 1970). El crecimiento de las plantas de Alfalfa se ve directamente afectado por el incremento de la concentración del ión Al^{+3} debido al cambio de pH en el suelo (Cregan *et al.* 1980; Figura 7).

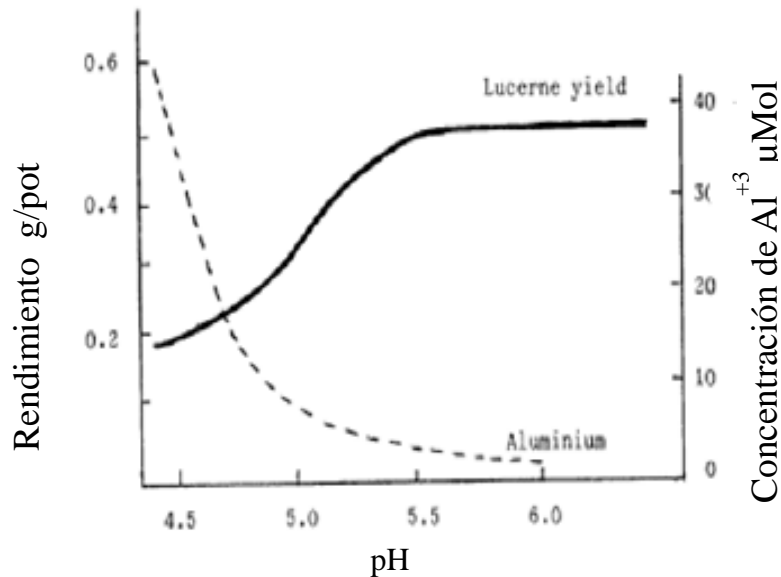


Figura 7. Efectos del pH del suelo en la actividad del ión aluminio (Aluminium) en la solución del suelo y en la producción de Alfalfa-Lucerne (Cregan *et al.* 1980).

G.R. Rout *et al.* 2000, argumenta que la toxicidad por aluminio es un limitante potencial de crecimiento para las plantas cultivadas en suelos ácidos en muchas partes del mundo, los síntomas de la toxicidad de aluminio no son fácilmente identificables en las plantas. Los síntomas foliares se asemejan a la deficiencia de fósforo (P) (retraso del crecimiento, hojas pequeñas, de color verde oscuro y la madurez tardía, color púrpura de tallos, hojas y nervaduras de las hojas, color amarillo y la muerte de puntas de las hojas). En algunos casos, la toxicidad de Al aparece como un calcio inducido (Ca) o deficiencia, al reducir el transporte Ca mostrando (rizado o ondulado de hojas jóvenes y el colapso de los puntos de crecimiento de pecíolos).

Su toxicidad radica en que afecta al transporte intracelular de la planta, incluyendo las proteínas que facilitan el paso de las auxinas, fitohormonas del crecimiento. También, el aluminio afecta el citoesqueleto y el transporte vascular (Amenós *et al.*, 2009).

Es generalmente aceptado que la toxicidad de Al es una de los principales factores que limita el crecimiento de las plantas en suelos ácidos (Kochian, 1995). En diferentes

investigaciones el Al^{+3} tóxico es atribuido como el principal limitante sobre el crecimiento de las plantas, diferentes mecanismos fisiológicos se han atribuido, aunque el mecanismo exacto todavía no ha sido dilucidado.

Las plantas más jóvenes son más susceptibles que las plantas más viejas. Al parecer, no interfiere con la germinación de las semillas, pero no se debe poner en peligro el crecimiento de nuevas raíces y el establecimiento de plántulas, (Pietraszewska, 2001). Las respuestas comunes de las raíces a Al^{+3} son: cambios celulares y ultraestructurales en hojas, las tasas de aumento de resistencia a la difusión, reducción de la abertura estomática, disminución de la actividad fotosintética que conduce a la clorosis y necrosis de las hojas, la disminución total en hojas, número y tamaño, y una disminución en la biomasa de los brotes.

Con respecto a determinantes del crecimiento (auxinas, ácido giberélico y etileno), al parecer interactúan directamente y/o indirectamente con los factores que influyen en la organización del citoesqueleto, tales como los niveles citosólicos de Ca^{2+} , Mg^{2+} , calmodulina, potencial eléctrico de la superficie de las células y la composición de lípidos de la membrana plasmática.

La intensidad de la fitotoxicidad se ha visto que está altamente correlacionada con la actividad del Al^{+3} y no con la concentración (Zapata y Bohn, 1993).

2.7 TOXICIDAD EN RAICES

Coincidiendo con otras investigaciones Kochian *et al* (2004), presenta la toxicidad de aluminio en numerosos y complejos mecanismos mediante los cuales se manifiesta su actividad tóxica. Cuando el pH del suelo cae por debajo de 5,0 (Ryan *et al.*, 1992) el Al^{+3} es disuelto en la solución del suelo en su forma toxica; el síntoma primario de toxicidad es, una rápida inhibición del crecimiento de las raíces, resultando una reducción del sistema radical limitando la adsorción de agua y nutrientes minerales, el crecimiento del tallo no se ve tan afectado (Faixen 2001).

El aluminio en la solución del suelo reacciona con materiales de las membranas celulares, restringiendo la expansión de la pared celular y, por lo tanto, el crecimiento de las raíces. Los microtúbulos del citoesqueleto son un sitio específico de la toxicidad de Al y las células mitóticas en la punta de raíz. (G.R. Rout *et al.* 2000). A su vez, genera trastornos en los procesos de transporte, inhibición de la absorción y del metabolismo de minerales, especialmente de calcio (Ca) y fósforo (P) (Helyar 1970).

En experimentos a corto plazo han comparado la localización tisular y subcelular del aluminio en dos variedades de maíz con tolerancia diferencial a la toxicidad de este elemento. Muestran que, en la variedad sensible, el aluminio se acumula de forma específica en los nucléolos de las células de la zona de transición radicular. Sin embargo, la variedad tolerante excluye más eficientemente el aluminio de la raíz. El poco aluminio que entra en la raíz de la variedad tolerante queda fuera de los núcleos. Los resultados

sugieren que el transporte vesicular puede jugar un papel central, en la variedad tolerante, para propiciar el flujo de aluminio fuera de la raíz (Amenós *et al.*, 2009).

El retraso en el crecimiento de la raíz es una consecuencia del Al^{+3} inducida por la inhibición del alargamiento de la raíz. Las raíces son generalmente gruesas, quebradizas sus puntas y las raíces laterales son más gruesas de color marrón (Pietraszewska *et al.*, 2001). Dichas raíces son ineficientes, en la absorción de nutrientes y agua.

2.8 TOXICIDAD EN MICROROGANISMOS

De igual forma la toxicidad del aluminio también afecta otros organismos, Whelad *et al.* (1985), confirman los datos que muestran que Al es tóxico para *Rhizobium trifolii*, en condiciones de bajo pH y elevadas concentraciones de Fe son perjudiciales para la formación de nódulos del trébol subterráneo (*Trifolium subterraneum*). Autores como Fichtner *et al.* (2005), confirman que el Al también afecta los patógenos de las plantas como *Thielaviopsis basicola* y *Phytophthora parasitica* var. *nicotianae*, siendo sensibles a diferentes concentraciones. Furuya *et al.* (1998) establecen que la disminución de la severidad de fusario en las raíces de trigo causada por *Fusarium solani* f. sp. *Phaseoli*, es debida a la presencia de este mineral, esto sugiere que el aluminio puede ser tóxico para *S. subterranea*, como lo es para otros parásitos de la papa como *Phytophthora infestans* (Andrivon, 1995) y *Streptomyces scabies* (Mizuno y Yoshida, 1993).

Raktim Pal *et al.* 2007 confirman a partir de su trabajo, que el pH del suelo influye en gran medida la actividad de los microorganismos del suelo. Propiedades microbianas y bioquímicas, además del ciclo de nutrientes en el suelo se reduce significativamente bajo una condición de pH ácidos, debido a la combinación del efecto de H^+ y Al^{+3} .

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Determinar si la actividad química del aluminio como ion Al^{+3} libre presente en la solución puede ser parte de una estrategia de control de *Spongospora subterranea*.

3.2 Objetivos específicos

- 3.2.1 Evaluar si la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre afecta o favorece el crecimiento de plantas de tomate.
- 3.2.2 Determinar si la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre disminuye la concentración y los efectos de los quistosoros de *Spongospora subterranea* en plantas de tomate.
- 3.2.3 Establecer el efecto de los quistosoros de *Spongospora subterranea* y la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre en el crecimiento de plantas de tomate.
- 3.2.4 Identificar si la aplicación de Aluminio, en un suelo infectado con quistosoros de *Spongospora subterranea*, favorece el crecimiento de las plantas de papa.

