

**UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y FORESTALES**



EFFECTO DE DIFERENTES DOSIS DE SULFATO DE CALCIO SOBRE LA EFICIENCIA FOTOQUÍMICA Y SISTEMA ANTIOXIDANTE DE TRES CULTIVARES DE ARÁNDANO ALTO (*Vaccinium Corymbosum* L.) SOMETIDOS A ESTRÉS POR TOXICIDAD DE ALUMINIO EN UN ANDISOL.

Tesis presentada a la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Forestales de la Universidad de La Frontera. Como parte de los requisitos para optar al título de Ingeniero Agrónomo.

PATRICIA VICTORIA POBLETE GRANT

PROFESOR GUIA: MARJORIE REYES DIAZ

TEMUCO – CHILE
2011

EFFECTO DE DIFERENTES DOSIS DE SULFATO DE CALCIO SOBRE LA EFICIENCIA FOTOQUÍMICA Y SISTEMA ANTIOXIDANTE DE TRES CULTIVARES DE ARÁNDANO ALTO (*Vaccinium Corymbosum* L.) SOMETIDOS A ESTRÉS POR TOXICIDAD DE ALUMINIO EN UN ANDISOL.

PROFESOR GUIA

: MARJORIE MARIANELA REYES DIAZ
BIÓLOGO, DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS QUÍMICAS Y RECURSOS
NATURALES, UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA

PROFESORES CONSEJEROS

: MIREN RITA ALBERDI LAG
PROFESOR DE BIOLOGÍA Y QUÍMICA
DOCTOR EN CIENCIAS BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS QUÍMICAS Y RECURSOS
NATURALES, UNIVERSIDAD DE LA FRONTERA

CALIFICACION PROMEDIO TESIS

:

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero agradecer a Dios por elegir tan sabiamente y poner a mi lado a la mujer que fue mi motor para levantarme cada día y lograr terminar esta etapa tan importante de mi vida... mi madre. Sin ella nada de esto podría haber sido posible. También agradecer a la pequeña luz de alegría que es mi sobrino Benjamín, a mi padre, hermanos y mi cuñado.

También considero importante mencionar a mi buen amigo Guido Candia, ya que él fue el que me consiguió esta tesis y estuvo conmigo durante todo el proceso junto con mi amigo Felipe Millanao.

Quiero agradecer la siempre buena disposición de mi profesor guía la Doctora Marjorie Reyes para la consulta de dudas, sus consejos y preocupación en el desarrollo de este trabajo de investigación, así como también quiero agradecer el apoyo de mi profesor consejero la Doctora Miren Alberdi.

También a mi compañero de trabajo Cristian Meriño, que me ayudó a realizar esta investigación y a todas aquellas personas que estuvieron conmigo durante este proceso que finalizó con la entrega de esta tesis.

El desarrollo de esta tesis fue posible gracias al proyecto Fondecyt N° 11080231.

INDICE GENERAL

Capítulo		Página
1	INTRODUCCION	7
2	REVISION BIBLIOGRAFICA	9
2.1	El cultivo del arándano	9
2.1.1	El arándano en Chile	9
2.1.2	Generalidades del Cultivo del arándano	10
2.1.3	Morfología	11
2.1.3.1	Hojas	11
2.1.3.2	Sistema radical	11
2.1.4	Factores de suelo	12
2.2	Características de los suelos Andisoles	13
2.3	Aluminio en el suelo	14
2.3.1	El Al ³⁺ intercambiable	15
2.3.2	Absorción de aluminio por la planta	16
2.3.3	Efectos de estrés por aluminio	17
2.3.4	Interacción del aluminio con otros cationes del suelo	21
2.3.4.1	Interacción aluminio-calcio	21
2.3.4.2	Interacción aluminio-azufre	23
2.3.4.3	Interacción aluminio-fósforo	25
2.4	Sistema Antioxidante	27
2.4.1	Compuestos fenólicos como antioxidantes	30
2.5	Utilización de enmiendas como una forma de disminuir el Al del suelo	32
2.5.1	Sulfato de Calcio como enmienda de corrección	33

Capítulo		Página
3	MATERIALES Y MÉTODOS	35
3.1	Suelo utilizado	35
3.2	Cultivares utilizados en el ensayo	36
3.3	Fertilización	36
3.4	Plantación	37
3.5	Cuidados culturales	37
3.5.1	Riego	37
3.5.2	Control de malezas	37
3.6	Diseño experimental y tratamientos	38
3.7	Mediciones	38
3.7.1	Fluorescencia de la clorofila a	38
3.8	Cosecha	39
3.9	Análisis Químico	39
3.9.1	Análisis químico a nivel foliar y de raíz	39
3.9.2	Análisis químico de suelos	40
3.10	Análisis Bioquímico	40
3.10.1	Determinación de la actividad antioxidante	40
3.10.2	Determinación de fenoles totales	40
3.10.3	Determinación de pigmentos	41
3.10.4	Determinación peroxidación lipídica	41
3.11	Análisis estadísticos	41
4	PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	42
4.1	Análisis Químico de suelo	42
4.2	Análisis de Fluorescencia	55
4.1.2	Rendimiento cuántico máximo (Fv/Fm)	55

Capítulo		Página
4.2.2	Rendimiento cuántico efectivo (Φ_{PSII})	57
4.2.3	Tasa de transporte de electrones (ETR)	59
4.2.4	Apagamiento no fotoquímico (NPQ)	63
4.3	Análisis Bioquímico	66
4.3.1	Análisis Actividad Antioxidante	66
4.3.2	Análisis contenidos de fenoles	68
4.3.3	Análisis de Pigmentos	70
4.3.4	Análisis Peroxidación Lipídica	75
4.4	Análisis Químico de hojas y raíces	77
4.4.1	Contenido de Aluminio	77
4.4.2	Contenido de Calcio	80
4.4.3	Contenido de Azufre	83
4.4.4	Contenido de Fósforo	85
5	CONCLUSIONES	88
6	RESUMEN	90
7	SUMMARY	92
8	REFERENCIAS	94
9	ANEXOS	109

1. INTRODUCCIÓN

Los suelos ácidos en el mundo abarcan una superficie de tres mil novecientos cincuenta millones de hectáreas (von Uexkull y Mutert, 1995). De estos suelos, entre un 40 y 50% de la superficie cultivable en el mundo corresponde a suelos con problemas de toxicidad por aluminio, lo cual es uno de los factores que más limita la producción de cultivos en este tipo de suelos. Los suelos volcánicos de Chile están constituidos mayoritariamente por Andisoles (Trumaos). Estos suelos se encuentran influenciados por el clima templado lluvioso y una agricultura intensiva que trae como principal consecuencia la acidificación de los suelos. Un pH ácido puede solubilizar aluminio presente en silicatos de aluminio y óxidos de aluminio llevándolo a la forma trivalente (Al^{3+}) que es tóxico para las plantas. La toxicidad del aluminio produce precipitación de los fosfatos como fosfato de aluminio en la superficie de la raíz, interfiere con la división celular en las raíces, así como el proceso de absorción y la utilización de algunos iones, en especial el calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}) y fósforo (P).

La aplicación de enmiendas calcáreas como la cal, dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), calcita (CaCO_3) o productos similares para disminuir la toxicidad generada por el aluminio es bien conocida. Para este mismo fin también se utiliza las aplicaciones de yeso agrícola o sulfato de calcio (CaSO_4) como enmienda, que además de aumentar la concentración de calcio y azufre en la solución del suelo que esté disponible para las plantas, presenta un bajo efecto sobre el pH, requerido por algunos cultivos para un buen desarrollo, disminuye el nivel de aluminio intercambiable y su actividad, reduce la saturación de aluminio en el complejo de intercambio del suelo, aumenta el crecimiento y la profundidad de raíces, mejora la estructura del suelo y reduce el sodio (Na^+) en suelos donde se ha acumulado, entre otras.

Convertido en el cultivo de mayor rentabilidad de los últimos años, el arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) requiere de suelos con pH entre 4,3 – 5,5. Si bien no se dispone de información respaldada, la superficie mundial de arándano cultivado estaría en torno a las 60.000 ha, de las cuales 10% se situarían en el hemisferio sur, con el liderazgo de Chile. Por sus requerimientos

agroclimáticos el cultivo del arándano se ha desarrollado principalmente en las regiones del sur de Chile. En la Región de la Araucanía hay alrededor de 1.525 ha de arándano (Censo frutícola, 2007) que se ha desarrollado bastante bien en la región debido a que este cultivo no presenta limitaciones en el establecimiento sobre suelos ácidos. Sin embargo, se especula que la presencia de aluminio sería un factor de estrés para este frutal. No se han realizado estudios científicos que evalúen el efecto de la aplicación de sulfato de calcio en arándano establecido en suelos del orden Andisol con presencia de aluminio fitotóxico y su implicancia sobre el potencial antioxidante y las respuestas fisiológicas en esta especie. Estos aspectos tan relevantes son los que se pretenden evaluar en la presente tesis. Para lo cual se ha planteado la siguiente hipótesis: La aplicación de CaSO_4 en suelos Andisoles disminuye la cantidad de aluminio del suelo reduciendo el estrés oxidativo en cultivares de arándano alto lo que se verá expresado en un mayor contenido antioxidante y una mayor eficiencia fotoquímica. Este estudio tiene por objetivo evaluar los efectos de diferentes dosis de sulfato de calcio sobre la eficiencia fotoquímica y sistema antioxidante en tres cultivares de arándano alto (*Vaccinium corymbosum* L.) sometidos a estrés por toxicidad de aluminio en un suelo Andisol, bajo condiciones controladas de invernadero.

Objetivos específicos:

- Analizar el efecto de la toxicidad de aluminio sobre parámetros fotoquímicos de la fotosíntesis en tres cultivares de arándano alto.
- Analizar la actividad antioxidante frente a un estrés por aluminio en tres cultivares de arándano alto.
- Evaluar las concentraciones de Al, Ca^{2+} , S y P en el suelo y su relación con algunos aspectos fisiológicos.
- Comparar los diferentes tratamientos de sulfato de calcio e identificar el tratamiento ideal para cada cultivar.
- Demostrar que la aplicación de sulfato de calcio como enmienda tiene efectos positivos para los cultivares de arándano estudiados.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 El cultivo del arándano.

2.1.1 El arándano en Chile.

En Chile, el arándano se inició como cultivo comercial a mediados de la década de los 80, alcanzando un mayor grado de expansión sólo a partir de los 90. Aparte de Chile, su cultivo se ha incorporado a otros países del hemisferio sur, como Argentina, Nueva Zelanda, Australia y Sudáfrica. Las primeras plantaciones comerciales se hicieron en 1985 y a partir de ese momento el cultivo se ha expandido hasta alcanzar una superficie que se estima sobrepasa las 10.000 ha que pueden separarse en tres zonas productoras: la zona norte con 998,7 ha (Coquimbo, Valparaíso y la Región Metropolitana), zona centro-sur con 6.200 ha aproximadamente (Libertador General Bernardo O'Higgins, Maule y Bío Bío) y la zona sur con unas 3.500 ha (Región de La Araucanía, Los Lagos y Los Ríos) (Allende y Vial, 2005; Censo Frutícola, 2007). De las especies cultivadas, las de mayor importancia son el arándano alto (highbush), que representa más del 80% del total de las demás especies cultivadas, exceptuando el arándano bajo (lowbush). Le sigue, en base al mismo análisis, la especie ojo de conejo (rabbiteye), con una proporción de alrededor del 14%.

Por sus requerimientos agroclimáticos el cultivo del arándano se ha desarrollado principalmente en las regiones del sur. Sin embargo, buscando la mejor oportunidad de colocación en el mercado externo, con un adecuado manejo tecnológico y para la obtención de fruta temprana, se ha establecido en regiones de la zona central, alcanzando incluso localidades del centro norte. Como una alternativa de exportación, por la alta resistencia de post cosecha comparada con la de otros berries (frutillas, moras y frambuesas), la investigación en arándanos ha permitido su introducción y expansión en un área más amplia que la esperada.

Chile tiene ventajas comparativas de contraestación que permite nuestra posición geográfica, ya que es posible ofrecer este producto en estado fresco a los principales mercados que se ubican en el hemisferio norte (Estados Unidos, Canadá y algunos países europeos). Chile es el tercer país en importancia a nivel mundial, y a su vez el mayor productor y exportador de arándano, del hemisferio sur. No cabe duda que en Chile aún no se ha explotado todo el potencial que puede ofrecer este frutal, teniendo en mente la demanda creciente que existe en los mercados externos. Dada la reciente introducción del arándano, en forma comercial en el país, existen muchas áreas que necesitan mayor investigación, aunque actualmente se están aplicando sistemas de manejo de otros países productores con bastante éxito. Por lo tanto, es importante realizar las adaptaciones y evaluaciones necesarias.

2.1.2 Generalidades del Cultivo del arándano.

Los arándanos son miembros de la familia Ericaceae, que son plantas caducifolias, naturales de suelos ácidos (pH de 4,3 a 5,5). Su saturación de calcio en el complejo de intercambio catiónico del suelo no debe exceder el 20%.

La subfamilia Vaccinioideae incluye al género *Vaccinium* y dentro de este género está el subgénero *Cyanococcus* o arándano verdadero. Dentro del género *Vaccinium* hay aproximadamente 400 especies, la mayoría de las cuales son nativas de Asia, pero 26 provienen de Norteamérica, destacando los whortleberries, deerberries, bilberries, sparkleberries, cranberries, lingonberries y blueberries, siendo estos últimos los que han alcanzado mayor importancia comercial en el sector frutícola (Buzeta, 1997).

2.1.3 Morfología.

2.1.3.1 Hojas.

Las hojas son simples, se distribuyen en forma alterna en la ramilla, varían entre uno a ocho cm en el largo y la forma puede ir de ovada a lanceolada. Tienen color verde pálido y en otoño desarrollan una pigmentación rojiza. Hay estomas solamente en el envés de las hojas encontrándose en densidades de 300 por mm cuadrado (Buzeta, 1997).

Las hojas de arándano pueden alcanzar los 75 mm de longitud y pueden tener pelos finos en su superficie inferior, bordes dentados, y lo que parece ser las nectarinas extraflorales cerca de su base (Gough *et al.*, 1976). Tienen alrededor de 2,2 mm de grosor y contienen varias capas estructurales entre la epidermis superior e inferior. La epidermis superior está cubierta por una cutícula promedio de 2,6 μm de espesor, y está compuesto de células simples, transparentes de 24 μm de ancho. Las hojas pueden variar en forma de estrecha elíptica a oval. Su superficie superior puede ser glabra, rugosa o lisa; los márgenes, todo o aserrada; la vena media, suave o pubescentes por el haz o el envés (Gough, 1994). El tamaño de la hoja se ve afectado por el medio ambiente y de los cultivos, así como por el espesor del tallo. Las hojas de los brotes ligeros pesan mucho menos que los de los brotes de espesor. Los brotes de mediano grosor son de peso intermedio (Shutak *et al.*, 1957). El número de hojas también varía de acuerdo a disparar espesor.

2.1.3.2 Sistema Radical.

El sistema de raíces se limita a la parte superior de 8 a 10 centímetros del suelo y es un competidor débil de agua y nutrientes. Las raíces, encargadas de la absorción, son finas y fibrosas. Tienen un diámetro de 50 μm (Gough, 1994). Las células de la epidermis de éstas, se encuentran asociadas bajo condiciones naturales a hongos simbiotes, pertenecientes a las micorrizas ericoides, las cuales intervienen en el metabolismo del N y P (Buzeta, 1997). Estas raíces fibrosas presentan ausencia de pelos radicales, por lo que el sistema de raíces tiene una capacidad de absorción relativamente baja. Las raíces del arándano no pueden penetrar los suelos

compactados y tienen poca tolerancia a los suelos excesivamente húmedos o secos (Gough, 1994).

El arándano alto tiene dos tipos de raíces: (1) las raíces de almacenamiento de lápiz grueso y el ancla y (2) las raíces finas, filiformes, a menudo sólo 50 μm de diámetro. Estas últimas son las raíces del alimentador responsable de la absorción de nutrientes. Las raíces están compuestas por una fina capa mucilaginosa que cubre el meristemo apical de la raíz, la que ayuda a la penetración de la raíz del suelo al tiempo que protege el tejido meristemático. El tejido de meristemas va en rápida división celular y es responsable en parte por la adición de nuevas células de la raíz (Gough, 1994).

2.1.4 Factores de Suelo.

Los mejores suelos para los arándanos son limos, arenosos, ácidos (pH 4,3 – 5,5) y bien drenados, lo que les permite lograr una alta disponibilidad de nutrientes como el hierro y el manganeso, los cuales requieren en mayor proporción comparado con otras especies frutales como el manzano, kiwi, cerezo y frambuesa. Para el cultivo de arándano es necesario el riego artificial por goteo que requerirá de una buena disponibilidad de agua. Por otro lado, ésta no debe presentar excesos de salinidad (sodio, calcio, cloro o boro). Un aspecto trascendental es la salinidad de los suelos. Según información del INIA, el arándano no soporta suelos salinos (carbonatos de calcio y de sodio) característicos de regiones del norte. El sistema radical del arándano, aunque requiere de una humedad constante, es muy sensible a terrenos con pobres drenajes y en condición de saturación podrían morir en dos días (Valenzuela, 1988).

Soto (1993) al probar sustratos, ratifica que el crecimiento óptimo de las raíces se genera en medios con una adecuada porosidad que se mantengan bien oxigenadas y constantemente húmedas. Por lo tanto, manejos que favorezcan esta condición como: el uso de materia orgánica y mulch, resultan ser muy positivos para aumentar la distribución radical y favorecer el crecimiento de las plantas (Valenzuela, 1988).

2.2 Características de los suelos Andisoles.

Es ampliamente conocido que los Andisoles presentan características naturales muy particulares que los distinguen de otros suelos en el mundo (Soil Survey Staff, 2006). Los suelos volcánicos del sur de Chile constituyen cerca del 60% de los suelos arables en el país (Besoin, 1985). Los suelos derivados de cenizas volcánicas ocupan en Chile un área aproximada a los 4 millones de hectáreas, de las cuales una superficie cercana al millón es arable. Estos suelos se caracterizan por poseer una alta capacidad de intercambio catiónico, alta capacidad de retención de fosfatos, bajo porcentaje de saturación de bases, altos contenidos de Al de intercambio y niveles de pH moderadamente a fuertemente ácidos (Gallardo *et al.*, 1999; Mora, 1994).

La alta retención de fósforo se debe mayoritariamente a reacciones de adsorción específica por formación de complejos de esfera interna con aluminio, hierro y manganeso de la superficie de los minerales de arcilla con carga variable y de óxidos cristalinos y no cristalinos. La acidificación es el resultado de una disminución en la concentración de bases intercambiables causada por una combinación de: lixiviación por la alta pluviosidad, y el uso de fertilizantes acidificantes (Mora *et al.*, 2004). La reactividad química está determinada especialmente por la presencia de Al activo, el cual puede presentarse en varias formas: alumino-silicatos de rango corto como alófan e imogolita; iones hidroxil-Al en silicatos de capas 2:1 y 2:2; complejos Al-húmicos; y Al de intercambio (Al^{3+}) en silicatos de capas (Sadzawka y Porte, 1985; Besoin, 1999).

En la Región de la Araucanía, el 53% de las Series de Suelos de Andisoles tiene $pH-H_2O < 5,8$ y el 34% una saturación de Al $> 5\%$ en los primeros 0,20 m. Todos los Andisoles con $pH-H_2O > 5,8$ tienen una saturación de Al $< 5\%$ (Figura 1), con excepción de la Asociación Los Nevados, debido a que posee una concentración muy baja de Ca intercambiable ($0,65 \text{ cmol} + \text{kg}^{-1}$) y un alto contenido de carbono orgánico (9,3%), lo que permite que el Al intercambiable se manifieste en forma importante en la capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE), sin que se vea reflejado en el pH por el efecto tampón de la materia orgánica.

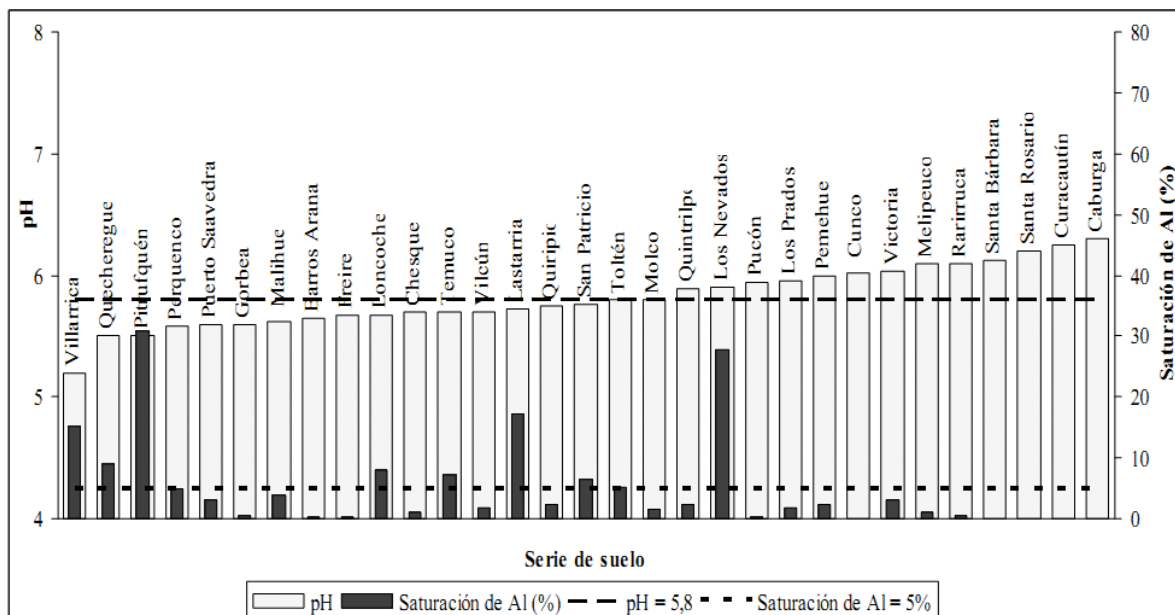


Figura 1. Proporción de Andisoles con $\text{pH-H}_2\text{O} < 5,8$ y con saturación de Al $> 5\%$ en los primeros 0,20 m, en la Región de la Araucanía de Chile (CIREN, 1999).

2.3 Aluminio en el suelo.

El aluminio se reporta como el factor más limitante de la producción agrícola en suelos ácidos, los cuales comprenden alrededor del 40% de la superficie cultivable en el mundo (Matzner y Prenzel, 1992; Ma, 2000). En zonas ácidas, el aluminio es uno de los factores más importantes que determinan las especies de plantas y su distribución. La principal toxicidad causada por la acidificación de los suelos se debe al aluminio soluble en la solución de suelo, que afecta especialmente el desarrollo de la raíz de la planta. Sin embargo, aún a concentraciones no letales, el aluminio soluble afecta la absorción de otros iones, principalmente calcio, magnesio y potasio (Sadzawka *et al.*, 2006).

La solubilidad y las formas químicas del Al en agua pura están determinadas por una secuencia de etapas de hidrólisis que finalizan en la precipitación del $\text{Al}(\text{OH})_3$, hecho que sucede a $\text{pH } 5.5$ y

una posterior solubilización de este sólido como anión aluminato a un pH mayor de 8 (Zapata, 2004). Con la reducción del pH del suelo, sucede la destrucción de los minerales de las arcillas y de otros silicatos, así como la solubilización de óxidos de aluminio, lo que conduce a la degradación irreversible del suelo; el aluminio aparece en estos casos como Al^{3+} . La meteorización de los componentes del suelo permite la liberación de iones Al^{3+} a partir de la red de los silicatos de las arcillas.

Adicionalmente, los protones del suelo tienen otros orígenes. En los suelos ácidos, estas fuentes pueden ser la hidrólisis del CO_2 proveniente de la respiración de los microorganismos, la hidrólisis de cationes metálicos, los grupos ácidos y alcohólicos de la materia orgánica, los grupos OH^- de las láminas de los aluminosilicatos y los fertilizantes. Igualmente, al suelo pueden llegar ácidos fuertes provenientes de contaminantes como la lluvia ácida o vertidos industriales. En suelos ácidos minerales, con pH menor de 5,5 los cationes intercambiables Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$ y $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ son dominantes, principalmente en suelos con predominio de coloides con carga permanente (Zapata, 2004).

2.3.1 El Al^{3+} intercambiable.

La concentración del aluminio en la solución del suelo está relacionada con el pH del suelo, con la saturación del aluminio intercambiable y con la concentración de sales del suelo. A pH 5,5 la concentración de Al^{3+} es muy baja. Cuando el pH disminuye la concentración de Al^{3+} aumenta bruscamente y coexisten en la solución las especies Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{+2}$ y $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ (Zapata, 2004). En el suelo de pH 4 o menor, la forma predominante es de aluminio trivalente (Al^{3+}). A medida que aumenta el pH del suelo por hidrólisis se forman especies mononucleares como $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$ y $\text{Al}(\text{OH})_2^+$. Si aumenta el pH lo suficientemente alto, estas especies se precipitan en forma $\text{Al}(\text{OH})_3^0$, y con nuevos aumentos en el pH, especies anfotéricas de $\text{Al}(\text{OH})_4^-$ aparecen (Barnhisel y Bertsch, 1982; Thomas y Hargrove, 1984). En condiciones de pH extremadamente ácido [pH (CaCl_2) < 3] comienza la solubilización del óxido de hierro cristalino Ferrihidrita, lo que conduce a la liberación de iones Fe^{3+} . A ese rango de pH casi el 100% de los cationes de

intercambio están conformados por Al^{3+} , y una parte muy pequeña por H^+ , Fe^{3+} y Mn^{2+} . Como consecuencia, en las plantas se presentan deficiencias nutritivas severas y efectos tóxicos causados por los iones de aluminio y manganeso (Casierra y Aguilar, 2007).

La mineralización de la materia orgánica puede contribuir también a la toxicidad por Al, lo que resulta en una liberación de iones de hidrógeno (H^+) al medio ambiente del suelo reduciendo su pH, lo que determina un aumento de la liberación de Al^{3+} (Hede *et al.*, 2001).

2.3.2 Absorción de aluminio por las plantas.

El aluminio puede ser absorbido por la planta con gran rapidez principalmente cuando el suelo tiene una reacción ácida. Las reacciones químicas del aluminio en el suelo son extraordinariamente complejas y diversas, y comprenden principalmente hidrólisis, polimerización y reemplazo de elementos. Algunos monómeros resultantes de las reacciones de hidrólisis de los compuestos de aluminio han sido reconocidos como fitotóxicos, aún cuando, los reportes sobre el efecto del hidróxido de aluminio en las plantas son contradictorios. Las reacciones de hidrólisis del aluminio semejan la reacción de un ácido fuerte, en la cual se liberan iones protones (Wallnöfer y Engelhardt, 1995).

Haug (1984) señaló tres vías de entrada al aluminio:

- Por simple permeabilidad a través de la membrana.
- A través de estructuras lipídicas micelares inducidas por el propio aluminio.
- A través de transportadores unidos a fosfolípidos de la membrana o a otros agentes quelantes.

Es posible que la membrana plasmática, por su composición química, sea poco permeable a las formas ionizadas del aluminio, mientras que los compuestos de aluminio electrónicamente neutros o los complejos de aluminio, como $\text{Al}(\text{OH})_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ o AlCl_3 sean más móviles. Además, el

aluminio puede atravesar la membrana plasmática a través de los poros hidrófilos o por los canales de proteína y alcanzar el interior de la célula, reemplazando así la entrada de otros cationes necesarios para el desarrollo de las plantas (Wallnöfer y Engelhardt, 1995; Casierra-Posada, 2001; 2002).

La membrana plasmática, y de igual manera el apoplasto de las células radiculares representan una barrera para la absorción del aluminio, sin embargo, puede suceder una acumulación pasiva del elemento en el apoplasto; además, es posible que el apoplasto no sea completamente permeable al aluminio, pues el tejido fuera de la endodermis presenta usualmente diferentes modelos de distribución del elemento (Casierra-Posada, 2001; 2002).

En la actualidad se acepta que el ápice radicular juega un papel muy importante en cuanto a la respuesta a la toxicidad por aluminio y a la percepción de la presencia del elemento en forma soluble en el sustrato. Con base en las investigaciones realizadas al respecto, Sivaguru *et al.* (2000) sintetiza en tres aspectos el papel del ápice radicular en la respuesta al estrés por aluminio:

1. La acumulación de aluminio es un indicador de que la sensibilidad al elemento se ubica en el ápice radicular.
2. Los mecanismos de tolerancia a aluminio, como la exudación de ácidos orgánicos para formar complejos con el elemento, están confinados principalmente al ápice radicular.
3. La formación de calosa como indicador de la sensibilidad a aluminio, se induce en primer lugar en las células apicales de la corteza externa de la raíz.

2.3.3 Efectos del estrés por aluminio en plantas.

Efectos generales de la toxicidad de Al en las plantas incluyen alteraciones en la raíz, enrollamiento de la hoja, clorosis y crecimiento reducido. Más concretamente, Al interactúa con el equilibrio del agua, los daños del aparato fotosintético, disminuye el contenido de clorofila y carotenoides, inhibe la apertura de los estomas, afecta a la actividad de varias enzimas a través de

la sustitución de los iones de metal, y produce estrés oxidativo (Tripathi y Gaur 2006, Rai *et al.*, 2004).

Los organismos fotosintéticos de ambos ambientes terrestres y acuáticos pueden estar expuestos a estrés por Al, lo que podría causar un perjuicio grave en los procesos metabólicos básicos (Heim *et al.*, 1999). Estos estudios han documentado una reducción en el contenido de clorofila y el crecimiento, la inhibición de la actividad del PSII, aumento de la peroxidación lipídica, y los cambios en el metabolismo primario, contenido de minerales y de este modo inhibe la transferencia de electrones en el centro de reacción que finalmente resulta en el desgaste de la fotosíntesis (Reyes-Díaz *et al.*, 2010; Inostroza-Blancheteau *et al.*, 2011). Reyes-Díaz *et al.* (2009) analizaron los parámetros fotoquímicos ϕ PSII (eficiencia fotoquímica efectiva) y ETR (transporte relativo de electrones) para cultivares de arándano sometidos a diferentes tratamientos con Al los cuales disminuyeron sustancialmente en Legacy (alrededor de un 73%) y en Bluegold (cerca de un 83%), sin una recuperación total de estos parámetros, especialmente en Bluegold. Los parámetros fotoquímicos de Bluegold fueron menores, incluso bajo la condición de control en comparación con los otros cultivares.

Los resultados obtenidos por Azmat y Hasan (2008) mostraron que Al induce efectos adversos en el aparato fotosintético de *Lens culinaris*, impidiendo la recolección fotosintética de la luz debido a la alteración de los pigmentos de la antena. La inhibición de la síntesis de clorofila podría deberse al daño estructural de los cloroplastos en presencia de Al. El aluminio también interfiere en la absorción, transporte y uso del agua y diferentes nutrimentos esenciales, ya sea por el daño causado en la raíz o por ejercer efectos antagónicos en la absorción de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+ , NO_3^- y PO_4^{3-} (Nichol *et al.*, 1993; Ryan y Kochian, 1993). En consecuencia, se observan diversos síntomas de deficiencias nutricionales y disminuciones importantes en el rendimiento por efecto de Al. A nivel celular, la toxicidad de Al afecta la estructura y el funcionamiento de la membrana, la síntesis de ADN y la mitosis, la elongación de la célula, la nutrición mineral y el metabolismo (Wright, 1989). Eticha *et al.* (2005) sometieron al cultivo de maíz a tratamientos de 25 μM Al (como AlCl_3) durante 12 horas obteniendo como resultado la reducción del alargamiento de la raíz en forma significativa con una inhibición media de 34% en comparación

con el control sin Al. Trejo-Téllez y Gómez-Merino, (2007) reportaron en plantas de tabaco una inhibición del crecimiento de la raíz principal en presencia de 100 μM de Al a partir del tercer día de exposición evitando también la formación y el crecimiento de pelos radicales. Dicho efecto se acentuó a partir del quinto día. Durante los 10 días de exposición el crecimiento radicular en las plántulas del testigo fue cercano a 0,4 cm, mientras que con 100 μM de Al sólo fue de 0.23 cm, lo que significa una inhibición del crecimiento radicular de 41% en las raíces tratadas con Al, en comparación con el testigo. En este estudio también se observó una coloración intensa en 90% de las raíces tratadas con 100 μM de Al. La mayor intensidad de la tinción se localizó en los ápices, señalando esta parte de la raíz como el primer sitio de adsorción y acumulación de Al en cualquier tipo de planta cuyos mecanismos de resistencia han sido rebasados por las altas concentraciones del metal en la solución del suelo (Figura 2).

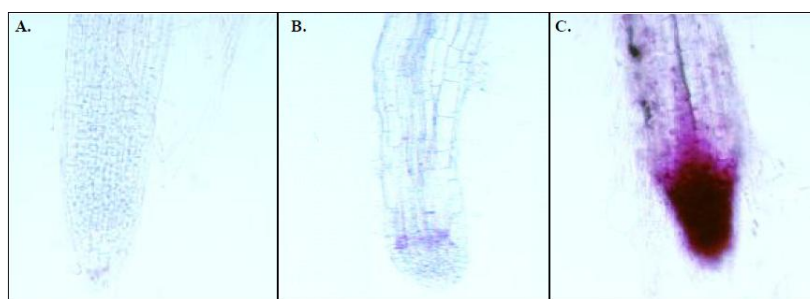


Figura 2. Tinción de raíces de plántulas de tabaco con eriocromo cianina R después de 24 h de tratamiento sin y con aluminio (Al). A. Sin Al, B. 50 mM Al y C. 100 mM Al (Trejo-Téllez y Gómez-Merino, 2007).

El estrés por Aluminio (Al), al igual que otros estreses abióticos y bióticos en las plantas puede alterar la homeostasis redox y puede incluso dar lugar a producir estrés oxidativo. El estrés oxidativo se describe como un desequilibrio entre las especies reactivas de oxígeno (ROS) y antioxidantes en los sistemas biológicos, y puede ser provocada por una mayor formación de ROS y / o por una reducción de las defensas antioxidantes (Munné-Bosch *et al.*, 2001). Es bien sabido que los orgánulos como cloroplastos, mitocondrias o peroxisomas con una actividad metabólica altamente oxidante o con intenso ritmo de flujo de electrones es una fuente importante de ROS en las células vegetales (Gill y Tuteja, 2010). El estrés oxidativo es un estado alterado de

la homeostasis de óxido-reducción intracelular, es decir, el balance entre oxidantes y antioxidantes. Dada su gran reactividad y en ausencia de mecanismos que las depuren, las ROS producen daños en la estructura y la función de las células (Simontacchi *et al.*, 2001).

Existen en las plantas mecanismos de protección enzimáticos y no enzimáticos que atrapan e inactivan eficientemente las ROS. Los principales antioxidantes no-enzimáticos incluyen a compuestos como el ascorbato y el glutatión, así como los tocoferoles, los flavonoides, los alcaloides y los carotenoides que se encuentran en las plantas con altas concentraciones y constituyen una primera línea de defensa.

Los compuestos fenólicos han sido correlacionados con la tolerancia de Al en las raíces de algunas plantas leñosas (Ofei-Manu *et al.*, 2001). Los compuestos fenólicos en particular los flavonoides han sido implicados recientemente como una nueva clase de metabolitos envueltos en la tolerancia de las plantas a Al (Manu *et al.*, 2001; Kidd *et al.*, 2001; Barceló *et al.*, 2002; Kochian *et al.*, 2004; Tolrá *et al.*, 2005; Mortia *et al.*, 2008). Los fenoles generan tolerancia a Al por doble mecanismo de expulsión antioxidante y quelación de Al (Kidd *et al.*, 2001; Kochian *et al.*, 2004). Debido a su alta afinidad para el aluminio a pH neutro, los compuestos fenólicos podrían contribuir al mecanismo interno de desintoxicación de aluminio.

Mecanismos de exclusión de aluminio incluyen quelación y desintoxicación del aluminio en la interfase suelo-raíz con ligandos orgánicos principalmente citrato, malato y oxalato y fosfato también, fenoles, y polipéptidos (Kidd *et al.*, 2001; Manu *et al.*, 2001; Kochian *et al.*, 2004; Zheng *et al.*, 2005) y la reducción de la absorción de Al por poseer una pared celular de baja capacidad de intercambio catiónico (Eitcha *et al.*, 2005; Hossain *et al.*, 2006; Liu *et al.*, 2008; Yang *et al.*, 2008). El problema de la toxicidad de Al^{3+} y la acidez del suelo que tradicionalmente se alivia mediante el encalado y fertilización. Sin embargo, el efecto de esta práctica se limita sólo a la capa superior del suelo, mientras que el subsuelo sigue siendo problemática (Eitcha *et al.*, 2005).

2.3.4 Interacción del aluminio con otros cationes del suelo.

2.3.4.1 Interacción aluminio-calcio.

El calcio es un nutriente esencial para las plantas. Como el catión divalente (Ca^{2+}), se requiere para las funciones estructurales en la pared celular y las membranas, como un catión opositor de aniones inorgánicos y orgánicos en la vacuola, como un mensajero intracelular en el citosol (Marschner, 1995). El calcio es absorbido por las raíces de la solución del suelo. Puede atravesar la raíz sea a través del citoplasma de las células unidas por plasmodesmos (el simplasto) o a través de los espacios entre las células (el apoplasto).

La contribución relativa de las vías apoplástica y simplástica a la entrega de Ca^{2+} al xilema son desconocidos (White, 2001). Sin embargo, el movimiento de Ca^{2+} a través de estas vías debe ser bien equilibrado, para permitir a las células de la raíz señalar la concentración de Ca^{2+} citosólico. El calcio entra en las células vegetales a través de los canales de iones Ca^{2+} permeables en su membrana plasmática (White, 2000). La deficiencia de calcio es rara en la naturaleza, pero puede ocurrir en suelos con baja saturación de bases y/o altos niveles de deposición ácida (McLaughlin y Wimmer, 1999).

El flujo de Ca^{2+} por el xilema a través de la vía apoplástica está influenciado notablemente por la transpiración, lo que podría llevar a las variaciones de la cantidad de Ca suministrado a la parte aérea y el desarrollo de trastornos de Ca^{2+} (Marschner, 1995; McLaughlin y Wimmer, 1999). Por otra parte, la vía apoplástica es relativamente no selectivo entre los cationes bivalentes (White, 2001; White *et al.*, 2002). Por el contrario, la vía simplástica permite a la planta controlar la velocidad y la selectividad del transporte de Ca^{2+} a los brotes (Clarkson, 1993).

En suelos minerales ácidos con pH inferior a 5,5 gran proporción de los sitios de intercambio de las arcillas está ocupado por aluminio, en donde éste reemplaza otros cationes como el Mg^{2+} y el Ca^{2+} y simultáneamente se adsorbe a los fosfatos. El efecto de competencia del aluminio sobre la

toma de calcio y magnesio justifica que las relaciones Ca/Al, Mg/Al o $(Ca^{2+} Mg^{+} K^{+})/Al$ en el suelo o en las soluciones nutritivas son mejores parámetros para predecir el riesgo de deficiencia de bases inducidas por aluminio, que la concentración de alguno de los elementos en forma individual (Casierra y Aguilar 2007).

El aluminio es un gran competidor del calcio, ya que tiene preferencia por donantes de electrones que contienen O_2 . Las paredes celulares contienen una gran variedad de lugares cargados negativamente, de los cuales el más importante es el ácido galacturónico que forma cadenas lineales altamente ramificadas dando lugar a las pectinas. Los principales polisacáridos pécticos son: homogalacturonano, ramnogalacturonano I y II y arabinogalactano. El homogalacturonano forma un gel rígido e insoluble en presencia de calcio. Es posible entonces que el aluminio con una mayor capacidad de unión a las pectinas que el calcio se una produciendo un aumento en la rigidez de la pared impidiendo la expansión celular (Garzón, 2003).

Uno de los primeros síntomas definidos en la toxicidad por aluminio es el producido debido a los procesos que ocurren tanto en el citoplasma como en la membrana plasmática, donde el metal bloquea la entrada de calcio, reduciendo su absorción (Rengel, 1992). El calcio actúa como mensajero secundario en la transducción de señales desde el medio exterior que rodea la planta a elementos del metabolismo de ésta (Triwavas y Gilroy, 1991) y se encuentra implicado sobretodo en la expansión celular. Diversos estudios han demostrado cómo el aluminio puede bloquear los canales de calcio en la membrana plasmática evitando la entrada de calcio al simplasma (Piñeros *et al.*, 1995).

Es bien conocido el efecto antagonista del calcio en la toxicidad por aluminio. Una elevada cantidad de Ca^{2+} evita la entrada de éste en la raíz y la inhibición del crecimiento radicular (Matsumoto *et al.*, 1976). El calcio actúa también de manera antagónica en cuanto a la permeabilidad de la membrana. La controversia acerca de si el aluminio aumenta o disminuye la concentración de calcio intracelular que se refleja en la disparidad de los estudios realizados y sus resultados, indicando algunos una disminución de éste a través del bloqueo de los canales (Rengel, 1992) y otros un aumento de la concentración citosólica del catión (Ma, 2002).

2.3.4.2 Interacción aluminio-azufre.

Puede decirse que el azufre (S) es un elemento olvidado. A pesar de ser requerido por las plantas en cantidades parecidas a las del fósforo (Tisdale *et al.*, 1990) y de ser tan importante como el nitrógeno en la determinación de la cantidad y calidad de la biomasa de un cultivo, no se le considera un macroelemento (Rending *et al.*, 1976; Reuveny *et al.*, 1980; Rennenberg, 1984) y se le clasifica aún en muchos textos como "elemento secundario".

La principal fuente original de S en los suelos es la pirita (FeS_2) de las rocas ígneas. Durante la meteorización, el S de la pirita se oxida a la forma de sulfato (SO_4^{2-}), el cual finalmente es asimilado por las plantas y los microorganismos e incorporado a la materia orgánica del suelo. En algunos suelos, parte del S se retiene como yeso ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$) y epsomita ($\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$) o se lixivia. El rango normal de S en los suelos agrícolas de regiones húmedas y semihúmedas es de 100 a 500 mg/kg o de 0,01 a 0,05%. Estas cantidades equivalen a alrededor de 200 a 1000 kg ha^{-1} en la capa arable. Sin embargo, la mayoría del S se encuentra en formas orgánicas que no son disponibles directamente para las plantas (Sadzawka *et al.*, 2004).

El S se encuentra en el suelo en formas orgánicas e inorgánicas. La cantidad de S en las dos formas varía ampliamente, dependiendo de la profundidad y de las características del suelo, pH, drenaje, contenido de materia orgánica, composición mineralógica. El S inorgánico del suelo se encuentra principalmente como sulfato, SO_4^{2-} , aunque pueden encontrarse compuestos de menor estado de oxidación, tales como sulfuros, sulfitos, tiosulfatos y S elemental. El S orgánico del suelo se divide en dos grandes grupos: S unido al C y sulfato esteres ($\text{R-O-SO}_3\text{H}$) (Sadzawka *et al.*, 2004). Como regla general, un suelo con menos de 14 $\mu\text{g g}^{-1}$ (ppm) de SO_4^{2-} soluble se considera un suelo deficiente en azufre disponible para las plantas (Wainwright, 1984; Rennenberg, 1984). Los requisitos y la captación de S son muy diferentes entre especies y entre los cultivares dentro de una misma especie (Scherer, 2001).