4. METODOLOGÍA

4.1 Evaluar si la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre afecta o favorece el crecimiento de plantas de tomate.

Se sembraron 5 semillas de tomate *Lycopersicon esculentum* variedad Chonto Santa Cruz en vasos plásticos de 5 onzas (unidad experimental), en arena lavada con HNO_3 concentrado. 3 réplicas por cada tratamiento incluyendo el control.

Se evaluaron dos fuentes de aluminio Al^{+3} , Cloruro y Sulfato de Aluminio, con seis concentraciones crecientes (0, 1, 10, 25, 50 y 100 ppm) para determinar la longitud del tallo, la raíz y el peso seco final.

Se ajustó el pH de las soluciones a 3.5, (McBride, 1994), con HNO_3 1M para el Cloruro de Al y con HCl 1M para el Sulfato de Al.

Se aplicaron 15 ml cada 3 días y se mantuvieron con luz constante durante 21 días, las soluciones se adicionaron cuando las plántulas presentaron la primera hoja verdadera desplegada. (Merz, 1986).

4.2 Determinar si la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre disminuye la concentración y los efectos de los quistosoros de *Spongospora subterranea* en plantas de tomate.

Los quistosoros se desinfectaron con hipoclorito al 0.5 % con un pH inicial de 6.0. Se incubaron durante 4 días a 19 °C expuestos a la luz, se realizaron 3 réplicas por cada tratamiento.

Se realizó un conteo inicial de quistosoros, para determinar el porcentaje de quistosoros desaparecidos al cuarto día. El número de quistosoros se determinó utilizando la cámara de Neubauer bajo el microscopio de luz con un aumento de 10x.

Los quistosoros se reconocieron por su forma ovoide o esférica irregular, por su estructura porosa de apariencia esponjosa y por su color ocre oscuro. Se consideraron los quistosoros que presentaron completo un 75% de su forma ovoide o esférica irregular.

En tubos falcon, se adicionó una solución acuosa con quistosoros provenientes de agallas de plantas de papa *Solanum tuberosum* variedad Diacol Capiro. En soluciones crecientes de Cloruro y Sulfato de Aluminio (0, 50, 100, 500, 1000 y 5000 ppm).

Los conteos se expresaron como quistosoros por mililitro (quistosoros/ml) (Beltrán *et al.*, 2009) (Figura 9).

EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS

El diseño experimental es al azar y se repitió dos veces.

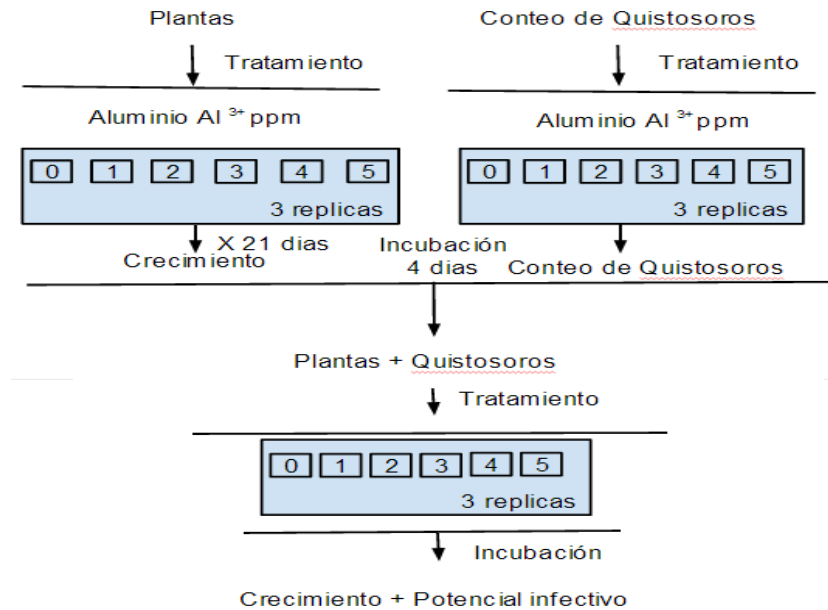


Figura 8. Diseño de los experimentos objetivos 1 y 2 con plantas de tomate.

4.3 Establecer el efecto de los quistosoros de *Spongospora subterranea* y la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre en el crecimiento de plantas de tomate.

En bandejas plásticas, se sembraron en solución acuosa 5 plantas de tomate *Lycopersicon esculentum* variedad Chonto Santa Cruz, y se inocularon con quistosoros provenientes de agallas de plantas de papa *Solanum tuberosum* variedad Diacol Capiro.

Luego se adicionaron los diferentes tratamientos de Cloruro de Al (0, 25, 50 y 100 ppm), los cuales fueron ajustadas a un pH de 4.0 (HNO_3 1M) en una solución nutritiva de Hoagland (Merz, 1983) (Tabla 7).

Las plantas se mantuvieron con luz constante durante 15 días, realizando un cambio de la solución a los 8 días y se oxigenaron las raíces insuflándolas con una pipeta.

Se determinó la longitud del tallo, la raíz, el peso seco y el número de quistosoros al final del experimento.

Tabla 7. Solución nutritiva de Hoagland para patatas de papa.

REACTIVO	Solución Stock (g/10L)	Volumen utilizado (ml/L)
Nitrato de Potasio	4,4667	4,762
Nitrato de Calcio	9,7667	4,762
Sulfato de potasio	1,8142	0,923
Ácido Fosfórico	1	0,923
Hidróxido de Calcio	0,3286	0,923
Sulfato de Magnesio	7,9286	4,762
Ácido Bórico	0,0298	0,573
Sulfato de Manganeso	0,0167	0,573
Sulfato de Zinc	0,0012	0,573
Sulfato de Cobre	0,0012	0,573
Molibdato de Amonio	0,0009	0,573
Sulfato Ferroso	0,1667	0,573

4.4 Identificar si la aplicación de Aluminio, en un suelo infectado con quistosoros de *Spongospora subterranea*, favorece el crecimiento de las plantas de papa.

En parcelas de 1 m² por 40 cm, con un suelo de una zona productora de papa de Antioquia, clasificada como Andisol (Jaramillo *et al.* 1994), se plantaron cuatro semillas-tubérculo certificados de *Solanum tuberosum* variedad Diacol Capiro, (Unidad experimental).

Se utilizaron 120 parcelas a las que se le aplicaron diferentes tratamientos (0, 1000, 5000 y 10000 ppm de $Al_2(SO_4)_3$. De forma manual alrededor de las plantas en solución cada 15 días después de la siembra durante cinco meses y medio.

Se utilizaron 60 parcelas con cantidades homogéneas de quistosoros de *S. subterranea* provenientes de cultivos previos (Gilchrist, 2009) y 60 en ausencia del inoculo.

Se determinó el efecto de la sarna polvosa en presencia y en ausencia de la actividad química del aluminio Al^{3+} libre.

La humedad del suelo se garantizó con una frecuencia de riego de 5 litros/hora metro lineal equivalente a 0.55-0.77 bares, lo que corresponde a 20 Litros/hora/Parcela, tres veces al día de (6.00am - 7:00am, 10:00am – 11:00am y 2:00pm – 3:00pm), desde la siembra hasta la floración, teniendo en cuenta las condiciones ambientales.

Se determinaron los efectos de los tratamientos de Al^{3+} sobre el desarrollo de la sarna polvosa y la planta midiendo el crecimiento de la planta hasta la floración después de la siembra.

Se determinó la producción al final del ciclo de cultivo.

EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS

El experimento se llevó a cabo en el Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico Paysandú, Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, localizado en el corregimiento de Santa Elena-Medellín, Antioquia. El terreno donde se trabajó presenta una altitud de 2.550 metros sobre el nivel del mar, con un promedio anual de precipitación y temperatura de 2.500 mm y 14 °C, respectivamente. La región pertenece a la zona de vida Bosque húmedo Montano Bajo (BhMB) (Espinal 1992).

Se realizó el mantenimiento del experimento con desyerbas manuales y control químico de enfermedades y plagas según recomendación de un Ingeniero Agrónomo. No se aplicaron enmiendas al suelo. La fertilización química para garantizar un adecuado desarrollo de las plantas consistió en: 50 gramos de gallinaza y 20 gramos de un fertilizante compuesto 10-20-10 (N-P-K) por planta, luego transcurridos 36 días se realizó el aporque y se aplicó fertilizante en la misma relación 10-20-10 (N-P-K), sin gallinaza.