Si no se toma en cuenta la absorción de dióxido de azufre (SO_2) de la atmósfera, actividad que puede representar un aporte importante de azufre para muchas plantas (Wainwright, 1984;

Rennenberg, 1984). La mayor parte del azufre tomado por las plantas del suelo es absorbido en forma de SO_4^{2-} e incorporado al aminoácido cisteína en los tejidos fotosintéticos. La reducción asimilativa del azufre a sulfato es un proceso dependiente de la luz llevado a cabo en los cloroplastos (Rennenberg *et al.*, 1982). Una fracción importante de SO_4^{2-} es absorbido en los suelos con grandes cantidades de óxidos de Al y Fe (Bohn *et al.*, 1986).

Se sabe que aproximadamente un 40% de las enzimas (entre ellas ferredoxinas, nitrogenasas, entre otras) dependen para su actividad catalítica y de la presencia de grupos sulfhidrilo (SH). Dichos grupos SH proporcionan sitios de unión para metales tóxicos o fisiológicamente importantes que se relacionan con la destoxificación de drogas diversas y se ven involucrados en numerosas reacciones redox debido a su relativa facilidad de oxidación. También se sabe que la estructura terciaria y cuaternaria de muchas proteínas es resultado de la presencia de puentes disulfuro (-S-S-) formados por la oxidación de grupos SH de la cisteína, un aminoácido azufrado que, junto con la metionina, es factor clave en determinar el valor nutricional de las plantas (Huxtable, 1986) siendo un elemento central en el metabolismo del azufre en todos los organismos (Scott y Eagleson, 1988). Debido a la gran proporción de cargas dependientes del pH del suelo, la absorción de SO_4^{2-} depende más del pH de la solución de equilibrio (Couto *et al.*, 1979). La adsorción es más fuerte a menor pH del suelo (Martini y Mutters, 1984), por lo tanto existe una correlación negativa con el pH del suelo (Kparmwang *et al.*, 1997). La adsorción se convierte en insignificante a pH 6,5. Los suelos pueden absorber SO_4^{2-} por óxidos hidratados de Fe y Al de la siguiente manera (Figura 3).

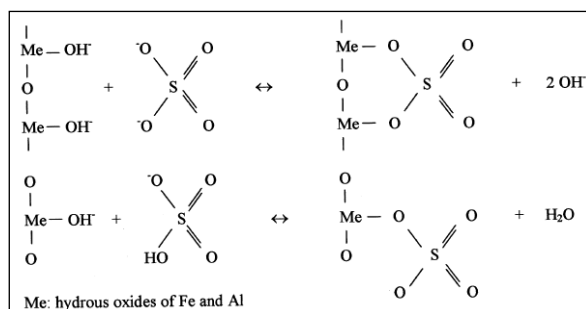


Figura 3. Adsorción de los iones SO_4^{2-} óxidos hidratados de Fe y Al (Scherer, 2001).

2.3.4.3 Interacción aluminio-fósforo.

Teniendo en cuenta que el P es un nutriente esencial y frecuentemente una limitación de él es negativa para el crecimiento vegetal, es sorprendente que muchos aspectos de la absorción de P y el transporte en las plantas no se entiendan completamente (Schachtman *et al.*, 1998). La absorción de P es un problema para las plantas, ya que la concentración de este mineral en la solución del suelo es baja, pero las necesidades de la planta son altas. La forma de acceder fácilmente a la mayoría de P por las plantas es P inorgánico (Pi), la concentración rara vez supera los 10 M en las soluciones del suelo (Bielecki, 1973).

La forma en que Pi existe en solución cambia en función del pH. Por debajo de pH 6,0, la mayoría de Pi está presente como especies monovalentes de H_2PO_4^- , mientras que H_3PO_4 y HPO_4^{2-} sólo estará presente en proporciones menores. La mayoría de los estudios sobre la dependencia del pH de la absorción de Pi en las plantas superiores han encontrado que las tasas de respuesta son más altas entre pH 5.0 y 6.0, donde domina H_2PO_4^- (Ullrich-Eberius *et al.*, 1984; Furihata *et al.*, 1992), lo que sugiere que Pi es tomado como la forma monovalente.

Es importante destacar que del 20 al 80% de P en el suelo, se encuentra en forma orgánica, de los cuales el ácido fítico (hexafosfato de inositol) suele ser un componente importante (Richardson, 1994). El resto se encuentra en la fracción inorgánica que contiene 170 formas minerales de P (Holford, 1997).

Las reacciones de fijación de fósforo en los suelos Andisoles, son muy energéticas y éstos adsorben apreciables cantidades de fósforo a través del tiempo. En éstos suelos, la fijación de fósforo ocurre en la superficie de algunos minerales como el alofán, la imogolita y complejos humus-Aluminio, especialmente en la estrata arable de los suelos. En los complejos humus-aluminio, el aluminio se encuentra en la forma de quelato sobre la superficie de las moléculas de humus, manteniendo cierta afinidad con el fósforo inmovilizándolo con gran energía (Figura 4) (Rojas, 2002). Las deficiencias de fósforo en los Andisoles se pueden atribuir a la abundancia de

óxidos de hierro y aluminio, lo cual es típico de los suelos de origen volcánico o altamente intemperizados (Agbenin, 2003).

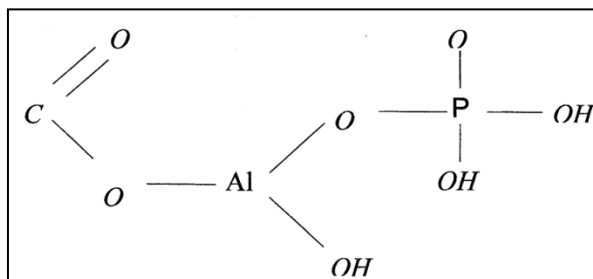


Figura 4. Modelo de fijación de fósforo. Complejo humus – aluminio en Andisoles (Rojas, 2002).

El P es absorbido por la planta principalmente como ion ortofosfato primario (H_2PO_4^-), pero también se absorbe como ion fosfato secundario (HPO_4^{2-}). La absorción de esta última forma se incrementa a medida que el pH asciende. Una vez dentro de la raíz, el P puede permanecer almacenado en esta área o puede ser transportado a las partes superiores de la planta.

El P en la planta forma parte de los ácidos nucleicos, adenosin-fosfatos (AMP, ADP, ATP) y piridín nucleótidos (NADP) por lo que participa en las reacciones energéticas, procesos anabólicos y transferencia de características hereditarias. Su deficiencia provoca severas alteraciones al metabolismo y por tanto al desarrollo vegetal (Marschner, 1986, Barceló, 2003).

En general, los iones fosfatos tienen alta afinidad por el aluminio, hierro y calcio, elementos que forman precipitados insolubles dependiendo de la acidez del suelo. Al respecto, en suelos con presencia de arcillas expandibles, al incrementarse el pH de la solución se produce la ruptura de las estructuras cristalinas y liberación del Aluminio la que se puede combinar con iones fosfatos y formar compuestos insolubles. En estos suelos, el encalado favorece el incremento de la disponibilidad del fósforo por la precipitación del aluminio (Rojas, 2002). Uno de los síntomas observados en las plantas expuestas a tratamientos con aluminio es una pigmentación más oscura, un verde más intenso que Lee y Pritchard (1984) relacionaron con una deficiencia de fósforo. Los niveles de fósforo interno varían bastante en función de la especie estudiada.

2.4 Sistema Antioxidante.

El estrés por Al, al igual que otros estreses abióticos y bióticos en las plantas, puede alterar la homeostasis redox y puede incluso dar lugar al estrés oxidativo. La peroxidasa (POD) y la superóxido dismutasa (SOD) constituyen la primera línea de defensa contra las especies reactivas del oxígeno (ROS), y los cambios en cantidad y actividad de ambas, se han identificado como un indicador de un cambio del estado redox bajo el estrés por Al (Jan *et al.*, 2001; Tamás *et al.*, 2003; Meriga *et al.*, 2004; Simonovicová *et al.*, 2004; Ali *et al.*, 2008). La investigación de este mecanismo de respuesta al estrés por Al puede dar nuevas pistas sobre el proceso de estrés en las plantas e incluso ayudar a mejorar la tolerancia al aluminio en los cultivos. Las plantas poseen sistemas de remoción de ROS muy eficiente, que los protegen de las reacciones de oxidación destructiva. Estas defensas no están restringidas al compartimento intracelular, sino también se encuentran en el apoplasto en forma limitada (Arora *et al.*, 2002).

Para controlar el nivel de ROS y para proteger las células en condiciones de estrés, los tejidos vegetales contienen varios compuestos para la remoción de ROS tales como: SOD, CAT, peroxidasa y glutatión peroxidasa (enzimáticos), glutatión S-transferasa, peroxidasa fosfolípidos hidroperóxido, glutatión peroxidasa y ascorbato (no enzimáticos y productos detoxificantes de la peroxidación lipídica), y la red de antioxidantes de baja masa molecular (ascorbato, glutatión, antifúngicos fenólicos y tocoferoles). Como también una serie de enzimas que se necesitan para la regeneración de las formas activas de los antioxidantes (reductasa monodehydroascorbate, dehidroascorbato reductasa y glutatión reductasa) (Blokhina *et al.*, 2003).

Además de la producción inducida por el estrés de oxígenos activos, se ha demostrado de forma concluyente que los ROS se forman incluso durante el metabolismo normal de las plantas (Rich y Bonner, 1978; Halliwell y Gutteridge, 1985). Los ROS pueden dañar diversos componentes celulares tales como lípidos (Moran *et al.*, 1994) y proteínas (Berlett y Stadtman 1997). Los ROS son producidas en diversos lugares de la célula. En la Tabla 1, se muestran algunos de los sitios de producción de ROS y los componentes del sistema antioxidante de la célula como también las

sustancias removedoras. Dentro del grupo de las ROS podemos encontrar radicales libres (especies químicas con uno o más electrones desapareados en sus orbitales externos), tales como el anión superóxido (O^{2-}) y el radical hidroxilo (HO^{\cdot}). Por otro lado, entre las formas no radicales encontramos el peróxido de hidrógeno (H_2O_2) y el oxígeno singulete (1O_2). En las plantas, el transporte fotosintético de electrones es una fuente importante de producción de oxígeno activo (Asada y Nakano, 1978). Superóxido (O^{2-}), el principal oxígeno activo producido, puede pasar a formar peróxido de hidrógeno (H_2O_2), en una reacción catalizada por la superóxido dismutasa (SOD) (Asada y Takahashi, 1987; Asada, 1994). A diferencia de otras especies de oxígeno activo, el H_2O_2 es capaz de difundir a través de membranas, debido a su alta estabilidad y a la permeabilidad de la membrana. La toxicidad de H_2O_2 en sí es débil en comparación con otras especies reactivas de oxígeno, pero en la presencia de metales de transición, el H_2O_2 produce el radical hidroxilo ($\cdot OH$), el oxígeno activo más reactivo (Sakihama *et al.*, 2002). Por lo tanto, la eliminación de H_2O_2 es esencial para evitar el daño oxidativo de las células vegetales. El oxígeno molecular en estado basal es relativamente poco reactivo (Foyer *et al.*, 1994b).

Tabla 1. Principales formas de ROS y su sitio de producción.

ROS		SITIO PRIMARIO DE PRODUCCIÓN	Removedores
PERÓXIDO DE HIDRÓGENO	H_2O_2	PEROXISOMAS (FOTORRESPIRACIÓN)	CATALASA
		DIVERSOS COMPARTIMIENTOS CELULARES Cloroplastos (CLP), Mitocondrias (MIT), Citoplasma (CIT)	APX, GLUTATIÓN
ANIÓN RADICAL SUPERÓXIDO	O^{2-}	DIVERSOS COMPARTIMIENTOS CELULARES (CLP, MIT, CIT)	SOD, AC. ASCÓRBICO, GLUTATIÓN
OXÍGENO SINGULETE	O_2^1	TILACOIDES	A-TOCOFEROL, CAROTENOIDES
RADICAL HIDROXILO	HO^{\cdot}	DIVERSOS SITIOS (EJ. REACCIÓN DE HABER-WEISS EN CLOROPLASTOS)	AC. ASCÓRBICO

En la mayoría de las circunstancias, el control del flujo de electrones entre el PSII y PSI regula el estado de reducción del lado receptor del PSI. Esto significa que el estado redox de aceptores del PSI significativamente no limita el transporte electrones (Harbinson y Hedley, 1993). Algunos

sitios importantes, tales como la proteína D1 del centro de reacción del PSII y el espacio apoplástico, parecen tener muy poca protección contra el daño oxidativo (Castillo y Greppin, 1988; Luwe y Heber, 1993). Normalmente, el H_2O_2 como subproducto del transporte de electrones fotosintético se detoxifica por el ciclo ascorbato-glutatión (Hall, 1993).

La reducción de cuatro electrones de oxígeno en la cadena de transporte de electrones respiratoria es siempre acompañado con una parcial reducción de tres electrones, produciendo la formación de ROS. Este término incluye no solo a los radicales libres (radical superóxido, O_2^- y radical hidroxilo, OH), sino también moléculas tales como peróxido de hidrogeno (H_2O_2), oxígeno simple ($^1\text{O}_2$) y ozono (O_3) (Blokhina *et al.*, 2003).

En un medio ácido el Al puede infiltrarse en los tejidos vegetales como Al^{3+} que resulta en una disminución dramática en las concentraciones de ascorbato (ASA) (Lukaszewski y Blevins, 1996). Pérdida de ASA cambia el equilibrio de los compuestos fenólicos (FA)/ ciclo de H_2O_2 hacia mayores niveles de radicales fenoxilo (FA). Estos procesos de detoxificación enzimática de O_2^- que se reduce a H_2O_2 por la superóxido dismutasa (SOD), otra enzima que muestra elevada actividad en respuesta a Al^{3+} (Cakmak y Horst, 1991).

Giannakoula *et al.* (2010) estudiaron dos líneas de maíz una tolerante y otra sensible al Al sometidas a estrés por Al donde se pudo apreciar un aumento en las raíces de la actividad de la SOD de la línea VA-22 de maíz tolerante a Al, especialmente después de 72 h de tratamiento con Al, lo que indica que la exposición a Al induce a la célula para iniciar la síntesis de SOD para eliminar los radicales superóxido que se produce en una cantidad mayor que la de SOD preexistente de un resultado que sugiere que Al induce la formación de ROS.

El peróxido de hidrógeno es producido por la dismutación de radicales superóxido en una reacción catalizada por la mayoría de las superóxido dismutasas (Asada y Yoshikawa, 1974). Convencionalmente, éstos han sido clasificados como enzimáticos y no enzimáticos, aunque en muchos casos ambos tipos de antioxidantes funcionan en forma coordinada (Foyer, 1994).

Antioxidantes enzimáticos: en este grupo se encuentran diversas enzimas tales como catalasa (ej. elimina H_2O_2 en los peroxisomas), superóxido dismutasa (SOD, elimina el anión-radical superóxido), ascorbato peroxidasa (APX, elimina H_2O_2 en diversos compartimentos) y glutatión reductasa (regeneración del glutatión). Antioxidantes no enzimáticos: En este grupo pueden distinguirse los antioxidantes hidrosolubles y los liposolubles. Entre los primeros (importantes en el citoplasma, estroma cloroplástico, entre otros) destacan el ácido ascórbico y el glutatión (Foyer *et al.*, 1994a). Entre los antioxidantes liposolubles (presentes en membranas) se encuentran los carotenoides (carotenos y xantofilas; Young 1991) y el α - tocoferol (Munné-Bosch y Alegre 2002). Existe además gran cantidad de moléculas antioxidantes putativos (flavonoides, diterpenos), cuyo papel está siendo estudiado actualmente (Munné-Bosch y Alegre 2000).

2.4.1 Compuestos fenólicos como antioxidantes.

Son diversos metabolitos secundarios (flavonoides, taninos, ésteres hidroxycinnamato y lignina) abundantes en los tejidos vegetales (Grace y Logan, 2000). Los polifenoles poseen la estructura química ideal para la actividad captadora de radicales libres, y se ha demostrado que los antioxidantes más eficaces *in vitro* son los tocoferoles y el ascorbato.

Propiedades antioxidantes de los polifenoles son derivados de su alta reactividad como donantes de hidrógeno o electrones, y de la capacidad de los polifenoles derivados de radicales para estabilizar y deslocalizar los electrones no apareados, y de su capacidad de quelar iones de metales de transición (terminación de la reacción de Fenton) (Rice-Evans *et al.*, 1997). Otro mecanismo que subyace a las propiedades antioxidantes de los fenoles es la capacidad de los flavonoides de alterar la cinética de la peroxidación de modificación de la orden de empaque para reducir los lípidos y la fluidez de las membranas (Arora *et al.*, 2000). Estos cambios estéricamente podría obstaculizar la difusión de los radicales libres y limitar las reacciones de peroxidación. Por otra parte, se ha demostrado recientemente que los compuestos fenólicos pueden estar implicados en la cascada de peróxido de hidrógeno de barrido en las células

vegetales (Takahama y Oniki, 1997). Los flavonoides comúnmente se acumulan en las células epidérmicas de los órganos de plantas como flores, hojas, tallos, raíces, semillas y frutos, que se encuentra en las formas glucosídicos (glucósidos) y formas no-glucosídicos (agliconas) (Sakihama *et al.*, 2002).

Una mayor tasa de exudación de ácidos orgánicos es inducida por el Al^{3+} a partir de los ápices de las raíces, lo que ha sido identificado como un importante mecanismo para la exclusión de las especies tóxicas de Al^{3+} de los ápices de las raíces (Ma *et al.*, 2001; Delhaize *et al.*, 2007; Liu *et al.*, 2009). La mayor exudación del ápice de la raíz de compuestos fenólicos tipo flavonoides también se ha relacionado con la exclusión de Al en el maíz (Kidd *et al.*, 2001). Sin embargo, los compuestos fenólicos han merecido menos atención que los ácidos orgánicos para la detoxificación de Al en las plantas. La razón principal es la alta afinidad por el H^+ de compuestos fenólicos. En la figura 5, se representa un modelo de cómo la interacción sinérgica de los radicales de fenoles y metales pesados, como el Al, pueden actuar para inducir al metabolismo un estrés oxidativo en las plantas.

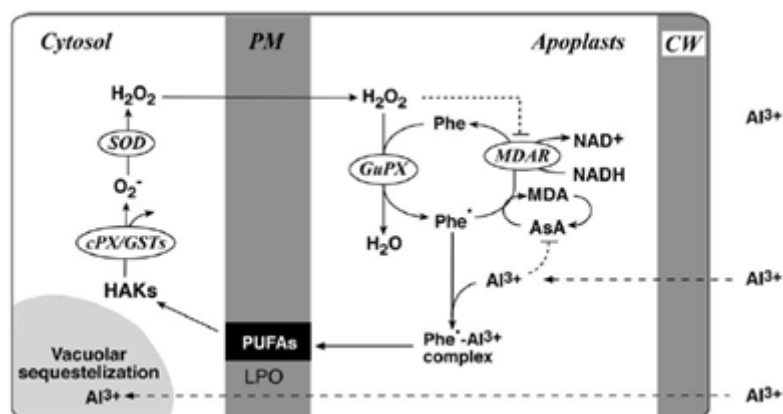


Figura 5. Esquema hipotético de toxicidad de Al mediada por compuestos fenólicos (Sakihama *et al.*, 2002).

2.5 Utilización de enmiendas como una forma de disminuir el Al del suelo.

Se han generalizado tres criterios para considerar al aluminio como un problema en el suelo: (1) cuando se presentan en el suelo, valores superiores a 2 meq de aluminio intercambiable; (2) cuando el porcentaje de saturación de aluminio, en relación con los cationes intercambiables, es mayor a 25; (3) si la relación $(Ca^{2+} Mg^{2+} K^+)/Al$ es menor o igual que uno. En cualquiera de estos casos es necesaria la implementación de algún correctivo con el fin de reducir el efecto tóxico del aluminio para las plantas (Instituto Colombiano Agropecuario, 1992).

En condiciones de alta acidez en los suelos, se aplican generalmente compuestos de cal como enmienda (Nuñez 1985, Fassbender y Bornemisza 1987). Se definen como materiales para encalado agrícola aquellas sustancias cuyos compuestos de calcio y magnesio son capaces de neutralizar la acidez de los suelos (Barber 1984). Entre los materiales más usados están la cal dolomítica ($CaMg(CO_3)_2$), debido a su alto valor de neutralización (Perdomo y Hampton 1970) y el sulfato de calcio o yeso agrícola ($CaSO_4 \times H_2O$), con fines de desplazar Al intercambiable y reemplazarlo por Ca^{2+} (Fassbender 1975, Lemus 1989).

Mediante la aplicación de cal al suelo, es posible lograr la reducción de los efectos tóxicos del aluminio, dado que los carbonatos, óxidos, hidróxidos y silicatos de calcio o magnesio neutralizan los iones H^+ en la solución del suelo, a través de los iones OH^- , cuando la cal reacciona con el agua del suelo ($CaCO_3 + H_2O \rightarrow Ca + HCO_3^- + OH^-$). La cal incrementa el pH del suelo al convertir el exceso de H^+ en H_2O . Además, el incremento del pH del suelo induce la precipitación del aluminio, como $Al(OH)_3$, que es un compuesto insoluble (Cumming y Weinstein, 1990).