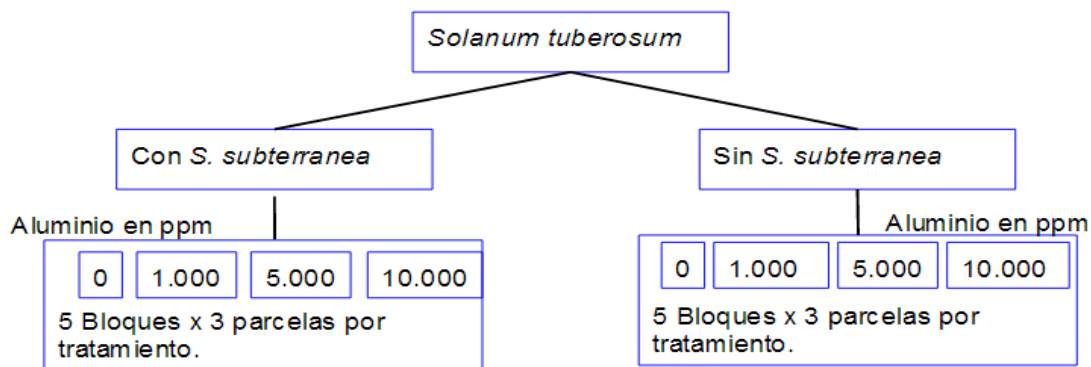


Figura 9. Diseño del experimento en campo.

Para el montaje de los cálculos en el programa de SPECIES es necesario en cada ensayo realizado en solución, realizar un balance de iones para limitar los errores termodinámicos en el sistema y poder obtener datos confiables y poder analizar adecuadamente los resultados y su especiación, es necesario que el balance de masa sea el adecuado en términos que la suma de cationes y aniones al final del cálculo sea equivalente a cero o con una diferencia porcentual no superior al 5%. Barack (1990).

El programa SPECIES solicita unos parámetros específicos para lanzar al cálculo:

INPUT:

1. Concentración de iones en solución en moles /L.(Cationes: Al^{+3} , Ca^{+2} , K^{+} , Na^{+} , $Fe^{+2,3}$, Mg^{+2} , NH_4^{+} , Si^{+4} , B^{+3} Aniones: SO_4^{-2} , Cl^{-} , NO_3^{-} , F^{-} , PO_4^{-2} , carbonatos).
2. pH
3. Concentración de carbonatos moles /L.(No aplica en el experimento)
4. Condiciones de precio parcial de CO_2 si existe.(No aplica en el experimento)

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

5. Punto de ebullición si aplica en la solución. (No aplica en el experimento)
6. Verificar que la suma de aniones y cationes sea cero.
7. Se lanza al cálculo “calcular”.

OUPUT: Datos finales para el análisis de cada especie formada.

1. Constantes de equilibrio.
2. Fracciones iónicas
3. Concentración de iones
4. Estiramiento iónico y coeficiente de actividad en cada ion.
5. Balance de carga
6. Distribución de especies
7. Actividad iónica libre
8. Actividad iónica en formación de productos.

5. ANALISIS ESTADISTICO

Los experimentos se analizaron utilizando esquemas de deducción y análisis de varianza (ANOVA) ($p < 0,05$). La homocedasticidad y normalidad de los datos se analizó ($p < 0,05$) utilizando las pruebas de Kolmogorov-Smirnov, respectivamente (Zar, 1999). Cuando estos requerimientos no se cumplieron se utilizó la transformación W de Shapiro-Wilks o T de Student. Todos los análisis y transformaciones se realizaron con el programa de distribución libre R (CRAN, 2009) y STATGRAPHICS Centurion XVI.

Para los resultados de especiación se realizaron todos los cálculos con el programa species Barack (1990), para los objetivos 1, 2 y 3.

6. RESULTADOS Y DISCUSION.

Antes de iniciar con la descripción de los resultados y su discusión respectiva es necesario dar claridad que a partir de investigaciones anteriormente realizadas se estableció que las plantas de tomate (*Solanum lycopersicum*), y de papa (*Solanum tuberosum*) variedad Diacol Capiro son el huéspedes más susceptibles a la enfermedad (Gilchrist *et al.*, 2009; Merz, 1989 - 2010), y por lo tanto, son ideales para la propagación del patógeno.

De igual forma para establecer el pH adecuado para el montaje final se realizaron ensayos preliminares con curvas de pH para establecer el porcentaje de germinación de la planta e identificar si este la afectaba o no, confirmado con esto que la planta es ácido tolerante.

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

Se consideró entonces utilizar un pH bajo para garantizar la liberación del catión tóxico en la planta de tomate y también su efecto sobre los quistosoros de spongospora subterránea.

a. Evaluar si la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre, afecta o favorece el crecimiento de plantas de tomate.

Para evaluar la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre se consideraron dos compuestos químicos en solución, como fuentes del aluminio, el sulfato de aluminio y el cloruro de aluminio, y se compararon sus resultados (Tabla 8 y 9).

En la tabla 8 se presentan los efectos que tuvieron las dos especies complejantes del aluminio en solución, el sulfato y el cloruro de aluminio. En la tabla 9 se presentan las especies que forma el Al^{+3} con estos dos compuestos químicos en solución acuosa.

Tabla 8. Efecto de la concentración y actividad del Al^{3+} en el crecimiento de plantas de tomate *Solanum Lycopersicum* en presencia de dos fuentes a un pH de 3,5.

Fuente	$[Al^{+3}]$		(Al^{3+})	tallo	raíz	Peso seco
	Ppm	(molL ⁻¹)				
Sulfato	0	0	0	6,6b	9.0a	0,919a
	1	1,9E-05	1,5E-05	7,6b	8,9a	1,0375a
	10	1,9E-04	1,3E-04	7.0a	7,8a	0,983a
	25	4,6E-04	3,3E-04	7,3c	8.0a	0,9368a
	50	9,3E-04	5,2E-04	7,1a	9,8a	0,941a
	100	1,9E-03	9,4E-04	7,1a	9,5c	1,0008a
	Cloruro	0	0	0	7,1b	7,6 b
1		3,7E-05	3,6E-05	5,4a	7,9 a	1,198a
10		3,7E-04	3,6E-04	5,4a	6,7b	1,352a
25		9,3E-04	9,1E-04	5,6c	6,9 c	1,036a
50		1,9E-03	1,8E-03	5,5a	5,8 a	0,951b
100		3,7E-03	3,6E-03	5,4b	5,5 a	0,982a

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas, ($p < 0,05$).

Se observa en la tabla 8 como la presencia de Al^{+3} tiene un efecto positivo sobre la longitud del tallo, las bajas actividades de este catión estimulan el crecimiento. Este efecto es contrario a lo reportado en la literatura, que indica un efecto detrimental sobre las plantas. Pero igualmente, McBride (1994) reporta que concentraciones muy bajas de aluminio pueden causar efectos que favorecen las plantas, ya que su capacidad de complejación permite la formación de sistemas de equilibrio, actuando como una solución buffer, que dependiendo del pH, permite que se da una difusión iónica lenta.

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{3+} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

La actividad del Al^{3+} en la longitud del tallo de las plantas de tomate según los tratamientos de Sulfato de Aluminio y Cloruro de Aluminio se encontró que no presentan una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$), aunque en la tabla 8 se muestra que el crecimiento de tallo fue menor a medida que aumentaba la actividad del Al^{3+} , muy significativo en 100 ppm cuando se utilizó el cloruro de aluminio, ya que el Al^{3+} en solución actúa como un ácido de Lewis formando pares ionios, mientras que el cloruro actúa como base de Lewis que se asocia fácilmente con los protones ácidos generados en la solución (Zapata, 2002) y no presenta toxicidad específica en la planta.

En la longitud de la raíz de plántulas de tomate según los tratamientos de sulfato Aluminio, no existe una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$), sin embargo entre los tratamientos, si es evidente que a medida que aumenta la actividad química del Al^{3+} , la longitud de la raíz si se redujo proporcionalmente, esta incidencia tóxica del aluminio es más específica a nivel de la raíz (tabla 8), respecto al control.

Considerando que la toxicidad del aluminio en la raíz si se presentó aunque de forma irregular, se coincide con lo propuesto por (Cregan *et al.* 1980; Amenós *et al.*, 2009) que establecen que el Al^{3+} afecta directamente el crecimiento y el desarrollo de la planta se confirma que hay una disminución significativa en el crecimiento de las raíces. Es decir el aluminio afecta directamente la punta de la raíz limitando la transferencia de nutrientes por la pared celular y reduciendo su capacidad de elongación, la toxicidad muestra cauterización de los tejidos primarios en la raíz de la planta. (Faixen, 2001).

Se conoce que las plantas cultivadas en suelos ácidos, presentan elevada citotoxicidad (Delhaize y Ryan, 1995; Horst *et al.*, 1999; Rout 2000), debido a la solubilidad del Al a pH bajo, generando reducción de los sistemas de raíces y exhibiendo una variedad de síntomas por deficiencias de nutrientes y disminución del rendimiento, convirtiéndose en un problema agrícola importante (LeNoble *et al.*, 1996).