Kinraide (1998) informó que la capacidad a corto plazo de Ca^{2+} para aliviar la toxicidad de Al^{3+} utiliza tres mecanismos: 1) El desplazamiento de Al^{3+} por efectos electrostáticos en la superficie celular, muy probablemente mediante el bloqueo de los canales de la membrana plasmática para el catión tóxico; 2) La restauración de Ca^{2+} en la superficie de la membrana celular con la adición de Ca^{2+} , cuando Al ha reducido la negatividad de la superficie; 3) Interacciones entre Ca^{2+} y Al^{3+}

(Silva *et al.*, 2005). Kinraide (1998) puso énfasis que con el objetivo de inhibir Al^{3+} ($1 \mu\text{mol L}^{-1}$) es necesario aplicar una concentración aproximadamente 1 mmol L^{-1} de Ca^{2+} .

2.5.1 Sulfato de Calcio como enmienda de corrección.

El yeso agrícola o sulfato de calcio ($\text{CaSO}_4 \times 2\text{H}_2\text{O}$), es un subproducto de la elaboración del ácido fosfórico y ha sido identificado como un mejorador de la acidez en el subsuelo (Raiji, 1988). Su composición química, rica en azufre (18-21%) y calcio (20-23%), hacen del yeso un elemento de gran valor como fertilizante de los suelos, aunque en este caso se emplea el mineral pulverizado y sin fraguar para que sus componentes se puedan dispersar en el terreno. Asimismo, una de las aplicaciones más recientes del yeso es la "remediación ambiental" en suelos, esto es, la eliminación de elementos contaminantes de los mismos, especialmente metales pesados.

El uso del yeso mejora las propiedades químicas de los suelos, aumentando además el Ca^{2+} en el subsuelo (Caires *et al.*, 2006), disminuyendo la acidez de éste (Toma *et al.*, 1999a) y además reduce el Al intercambiable (Ritchey y Snuffer de 2002, Hue, 2005). Representa también una importante fuente de Ca^{2+} y el azufre (S) (Bolan *et al.*, 1993) para la nutrición de las plantas y, según algunos autores, se puede mejorar el contenido de minerales en los tejidos vegetales, tales como N, P, K^+ , Ca^{2+} , Mn^{2+} , S y Zn^{2+} (Caires *et al.*, 2006; Tuna *et al.*, 2007).

Una característica importante de CaSO_4 es la reducción de Al tóxicos y el aumento en el estado de Ca^{2+} en el subsuelo (Toma *et al.*, 2005), sin alterar o ligeramente las condiciones de pH (Takahashi *et al.*, 2006). Se ha informado que la reducción de Al^{3+} intercambiable por la precipitación de CaSO_4 en minerales de sulfato de aluminio ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3$) y la formación es considerablemente menos tóxico para las plantas (Saigusa y Toma, 1997; Garrido *et al.*, 2003). Brady *et al.* (1993) estudiaron los efectos de tres especies monoméricas de Al, Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ y $\text{Al}(\text{OH})_2^{2+}$, y su influencia en el crecimiento de las raíces de la soja modificada con sulfato de calcio (500 a 2000 mM). Los efectos negativos de estas especies en el desarrollo de las raíces fueron inhibidos a concentraciones de CaSO_4 de 500 mM.

Como se indica más arriba, el sulfato de calcio no produce cambios significativos en el pH del suelo, su principal función radica en disminuir los niveles de Al del suelo. Esta función ha sido demostrada en el trabajo de Braeuner *et al.*, 2005 en cafetales (*Coffea arabica*). Mora *et al.* (1999) informó que la aplicación de CaSO_4 para ballica creciendo en un Andisol rico en materia orgánica (MO) resultó en un aumento considerable del rendimiento y una reducción del 50% en la concentración de Al, sin cambios significativos en el pH. Esta característica es muy importante, por ejemplo, en cultivos como el arándano (*Vaccinium spp.*), que deben desarrollarse en condiciones ácidas (pH 4,0 a 5,2), pero que son sensibles a la toxicidad de Al (Lyrene y Muñoz, 1997). Bakker (1999), también llegó a la conclusión que el CaSO_4 aumenta la biomasa de raíces finas en robles que crecen en suelos ácidos, incluso cuatro o cinco años después de la aplicación.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se montó en macetas en los invernaderos del Departamento de Ciencias Químicas y Recursos Naturales, perteneciente a la Universidad de la Frontera (densidad fotosintética de fotones $300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, 80% de humedad relativa y una temperatura media de 20°C), durante 60 días.

3.1 Suelo utilizado.

Para establecer el ensayo se trabajó con un suelo Andisol del Fundo Von Baer (Serie Gorbea), el cual se mezcló con un 20% de perlita para facilitar el desarrollo de la raíz. Cultivos altamente tolerantes a aluminio se desarrollan bien en suelos con saturaciones de aluminio de hasta un 20-30% (Campillo y Sadzawka, 2006) Además Yamamoto et al., (1996) señalan que el aluminio es uno de los mayores componentes del suelo y los iones de aluminio libre solubilizados a pH inferior a 5,0 son la mayor limitante para el crecimiento vegetal. Es por esto que para este ensayo el suelo que se utilizó puede ser considerado como un factor inductor de estrés en las plantas provocado por una alta saturación de aluminio ya que reúne un alto % de saturación de aluminio en el suelo (68%) y un bajo pH (4,7).

Tabla 2. Análisis químico de suelo serie Gorbea *Fundo Von Baer.

Análisis de Suelo (cm)	Promedio M
N (mg/kg)	33 ± 1,27
P (mg/kg)	20 ± 1,31
K (mg/kg)	70 ± 8,49
pH (en agua)	4,7 ± 0,03
Materia orgánica (%)	13,0 ± 0,71
K (cmol+/kg)	0,2 ± 0,02
Na(cmol+/kg)	0 ± 0
Ca (cmol+/kg)	0,2 ± 0,05
Mg(cmol+/kg)	0 ± 0
Al(cmol+/kg)	1,2 ± 0,36
Saturación de Al (%)	68,1 ± 6
CICE (cmol+/kg)	1,6 ± 0,34
S. Bases (cmol+/kg)	0,5 ± 0,03

Fuente: Laboratorio de Análisis Químicos de Suelos. Agroindustria Universidad de la Frontera.

3.2 Cultivares utilizados en el ensayo.

Plantas de arándano alto (*Vaccinium corymbosum* L.) cultivares Brigitta, Legacy y Bluegold de un año se establecieron en macetas con suelo Andisol serie Gorbea, además de macetas solo con suelo para tener una base en los análisis de suelo sin la interacción con las plantas.

3.3 Fertilización.

El suelo fue previamente tamizado (5 mm) y homogeneizado, colocando 2 kg/maceta de Andisol. Toda la fertilización se realizó al establecimiento, con excepción de la urea la cual se aplicó un 50% al inicio y el otro 50% a los 30 días después.

Tabla 3. Fertilización aplicada al inicio del ensayo

Nutriente	Dosis kg/ha	Fertilizante	Modo aplicación
N	50	Urea	cobertera
P	100	SFT	cobertera
K	100	Sulpomag	cobertera
Ca	100	SFT	cobertera
Mg	100	Sulpomag	cobertera
S	120	Sulpomag	cobertera
B	4	Boronat	cobertera
Zn	2	Sulfato de zinc	diluido riego
Cu	2	Sulfato de cobre	diluido riego

3.4 Plantación.

Las plantas se establecieron en macetas de 2 kg el 7 de diciembre del año 2010, se mantuvieron en el invernadero con condiciones controladas de temperatura y humedad durante 60 días.

3.5 Cuidados culturales.

3.5.1 Riego: Al inicio se aplicaron 400 ml de agua desionizada por maceta, luego la frecuencia de riego fue día por medio con 200 ml de agua desionizada por maceta, manteniendo el suelo a capacidad de campo.

3.5.2 Control de malezas: Se realizó el control manual, extrayéndolas en la medida que aparecían.

3.6 Diseño experimental y tratamientos.

Se utilizó un diseño factorial (3 x 4 x 3 ; cultivares x tratamientos x repeticiones) completamente al azar que constaron con la aplicación de cuatro tratamientos de CaSO_4 en dosis de 0 kg ha^{-1} (Control), 1000 kg ha^{-1} (T1), 2000 kg ha^{-1} (T2) y 4000 kg ha^{-1} (T3). Para cada tratamiento se realizaron 10 repeticiones.

3.7 Mediciones.

3.7.1 Fluorescencia de la clorofila a.

Se midieron los parámetros fotoquímicos como rendimiento cuántico máximo (F_v/F_m), rendimiento cuántico efectivo (Φ_{PSII}), tasa de transporte de electrones (ETR) y apagamiento no fotoquímico (NPQ) al inicio, 7, 15, 30, 45 y 60 días. Se midieron 5 plantas por tratamiento con 2 submuestras por planta (2 hojas) en hojas totalmente expandidas. El equipo utilizado para la medición de fluorescencia (parámetros fotoquímicos) fue un equipo de fluorescencia modulada HANSATECH FMSII N° 010992. Se utilizó el Método del pulso saturante descrito por Maxwell y Johnson (2000). Esta metodología se basa en lo siguiente:

Cuando una molécula de clorofila es excitada por la luz, la energía absorbida puede ser disipada a través de tres procesos: (a) fotoquímica, (b) disipación térmica (procesos no-fotoquímicos) y (c) fluorescencia. Los tres procesos mencionados compiten entre sí, de tal forma que el aumento en la eficiencia de cualquiera de ellos resulta en la disminución del rendimiento de los otros.

Cuando una hoja (previamente aclimatada a condiciones de oscuridad) es iluminada con luz de muy baja irradiancia (lo suficientemente débil para que no se produzca los procesos fotoquímicos), la hoja emite una señal baja de fluorescencia denominada F_0 . Esta señal proviene principalmente de la antena del PSII. Si a continuación se aplica un pulso de luz saturante (normalmente, varios miles de $\mu\text{mol fotones m}^{-2}\text{s}^{-1}$), la fluorescencia alcanza un máximo (F_m)

cuando la fotoquímica es saturada. En estas condiciones, el aceptor primario de electrones (Q_A) es completamente reducido. Si posteriormente se ilumina la hoja con luz actínica (es decir, luz fotosintéticamente activa), la hoja emite una señal de fluorescencia basal llamada F_s . Luego es aplicado otro pulso saturante y una nueva señal de máxima fluorescencia es obtenida (F'_m). Esta señal F'_m siempre debe ser menor que F_m debido a la existencia de procesos de disipación térmica (no-fotoquímicos) inducidos por la luz actínica. Si luego la luz actínica es removida y se ilumina con luz débil de tipo rojo lejano ($\lambda = 730$ nm), se obtiene una nueva señal basal llamada F'_0 , la cual suele ser menor a la F_0 (tomada en oscuridad).

3.8 Cosecha.

Las plantas fueron cosechadas luego de 60 días, se determinó el peso húmedo de cada muestra foliar y raíz. Se guardaron muestras para análisis bioquímicos y químicos. Las muestras para análisis bioquímicos se guardaron en bolsas de papel aluminio y se almacenaron en un refrigerador de -80°C . Las muestras para análisis químico se colocaron en bolsas de papel debidamente identificadas, para luego ser secadas en un horno de ventilación forzada por 48 h a una temperatura de 65°C , con el objeto de determinar contenidos de aluminio, calcio, fósforo y azufre. Después de secadas las muestras se pesaron en balanza y luego se molieron.

3.9 Análisis Químico.

3.9.1 Análisis químico a nivel foliar y de raíz.

- 1.- Fósforo: Por colorimetría del complejo fosfo-vanadomolibdato (Sadzawka *et al.*, 2007).
- 2.- Azufre: Por turbidimetría del sulfato de bario (Sadzawka *et al.*, 2007).

3.9.2 Análisis químico de suelos.

Se realizó un análisis químico de suelo inicial y al término del ensayo. Se tomó una muestra por tratamiento al comienzo, a 20 cm del suelo en estudio y al término del ensayo. Los análisis fueron realizados por el Laboratorio de Suelos de la Universidad de La Frontera.

3.10 Análisis Bioquímico.

3.10.1 Determinación de la actividad antioxidante.

Se empleó el método utilizado por Chinnici *et al.* (2004) el cual se basa en la reducción de la absorbancia medida a 515 nm del radical DPPH, por antioxidantes. El 1,1-difenil-1-picrilhidrazilo (DPPH[•]), es un radical libre estable que presenta una coloración púrpura en medio metanólico, como consecuencia de la donación de un electrón o un protón por un compuesto con poder antioxidante la tonalidad desaparece. Este procedimiento se lleva a cabo utilizando 10 µL de extracto para hoja y 20 µL para raíz y se completa a 500 µL de la solución metanólica 80%. Esta reacción se realiza en hielo. Luego se adicionan 2 ml de DPPH cada 30 segundos. Transcurridos 8 minutos de reacción a temperatura ambiente, se lee la absorbancia en un espectrofotómetro. Los resultados se expresan como valores en equivalentes Trolox (µg ET/g de peso fresco).

3.10.2 Determinación de fenoles totales.

La determinación de fenoles se realizó por el método colorimétrico de Folin-Ciocalteu (Singleton y Rossi, 1965). El fundamento de este método consiste en que los compuestos fenólicos son oxidados por una mezcla de ácidos conocida como reactivo de Folin. Se utiliza como reactivo una mezcla de ácidos fosfowolfrámico y fosfomolibdico en medio básico, que se reducen al oxidar los compuestos fenólicos, originando óxidos azules de wolframio (W₈O₂₃) y molibdeno

(Mo_8O_{23}). La absorbancia del color azul desarrollado se mide a 765 nm. Todas las muestras debieron ser diluidas utilizando 10 μl de extracto foliar con 30 μl de metanol 80%. Preparación de la muestra: 10 μl muestra diluida, 590 μl agua desionizada y 100 μl FOLIN.

3.10.3 Determinación de pigmentos.

Clorofila total y carotenoides totales se midieron en los extractos de hojas totalmente expandidas no a la sombra de un espectrofotómetro (modelo 2802 UV/VIS atomic absorption spectrometer; marca UNICO®) a 665, 646 y 470 nm. Los pigmentos se extrajeron con etanol 96% y las concentraciones se calcularon de acuerdo a Lichtenthaler y Wellburn (1983).

3.10.4 Determinación peroxidación lipídica.

En el material fresco, las sustancias reactivas al ácido tiobarbitúrico (TBARS) fueron medidos por el método de Heath y Parker (1968), modificado por Du y Bramlage (1992). En este procedimiento modificado, la absorbancia se midió a 532, 600 y 440 nm para corregir la interferencia producida por complejos de TBARS de azúcar. La peroxidación lipídica es un buen criterio para determinar la tolerancia de Al en las plantas (Jones *et al.*, 2006; Yamamoto *et al.*, 2001), por lo que se utilizó para establecer la tolerancia a este metal en este estudio.

3.11 Análisis estadísticos.

Para todos los análisis se utilizó el programa estadístico JMP 8. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de los datos de parámetros bioquímicos y químicos, y las medias fueron comparadas entre sí por el test de Tukey a 5% de probabilidad.

4. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 Análisis Químico de suelo.

En todos los tratamientos tanto para suelo rizósferico, como también para suelo solo (Tabla 4), los niveles de fósforo (P) en Brigitta ($p=0,0151$) y Legacy ($p=0,0044$) se mantuvieron constantes, lo que permite inferir que la aplicación de CaSO_4 no modifica los niveles de P en el suelo, para estos cultivares. Resultados similares fueron obtenidos en el estudio de Hanson y Berkheimer (2004) al aplicar sulfato de calcio (550 kg ha^{-1}) en un huerto de arándanos alto cv. Jersey de 20 años. Sin embargo, Bluegold tuvo una reducción significativa ($p<0,0001$) de un 43% al aplicar la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1). Estos resultados se oponen al estudio realizado por Salas *et al.* (2002) donde se analizó el efecto de la aplicación de encalado con varias enmiendas (entre ellas CaSO_4) en un cultivo del palmito (*Bractis gasipaes*) establecido en un Andisol, obteniendo un incremento en el contenido de P del suelo desde $8,1$ a $8,9 \text{ mg L}^{-1}$

Los niveles de potasio (K^+) en el suelo para el cultivar Legacy (Tabla 4) se incrementaron a medida que la dosis de CaSO_4 aumentaba. Para la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1) este aumento fue de un 6%, con la aplicación de 2000 y 4000 kg ha^{-1} (T2 y T3) se tuvo un incremento de un 12% de los niveles de K en el suelo ($p=0,0112$). En Brigitta, se produjo una disminución de K^+ en todos los tratamientos de CaSO_4 , la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1) tuvo una reducción de un 6% con respecto del control, para los 2000 kg ha^{-1} (T2) la reducción fue de un 12% y para los 4000 kg ha^{-1} (T3) se redujo un 16% ($p=0,0030$). En Bluegold también se observó una disminución de K^+ , de un 16% en T1 y de un 12% tanto para T2 y T3 ($p=0,0008$). En el suelo solo también se observa una reducción de K de un 11% en T1, 13% en T2 y 18% en T3 (Tabla 4). La disminución observada en los cultivares de Brigitta y Bluegold es similar a los resultados observados en el estudio realizado por Rincón y Ligarreto (2008), al evaluar la aplicación de enmiendas calcáreas entre ellas CaSO_4 en la asociación de maíz y pastos en suelos ácidos, donde K^+ fue el mineral que más disminuyó en el suelo, ya que antes de iniciar el establecimiento del experimento se

encontraba en 0,10 me 100 g de suelo⁻¹ y al momento de la cosecha del maíz se redujo a 0,08 me.100 g de suelo⁻¹. En cambio en el estudio de Hanson y Berkheimer (2004) en arándanos cv. Jersey las concentraciones de K no se vieron modificadas al aplicar 550 kg ha⁻¹ de yeso.

Respecto al contenido de azufre (S) en el suelo se observó un efecto positivo en la aplicación de la enmienda de CaSO₄, obteniendo un aumento significativamente alto a medida que la dosis del tratamiento aumentaba. En Legacy este incremento fue de un ~50% para la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), con los 2000 kg ha⁻¹ (T2) se obtienen valores dos veces mayores al contenido de las plantas control y con 4000 kg ha⁻¹ (T3) este aumento fue 2,6 veces mayor (p<0,0001). Brigitta es el cultivar que presenta el mayor incremento de S con la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) alcanzando un aumento de un 64%, con la aplicación de 2000 kg ha⁻¹ (T2) este aumento fue de un 83% y para los 4000 kg ha⁻¹ (T3) fue 2,8 veces mayor a las plantas control (p<0,0001) (Tabla 4). Los niveles de azufre para el suelo en contacto con el cultivar Bluegold también aumentaron significativamente, aunque este incremento fue menor en comparación a los otros cultivares siendo solo de un 4% con la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), los valores obtenidos en las plantas control se doblan al aplicar la dosis de 2000 kg ha⁻¹ (T2) obteniendo un aumento de un 90%, con los 4000 kg ha⁻¹ (T3) el aumento es de 2,5 veces mayor a los valores del control (p<0,0001). Para los tratamientos de suelo solo, se observó un aumento progresivo a medida que la dosis de CaSO₄ aumenta, este aumento fue de un 27% en la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), un 84% en la dosis de 2000 kg ha⁻¹ (T2) y con 4000 kg ha⁻¹ (T3) fue de tres veces mayor a los valores obtenidos en el control (Tabla 4). El aumento en los valores de S en esta tesis, concuerda con el estudio realizado por Salas *et al.* (2002) donde analizó el efecto de la aplicación de encalado con varias enmiendas (entre ellas CaSO₄) en el cultivo del palmito (*Bractis gasipaes*) establecido en un Andisol, y se obtuvo un incremento del S del suelo de 12,3 a 77,5 mg L⁻¹

Tabla 4. Contenido de fósforo (P), potasio (K) y azufre (S) expresados en ppm en un Andisol con alta saturación de aluminio tras el establecimiento por 60 días de cultivares de arándano y suelo solo, con aplicación de CaSO_4 . Valores representan el promedio de tres réplicas \pm error estándar. Control: 0 kg ha^{-1} , T1: 1000 kg ha^{-1} , T2: 2000 kg ha^{-1} , T3: 4000 kg ha^{-1} . Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar.

		P (ppm)		K (ppm)		S (ppm)	
Legacy	Control	26,6	$\pm 0,33b$	164,2	$\pm 4,51b$	41	$\pm 0,88d$
	T1	27,6	$\pm 0,33ab$	174,6	$\pm 1,30ab$	61	$\pm 0,88c$
	T2	28,7	$\pm 0,33a$	183,8	$\pm 2,26a$	83	$\pm 0,67b$
	T3	26,3	$\pm 0,33b$	183,8	$\pm 4,51a$	107	$\pm 0,67a$
Brigitta	Control	27,3	$\pm 0,33a$	195,5	$\pm 5,97a$	48	$\pm 0,88d$
	T1	26,7	$\pm 0,33ab$	183,8	$\pm 0,00ab$	78	$\pm 1,15c$
	T2	27,7	$\pm 0,33a$	172,0	$\pm 3,91bc$	87	$\pm 2,67b$
	T3	26,0	$\pm 0,00b$	164,2	$\pm 3,91c$	110	$\pm 1,15a$
Bluegold	Control	25,0	$\pm 0,00b$	239,8	$\pm 3,45a$	55	$\pm 2,73c$
	T1	14,3	$\pm 0,33c$	199,4	$\pm 5,97b$	53	$\pm 1,73c$
	T2	24,3	$\pm 0,33b$	209,8	$\pm 3,45b$	105	$\pm 2,52b$
	T3	27,3	$\pm 0,33a$	209,8	$\pm 3,45b$	137	$\pm 2,52a$
Suelo solo	Control	23,5	$\pm 0,71ab$	201,4	$\pm 8,29b$	49	$\pm 1,41d$
	T1	23,5	$\pm 0,71ab$	179,9	$\pm 5,53a$	62	$\pm 5,66c$
	T2	23,0	$\pm 0,00c$	176,0	$\pm 2,45c$	90	$\pm 2,83b$
	T3	24,5	$\pm 0,71a$	164,2	$\pm 0,00d$	149	$\pm 1,41a$

Los tratamientos con CaSO_4 tendieron a aumentar el pH del suelo, pero siempre estuvieron bajo 5, manteniendo las condiciones ideales de pH para los cultivares estudiados (Figura 6). En Legacy el aumento fue de 4,5 a 4,9 ($p < 0,0001$). En Brigitta 4,6 a 4,8 ($p = 0,0002$) y en Bluegold 4,5 a 4,7 ($p < 0,0001$). Para el suelo solo el pH inicial fue de 4,3 y aumentó a 4,6 (Figura 6). Esto concuerda con los resultados obtenidos por Braeuner *et al.* (2005) en cafetales (*Coffea arabica*) donde el yeso agrícola tampoco produjo cambios estadísticamente significativos en pH. También en los estudios realizados por Hansen y Berkheimer (2004) al aplicar yeso agrícola (630 kg ha^{-1}) en los cultivares de arándano cv. Jersey el efecto obtenido en el pH también se vio incrementado pero en menor medida que al aplicar cal. Salas *et al.* (2002) analizó el efecto de la aplicación de encalado con varias enmiendas (entre ellas CaSO_4) en el cultivo del palmito (*Bractis gasipaes*)

establecido en un Andisol y tampoco obtuvo modificaciones en el pH del suelo que se mantuvo en 4,0. En el estudio de Caires *et al.* (2002) en trigo la aplicación de yeso (0 a 9 t ha⁻¹) después de 20 meses, no influyó en la acidez del suelo, pero causó un aumento en el pH en las capas del subsuelo (40-60 cm y 60-80). Este efecto ha sido atribuido a una reacción de desplazamiento, con el SO₄²⁻ desplazando a la OH de la superficie de las partículas del suelo, involucrando a los óxidos hidratados de Fe y Al (Reeve y Sumner, 1972).

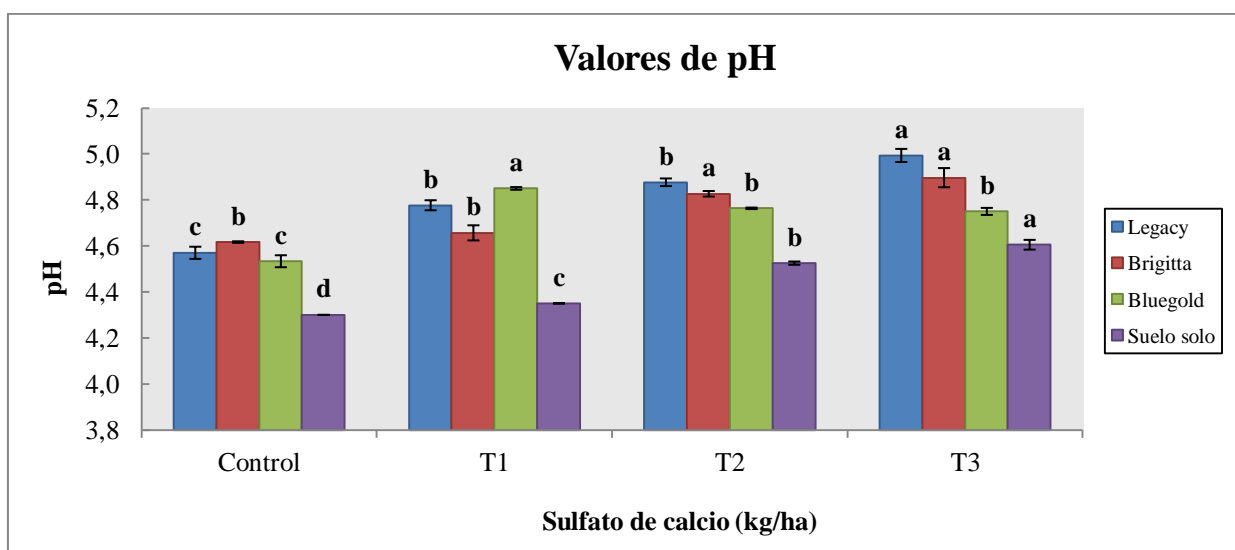


Figura 6. Valores de pH en un Andisol con alta saturación de aluminio tras el establecimiento por 60 días de cultivares de arándano y suelo solo, con aplicación de CaSO₄. Valores representan el promedio de tres réplicas ± error estándar. Control: 0 kg ha⁻¹, T1: 1000 kg ha⁻¹, T2: 2000 kg ha⁻¹, T3: 4000 kg ha⁻¹. Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar.

Los niveles de calcio (Ca²⁺) en el suelo aumentaron de manera significativa para todos los tratamientos (Tabla 5). En Legacy este incremento fue de ~3 veces mayor (de 0,27 a 0,7 cmol/kg) para la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), 7 veces mayor (1,4 cmol/kg) en los 2000 kg ha⁻¹ (T2) y 10 veces mayor (2,6 cmol/kg) en la dosis más alta de 4000 kg ha⁻¹ (T3) ($p < 0,0001$). Brigitta, aumentó 4 veces (de 0,17 a 0,81 cmol/kg) su valor en el tratamiento de 1000 kg ha⁻¹ (T1), 6 veces mayor (1,13 cmol/kg) con la dosis de 2000 kg ha⁻¹ (T2) y 10 veces mayor (2,06

cmol kg) en los 4000 kg ha⁻¹ (T3) (p<0,0001). Bluegold, aumentó 2 veces (de 0,35 a 0,73 cmol kg) en la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), 4,5 veces (1,43 cmol+kg) en los 2000 kg ha⁻¹ (T2) y 7 veces (2,22 cmol kg) en los 4000 kg ha⁻¹ (T3) (p<0,0001). Los valores para suelo solo, también se vieron aumentados por los tratamientos aplicados, siendo este aumento de 2 veces (de 0,44 a 0,99 cmol+kg) con el tratamiento de 1000 kg ha⁻¹ (T1), 4 veces (1,63 cmol+kg) con la dosis de 2000 kg ha⁻¹ (T2) y 8 veces (3,26 cmol+kg) en los 4000 kg ha⁻¹ (T3) (Tabla 5). El aumento de Ca²⁺ en el suelo concuerda con el estudio realizado por Braeuner *et al.* (2005), donde los niveles de saturación de Ca²⁺ también aumentaron ligera pero significativamente en función a la dosis de yeso aplicada. El pequeño aumento obtenido lo asociaron a que aunque el Al aparentemente fue desplazado por el Ca²⁺, éste último también pareció lixivarse en el suelo en vez de acumularse en el complejo de intercambio. Rincón y Ligarreto (2008), también obtuvieron incrementos en el contenido de Ca²⁺, al comparar los contenidos antes de aplicar las enmiendas, (0,37 meq 100 g de suelo⁻¹) y después de aplicar las enmiendas (1,14 meq.100 g de suelo⁻¹) en un cultivo de maíz. También en el estudio de Caires *et al.* (2002) en trigo, hubo un aumento en las concentraciones de Ca²⁺ intercambiable en función de las tasas de yeso (0 a 9 t ha⁻¹) en las profundidades estudiadas, de 49 a 79 mmol dm⁻³ (0-5 cm), de 34 a 54 mmol dm⁻³ (5-10 cm) y de 25 a 41 mmol dm⁻³ (10-20 cm). Finalmente en el estudio realizado por Salas *et al.* (2002) donde se analizó el efecto de la aplicación de encalado con varias enmiendas (entre ellas CaSO₄) en el cultivo del palmito (*Bractis gasipaes*) establecido en un Andisol, el contenido de Ca del suelo también se vio incrementado de 1,39 cmol+ l⁻¹ a 3,88 cmol+ L⁻¹.

Los valores de sodio (Na⁺) en el suelo se vieron reducidos significativamente tanto para los tratamientos con plantas como para el suelo solo (Tabla 5). Para Legacy se produjo una reducción solo con la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) de un 13% (p=0,0008), aumentando en los otros tratamientos desde un 3% con 2000 kg ha⁻¹ (T2) a un 26% con 4000 kg ha⁻¹ (T3) con respecto al control (p=0,0008). En el suelo donde estuvo establecido Brigitta mostró una reducción de los niveles de Na⁺ solo para el tratamiento de 2000 kg ha⁻¹ (T2), esta disminución fue de un 17% (p=0,0007), para la dosis de 1000 y 4000 kg ha⁻¹ (T1 y T3) se produce un aumento respecto al control de un 9 y 26%, respectivamente (p=0,0007). Bluegold fue el cultivar que mejor respondió a los tratamientos con CaSO₄ ya que produjo una disminución progresiva de Na⁺ a medida que la

dosis de la enmienda aumentaba, produciéndose una reducción de un 29% para la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), un 48% con 2000 kg ha⁻¹ (T2) y un 52% para el tratamiento de 4000 kg ha⁻¹ (T3) (p<0,0001). Para los tratamientos en suelo solo también fue posible apreciar una disminución progresiva de las concentraciones de Na⁺ a medida que las dosis del tratamiento aumentaban, reduciéndose un 24% con la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), un 44% con los 2000 kg ha⁻¹ (T2), y un 50% para el tratamiento de 4000 kg ha⁻¹ (T3) (Tabla 5). Rincón y Ligarreto (2008), en su estudio con plantas de maíz y pastos asociados también observaron una alta reducción de Na⁺, mineral considerado como no esencial en el desarrollo de las plantas, debido a que de 0,26 meq 100 g de suelo⁻¹ pasó a 0,12 meq 100 g de suelo⁻¹.

Los niveles de magnesio (Mg²⁺) del suelo se vieron favorecidos por las aplicaciones de los tratamientos con la enmienda de CaSO₄. En Legacy se produjo un aumento progresivo a medida que la dosis de CaSO₄ aumentaba, este aumento fue de un 11% para la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), un 18% para los 2000 kg ha⁻¹ (T2) y un 20% para el tratamiento de 4000 kg ha⁻¹ (T3) (p=0,0352). Brigitta en cambio obtuvo sus mejores valores con la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) donde se produjo un incremento de un 15% de los niveles de Mg²⁺ en el suelo, ya que para el tratamiento de 2000 kg ha⁻¹ (T2) este aumento fue de solo un 1,2% (p=0,0082), y para los 4000 kg ha⁻¹ (T3) se produjo una reducción de Mg²⁺ del suelo de un 3% respecto al control (p=0,0082). Para el cultivar Bluegold el aumento de Mg²⁺ del suelo fue de solo un 4% a un 8% (p<0,0001) a medida que la dosis de CaSO₄ aumentaba. Esto concuerda con el estudio realizado por Hanson y Berkheimer (2004) en arándano cv. Jersey en el cual los niveles de Mg²⁺ tuvieron un aumento significativo tras la aplicación de 550 kg ha⁻¹ de CaSO₄. Para el tratamiento de suelo solo se observó una disminución de este catión en el suelo de un 23% tanto para los 1000 y 2000 kg ha⁻¹ (T1 y T2) y de un 11% en los 4000 kg ha⁻¹ (T3) (Tabla 5). En el estudio de Rincón y Ligarreto (2008), también se pudo observar un aumento de los contenidos de Mg²⁺ en el suelo comenzando con una concentración de 0,11 meq100 g de suelo⁻¹ el cual se duplicó obteniendo un valor de 0,22 meq100 g de suelo⁻¹ con las enmiendas aplicadas antes de la siembra. Sin embargo, en el estudio realizado por Braeuner *et al.* (2005), el yeso redujo ligeramente el contenido de Mg del suelo (p=0,014). Otro estudio en el que se observó una reducción del Mg²⁺ del suelo es en el de Caires *et al.* (2002) donde se produjo una disminución de los niveles de Mg²⁺ intercambiable a 0-5 cm,

por cada tonelada de yeso aplicado (0 a 9 t ha⁻¹). Los materiales calizos puros (como el yeso) pueden provocar desplazamientos de elementos como el Mg²⁺ (Worthen y Aldrich, 1967).

El contenido de potasio intercambiable (K⁺ inter.) se redujo en los suelos con Brigitta y Bluegold a medida que la dosis de CaSO₄ aumentaba. En Brigitta esta reducción fue de un 6% para la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), un 12% para los 2000 kg ha⁻¹ (T2) y un 16% para los 4000 kg ha⁻¹ (T3) (p=0,0030). Bluegold mostró una disminución de un 17% en la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), un 13% para los 2000 y 4000 kg ha⁻¹ (T2 y T3) (p=0,0008). Los niveles de K⁺ inter. para suelo solo también se vieron reducidos. Esta reducción fue de un 11% en la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), un 13% en los 2000 kg ha⁻¹ (T2) y un 18% con los 4000 kg ha⁻¹ (T3). Esto concuerda con el estudio de Salas *et al.* (2002) donde analizó el efecto de la aplicación de encalado con varias enmiendas (entre ellas CaSO₄) en el cultivo del palmito (*Bractis gasipaes*) establecido en un Andisol, y obtuvo una reducción del contenido de K⁺ inter. en el suelo de 0,49 a 0,44 cmol l⁻¹. Sin embargo, para el cultivar Legacy se obtuvo un incremento del contenido de K⁺ inter. de un 6% con la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) y de un 12% en los tratamientos de 2000 y 4000 kg ha⁻¹ (T2 y T3) (p=0,0112). Estos resultados concuerdan con el trabajo en trigo de Caires *et al.* (2002) donde el yeso (0 a 9 t ha⁻¹) produjo una lixiviación de K⁺ intercambiable (0-40 cm), causando una elevación de los niveles de este nutriente en el subsuelo (40-60 cm y 60-80). Sin embargo, en el estudio de Farina *et al.* (2000) el yeso no tuvo ningún efecto sobre el movimiento K⁺ inter.

Tabla 5. Contenido de potasio, sodio, calcio y magnesio intercambiable expresados en cmol+kg, en un Andisol con alta saturación de aluminio tras el establecimiento por 60 días con aplicación de CaSO₄ de cultivares de arándano y suelo solo. Valores representan el promedio de tres réplicas ± error estándar. Control: 0 kg ha⁻¹, T1: 1000 kg ha⁻¹, T2: 2000 kg ha⁻¹, T3: 4000 kg ha⁻¹. Letras minúsculas indican diferencias significativas (p≤0,05) entre tratamientos para un mismo cultivar.

		K ⁺		Na ⁺		Ca ²⁺		Mg ²⁺	
Legacy	Control	0,42	±0,01b	0,10	±0,01b	0,27	±0,00d	0,49	±0,03b
	T1	0,45	±0,00ab	0,09	±0,00b	0,70	±0,03c	0,55	±0,01ab
	T2	0,47	±0,01a	0,10	±0,00b	1,41	±0,01b	0,58	±0,01ab
	T3	0,47	±0,01a	0,13	±0,00a	2,57	±0,08a	0,59	±0,02a
Brigitta	Control	0,50	±0,02a	0,08	±0,00bc	0,17	±0,01d	0,52	±0,01b
	T1	0,47	±0,00ab	0,08	±0,00ab	0,81	±0,01c	0,59	±0,01a
	T2	0,44	±0,01bc	0,06	±0,00c	1,13	±0,02b	0,52	±0,01b
	T3	0,42	±0,01c	0,10	±0,00a	2,06	±0,07a	0,50	±0,03b
Bluegold	Control	0,61	±0,01a	0,10	±0,00a	0,36	±0,02d	0,59	±0,01b
	T1	0,51	±0,02b	0,07	±0,00b	0,73	±0,06c	0,61	±0,01ab
	T2	0,54	±0,01b	0,05	±0,00c	1,44	±0,05b	0,62	±0,01a
	T3	0,54	±0,01b	0,05	±0,00c	2,22	±0,01a	0,54	±0,00c
Suelo solo	Control	0,52	±0,02a	0,17	±0,02a	0,44	±0,01d	0,55	±0,01a
	T1	0,46	±0,01b	0,13	±0,00b	0,99	±0,06c	0,42	±0,02c
	T2	0,45	±0,00b	0,10	±0,01c	1,63	±0,03b	0,42	±0,02c
	T3	0,42	±0,00c	0,09	±0,01c	3,27	±0,02a	0,49	±0,01b

Los niveles de aluminio intercambiable (Al inter.) del suelo disminuyeron para todos los tratamientos según la dosis de CaSO₄ aumentaba (Figura 7). Para los tres cultivares los valores iniciales fueron similares (0,93-0,97 cmol+kg). Legacy con la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) tuvo una reducción de un 7% Al inter., en los 2000 kg ha⁻¹ (T2) la reducción fue de un 17% y para los 4000 kg ha⁻¹ (T3) esta reducción fue de un 26% (p<0,0001). El suelo con Brigitta con la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) obtuvo una disminución de un 6%, en los 2000 kg ha⁻¹ (T2) fue de un 19% y con los 4000 kg ha⁻¹ (T3) fue de un ~30% (p<0,0001). En Bluegold en cambio se produjo una reducción considerablemente significativa con la menor dosis de CaSO₄ para la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), donde la disminución fue de un 85%, en cambio al aumentar la dosis a 2000 kg ha⁻¹ (T2) se producía una disminución solo de un 30%, y con los 4000 kg ha⁻¹ (T3) solo un 8%

($p < 0,0001$) respecto al control. Para suelo sin plantas en el tratamiento de 1000 kg ha^{-1} (T1) se produjo una leve disminución (1,6%), mientras que en la dosis de 2000 kg ha^{-1} (T2) el contenido de Al inter. aumentó un 2,8%, y en la dosis de 4000 kg ha^{-1} (T3) se obtuvo el mejor resultado con una reducción de un 16%. La mejor respuesta se obtuvo con el cultivar Bluegold ya que con una baja dosis de CaSO_4 se produce una rápida disminución del Al inter. lo que puede deberse a que este cultivar presenta una alta excreción de ácidos orgánicos quelando el aluminio, disminuyendo así la concentración de aluminio intercambiable del suelo. Tanto para Legacy y Brigitta la disminución que se produjo con los tratamientos fueron similares, pero fueron mayores a los resultados obtenidos para suelo solo, lo que indica la alta interacción que se produce a nivel radical entre las raíces y el aluminio del suelo. El papel del yeso en la eliminación de Al inter. también se ha reportado en otros estudios (Toma *et al.*, 1999b), por lo que se considera una buena opción para reducir el problema del Al^{3+} en el subsuelo de suelos ácidos. Rincón y Ligarreto (2008), observaron una reducción importante en el contenido de Al inter. en el suelo por efecto de las enmiendas aplicadas antes de la siembra, al pasar de $2,13 \text{ meq } 100 \text{ g de suelo}^{-1}$ a $1,25 \text{ meq } 100 \text{ g de suelo}^{-1}$ en el momento de la cosecha del maíz. Esta reducción del Al en el suelo se atribuyó a la acción del Ca^{2+} de la roca fosfórica y del yeso agrícola, que desplazó al Al de los sitios de intercambio catiónico de las arcillas para luego formar compuestos con el fosfato y el sulfato que se movilizan a capas profundas del suelo (Plaster, 2005; Potash and Phosphate Institute, 1997; Guerrero, 1993).

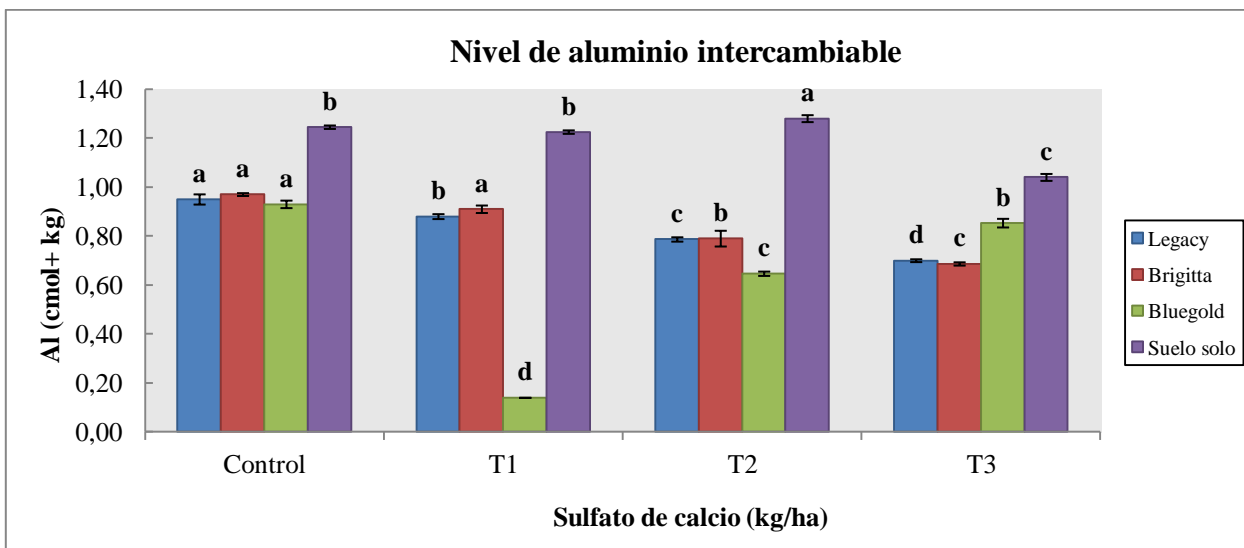


Figura 7. Contenido de aluminio intercambiable (cmol+kg) en un Andisol con alta saturación de aluminio tras el establecimiento por 60 días con aplicación de CaSO_4 en cultivares de arándano y suelo solo. Valores representan el promedio de tres réplicas \pm error estándar. Control: 0 kg ha^{-1} , T1: 1000 kg ha^{-1} , T2: 2000 kg ha^{-1} , T3: 4000 kg ha^{-1} . Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar.