Peso seco de las plántulas de tomate (miligramos) según el efecto de los tratamientos de Cloruro de aluminio y Sulfato de aluminio. Existe una diferencia estadísticamente significativa entre las medias de las dos muestras, con un nivel de confianza del 95,0% al comparar el aumento de la concentración en cada uno de los tratamientos (tabla 8).

En el peso seco de las plantas de tomate se encontró que no hay diferencia significativa en relación a los tratamientos, pero si hay una disminución en el peso seco a medida que se aumentó la concentración de aluminio respecto al control, confirmando el aumento de la actividad toxica, mientras se aumentan la actividad del ion libre que corresponde a la fuente cloruro de aluminio. Mientras que el peso seco se aumentó cuando se utilizó el sulfato de aluminio confirmando que la actividad química disminuye ya que puede formar complejos y pares iónicos con el aluminio disminuyendo la toxicidad de este ion en la planta, favoreciendo el incremento en su peso seco. (Tabla 8).

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

Tabla 9. Especies de aluminio presentes en solución, a partir de concentraciones variables de $Al_2(SO_4)_3$ y $AlCl_3$ a un pH de 3,5 evaluadas en plantas de tomate *Solanum Lycopersicum*.

Fuente	Concentración [Al^{+3}]	Actividad (Al^{+3})	($AlSO_4^+$)	(Cl^-)	
	ppm	($molL^{-1}$)			
Sulfato	0	0	0	0	0
	1	1,9E-05	1,5E-05	3,2E-06	0
	10	1,9E-04	1,3E-04	4,8E-05	0
	25	4,6E-04	3,3E-04	2,1E-05	0
	50	9,3E-04	5,2E-04	3,7E-04	0
	100	1,9E-03	9,4E-04	9,3E-04	0
Cloruro	0	0	0	0	0
	1	3,7E-05	3,6E-05	0	4,3E-04
	10	3,7E-04	3,6E-04	0	1,4E-03
	25	9,3E-04	9,1E-04	0	3,2E-03
	50	1,9E-03	1,8E-03	0	6,1E-03
	100	3,7E-03	3,6E-03	0	1,1E-04

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas, ($p < 0,05$).

Teniendo en cuenta que el sulfato de aluminio presenta una actividad más baja como anión formado, en comparación con el anión cloruro que presenta una actividad iónica en su menor actividad, este anión presenta una menor afinidad de complejación por el catión Al^{+3} (Rodella 2006), favoreciendo la toxicidad que está, presenta a nivel de raíz y en general toda la planta.

Aunque la incidencia tóxica del aluminio es más específica a nivel de la raíz, en la tabla 8 se muestra que también se afecta el crecimiento del tallo, mostrando una diferencia significativa utilizando el cloruro de aluminio, siendo mayor su actividad, favoreciendo la formación de especies o pares iónicos como, $AlSO_4^+$, que para nuestro caso esta formación de pares iónicos limita el efecto toxico, observado en la tabla 9, ya que las concentraciones crecientes de aluminio $AlSO_4^+$ no afectaron sustancialmente la planta, mientras que el cloruro de aluminio presentó un mayor efecto sobre la disminución de la longitud del tallo de las plantas de tomate, ya que éste último tiene unas mejores condiciones químicas de asociación y es un anión que fácilmente se puede asociar a otros cationes monovalentes, es decir, el cloro por ser tan electronegativo puede capturar fácilmente protones ácidos del medio y liberar de forma más fácil el catión Al^{+3} para que actúe más rápidamente sobre la raíz y de esta manera se afecte el crecimiento de la planta.

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

De allí que la actividad del Al^{+3} es más alta cuando se utilizó el cloruro de aluminio y no el sulfato de aluminio en 50 y 100 ppm respectivamente, ya que las condiciones de especiación del aluminio fueron más altas teniendo en cuenta que el aluminio que se encuentra libre puede formar complejos fácilmente con los componentes orgánicos específicos como el malato, oxalato y el citrato (Ryan *et al.*, 1992), liberados en el ápice de la raíz, asociados al gradiente de H^+ y Ca^{2+} en la pared celular. La respuesta química asociada a la liberación de ácidos orgánicos disociados expuestos al Al^{+3} libre en solución, (Barceló *et al.*, 2002), todos estos ácidos orgánicos como respuesta o tolerancia al efecto que presenta Al^{+3} en la raíz, que puede causar grandes efectos en la raíz y la planta como interferencia en la división celular, reducción en el transporte de citoquininas, modifica la estructura y la función de la membrana plasmática Mossor-Pietraszewska, (2001), limitando la adsorción de nutrientes, el crecimiento de sus raíces secundarias y el crecimiento del tallo.

b. Determinar si la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre disminuye la concentración y los efectos de los quistosoros de *Spongospora subterranea* en plantas de tomate.

Tabla 10. Especies de aluminio presentes en solución y efecto en la concentración de quistosoros, a partir de concentraciones crecientes de $Al_2(SO_4)_3$ y $AlCl_3$ a un pH de 3.5

<u>Fuente</u>	[quistosoros/ml]	Concentración [Al^{+3}]		Actividad (Al^{+3})	($AlSO_4^+$)	(Cl^-)
		ppm	molL ⁻¹			
Sulfato	40b	0	0	0	0	0
	34 ^a	50	9,3E-04	9,4E-07	5,1E-08	0
	21b	100	1,9E-03	1,9E-06	2,0E-07	0
	34 ^a	500	9,3E-03	9,8E-06	5,0E-06	0
	23 ^a	1000	1,9E-02	2,8E-05	1,9E-05	0
	38 ^a	5000	9,3E-02	2,7E-04	4,5E-04	0
Cloruro	33 ^a	0	0	0	0	0
	20 ^b	50	1,85E-03	1,9E-06	0	1,6E-04
	28 ^a	100	3,71E-03	3,8E-06	0	3,6E-04
	32 ^a	500	1,85E-02	2,6E-05	0	1,7E-03
	33 ^a	1000	3,71E-02	6,3E-05	0	3,6E-03
	45 ^a	5000	1,85E-01	7,1E-04	0	2,2E-02

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

Letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas, ($p < 0,05$). El efecto de la actividad química del aluminio (Al^{+3}) ML^{-1} a partir de las dos fuentes de aluminio no presentaron una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$), entre la media en el número de quistosoros, observados, con un nivel del 95,0% de confianza (tabla 10).

Aunque el número de quistosoros es muy variable, si existen diferencias en comparación con el sulfato de aluminio y el cloruro de aluminio, favoreciendo el aumento gradual de la concentración quistosoros al utilizar el cloruro de aluminio, ya que existe en la solución mayor concentración de Al^{+3} a medida que la concentración inicial fue aumentando utilizando el cloruro de aluminio (tabla 10), mientras que con el sulfato de aluminio se favoreció la formación de especie del pares iónicos ($AlSO_4^+$) y complejos solvatados aumentando gradualmente a medida que aumentaba su concentración en la solución.

Como la estructura del quistosoro es orgánica, constituida por quitina, cuando se utilizaron las concentraciones crecientes de cloruro de aluminio, así mismo aumentó la cantidad de quistosoros presentes en la solución, ya que existe la posibilidad que haya afinidad de los quistosoros por el catión Al^{+3} . Ya que la estructura quitinosa tiene posiciones hidroxilicas sustituibles y una posición acida muy reactiva donde puede darse mayor afinidad por el catión.

Po lo tanto el número de quistosoros no presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) al ser tratados con cloruro de aluminio (tabla 10), a pesar que el experimento se repitió dos veces la respuesta fue muy variable, posiblemente porque la estructura del quistosoro es rica en quitina (Harrison *et al.* 1997) que no se ve afectada por la variación del pH o por el estrés del aluminio en sus diferentes concentraciones.

La correlación de los datos y el conteo de quistosoros o estructuras resistentes, indican la posible asociación iónica que se pudo haber generado entre la cubierta quitinosa y el aluminio tóxico, favoreciendo la presencia de los quistosoros a medida que se aumenta el aluminio libre en solución y se favorecen las condiciones iónicas en las soluciones evaluadas.

La quitina es uno de los componentes principales de las paredes celulares de los hongos, del exoesqueleto de los artrópodos, y también hace parte de cubierta de los quistosoros (Merz, 1989; Falloon, 2008), está compuesta por un polisacárido de N-acetil glucosamina, estas unidades están enlazadas por enlaces β -1,4, cada monómero podría restringir la actividad del aluminio, ya que este podría asociarse a esta pared por sus hidrógenos amínicos o los grupos hidroxilo de cada monómero, favoreciendo el incremento de puentes de hidrógeno con los polímeros adyacentes, dándole mayor resistencia y afinidad por el aluminio libre, favoreciendo el aumento gradual de su concentración en la solución, cuando se utilizó el cloruro de aluminio como fuente de evaluación.

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

Establecer el potencial infectivo de los quistosoros de *Spongospora subterranea*, no es una tarea fácil, ya que sus unidades infectivas denominadas quistosoros tienen un gran potencial para la supervivencia en condiciones extremas y de larga durabilidad (Merz, 1989). Es necesario continuar indagando sobre cómo actúa este patógeno en diferentes medios químicos extremos.

c. Establecer el efecto de los quistosoros de *Spongospora subterranea* y la actividad química del Aluminio Al^{+3} libre en el crecimiento de plantas de tomate.

Tabla 11. Efecto de los quistosoros de *Ss* y la actividad química del aluminio libre Al^{+3} , evaluado en el crecimiento de plantas de tomate *Lycopersicon esculentum* a un pH de 4.0 en concentraciones crecientes de $AlCl_3$.

Fuente	$[Al^{+3}]$ Concentración	Actividad (Al^{+3})	[quistosoros/ml]	tallo	raíz	Peso seco	
	ppm	<i>Ssub</i>	($molL^{-1}$)	cm		g	
Cloruro	0	Sin	0	0	6,9 a	5,7b	19,4b
	25	Sin	9,3E-04	0	5,0b	2,4a	5a
	50	Sin	1,85E-03	0	5,5a	1,8b	3,6b
	100	Sin	3,71E-03	0	5,7b	2,2a	28a
Cloruro	0	Con	0	18a	6,5 a	6,9a	19c
	25	Con	9,3E-04	22a	4,9b	3,6c	7,1a
	50	Con	1,85E-03	29a	4,8a	1,5a	3b
	100	Con	3,71E-03	23a	4,3b	1,4c	39a

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

Para establecer la relación de la actividad del aluminio con el crecimiento de las plantas y el efecto del patógeno sobre la planta, se tomaron en cuenta los resultados obtenidos en los ensayos anteriores de forma independiente y así poder verificar su respuesta.

La longitud de las plantas de tomate según las concentraciones de Cloruro de aluminio, (tabla 11), muestran que existe una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$), de la actividad del (Al^{+3}) ML^{-1} en la longitud del tallo (cm), este se incrementa.

Teniendo como referencia que el cloruro de aluminio afectaba de forma significativa el crecimiento de la planta y también interfiere de forma directa en el crecimiento de la raíz (tabla 11), se muestra la disminución de la longitud de las raíces en las plantas de tomate, ya que presentó diferencias significativas ($p < 0,05$), al ser tratadas con Cloruro de aluminio en todas sus actividades químicas a medida de que su actividad química aumentaba.

Las raíces del tomate no se afectaron por el inóculo de *S. subterranea*, ya que los quistosoros podrían haberse asociado favorablemente al aluminio por la estructura

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{3+} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

orgánica que éste presenta favoreciendo la acción infectiva del patógeno y no limitando su acción.

El crecimiento de la raíz de las plantas de tomate disminuyó significativamente ($p < 0,05$) con el aumento de la actividad química del Al^{3+} a medida que aumentaban las diferentes concentraciones de Cloruro de aluminio. Existe cierta diferencia entre los inoculados con *S. subterranea* y los que no se inocularon, afectando su crecimiento en tallo y raíz, siendo más notorio el efecto de la actividad química del Al^{3+} en las muestras inoculadas, confirmando la posible asociación del catión con el inóculo.

El peso seco de las plantas de tomate (mg/planta), inoculadas con *Spongospora subterranea* (tabla 11). Según los tratamientos de Cloruro de aluminio, existe una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$), entre la media de Peso seco con la actividad química del (Al^{3+}) ML^{-1} , respecto al control.

Solo existe un punto de inflexión en la actividad del aluminio, donde se muestra algún efecto conjunto del inóculo y la actividad del aluminio libre, en el incremento de la concentración, donde se favoreció el peso seco con el aumento de la actividad, en la mayor concentración de la fuente de aluminio en 100 ppm.

El efecto de los tratamientos de Cloruro de aluminio en la reducción del número de quistosoros. No existe una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$), causada por la actividad del aluminio Al^{3+} sobre el número de quistosoros en la solución, se observa la misma tendencia analizada anteriormente, donde se establece una relación directa del patógeno con el catión, favoreciendo el incremento en el número de quistosoros cuando la actividad de este ion aumenta.

Tabla 12. Especies de aluminio presentes en solución, a partir de concentraciones crecientes de $AlCl_3$ a un pH de 4,0 evaluadas en plantas de tomate *Solanum Lycopersicun*.

Fuente	Inoculo	[Al+3]	(Al³⁺)	(Al(OH)⁺²)	(Al(OH)2⁺¹)	(Al(OH)3⁺⁰)	(Al(OH)4⁻¹)	
	<i>S sub</i>	ppm	molL-1					
Cloruro	sin	0	0	0	0	0	0	
	Sin	25	9,30E-04	8,70E-04	6,00E-05	3,46E-06	4,42E-07	2,18E-11
	Sin	50	1,85E-03	1,80E-03	1,07E-04	5,59E-06	6,93E-07	3,53E-11
	Sin	100	3,71E-03	3,50E-03	0,00019	9,40E-06	1,15E-06	5,94E-11
	Con	0	0	0	0	0	0	0
	Con	25	9,30E-04	8,70E-04	6,00E-05	3,46E-06	4,42E-07	2,18E-11
	Con	50	1,85E-03	1,80E-03	1,07E-04	5,59E-06	6,93E-07	3,53E-11
	Con	100	3,71E-03	3,50E-03	0,00019	9,40E-06	1,15E-06	5,94E-11

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{3+} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

Letras diferentes indican diferencias significativas ($p < 0,05$).

En la tabla 12, se presenta la especiación del aluminio, respecto a la solución de Hogland, siendo ésta la solución nutritiva utilizada para las plantas de tomate inoculadas y no inoculadas con *Spongospora subterranea* según los tratamientos de cloruro de aluminio.

Es muy notorio el incremento del ion libre Al^{3+} a medida que se incrementa su actividad en solución, independiente de la existencia del inóculo en la planta en todas las concentraciones; de igual manera se muestra el incremento gradual de las especies, aumentando su formación a medida que se aumenta la fuente de aluminio, confirmando la formación de pares iónicos en la solución, con una mayor solvatación con ligandos con el agua, generando productos por hidrólisis. En estas asociaciones el catión que actúa como ácido de Lewis, se asocia facialmente a otros aniones, formando pares iónicos específicos que actúan en la disminución de la actividad del ion Al^{3+} , aumentando la fuerza iónica y disminuyendo la toxicidad por precipitación con $Al(OH)_3$. (Rodella, 2006), atenuando el comportamiento y la actividad química por la transferencia de protones ácido-base en la solución.

A medida que la concentración de un electrolito aumentaba la concentración del catión entorno al anión, era ligeramente mayor que la concentración total esperada por su solvatación, y su efecto tóxico en la planta era evidente cuando se utilizó el cloruro de aluminio, pero con el sulfato de aluminio se limitó la acción por la atracción del ion a su entorno químico constituido por sustancias complejantes orgánicas o inorgánicas que disminuían su actividad específica teniendo muy en cuenta los cambios de pH que se pueden dar en la solución.

d. Identificar si la aplicación de Aluminio, en un suelo con quistosoros de *Spongospora subterranea*, favorece el crecimiento de las plantas de papa.

Tabla 13. Efecto de la aplicación de concentraciones crecientes de $Al_2(SO_4)_3$, en el crecimiento de plantas de papa infectadas con quistosoros de *Spongospora subterranea*.

Concentración (ppm)	Inoculo de <i>Ss</i>	pH siembra	pH 8 días despues	pH Floraciòn	pH Cosecha	pHf - pHl	Nº de Tuberculos	Peso g/parcela	Peso g/planta
0	Sin	5,5	5,2	4,6	4,4	-1,1	996 a	64880a	1622 b
1000	Sin	5,6	5,0	4,3	4,4	-1,2	1053 b	74810a	1870 a
5000	Sin	5,6	5,1	4,2	4,3	-1,3	1003 a	75810b	1895 a
10000	Sin	5,4	4,9	4,1	4,1	-1,3	1021 a	54710b	1673 b
0	Con	5,3	5,1	4,7	4,3	-1,0	797 a	50711a	1298 b
1000	Con	5,5	5,2	4,4	4,4	-1,1	726 b	64880a	1300 a
5000	Con	5,6	5,1	4,2	4,3	-1,3	993 a	57850b	1446 a
10000	Con	5,5	5,4	3,9	4,2	-1,3	913 a	50010b	1193 b

Las plantas de papa presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el crecimiento en suelo infestado y no infestado con *Spongospora subterranea*, presentando menor tamaño

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{3+} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

en el suelo infestado, entre los tratamientos de aluminio no se presentaron diferencias significativas.