Como anteriormente se mencionó las concentraciones de bases en el suelo se vieron aumentadas significativamente, por ende también la suma de bases se vio aumentada (Tabla 6). Este incremento se da principalmente por el aporte de Ca^{2+} al suelo tras la aplicación de la enmienda de CaSO_4 . Legacy con la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1) obtuvo un aumento en su suma de bases de ~un 40%, el tratamiento de 2000 kg ha^{-1} (T2) dobló el valor de la suma de bases en comparación con el control, y con los 4000 kg ha^{-1} (T3) casi triplicó ($p < 0,0001$) a los valores obtenidos por las plantas control. Brigitta obtuvo un aumento de un 54% en la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1), un 70% en los 2000 kg ha^{-1} (T2), por último para la dosis de 4000 kg ha^{-1} (T3) obtuvo valores de 2,4 veces el control ($p < 0,0001$). En Bluegold el efecto de la enmienda fue menor obteniéndose un aumento de un 15% para la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1) y un 60% en los 2000 kg ha^{-1} (T2) y recién en los 4000 kg ha^{-1} (T3) logra doblar los valores obtenidos en el control ($p < 0,0001$). Para los tratamientos de suelo solo, hubo un comportamiento similar al cultivar Bluegold, obteniendo un aumento de solo un 20% en los 1000 kg ha^{-1} (T1), 55% en los 2000 kg ha^{-1} (T2) y 2,5 veces mayor al control en los 4000 kg ha^{-1} (T3) (Tabla 6). Esto concuerda con el estudio realizado por

Rincón y Ligarreto (2008), en que la capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE) aumentó considerablemente, a medida que la dosis de la enmienda aumentaba la saturación de bases se aumentó de 24,7% antes de aplicar las enmiendas a 55,5 %. También en el estudio realizado por Caires *et al.* (2002) en trigo, se produjo un aumento de la saturación de bases del suelo obtenida con la aplicación de las dosis de yeso (0 a 9 t ha⁻¹) a diferentes profundidades que se derivan del incremento de calcio intercambiable, que no tiene relación con la corrección de la acidez. Finalmente, Salas *et al.* (2002) analizó el efecto de la aplicación de encalado con varias enmiendas (entre ellas CaSO₄) en el cultivo del palmito (*Bractis gasipaes*) establecido en un Andisol, y obtuvo también un incremento de casi dos veces la CICE de 3,66 a 6,74 cmol L⁻¹.

El porcentaje de saturación de aluminio (% sat. Al) del suelo se vio fuertemente reducido a medida que la dosis de CaSO₄ aumentaba (Tabla 6). Para Legacy con la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) se produjo una disminución de un 22%, el % sat. Al fue duplicado en los 2000 kg ha⁻¹ (T2) con un 45% y con los 4000 kg ha⁻¹ (T3) la reducción fue de un 63% (p<0,0001) en comparación con el control. El suelo establecido con Brigitta obtuvo una reducción de un 27% en la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), un 38% en los 2000 kg ha⁻¹ (T2) y un 58% con los 4000 kg ha⁻¹ (T3) (p<0,0001). En Bluegold la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) fue el tratamiento que provocó la mayor disminución (81%), ya que en los 2000 y 4000 kg ha⁻¹ (T2 y T3) se obtuvo una reducción de tan solo un 44% aproximadamente (p<0,0001). En los tratamientos de suelo solo, para la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) el % de sat. de Al se redujo un 11%, con los 2000 kg ha⁻¹ (T2) un 22% y con los 4000 kg ha⁻¹ (T3) un 54% en (Tabla 6). De los tres cultivares, Bluegold fue el que presentó los menores niveles de saturación de aluminio del suelo en las plantas control, pudiendo ser efecto de la quelación por exudados radicales, lo que lleva a inferir que este cultivar tiene una mayor exudación de ácidos orgánicos (lo que no se evaluó en esta tesis). Es posible observar que en este cultivar se produce una gran disminución en el % saturación de aluminio con la dosis mínima aplicada (1000 kg ha⁻¹), disminución mayor que con las dosis más altas de 2000 y 4000 kg ha⁻¹ (Tabla 6). Esto concuerda con los resultados de Braeuner *et al.* (2005), donde encontraron que los efectos del yeso (10-15 t ha⁻¹) en los cafetales (*Coffea arabica*) también fueron significativos en reducir los niveles de Al de un 3-6% (p=0,021), pero a la vez más variables. Rincón y Ligarreto (2008), en el estudio de la asociación de maíz con pastos en suelos con un

74% de saturación de aluminio utilizaron dosis de 300 kg ha⁻¹ de yeso asociado con 1.500 kg ha⁻¹ de cal dolomítica y la saturación de Al se redujo de 71,7 a 44,5%. Salas *et al.* (2002) analizó el efecto de la aplicación de encalado con varias enmiendas (entre ellas CaSO₄) en el cultivo del palmito (*Bractis gasipaes*) establecido en un Andisol, se obtuvo una reducción del % sat. Al de un 38 a 30%. Al igual que los valores de aluminio intercambiable los valores de aluminio extractable disminuyeron de acuerdo a la dosis de CaSO₄ aumentaba, demostrando así una interacción favorable entre los cultivares y los tratamientos aplicados. En suelo establecido con Legacy los valores de aluminio extractable, disminuyeron significativamente con la dosis de 2000 y 4000 kg ha⁻¹ (T2 y T3) esta reducción fue de un ~5% y un 9% respectivamente (p<0,0001). En Brigitta se observó una baja reducción de aluminio extractable del suelo, siendo solo un 1,2% en los 2000 kg ha⁻¹ (T2) y un 2% para los 4000 kg ha⁻¹ (T3) (p=0,0434). Bluegold fue el cultivar que presentó una reducción significativamente alta de los contenidos de aluminio extractable, un 12% en la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T2) y un 36% en los 4000 kg ha⁻¹ (T3) (p=0,0003). En los tratamientos de suelo solo se obtuvo una reducción de un 6% de aluminio extractable con los 1000 kg ha⁻¹ (T1), el efecto de los 2000 kg ha⁻¹ (T2) fue menor, solo un 4% y en los 4000 kg ha⁻¹ (T3) un 9% (Tabla 6).

Tabla 6. Valores de saturación de aluminio, capacidad de intercambio catiónico efectivo (CICE), suma de bases y aluminio extractable en un Andisol con alta saturación de aluminio tras el establecimiento por 60 días con aplicación de CaSO_4 en cultivares de arándano y suelo solo. Valores representan el promedio de tres réplicas \pm error estándar. Control: 0 kg ha^{-1} , T1: 1000 kg ha^{-1} , T2: 2000 kg ha^{-1} , T3: 4000 kg ha^{-1} . Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar.

		Sat. Al (%)		CICE		Suma Bases		Al ext. (ppm)	
Legacy	Control	42,7	$\pm 1,55a$	2,2	$\pm 0,08d$	1,3	$\pm 0,08d$	1092	$\pm 2,73a$
	T1	33,1	$\pm 0,83b$	2,7	$\pm 0,04c$	1,8	$\pm 0,05c$	1088	$\pm 8,45a$
	T2	23,5	$\pm 0,14c$	3,3	$\pm 0,04b$	2,6	$\pm 0,04b$	1040	$\pm 7,51b$
	T3	15,8	$\pm 0,45d$	4,5	$\pm 0,16a$	3,8	$\pm 0,16a$	990	$\pm 10,68c$
Brigitta	Control	43,4	$\pm 0,83a$	2,2	$\pm 0,05c$	1,3	$\pm 0,05c$	932	$\pm 11,56ab$
	T1	31,7	$\pm 0,30b$	2,9	$\pm 0,02b$	2,0	$\pm 0,01b$	953	$\pm 6,89a$
	T2	26,8	$\pm 0,52c$	3,0	$\pm 0,06b$	2,2	$\pm 0,03b$	921	$\pm 6,94ab$
	T3	18,3	$\pm 0,44d$	3,8	$\pm 0,10a$	3,1	$\pm 0,09a$	913	$\pm 7,27b$
Bluegold	Control	35,9	$\pm 1,17a$	2,6	$\pm 0,04c$	1,7	$\pm 0,06d$	993	$\pm 22,18a$
	T1	6,8	$\pm 0,14c$	2,1	$\pm 0,04d$	1,9	$\pm 0,04c$	1002	$\pm 37,71a$
	T2	19,6	$\pm 0,12b$	3,3	$\pm 0,06b$	2,6	$\pm 0,05b$	870	$\pm 41,83a$
	T3	20,3	$\pm 0,35b$	4,2	$\pm 0,02a$	3,3	$\pm 0,01a$	637	$\pm 38,62b$
Suelo solo	Control	42,7	$\pm 0,14a$	2,9	$\pm 0,01d$	1,7	$\pm 0,00d$	959	$\pm 4,95a$
	T1	38,0	$\pm 0,22b$	3,2	$\pm 0,15c$	2,0	$\pm 0,08c$	900	$\pm 0,71bc$
	T2	33,1	$\pm 1,08c$	3,9	$\pm 0,06b$	2,6	$\pm 0,08b$	925	$\pm 6,36ab$
	T3	19,7	$\pm 1,30d$	5,3	$\pm 0,21a$	4,3	$\pm 0,23a$	870	$\pm 51,62c$

4.2 Análisis de Fluorescencia.

4.2.1 Rendimiento cuántico máximo (Fv/Fm): El rendimiento cuántico es definido como la proporción del número de fotones emitidos sobre el número de fotones absorbidos. Hojas sanas que no están sufriendo ningún tipo de estrés poseen típicamente valores de alrededor de 0,8 (Demmig y Björkman 1987; Maxwell y Johnson, 2000). Este índice muestra una clara correlación con el porcentaje de centros funcionales del fotosistema II (Anderson *et al.*, 1997), por lo que su disminución es considerada un indicador de pérdida de función a nivel del aparato fotosintético (Bilger *et al.*, 1995). Brigitta no presentó diferencias significativas ($p=0,5253$) en este parámetro manteniéndose en valores considerados normales (Figura 17). Este resultado concuerda con la investigación realizada por Reyes-Díaz *et al.* (2009), donde este cultivar tampoco presentó modificaciones en este parámetro, infiriéndose que este cultivar podría ser resistente, esto se confirma también en las investigaciones realizadas Inostroza-Blancheteau *et al.* (2011).

Legacy fue el cultivar que obtuvo los menores valores para este parámetro, al inicio del ensayo (0,76), a los 15 días se ve un incremento de Fv/Fm a 0,80 en T2 y 0,79 tanto para los 1000 y 4000 kg ha⁻¹ (T1 y T3) ($p<0,0001$), el control mantuvo su valor constante. Luego a los 45 días se produjo una disminución a este parámetro a 0,71 para el control y los 4000 kg ha⁻¹ (T3), y a 0,76 para los 1000 y 2000 kg ha⁻¹ (T1 y T2) ($p<0,0001$) demostrándose un efecto positivo en estos tratamientos. Si bien los valores se ubicaron en los rangos normales para las plantas sanas para los tres cultivares (0,7-0,8) (Demmig y Björkman, 1987), se logra apreciar una disminución significativa de este parámetro tanto en Legacy y en Bluegold a los 15 días con respecto a sus controles (Tabla 7), la misma respuesta fue observada por Reyes-Díaz *et al.* (2009), esta disminución apoya la hipótesis de que una alta saturación de aluminio produciría un efecto negativo sobre el aparato fotosintético y que estos cultivares presentan una sensibilidad al aluminio en este tiempo. Sin embargo en un tiempo mayor ambos cultivares se recuperan. Cabe mencionar, que el que Legacy demuestre valores ligeramente menores a los demás cultivares, no permitirá asegurar que posee una mayor sensibilidad al Al, sino que constitutivamente posee un

Fv/Fm menor que los otros cultivares. Esto puede ser demostrado también en otras especies frutales como en la investigación realizada sobre plantas de cítricos por Chen *et al.* (2005b) donde este parámetro disminuyó sus valores significativamente a medida que los tratamientos con Al aumentaban. También es importante mencionar que según el estudio realizado por Reyes-Díaz *et al.* (2010) se indicó a Legacy como el cultivar más tolerante a un estrés por aluminio, seguido por Brigitta, resaltando la sensibilidad de Bluegold. Sin embargo a través de los resultados obtenidos en esta tesis para este parámetro se pudo observar una superioridad de Brigitta frente a los otros cultivares y una respuesta similar para Legacy y Bluegold, lo que cambiaría este orden siendo Brigitta el cultivar más tolerante, seguido por los otros dos cultivares (Bluegold y Legacy).

En el cultivar Bluegold, considerado sensible (Reyes-Díaz *et al.*, 2009-2010; Inostroza-Blancheteau *et al.*, 2011) a los 15 días ($p < 0,0001$) se produce la mayor disminución de este parámetro (0,75-0,67), independiente del tratamiento aplicado siendo esta disminución mayor en las plantas tratadas (1000, 2000 y 4000 kg ha⁻¹) en comparación al control (0,75). Luego a los 30 días ($p = 0,0048$) la situación logra normalizarse y se mantiene constante hasta los 60 días ($p = 0,0088$) (Tabla 7).

Tabla 7. Valores de Fv/Fm en hojas de cultivares de arándano establecidos en un Andisol con alta saturación de aluminio por 60 días, con aplicación de CaSO₄. Valores representan el promedio de cinco réplicas \pm error estándar. Control: 0 kg ha⁻¹, T1: 1000 kg ha⁻¹, T2: 2000 kg ha⁻¹, T3: 4000 kg ha⁻¹. Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre días de medición en un mismo cultivar.

		Inicio	15 días	30 días	45 días	60 días
Brigitta	Control	0,83 \pm 0,002ABab	0,84 \pm 0,006ABa	0,83 \pm 0,003ABb	0,82 \pm 0,007BCa	0,85 \pm 0,003Aa
	T1	0,82 \pm 0,005BCb	0,84 \pm 0,006ABa	0,85 \pm 0,003Aa	0,84 \pm 0,006ABa	0,85 \pm 0,004Aa
	T2	0,84 \pm 0,003ABCa	0,83 \pm 0,004ABCa	0,85 \pm 0,004Aa	0,83 \pm 0,006BCa	0,85 \pm 0,004ABa
	T3	0,84 \pm 0,005ABab	0,84 \pm 0,004ABa	0,84 \pm 0,004ABab	0,84 \pm 0,002Aa	0,85 \pm 0,002Aa
Legacy	Control	0,76 \pm 0,002Da	0,76 \pm 0,002Db	0,84 \pm 0,002Aa	0,71 \pm 0,002Eb	0,78 \pm 0,005Ca
	T1	0,77 \pm 0,003Ca	0,79 \pm 0,005Ba	0,84 \pm 0,003Aa	0,76 \pm 0,002Ca	0,80 \pm 0,005Ba
	T2	0,76 \pm 0,003Ca	0,81 \pm 0,003Ba	0,84 \pm 0,004Aa	0,76 \pm 0,005Ca	0,78 \pm 0,011Ca
	T3	0,77 \pm 0,003Ba	0,79 \pm 0,008Ba	0,84 \pm 0,004Aa	0,72 \pm 0,010Cb	0,79 \pm 0,015Ba
Bluegold	Control	0,84 \pm 0,004ABCa	0,75 \pm 0,004Da	0,84 \pm 0,003BCa	0,85 \pm 0,002ABa	0,85 \pm 0,002Aa
	T1	0,84 \pm 0,003Ba	0,74 \pm 0,005Ca	0,84 \pm 0,003Ba	0,85 \pm 0,002ABa	0,85 \pm 0,002Aa
	T2	0,84 \pm 0,003Aa	0,72 \pm 0,002Cb	0,82 \pm 0,006Bb	0,85 \pm 0,004Aa	0,85 \pm 0,002Aab
	T3	0,84 \pm 0,002Aa	0,67 \pm 0,008Cc	0,84 \pm 0,002Aa	0,84 \pm 0,003Aa	0,84 \pm 0,002Ab

4.2.2 Rendimiento cuántico efectivo (Φ PSII): Este índice es conocido como proporcional al rendimiento cuántico de la asimilación de CO₂ en condiciones no-fotorrespiratorias (Genty *et al.*, 1989). Los valores iniciales de Φ PSII para Brigitta fue de 0,32, a los 15 días este parámetro registró un aumento significativo ($p < 0,0001$) de un 48% para la dosis de 4000 kg ha⁻¹ (T3), un 35% para los 2000 kg ha⁻¹ (T2), un 26% para los 1000 kg ha⁻¹ (T1) y tan solo un 16% en las plantas no tratadas con CaSO₄ (control). Estos valores fueron significativamente mayores en las plantas tratadas diferenciándose la dosis de 4000 kg ha⁻¹ (T3) como el tratamiento que obtuvo los mayores valores durante todas las mediciones. A los 30 días los valores de Φ PSII se incrementan a 0,41 en el control y las plantas tratadas con 1000 kg ha⁻¹ (T1), se mantiene constante (0,43) en los 2000 kg ha⁻¹ (T2) y se reduce a 0,43 en los 4000 kg ha⁻¹ (T3) ($p = 0,0089$). Al hacer una comparación entre días los valores más bajos para Φ PSII en Brigitta se registraron recién a los 45 días ($p = 0,0040$) cuando se hacen similares a los iniciales (Tabla 8). Esta reducción fue de un 20% para las plantas control, un 17% en los 1000 kg ha⁻¹ (T1) y de un 14% en los 2000 y 4000 kg ha⁻¹

(T2 y T3). En la última medición (60 días), los valores Φ PSII obtenidos para este cultivar fueron 0,40 en las plantas control, 0,41 en los 1000 kg ha⁻¹ (T1), 0,44 en los 2000 kg ha⁻¹ (T2) y 0,45 para los 4000 kg ha⁻¹ (T3) ($p < 0,0001$).

Bluegold y Legacy tuvieron los mismos valores para Φ PSII al inicio (0,23). Legacy a los 15 días mostró una reducción de Φ PSII a 0,19 para las plantas control y para las dosis de 1000 y 4000 kg ha⁻¹ (T1 y T3) ($p < 0,0001$). Sin embargo, al aplicar 2000 kg ha⁻¹ (T2) se produjo un incremento de un 18% (Φ PSII=0,28) ($p < 0,0001$). A los 30 días se produce un incremento significativo de este parámetro con un aumento de Φ PSII a 0,46 en los 2000 y 4000 kg ha⁻¹ (T2 y T3) y a 0,43 tanto para las plantas control y las plantas tratadas con la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1). Luego a los 60 días los valores tienden a disminuir hasta ser similares a los iniciales, con excepción de la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) con un Φ PSII de 0,33 y para los 2000 kg ha⁻¹ (T2) con un Φ PSII de 0,26 ($p < 0,0001$). El cultivar Legacy registra la mayor disminución de este parámetro a los 45 días, siendo a los 30 días cuando se registran los mayores valores (Tabla 8). La reducción de Φ PSII por efecto de plantas sometidas a un estrés por aluminio en este trabajo concuerda con el estudio realizado por Chen *et al.* (2005b) donde se trataron hojas de cítricos con concentraciones de Al (a pesar de que las condiciones del cultivo fueron distintas) y se correlacionó el Al acumulado con la consecuente disminución de la eficiencia fotoquímica del Φ PSII. Tanto Reyes-Díaz *et al.* (2009) e Inostroza-Blancheteau *et al.* (2011), sostienen para este parámetro que el cultivar Brigitta expresa la mayor tolerancia y que Bluegold es el cultivar más sensible, en esta tesis si bien Brigitta no tuvo una gran variación de sus valores lo que podría tomarse como tolerancia frente a un estrés de aluminio; Bluegold comenzó con menores valores de Φ PSII al inicio, pero luego registró valores similares a Brigitta en las otras mediciones, siendo Legacy el cultivar que presentó los menores valores, constitutivamente sin observarse grandes variaciones con los tratamientos.

Bluegold disminuyó sus valores significativamente ($p < 0,0001$) a los 15 días, esta reducción fue de un 33% para las plantas control, un 30% para la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), un 41% para los 2000 kg ha⁻¹ (T2) y de solo un 28% para los 4000 kg ha⁻¹ (T3). Luego a los 30 días se produce un incremento significativo de Φ PSII a 0,32 en el control, a 0,34 para la dosis de 1000 kg ha⁻¹

(T1), a 0,33 en los 2000 kg ha⁻¹ (T2) y a 0,29 en los 4000 kg ha⁻¹ (T3). A los 45 días estos valores continúan aumentando, siendo este incremento significativamente mayor (Φ PSII=0,44) en los tratamientos de 1000 y 2000 kg ha⁻¹ (T1 y T2), por sobre los 4000 kg ha⁻¹ (T3) y el control (Φ PSII=0,40). A los 60 días los valores se mantienen relativamente constantes. Al comparar entre días Bluegold registra su menor valor de Φ PSII a los 15 días y es a los 45-60 días donde se obtienen los valores más altos de este parámetro (Tabla 8).

Tabla 8. Rendimiento cuántico efectivo (Φ PSII) en hojas de cultivares de arándano establecidos en un Andisol con alta saturación de aluminio por 60 días, con aplicación de CaSO₄. Valores representan el promedio de cinco réplicas \pm error estándar. Control: 0 kg ha⁻¹, T1: 1000 kg ha⁻¹, T2: 2000 kg ha⁻¹, T3: 4000 kg ha⁻¹. Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre días de medición en un mismo cultivar.

		Inicio	15 días	30 días	45 días	60 días
Brigitta	Control	0,32 \pm 0,003Cab	0,37 \pm 0,003Bc	0,41 \pm 0,004Aa	0,33 \pm 0,008Cb	0,40 \pm 0,002ABb
	T1	0,31 \pm 0,006Cb	0,39 \pm 0,009Abc	0,42 \pm 0,008Aa	0,35 \pm 0,002Bab	0,41 \pm 0,004Ab
	T2	0,32 \pm 0,002Dab	0,43 \pm 0,014ABb	0,43 \pm 0,006ABa	0,37 \pm 0,012Ca	0,44 \pm 0,006Aa
	T3	0,33 \pm 0,002Ea	0,48 \pm 0,017Aa	0,43 \pm 0,007BCa	0,37 \pm 0,006Da	0,45 \pm 0,003ABa
Legacy	Control	0,23 \pm 0,003Ba	0,19 \pm 0,003Db	0,42 \pm 0,001Ab	0,17 \pm 0,003Eb	0,22 \pm 0,002Cc
	T1	0,23 \pm 0,003Ca	0,20 \pm 0,002Db	0,44 \pm 0,002Ab	0,18 \pm 0,004Eab	0,33 \pm 0,002Ba
	T2	0,23 \pm 0,017Ca	0,28 \pm 0,003Ba	0,46 \pm 0,005Aa	0,19 \pm 0,004Da	0,26 \pm 0,005BCb
	T3	0,23 \pm 0,003BCa	0,19 \pm 0,004CDb	0,46 \pm 0,006Aa	0,07 \pm 0,003Ec	0,23 \pm 0,002Bc
Bluegold	Control	0,24 \pm 0,000Da	0,16 \pm 0,003Ea	0,32 \pm 0,005Cb	0,41 \pm 0,004Bb	0,43 \pm 0,003Ab
	T1	0,24 \pm 0,003Da	0,17 \pm 0,002Ea	0,34 \pm 0,003Ca	0,44 \pm 0,001Aa	0,44 \pm 0,001Ab
	T2	0,25 \pm 0,001Ca	0,14 \pm 0,005Db	0,33 \pm 0,002Ba	0,44 \pm 0,002Aa	0,43 \pm 0,004Ab
	T3	0,25 \pm 0,011Da	0,18 \pm 0,004Ea	0,28 \pm 0,001Cc	0,42 \pm 0,003Bb	0,45 \pm 0,003Aa

4.2.3 Tasa de transporte de electrones (ETR): A partir del índice de rendimiento cuántico efectivo del PSII es posible estimar la tasa lineal de transporte electrónico, conociendo los valores de PPFD, absorbancia foliar y asumiendo igual distribución de energía absorbida entre el fotosistema I y II (Tambusi, 2004). Brigitta al inicio registró un ETR igual a 40,4. A los 15 días ($p < 0,0001$) estos valores tuvieron un incremento significativamente mayor para la dosis de 2000

kg ha⁻¹ (T2) y 4000 kg ha⁻¹ (T3) con un 35 y 37%, respectivamente, en comparación con 1000 kg ha⁻¹ (T1) y con las plantas sin la enmienda (control) que tuvieron un incremento de un 20%. Luego, a los 30 días comienza una disminución de este parámetro, sin embargo los tratamientos (1000 kg ha⁻¹ ETR=52,10; 2000 kg ha⁻¹ ETR=50,45; 4000 kg ha⁻¹ ETR=52,40) se mantuvieron siempre por sobre los valores del control (ETR=48,58). A los 45 días las plantas control disminuyen su ETR a 41,76, los valores de los tratamientos también se ven reducidos (1000 kg ha⁻¹ ETR=43,53; 2000 kg ha⁻¹ ETR=45,27; 4000 kg ha⁻¹ ETR=45,25) pero se mantuvieron superiores al control. A los 60 días estos valores aumentan, siendo las dosis de 2000 y 4000 kg ha⁻¹ (T2 y T3) (ETR=54,3) superiores al control (44,7) y a la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) (46,5). Los tratamientos siempre se mantuvieron por sobre los valores del control. Al comparar entre días Brigitta registra su menor valor ETR recién a los 45 días, valores que incluso llegan a ser similares a los valores iniciales, pero en general mantiene altos valores ETR durante las mediciones realizadas (Figura 8).

Legacy registró al inicio valores ETR=24,4. A los 15 días estos valores se mantienen constantes, con excepción de la dosis de 2000 kg ha⁻¹ (T2) que registró un aumento significativo en comparación con los otros tratamientos con un ETR=35,78 ($p<0,0001$). A los 30 días se produce un incremento de este parámetro, siendo este aumento mayor en los 4000 kg ha⁻¹ (T3) (ETR=58,35) y en los 2000 kg ha⁻¹ (T2) (ETR=55,03) en comparación con el control (ETR=54,1), siendo los 1000 kg ha⁻¹ (T1) (ETR=51,7) el tratamiento que obtuvo el menor valor para ETR ($p<0,0001$). A los 45 días se registra una reducción en todas las plantas, siendo esta disminución en el control incluso menor a los valores iniciales (ETR=21,27) en comparación con las plantas tratadas con CaSO₄ que a pesar de reducir sus valores, estos se mantuvieron similares a los iniciales ($p<0,0001$). A los 60 días los valores tienden a aumentar obteniéndose en los 1000 kg ha⁻¹ (T1) el mejor incremento de ETR (41,37), en comparación con los 2000 y 4000 kg ha⁻¹ (T2 y T3) (ETR=29,30) y el control (ETR=27,75) ($p<0,0001$) (Figura 8). Brigitta obtuvo los mayores valores para ETR los cuales disminuyeron recién a los 45 días, esta reducción no fue menor a los valores que presento al inicio del ensayo lo que concuerda con los resultados obtenidos por Reyes-Díaz *et al.* 2009, sin embargo Bluegold fue la más afectada negativamente por los tratamientos de Al (resultados obtenidos también por Inostroza-Blancheteau *et al.*, 2011).

Bluegold al inicio registró un ETR=33,5. A los 15 días se observa una disminución significativa de este parámetro, siendo esta reducción de un 14% para la dosis de 4000 kg ha⁻¹ (T3), un ~30% para los 2000 kg ha⁻¹ (T2) y 1000 kg ha⁻¹ (T1) y de un 42% para las plantas sin aplicación de CaSO₄ (control) que fueron las que registraron la mayor disminución ($p<0,0001$). Luego a los 30 días las plantas se reponen y tienen un aumento significativo registrando valores ETR de 43,6 para las plantas control, 42,8 para la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1), 45,8 para los 2000 kg ha⁻¹ (T2) y 44,01 para los 4000 kg ha⁻¹ (T3) ($p<0,0001$). A los 45 días los valores siguen aumentando siendo la dosis de 2000 kg ha⁻¹ (T2) el tratamiento con el que se obtuvo mejor resultado registrando un valor ETR=63,87 seguido por los 1000 y 4000 kg ha⁻¹ (T1 y T3) con ETR= \sim 55,6, estando muy superior al control que obtuvo ETR=49,45 ($p<0,0001$). A los 60 días los valores entre los tratamientos se mantienen similares, con una reducción solo en los 2000 kg ha⁻¹ (T2) que registró un valor ETR=54,54 ($p<0,0001$). Al hacer una comparación entre días Bluegold registra su mayor ETR a los 45 días y la mayor reducción de este parámetro sucede a los 15 días (Figura 8).

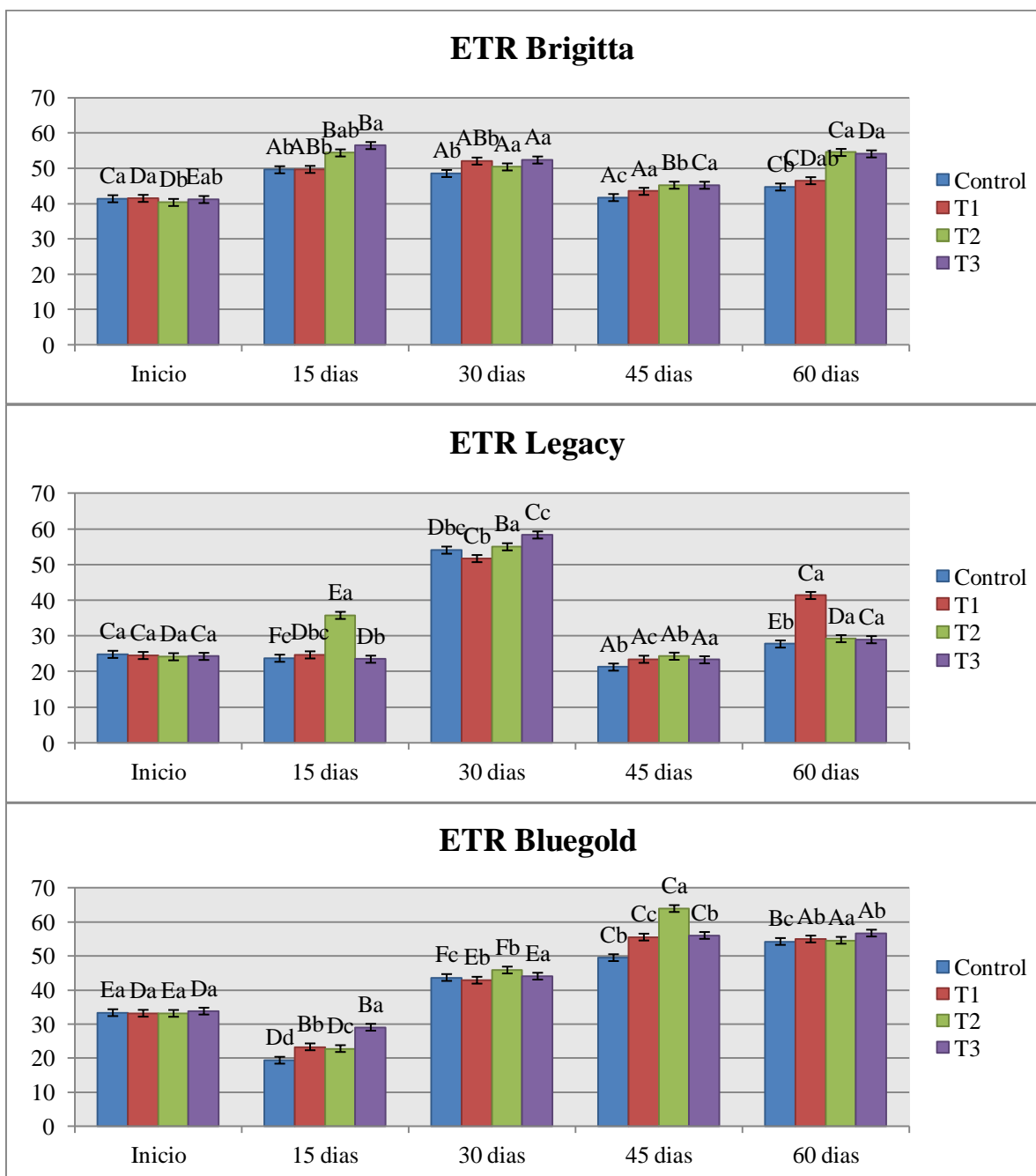


Figura 8. Tasa de transporte de electrones (ETR) evaluado en cultivares de arándano establecidos en un Andisol con alta saturación de aluminio, durante 60 días, con aplicación de CaSO_4 . Valores representan el promedio de cinco réplicas \pm error estándar. Control: 0 kg ha^{-1} , T1: 1000 kg ha^{-1} , T2: 2000 kg ha^{-1} , T3: 4000 kg ha^{-1} . Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre días de medición en un mismo cultivar.

4.2.4 Apagamiento no fotoquímico (NPQ): ‘Non-photochemical quenching’. Calculado como $(F_m - F'_m) / F'_m$. Aunque su real naturaleza es discutida, se lo considera un indicador de la tasa de disipación no-fotoquímica. Puede tomar valores entre 0 e infinito, aunque son comunes valores entre 0 y 4 (Tambusi, 2004). Brigitta registró al inicio un valor de 1,73 para NPQ. Para este cultivar los valores de NPQ del control siempre se mantuvieron por sobre los tratamientos demostrando el efecto negativo del estrés por aluminio en las plantas, siendo la dosis de 4000 kg ha⁻¹ (T3) el que obtuvo los mejores resultados a los 15 y 60 días ($p < 0,0001$). El tratamiento de 1000 kg ha⁻¹ (T1) fue el que obtuvo los valores más bajos a los 30 y 45 días ($p < 0,0001$). El valor NPQ más alto se registró a los 45 días (Figura 9).

Legacy registró al inicio un NPQ de 1,08. La dosis de 4000 kg ha⁻¹ (T3) fue el tratamiento que mantuvo los valores NPQ más bajos a los 60 días y la dosis de 2000 kg ha⁻¹ (T2) a los 30 días ($p < 0,0001$). Al comparar los días que estuvo expuesto este cultivar a los tratamientos el mayor valor NPQ (2,07) se registró a los 30 días, y el más bajo (0,86) a los 15 días ($p < 0,0001$). Al comparar entre los cultivares Bluegold obtuvo los mayores valores para NPQ al inicio, 45 y 60 días. Legacy tiene los menores valores de NPQ al inicio y 60 días, tan solo a los 30 días es el cultivar que tiene los mayores valores de NPQ. Brigitta presenta altos valores de NPQ a los 15 y 60 días, a los 30 días es cuando tiene los menores valores de NPQ en comparación con los otros cultivares ($p < 0,0001$) (Figura 9). Este aumento en NPQ producido en las plantas control, se contrapone al estudio de Chen *et al.* (2005b) donde este parámetro fue menor en las hojas de cítricos tratadas con Al que en las hojas de control. En el trabajo realizado por Inostroza-Blancheteau *et al.* (2011) se registró un aumento significativo de NPQ en el genotipo considerado resistente (Brigitta) con respecto a los puntos de control en tiempo cero, mientras que en el genotipo sensible (Bluegold), los niveles de NPQ disminuyeron significativamente en todos los momentos de tratamiento de Al. En esta tesis se pudo observar un aumento en los tres cultivares estudiados, y se demostró para este parámetro el efecto positivo de la enmienda utilizada para disminuir estos valores. En la investigación realizada por Reyes-Díaz *et al.* 2009 los valores de NPQ para Brigitta y Legacy no se vieron afectados por el tratamiento Al, sin embargo, Bluegold registró una tendencia a reducir su NPQ bajo los tratamientos Al después de 24 h.

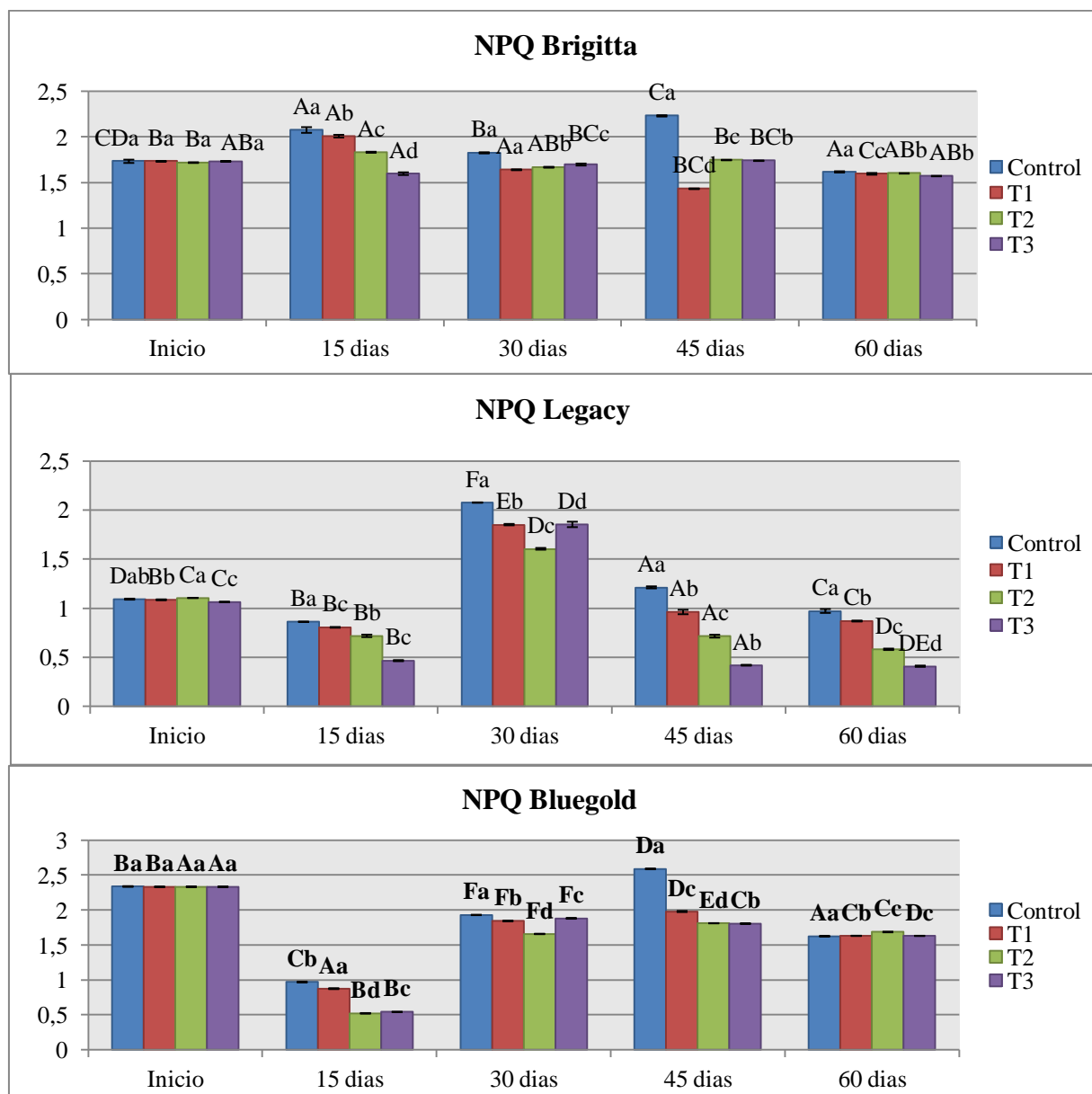


Figura 9. Apagamiento No-Fotoquímico (NPQ) evaluado en cultivares de arándano establecidos en un Andisol con alta saturación de aluminio, durante 60 días, con aplicación de CaSO_4 . Valores representan el promedio de cinco réplicas \pm error estándar. Control: 0 kg ha^{-1} , T1: 1000 kg ha^{-1} , T2: 2000 kg ha^{-1} , T3: 4000 kg ha^{-1} . Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre días de medición en un mismo cultivar.

Bluegold ($p < 0,0001$) registró en el inicio un NPQ de 2,33, siendo la dosis de 2000 kg ha⁻¹ (T2) el tratamiento que obtuvo los menores valores para este parámetro a los 15 y 30 días. A los 45 días tanto T2 como la dosis de 4000 kg ha⁻¹ (T3) obtienen valores similares siendo los más bajos en comparación con la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) y las plantas control. A los 60 días los valores registrados por el control, T1 y T3 no tuvieron diferencias (1,63) y T2 fue el tratamiento obtuvo el mayor NPQ (1,68). Los valores para NPQ en el control se mantienen siempre sobre los valores de los tratamientos. El valor de NPQ más bajo para este cultivar se presentó a los 15 días y el más alto a los 45 días (Figura 9).

Al realizar una comparación entre los cultivares, es importante mencionar la tolerancia que presenta Brigitta a una saturación de aluminio, ya que este cultivar mantiene su valor constante para Fv/Fm y registra su primer disminución de los parámetros PSII y ETR recién a los 45 días, seguido por Bluegold que tiene una tolerancia solo hasta los 15 días que es cuando comienza a registrar disminuciones para Fv/Fm, PSII y ETR, siendo Legacy el cultivar que registra a los 7 días la mayor disminución para PSII y ETR, y a los 15 días para Fv/Fm.

4.3 Análisis Bioquímicos.

4.3.1 Análisis Actividad Antioxidante

La actividad antioxidante (AA), fue medida de acuerdo al método DPPH de Li *et al.* (2007) en los tres cultivares bajo aplicación de la enmienda calcárea. Bluegold incrementó su AA de manera significativa ($p < 0,0001$) en un ~40% para T1, y al aumentar la dosis de la enmienda de CaSO_4 (2000 y 4000 kg ha^{-1}) tiende a decrecer sus valores (4%), pero se mantienen significativamente superiores al control no tratado (Figura 10). Para los otros cultivares estudiados el tratamiento que obtuvo el mayor incremento de AA en hojas fue T2, siendo este incremento hasta un 26% para Brigitta ($p < 0,0001$) y ~50% para Legacy ($p < 0,0001$), mientras los tratamientos de 1000 y 4000 kg ha^{-1} (T1 y T3) mostraron un menor incremento de la AA, pero significativamente superiores a las plantas no tratadas con CaSO_4 (control). De los tres cultivares estudiados, Bluegold presentó la mayor AA foliar en plantas control ($p < 0,0001$), en contraste Legacy presentó una menor AA en hoja ($p < 0,0001$). La actividad antioxidante fue en promedio 2,3 veces mayor en las hojas en comparación con las raíces, a pesar que nuestro ensayo fue realizado en condiciones de suelo concuerda con los resultados obtenidos por el ensayo en hidroponía a corto plazo (48 h) realizado por Inostroza-Blancheteau *et al.* (2011) en arándano (Brigitta y Bluegold) sometidos en dosis de Al (0-100 μM). Los valores obtenidos para la AA en hoja en las plantas sometidas a la toxicidad de aluminio sin aplicación de CaSO_4 para Bluegold fue de 8.790,2 $\mu\text{g TE g}^{-1}$ PF, Brigitta mostró 7.847,8 $\mu\text{g TE g}^{-1}$ PF y finalmente Legacy obtuvo 5.436,5 $\mu\text{g TE g}^{-1}$ PF. Ehlenfeldt y Prior (2001) midieron la AA en hoja y fruto en varios cultivares (87) de arándano, utilizando la metodología ORAC (Oxygen Radical Absorbance Capacity). Brigitta obtuvo 511,7 $\mu\text{mol de TE (Trolox Equivalentes) g}^{-1}$ PF (Peso Fresco) y Bluegold 410,2 $\mu\text{mol de TE g}^{-1}$ PF, Legacy fue el cultivar que presentó la menor actividad antioxidante en hoja 308,7 $\mu\text{mol de TE g}^{-1}$ PF. A pesar de que nuestro método de análisis de la AA y de que la medición de Ehlenfeldt y Prior fue en plantas establecidas en condiciones

favorables, es posible apreciar que los valores de AA en hoja de Legacy es constitutivamente menor a los otros dos cultivares, lo que concuerda con los valores obtenidos en esta tesis.