En el suelo no infestado con *S. subterranea*, no se presentaron diferencias significativas ($p < 0,05$) en el crecimiento de las plantas, además se confirma respecto a los tratamientos, que hay un efecto notorio ya que el suelo actúa como una solución buffer que le permite al catión solvatarse con otros aniones orgánicos o inorgánicos, limitando la toxicidad creado por el catión Al^{3+} (McBride, 1994). En la concentración más alta de 10000 ppm el suelo no infestado tuvo una diferencia significativa en comparación con la misma concentración en un suelo infestado y también en cada una de ellas respecto al control. (Tabla 13).

El crecimiento de las plantas fue afectado por el patógeno y no drásticamente por la acción tóxica del aluminio, pues lo analizado en los resultados anteriores indican la posible formación de complejos iónicos en el suelo, ya que el suelo actúa como una solución buffer que estabiliza y regula la acidez del mismo, limitando la liberación del catión tóxico y además la posible fijación de éste a la pared del patógeno. El aluminio también podría asociarse a compuestos orgánicos, generalmente ácidos orgánicos como el citrato y el oxalato (Sposito, 1989, McBride, 1994), además de compuestos fenólicos que le permitirán su complejación y su posible especiación en los diferentes equilibrios, que se pueden presentar según las condiciones iónicas existentes.

La presencia de los compuestos orgánicos en el suelo es muy importante, porque provee la formación de formas libres que afectan drásticamente la solubilidad de los minerales, influenciando la distribución de especies inorgánicas presentes. El material orgánico, forma complejos iónicos, y superficies de adsorción más efectivas que los mismos iones inorgánicos en solución, y permite así la precipitación, influyendo directamente en la toxicidad causada por estos, favoreciendo la acción del patógeno en la planta.

La producción de papa en (gramos) presentó diferencias significativas ($p < 0,05$) entre el suelo infestado y el no infestado, con mayor producción en el suelo no infestado (tabla 13), no siendo muy notorio el efecto de las concentraciones crecientes del sulfato de aluminio en la planta, ya que estos suelos ácidos, forma pares iónicos y complejos orgánicos solubles, que permiten el equilibrio químico en el suelo (Sposito, 1989).

El efecto de diferentes concentraciones de aluminio en la producción de papa (g/planta) y (g/parcela) en suelo infestado y no infestado con *Spongospora subterranea*. Se observa una diferencia estadísticamente significativa ($p < 0,05$), ya que es notorio que existe una mayor producción por parcela cuando ésta no está inoculada en 5000 ppm.

No hay diferencia de pH respecto a la fuente de Aluminio en el pH del suelo, infestado y no infestado con *Spongospora subterranea* durante un ciclo de cultivo de papa. $t = -0,561951$ valor-P = 0,594503., pero si existe una reducción en el pH desde la siembra y hasta la cosecha, que aunque este cambio se dio y fue gradual, estas condiciones del suelo no fueron las adecuadas para favorecer la acción del catión Al^{3+} .

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

La actividad toxica del Al^{+3} como ion libre en las plantas de papa durante los experimentos fue la esperada, puesto que después de obtener los resultados de los ensayos en el laboratorio con plantas de tomate, se confirmaron en campo utilizando como fuente el sulfato de aluminio. Sin embargo, no se pudo determinar el nivel de susceptibilidad de los quistosoros de *S. subterranea* puesto que en condiciones de acidez extrema y estrés por Al^{+3} demostró una respuesta muy variable (Tabla 11), en todos los casos al Al^{+3} . La resistencia de este patógeno podría estar basada en su estructura básica infectiva llamada quistosoro, cuya cubierta es rica en quitina (Merz, 1989; Falloon, 2008), y allí podría estar asociado el catión y además en el suelo se da la preferencia del catión Al^{+3} por los compuestos orgánicos e inorgánicos existentes en el suelo, no afectando directamente al patógeno.

Sin embargo, en las plantas de papa si se determinó una diferencia significativa entre las plantas inoculadas y las no inoculadas con *S. subterranea* (Tabla 13). Posiblemente en el experimento en espacio confinado con plantas de tomate, el inóculo no presentó una diferencia significativa, ya que no existían compuestos orgánicos que pudieran asociarse a la actividad del aluminio libre.

El efecto de las dosis crecientes de sulfato de aluminio en el peso de la planta en la producción de papa no presentó una diferencia estadísticamente significativa entre la media de g/planta entre un nivel de $Al_2(SO_4)_3$ ppm, con un nivel del 95,0% de confianza, pero si existe una diferencia con el inóculo en la concentración más alta 10.000 ppm.

En la producción de tubérculos el efecto de las dosis crecientes de sulfato de aluminio en la producción de tubérculos de papa. Presentó diferencia significativa entre la media de N° tubérculos con el Sulfato de Aluminio, con un nivel del 95,0% de confianza, muy clara a 1000 ppm, en comparación con el suelo inoculado con *S. subterranea* y el no inoculado, ya que los iones en el suelo pueden solvatarse y asociarse fácilmente formando pares iónicos.

Es necesario que en futuras investigaciones también se realice en campo el ensayo con cloruro de aluminio para poder identificar su acción tóxica y así establecer cómo actúa el catión tóxico Al^{3+} en la planta y en el patógeno.

7. CONCLUSIONES

La actividad química del Al^{3+} aportado por la fuente $AlCl_3$ afecto drasticamente las plantas de de tomate en el crecimientodel tallo, la raiz y el peso seco, confirmando su toxicidad.

Las especies o pares ionicos generados por el cloruro de aluminio son mas toxicas que las generadas por el sulfato de aluminio para las plantas de tomate y papa.

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{3+} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

No hay efecto tóxico de la actividad química del Al^{3+} sobre el patógeno de *Spongospora subterranea* en plantas de tomate y papa.

Es posible considerar que la no tener efecto el Al^{3+} sobre el patógeno *Spongospora subterranea* de forma evidente, se podría tener efecto sobre las zoosporas liberadas por el quistosoro y así indicar si se contrarresta su acción biológica por la toxicidad del catión y sus especies en solución.

El suelo (andisol) permite la regulación de las especies químicas del sulfato de aluminio $Al_2(SO_4)_3$, ya que este actúa como una solución buffer controlando o inhibiendo su toxicidad en las plantas de papa.

La función amortiguadora de las diferentes sales que eran aportadas por la solución nutritiva, limitó drásticamente el efecto tóxico del aluminio sobre *Spongospora subterranea* y las plantas analizadas en el ensayo experimental.

La formación de pares iónicos y complejos del aluminio con el sulfato en los ensayos en solución, permitió dar claridad sobre el efecto no tóxico del aluminio en el patógeno *Spongospora subterranea* y por consiguiente establecer que el Al^{3+} actúa en la inhibición del crecimiento de las plantas de tomate y no de la inhibición de la acción de el patógeno. Quitar alta

La especiación permitió dar claridad del por qué en gran parte de los ensayos la actividad química del aluminio sobre la planta y el inóculo no era lo esperado, frente a lo reportado para su toxicidad, ya que la alta formación de especies químicas y su concentración, además de la formación de pares iónicos, limitó sus efectos tóxicos, pero no controló la severidad del patógeno en la planta (papa), utilizando sulfato de aluminio como fuente.

La tolerancia del tomate se le atribuye a que es una planta ácido tolerante, fue una limitante en el análisis de resultados obtenidos y los resultados esperados, ya que al variar las concentraciones de la solución de aluminio, el efecto sobre la planta fue notorio en el crecimiento de las raíces y el tallo, aunque no se logró notar su efecto sobre los quistosoros de *Spongospora subterranea*.

En el ensayo de campo se encontró que el crecimiento de las plantas de papa *Solanum tuberosum* presentaron diferencias significativas a través del tiempo, debido a la acción del patógeno de *S. subterranea*, gracias a la relación que este mantiene con el sulfato de aluminio.

En el suelo sin infectar se determinó el efecto inhibitorio del crecimiento de las plantas de papa en presencia de aluminio, sobre todo a altas concentraciones como 10.000 ppm de sulfato de aluminio.

En la producción de papa al final del ciclo se confirmó que la producción disminuye significativamente por el efecto de *S. subterranea*, mientras que entre los tratamientos no existen diferencias significativas.

EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS

La especiación del aluminio basada en el programa de Species (Barak, 1990), fue fundamental para establecer la acción específica del aluminio como ion tóxico de las plantas, favoreciendo el análisis de los resultados en cada uno de los ensayos descritos, ya que permitió establecer cómo el aluminio tenía más preferencia por los aniones en su actividad química, al formar pares iónicos y complejos específicos en la solución cuando este era aportado por el sulfato de aluminio.

8. BIBLIOGRAFIA

Adams, f 1971. Ionic Concentrations and Activities in Soil Solutions. Soil Science of America., VOL. 35.

Amenós M, Corrales I, Poschenrieder C, Illés P, Baluska F, Barceló J. 2009. Different Effects of Aluminum on the Actin Cytoskeleton and Brefeldin A-sensitive Vesicle Recycling in Root Apex Cells of Two Maize Varieties Differing in Root Elongation Rate and Aluminum Tolerance. *Plant and Cell Physiology* 50: 528-540.

Allison, J.D.; Brown, D. S.; Novo-Gradac, K. J. MINTEQA2/PRODEFA2, a geochemical assessment model for environmental systems, version 3.0 User manual. U.S Environmental Protection Agency (EPA/600/3-91/021),1991.

Andrivon D. 1995. Inhibition by aluminum of mycelial growth and of sporangial production and germination in *Phytophthora infestans*. *Eur. J.Plant Pathol.* 101:527-533.

Andersen B, Nicolaisen M, Nielsen SL. 2002. Alternative hosts for potato mop-top virus, genus Pomovirus and its vector *Spongospora subterranea* f.sp. *subterranea*. *Potato Research*, 45: 37-43.

Barceló J. 2002. Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminium toxicity and resistance: a review. *Plant Physiology Laboratory, Science Faculty, Autonomous University of Barcelona, E-08193 Bellaterra, Spain.* *Environmental and Experimental Botany* 48 (2002) 75–92.

Barceló J. 2009. Different Effects of Aluminum on the Actin Cytoskeleton and Brefeldin A-sensitive Vesicle Recycling in Root Apex Cells of Two Maize Varieties Differing in Root Elongation Rate and Aluminum Tolerance. *Departamento de Biología Vegetal Universidad Autònoma de Barcelona.* *Plant and Cell Physiology* 50: 528-540.

Barak, P. 1990. SPECIES: A spreadsheet program for modeling chemical speciation of soil solution. *J. Agron. Educ.* 19(1):44-46.

Bohn L. 1993. Química del suelo, 2da edición, ed. LIMUSA México, p50-66.

Bohn HL, McNeal BL, O'Connor GA. 2001. Soil chemistry. John Wiley & Sons, third edition. New York, 307p.

EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS

Castaño, JJ. 1978. Trayectoria de la Fitopatología en Colombia (1571-1974). *Editorial Letras*, Medellín. 164 p.

Cevipapa 2009. Centro Virtual de Investigación de la cadena agroalimentaria de la papa. <http://www.cevipapa.org.co/>. Visitada Junio 2009.

Conklin AR Jr. 2005. *Introduction to Soil Chemistry: Analysis and Instrumentation*. p. 1. Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Delhaize E, Ryan PR. 1995. Aluminum Toxicity and Tolerance in Plants. *Plant Physiology*, 107: 315-321.

Falloon, R. *et al* 2004. Different Soil pHs Have Little Effect on *Spongospora subterranea* Infection of Potato Roots. Potato Association of America 88th Annual Meeting, Scottsbluff, Nebraska, 8-12 August 2004 *American Journal of Potato Research* 82 : 68-69.

Fassbender, H. W. 1982. Química de Suelos con Énfasis en Suelos de América Latina. IICA. San José. Costa Rica. P 398.

Feixa R, X. 2001, Tesis Doctoral. Poliaminas y tolerancia al aluminio en variedades tolerantes y sensibles de *Zea Mays*. P 1-19. Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Barcelona. Bellaterra España.

G.R. ROUT, S. SAMANTARAY, P. DAS. 2000. *Aluminium toxicity in plants: a review*. Plant Physiology and Biochemistry Laboratory, Regional Plant Resource Centre, Bhubaneswar, Orissa, India.

Gilchrist E, Jaramillo S, Reynaldi S. 2009. Efecto de aislamientos de *Trichoderma asperellum* y de las características del suelo sobre la sarna polvosa de la papa. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, en prensa.

Gilchrist, 2009. Estrategias para el manejo integrado de la sarna polvosa de la papa (*Spongospora subterranea* f.sp. *subterranea*), Tesis de doctorado Posgrado en Ciencias Agropecuarias, área Agraria Salud Pública Vegetal, Universidad Nacional sede Medellín

Harrison JG, Searle RJ, Williams NA. 1997. Powdery Scab Disease of Potato- A Review. *Plant Pathology*, 46: 1-25.

Hue, N.V.; G.R. Craddock; F. Adams. 1986. Effect of organic acids on aluminum toxicity in subsoils. *SoilSci. Soc. Amer. J.* 50, 28-34

Lee CR. 1971. Influence of Aluminium on Plant Growth and Mineral Nutrition of Potatoes. *Agronomy Journal*, 63:604-608.

EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS

- Lindsay W, 1979. Chemical Equilibria in Soils. Colorado State university. Press The Blackburn. New Jersey. P 34 – 49.
- McBride, M 1994. Environmental Chemistry of Soils. Oxford University Press. P 169-206. New York.
- Merz U. 1989. Infectivity, inoculum density and germination of *Spongospora subterranea* resting spores: A solution-culture test system. EPPO Bulletin, 19: 585–592.
- Merz U. 1997. Microscopical observations of the primary zoospores of *Spongospora subterranea* f.sp. *subterranea*. *Plant Pathology*, 46: 670-674.
- Merz U. 2008. Powdery Scab of Potato-Occurrence, Life Cycle and Epidemiology. Symposium paper. *American Journal Potato Research*, 85:241–246.
- Merz U, Falloon RE. 2009. Review: Powdery Scab of Potato-Increased Knowledge of Pathogen Biology and Disease Epidemiology for Effective Disease Management. *Potato Research*, 52:17–37.
- Mizuno N, Yoshida H. 1993. Effect of exchangeable aluminium on the reduction of potato scab. *Plant and Soil* 155/156: 505-508.
- Nakayama T, Horita M, Shimanuki T. 2007. *Spongospora subterranea* soil contamination and its relationship to severity of powdery scab on potatoes. *Journal Gen Plant Pathology*, 73: 229-234.
- Nielsen SL, Larsen J. 2004. Two *Trichoderma harzianum*-based bio-control agents reduce tomato root infection with *Spongospora subterranea* (Wallr.) Lagerh., f. sp. *subterranea*, the vector of *Potatomop-top virus*. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 111 (2), 145-150.
- N. K. KARANJA 1988. *Selecting Rhizobium phaseoli strains for use with beans (Phaseolus vulgaris L.) in Kenya: Infectiveness and tolerance of acidity and aluminium*. Department of Soil Science, University of Reading, London Road, UK
- Qu XS, Kavanagh JA, Egan D, Christ BJ. 2006. Detection and quantification of *Spongospora subterranea* f. sp. *subterranea* by PCR in host tissue and naturally infested soils. *American Journal of Potato Research*, 83:21–30.
- Raktim Pal et al. 2007. *Relationship between acidity and microbiological properties in some tea soils*. Biol Fertil Soils p.399–404 Springer-Verlag.
- Peter R. Ryan*, Ion E. Shaff, and Leon V. Kochian. Aluminum Toxicity in Roots. *Plant Physiol.* (1992) 99, 1193-1200. Published Cornell University, Ithaca, New York 14853.
- Sparks, D 2003. Environmental Soil Chemistry. Second edition. p118-124. University of Delaware. Press. Elsevier Science USA.

EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS

Sposito G. 1981. The Thermodynamics of Soil Solutions. Published in the United States by Oxford University Press.

Sposito G. 2008. The Chemistry of Soils. 2da ed, Cap 1. Oxford University Press
Sposito G. 1994. Chemical Equilibria and Kinetics in Soils. Published in the New York Oxford. University Press.

Stumm, W. y J. J Morgan. 1981. Aquatic chemistry. 2nd. Ed. John Willey and Sons. New York.

Statgraphis Centurion XVI Version 16.1.15. Programa de análisis estadístico.

Teresa Mossor-Pietraszewska. 2001. *Effect of aluminium on plant growth and metabolism*. Department of Biochemistry, Institute of Molecular Biology and Biotechnology, Adam Mickiewicz University of Poznań, Poznań, Poland.

Whelan and Martin Alexander. 1986. Effects of low pH and high Al, Mn and Fe levels on the survival of *Rhizobium trifolii* and the nodulation of subterranean clover
Department of Agronomy, Cornell University, Ithaca, NY 14853, USA. Published Plant and Soil 92, 363-371 (1986).

Wolt J.D. 1989. SOILSOLN. A program for teaching equilibrium modeling of solution composition. J. Agron. Educ. 18: 39-42. Dep. Plant and Soil Science, University of Tennessee, Knoxville.

Zapata R 2004. Química de la acidez del suelo. Cargraphics, 1^a edición.

Zar J. 1999. Bioestadistical análisis. *PrenticeHall*, 4^a edición, 663 p.

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

9. ANEXOS

Tablas por objetivos de los datos de especiación vinculados en el programa computacional.

Objetivo 1:

Concentración - dosis ppm	iones en M/L						Coeficiente de actividad	Balance final Mol /L		p(IAP)	p(Kps)
	Al	(SO ₄) ₃	(Cl) ₃	(Al)	(AlSO ₄ ⁺)	(Cl)		I	Cationes		
pH=3,5											
Sulfato	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1,9E-05	3,5E-06	9,4E-06	1,5E-05	3,2E-06	0	6,0E-04	3,8E-04	3,7E-04	36,43	33,96
10	1,9E-04	3,5E-05	9,4E-05	1,3E-04	4,8E-05	0	1,5E-03	7,6E-04	7,7E-04	35,57	33,96
25	4,6E-04	8,7E-05	2,4E-04	3,3E-04	2,1E-05	0	3,1E-03	1,4E-03	1,4E-03	35,25	33,96
50	9,3E-04	1,7E-04	4,7E-04	5,2E-04	3,7E-04	0	3,1E-03	2,2E-03	2,4E-03	34,96	33,96
100	1,9E-03	3,5E-04	9,4E-04	9,4E-04	9,3E-04	0	1,8E-03	1,8E-04	1,7E-03	29,86	33,96
Cloruro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	3,7E-05	0	9,4E-06	3,6E-05	0	4,3E-04	5,4E-04	4,4E-04	4,3E-04	36,05	33,96
10	3,7E-04	0	9,4E-05	3,6E-04	0	1,4E-03	2,4E-03	1,4E-03	1,3E-03	35,15	33,96
25	9,3E-04	0	2,4E-04	9,1E-04	0	3,2E-03	5,9E-03	3,1E-03	3,2E-03	34,86	33,96
50	1,9E-03	0	4,7E-04	1,8E-03	0	6,1E-03	1,2E-02	6,0E-03	6,1E-03	34,66	33,96
100	3,7E-03	0	9,4E-04	3,6E-03	0	1,1E-04	2,2E-02	1,1E-02	1,1E-02	34,51	33,96

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

Objetivo 2:

Fuentes	Concentración dosis ppm	iones en M/L			Actividades			Coeficiente de actividad	Balance final Mol /L		p(IAP)	p(Kps)	
		pH=3,5	Al	SO ₄	Cl	(Al)	(AlSO ₄ ⁺)		(Cl ⁻)	I			Cationes
Sulfato	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50	9,3E-04	1,7E-04	4,7E-04	9,4E-07	5,1E-08		3,1E-03	2,2E-03	2,4E-03	34,96	33,96	
	100	1,9E-03	3,5E-04	9,4E-04	1,9E-06	2,0E-07		1,8E-03	1,8E-04	1,7E-03	29,86	33,96	
	500	9,3E-03	1,7E-03	4,7E-03	9,8E-06	5,0E-06		3,9E-02	1,8E-02	1,8E-02	34,63	33,96	
	1000	1,9E-02	3,5E-03	9,4E-03	2,8E-05	1,9E-05		0,054956	0,0238	0,247	34,55	33,96	
	5000	9,3E-02	1,7E-02	4,7E-02	2,7E-04	4,5E-04		0,3155	0,1609	0,1591	34,28	33,96	
Cloruro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	50	1,85E-03	4,7E-04	1,9E-06	1,6E-04			1,2E-02	6,0E-03	6,1E-03	34,66	33,96	
	100	3,71E-03	9,4E-04	3,8E-06	3,6E-04			2,2E-02	1,1E-02	1,1E-02	34,51	33,96	
	500	1,85E-02	4,7E-03	2,6E-05	1,7E-03			1,1E-01	5,4E-02	5,4E-02	34,23	33,96	
	1000	3,71E-02	9,4E-03	6,3E-05	3,6E-03			0,223	0,111	0,112	34,1	33,96	
	5000	1,85E-01	4,7E-02	7,1E-04	2,2E-02			1,07	0,538	0,536	33,11	33,96	

Objetivo 3:

Fuente	Concentración - dosis ppm	Mol/L		iones en Mol/L						Coeficiente de actividad	Balance final Mol /L		p(IAP)	p(Kps)
		Al	Cl	(Al)	(Cl)	(Al(OH ⁻²))	(Al(OH ⁻¹) ₂)	(Al(OH ⁻⁰) ₃)	(Al(OH ⁻¹) ₄)		I	Cationes		
Cloruro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	25	9,3E-04	2,4E-04	8,7E-04	2,9E-03	6,0E-05	3,46E-06	4,42E-07	2,18E-11	5,9E-03	3,1E-03	3,2E-03	34,86	33,96
	50	1,9E-03	4,7E-04	1,8E-03	5,6E-03	1,07E-04	5,59E-06	6,93E-07	3,53E-11	1,2E-02	6,0E-03	6,1E-03	34,66	33,96
	100	3,7E-03	9,4E-04	3,5E-03	1,1E-04	1,90E-04	9,40E-06	1,15E-06	5,94E-11	2,2E-02	1,1E-02	1,1E-02	34,51	33,96

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

**RELACIONES DE MASA A PARTIR DE LA SOLUCION NUTRITIVA
HOGLAND.**

REACTIVO	Solución Stock (g/10L)	Volumen utilizado (mL/ L)	g/L	Mol/L(stok)	Mol sol	mM/L	mEq/L
Nitrato de Potasio	4,47E+00	4,76E+00	4,47E-01	4,46E-03	2,12E-02	2,12E+01	2,12E+01
Nitrato de Calcio	9,77E+00	4,76E+00	9,77E-01	9,58E-03	4,56E-02	4,56E+01	4,56E+01
Sulfato de potasio	1,81E+00	9,23E-01	1,81E-01	1,04E-03	9,61E-04	9,61E-01	9,61E-01
Ácido Fosfórico	1,00E+00	9,23E-01	1,00E-01	1,02E-03	9,42E-04	9,42E-01	9,42E-01
Hidróxido de Calcio	3,29E-01	9,23E-01	3,29E-02	4,44E-04	4,09E-04	4,09E-01	4,09E-01
Sulfato de Magnesio	7,93E+00	4,76E+00	7,93E-01	6,59E-03	3,14E-02	3,14E+01	3,14E+01
Ácido Bórico	2,98E-02	5,73E-01	2,98E-03	-	-	-	-
Sulfato de Manganeso	1,67E-02	5,73E-01	1,67E-03	-	-	-	-
Sulfato de Zinc	1,20E-03	5,73E-01	1,20E-04	-	-	-	-
Sulfato de Cobre	1,20E-03	5,73E-01	1,20E-04	-	-	-	-
Molibdato de Amonio	9,00E-04	5,73E-01	9,00E-05	4,59E-07	2,63E-07	2,63E-04	2,63E-04
Sulfato Ferroso	1,67E-01	5,73E-01	1,67E-02	-	-	-	-

Los espacios en blanco indican trazas mínimas no consideradas en la experimentación.

**REACIONES DE MASA PARA LOS CALCULOS EN EL PROGRAMA
SPECIES.**

Reactivo	PM g/mol	M/L sln	Mol/L[Ca ⁺²]	Mol/L[K ⁺¹]	Mol/L[Mg ⁺²]	Mol/L[H ⁺¹]	Mol/L[NO ₃ ⁻¹]	Mol/L[SO ₄ ⁻²]	Mol/L[PO ₄ ⁻²]	Mol/L[OH ⁻¹]	Sumatoria
Nitrato de Potasio	101,103	2,12E-02		8,21E-03			1,30E-02				2,12E-02
Nitrato de Calcio	164	4,56E-02	1,13E-02				3,45E-02				4,58E-02
Sulfato de potasio	174,25	9,61E-04		4,31E-04				5,29E-04			9,60E-04
Ácido Fosfórico	98	9,42E-04				2,88E-05			9,13E-04		9,42E-04
Hidróxido de Calcio	74,093	4,09E-04	2,21E-04							1,88E-04	4,09E-04
Sulfato de Magnesio	120,36	3,14E-02			6,33E-03			2,50E-02			3,13E-02
Sumatoria			1,16E-02	8,64E-03	6,33E-03	2,88E-05	4,75E-02	2,55E-02	9,13E-04	1,88E-04	

**EFFECTOS DE LA ACTIVIDAD DEL Al^{+3} SOBRE EL PROTOZOARIO *Spongospora subterranea*,
EVALUADO EN PLANTAS**

TABLA ANIONES Y CATIONES

Catión y Anión Mol/L	NO_3^+	SO_4^{2-}	PO_4^{3-}	OH^-	Sumatoria
Ca^{2+}	9,58E-03			4,44E-04	1,00E-02
K^+	4,46E-03	1,04E-03			5,50E-03
Mg^{2+}		6,59E-03			6,59E-03
H^+			1,02E-03		1,02E-03
Sumatoria	1,40E-02	7,63E-03	1,02E-03	4,44E-04	0