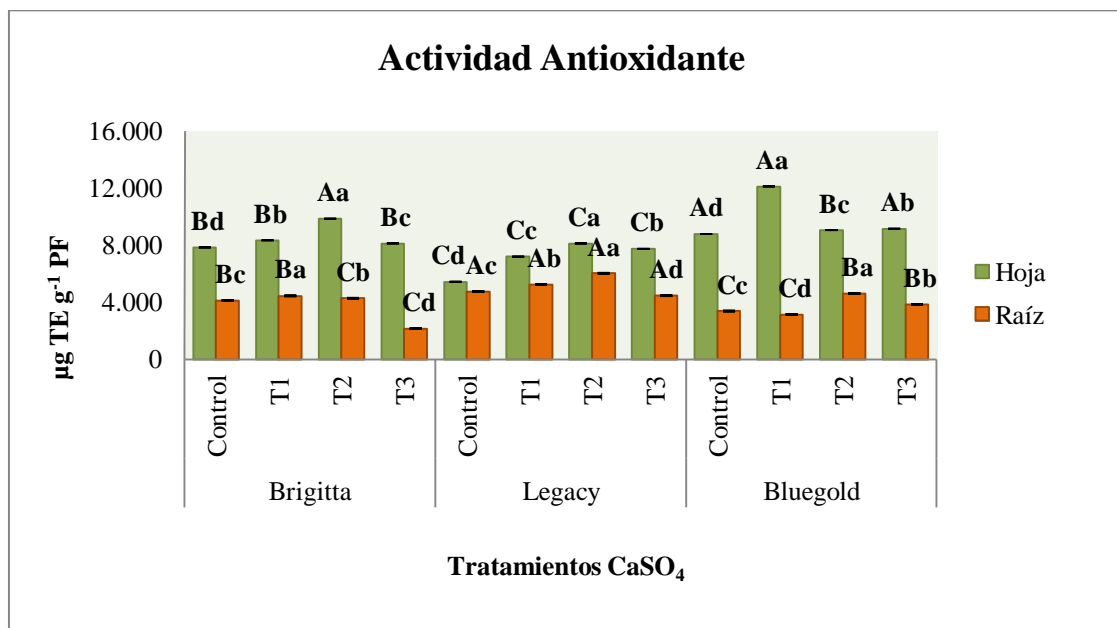


Figura 10. Actividad antioxidante ($\mu\text{g TE g}^{-1}\text{ PF}$) medida en hoja y raíz de cultivares de arándano, establecidos 60 días en un Andisol serie Gorbea con alta saturación de aluminio y aplicación de CaSO_4 . Valores representan el promedio de tres réplicas \pm error estándar. Control: 0 kg ha^{-1} , T1: 1000 kg ha^{-1} , T2: 2000 kg ha^{-1} , T3: 4000 kg ha^{-1} . Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivares en un mismo tratamiento.

Brigitta aumentó significativamente su AA de raíz (8%) en la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1) comparado con las plantas no tratadas (control). Para los otros cultivares la dosis de 2000 kg ha^{-1} (T2) fue el tratamiento que obtuvo los mayores incrementos de la AA con un 37% para Bluegold y un 27% para Legacy. Legacy demostró una mayor AA en raíces en todos los tratamientos comparado con los otros dos cultivares ($p < 0,0001$) (Figura 10). Esto concuerda con el trabajo realizado por Reyes-Díaz *et al.* (2010) donde Legacy también fue el cultivar que expresó mayor actividad antioxidante en las raíces en comparación con Bluegold. Esto demuestra que una alta saturación de aluminio en el suelo provoca una disminución considerable de la AA tanto de las hojas como de las raíces en los cultivares estudiados y que los tratamientos aplicados tienden a

favorecer en un incremento de este parámetro. El estrés provocado en la AA por el Al^{3+} presente en los suelos concuerda con el estudio realizado por Zhang *et al.* (2007) en plantas de soja (*Glycine max* Merrill.) donde se observó que la AA incrementaba con una baja concentración de Al (200 mg kg^{-1}), pero si se aumentaba la concentración de Al (400 a 800 mg kg^{-1}) en el suelo tendía a disminuir considerablemente.

La aplicación de $CaSO_4$ produjo un incremento en la AA para los cultivares estudiados al ser comparadas con las plantas control. Este efecto positivo puede ser explicado por la relación que se observó en el contenido de calcio y azufre del suelo y la AA, donde se obtuvieron correlaciones positivas en los cultivares Legacy y Brigitta para la AA en hoja y en Bluegold para la AA en raíz (Anexos 2 y 3). La baja AA en hojas observada en las plantas control, está relacionada a la alta y negativa correlación observada con el contenido de aluminio intercambiable del suelo, siendo esta correlación significativa ($p=0,045$) solo para el cultivar Bluegold (Anexo 1).

4.3.2 Análisis Contenido de Fenoles Totales

Luego de 60 días el contenido de fenoles totales (CFT) medido en hojas de los tres cultivares estudiados aumentó significativamente ($p<0,0001$) en relación al control, en la medida que se incrementó la dosis de $CaSO_4$. Brigitta presentó el mayor CFT en las plantas sin aplicación de la enmienda lo que podría indicar que es un cultivar tolerante al estar sometido a una alta saturación de aluminio, mientras que Legacy fue el cultivar en el que se obtuvieron los menores valores. Brigitta tuvo un incremento de ~60% de CFT al aplicar la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1) y un 75% para la dosis de 4000 kg ha^{-1} (T3). Legacy obtuvo un incremento de un 28% en los 1000 kg ha^{-1} (T1) y un 70% en los 4000 kg ha^{-1} (T3), ambos cultivares duplicaron sus valores CFT para la dosis de 2000 kg ha^{-1} (T2), resultando ser este el tratamiento en el que se evidenció el mayor incremento en el contenido de fenoles. En Bluegold se observa un aumento de un 68% en los 1000 kg ha^{-1} (T1), de ~90% en los 2000 kg ha^{-1} (T2) llegando a duplicar los valores obtenidos en

el control para la dosis de 4000 kg ha⁻¹ (T3) el que obtuvo los mayores valores (Figura 11). Ehlenfeldt y Prior (2001), estudiaron el CFT en 87 cultivares de arándano establecidos en condiciones normales, Brigitta fue el cultivar que expresó mayor contenido de fenoles totales (48,09 mg GAE g⁻¹ PF) seguido por Bluegold con valor similar (47,04 mg GAE g⁻¹ PF), siendo Legacy el cultivar que contiene menor contenido de fenoles totales (32,63 mg GAE g⁻¹ PF). A pesar que en nuestro estudio, estos cultivares estuvieron sometidos a un estrés por aluminio, Brigitta también obtuvo los valores más altos para CFT (112,19 µg ac. clorogénico g⁻¹ PF), con muy poca diferencia con Bluegold (110,45 µg ac. clorogénico g⁻¹ PF) y Legacy (85,25 µg ac. clorogénico g⁻¹ PF) al igual que en el estudio de Ehlenfeldt y Prior, fue el cultivar que mostró los menores valores de CFT. Sin embargo, esto se opone al trabajo realizado por Tolrá *et al.* (2004), donde se observó un aumento de hasta un 50% en el CFT en la parte aérea de plantas de *Rumex acetosa* L. al aplicar 50 µM de Al. También en el estudio realizado por Kovacević *et al.* (2010) en plantas de *Matricaria chamomilla* se mostró un aumento en el total de fenoles solubles en la parte aérea a medida que la dosis de Al aumentaba (60-120 µM), lo que sugiere que el metabolismo fenólico de diferentes plantas responde al exceso de Al de una manera similar.

Si bien los resultados de Kovacević *et al.* (2010), indican un alto contenido de CFT por acción de altas concentraciones de Al, se podría indicar que esas condiciones comparadas con la aplicación de CaSO₄ realizada en este estudio aumentaría en mayor medida el CFT de las plantas tratadas. Al hacer la relación del contenido de calcio intercambiable y azufre del suelo con CFT se obtuvo una correlación positiva aunque no significativa para los tres cultivares estudiados (Anexos 2 y 3). Los bajos resultados obtenidos en las plantas control concuerdan con la correlación negativa que mostraron los cultivares en su CFT al relacionarlo con el contenido de aluminio intercambiable del suelo (Anexo 1).

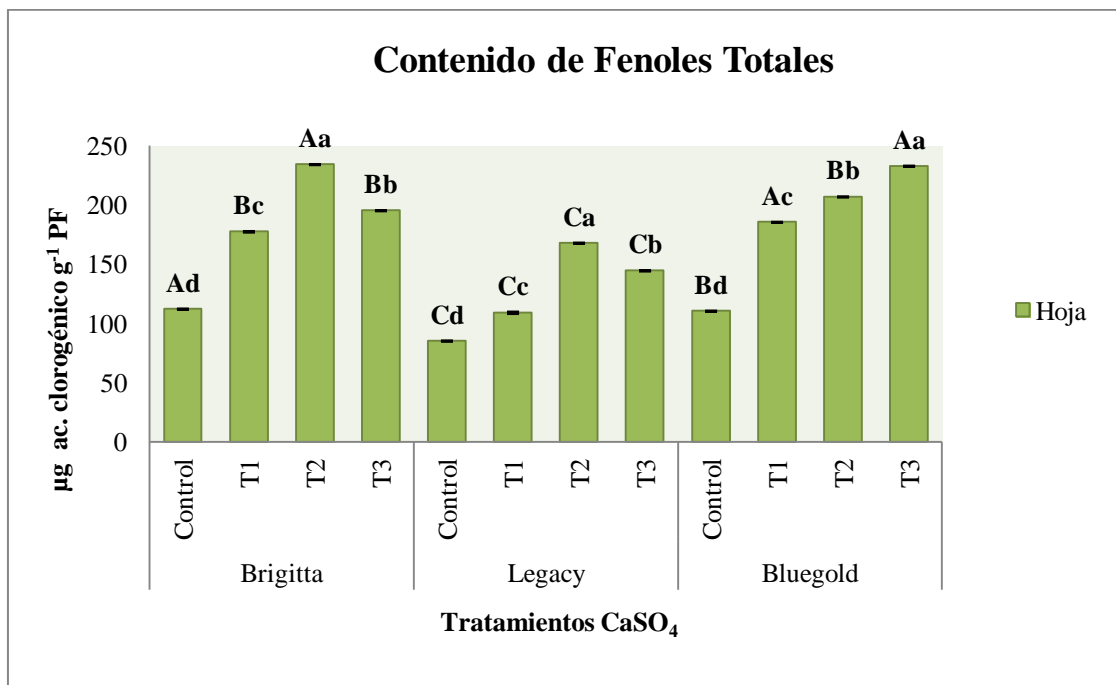


Figura 11. Contenido de fenoles totales (μg ac. clorogénico g^{-1} PF) en hoja de cultivares de arándano, establecidos 60 días en un Andisol serie Gorbea con alta saturación de aluminio y aplicación de CaSO_4 . Valores representan el promedio de tres réplicas \pm error estándar. Control: 0 kg ha^{-1} , T1: 1000 kg ha^{-1} , T2: 2000 kg ha^{-1} , T3: 4000 kg ha^{-1} . Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivares en un mismo tratamiento.

4.3.3 Análisis Pigmentos

Los niveles de Clorofila total (Chl a+b) fueron reducidos significativamente por la aplicación de CaSO_4 , en Bluegold y Brigitta ($p=0,0002$), respecto del control, esta reducción en Brigitta fue de un 21% para la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1), de ~25% en los 2000 kg ha^{-1} (T2) y de un 38% en los 4000 kg ha^{-1} (T3), en Bluegold los niveles de Chl a+b se redujeron un 18% tanto para los 1000 y 2000 kg ha^{-1} (T1 y T2) y un 33% en los 4000 kg ha^{-1} (T3). Esto se opone a los resultados de Chen *et al.* (2005a) donde las concentraciones totales de Chl a+b en plántulas de mandarina var. Cleopatra (*Citrus reshni* Hort. Cx Tanaka), establecidas en solución de Hoagland por 8 semanas, fueron significativamente inferiores en las hojas tratadas (2 mM de Al) comparadas a las control

(0 mM Al). En el trabajo realizado por Azmat y Hasan, (2008) se estudió el efecto de la toxicidad del aluminio (20-150 mM) en lenteja (*Lens culinaris* L.) en solución Hoagland por 15 d, obteniendo una reducción de hasta un 50% en el contenido de Chl a+b a medida que la concentración de aluminio aumentaba. Al revisar estos estudios se logra apreciar un claro efecto negativo del Al en el contenido de Chl a+b, por lo tanto, se esperaría un incremento con la aplicación de la enmienda de CaSO₄ lo cual no se reflejó en los resultados obtenidos en esta tesis. Entre cultivares, Brigitta es el que contiene mayor cantidad de Chl a+b con 1,08 mg g⁻¹ PF, seguido por Bluegold con 0,93 mg g⁻¹ PF, siendo Legacy el cultivar que presenta menores valores de pigmentos clorofílicos con 0,64 mg g⁻¹ PF. Legacy mantuvo sus valores constantes de Chl a+b independiente de la dosis de CaSO₄ aplicada ya que no presentó diferencias significativas entre los tratamientos (p=0,0264) (Figura 12). Reyes-Díaz *et al.* (2010), estudió la respuesta a largo plazo (20 días) de cultivares de arándano alto (Legacy y Bluegold) mantenidos en solución nutritiva. Obtuvo un aumento significativo de Chl a+b a los 7 d cuando aumentó la concentración de aluminio (200 μM).

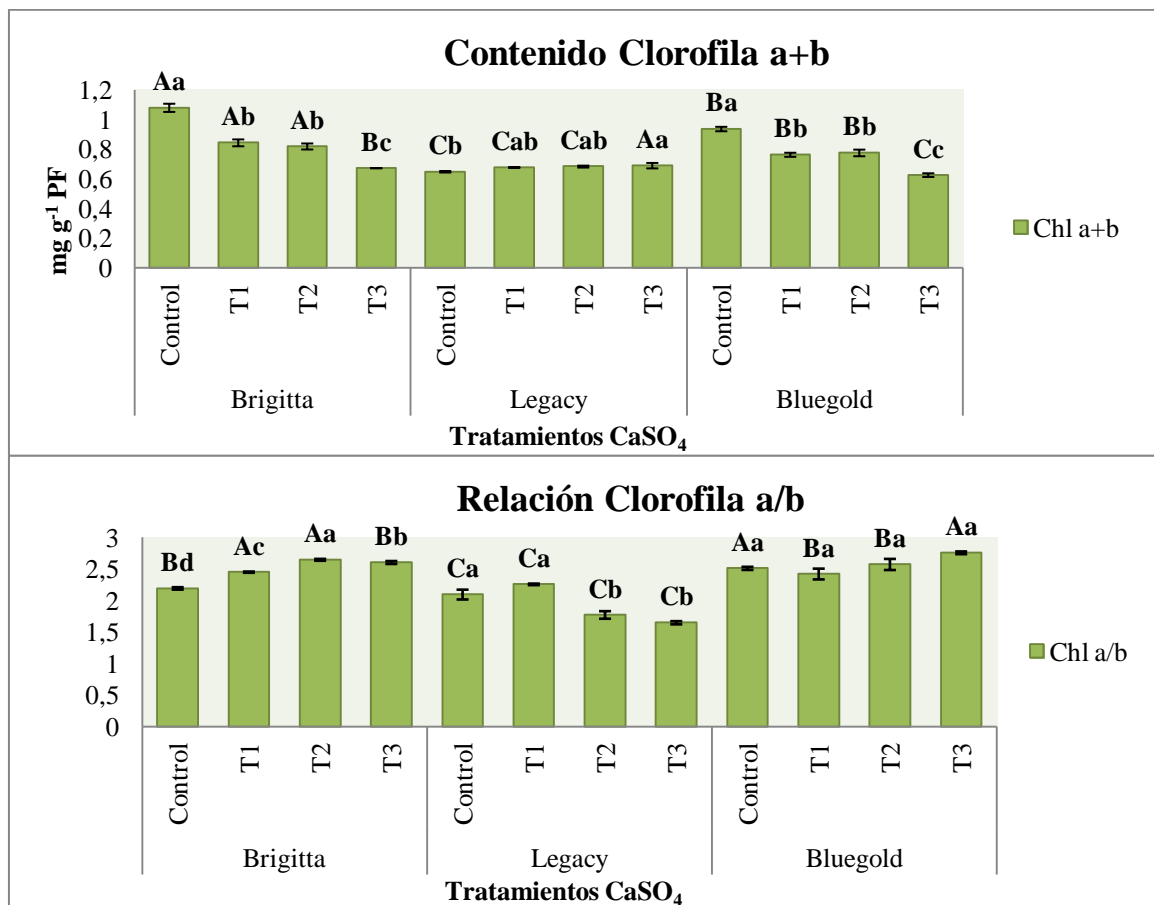


Figura 12. Contenido total de clorofila (mg g^{-1} PF) y su relación clorofila a/b en hoja de cultivares de arándano, establecidos por 60 días en un Andisol serie Gorbea con alta saturación de aluminio y aplicación de CaSO_4 . Valores representan el promedio de tres réplicas \pm error estándar. Control: 0 kg ha^{-1} , T1: 1000 kg ha^{-1} , T2: 2000 kg ha^{-1} , T3: 4000 kg ha^{-1} . Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivares en un mismo tratamiento.

El descenso de la relación clorofila a/b (Chl a/b) se traduce en una reducción en el tamaño de la antena de los fotosistemas para protegerlos de la fotoinhibición reduciendo el suministro de energía a los centros de reacción (Adams *et al.*, 2004). Este cambio en el tamaño de la antena de la clorofila es probablemente una estrategia para reducir la absorción de la luz y evitar posibles daños a los fotosistemas debido a la toxicidad de Al (Reyes *et al.*, 2009). Brigitta muestra un incremento significativo ($p < 0,0001$) en Chl a/b en todos los tratamientos respecto al control, este aumento fue de un 12% para la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1) y de ~20% para los 2000 y 4000 kg

ha⁻¹ (T2 y T3). En Legacy (p=0,0031) se observó un incremento de un 8% solo en la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) ya que al aumentar la dosis de CaSO₄ a 2000 o 4000 kg ha⁻¹, Chl a/b disminuyó un ~20%. En Bluegold no se obtuvieron diferencias significativas en el ratio de clorofila a/b (p=0,1736) (Figura 12). Una disminución de Chl a/b está fuertemente relacionado con el mecanismo de protección de las plantas ante un estrés para evitar una fotoinhibición. Esto coincide con el trabajo de Reyes-Díaz *et al.* (2009) donde se estudiaron las mismas variedades de arándano utilizadas para este estudio establecidas en solución Hoagland y sometidas durante una semana a diferentes tratamientos de Al (0, 25, 50, 75 y 100 µM), obteniéndose reducciones de Chl a/b de hasta un 60% para Brigitta y un 80% en Bluegold, lo que indica claramente el efecto positivo que tuvo la aplicación de los tratamientos con la enmienda CaSO₄ ya que logró mantener constantes los valores de Chl a/b para Bluegold y provocó un incremento significativo para Brigitta en todos los tratamientos aplicados. Hay informes contradictorios sobre los efectos de Al en el ratio Chl a/b, mientras la relación se incrementó con tratamientos de Al en mandarinas cv. Cleopatra (Chen *et al.*, 2005) y en *Eucalyptus grandin* x *E. urophylla* (Yang *et al.*, 1996), en arroz así como también en el cultivo de soja (Roy *et al.*, 1988 y Ying y Liu, 2005) se produjo una disminución y se mantuvo constante, respectivamente, en el estudio realizado por Milivocevic *et al.* (2000) en soja.

Los carotenoides juegan un papel esencial en la protección del aparato fotosintético frente a estreses ambientales que pueden perjudicar la actividad fotosintética contra los efectos nocivos de la luz y el oxígeno, disipando el exceso de energía en forma de calor en los complejos pigmento antena (Demmig-Adams y Adams, 1996; Niyogi *et al.*, 1998). Legacy tuvo un aumento significativo en el contenido de carotenoides a medida que la dosis de CaSO₄ aumentaba (p<0,0001), este incremento fue de un 23% en la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) y de un 53% en los 2000 kg ha⁻¹ (T2), alcanzando la mejor respuesta con la dosis de 4000 kg ha⁻¹ (T3) con un incremento de un 70% respecto a los valores obtenidos en las plantas no tratadas con la enmienda. Similar resultado ha sido reportado por Reyes-Díaz *et al.* (2009) en que Legacy disminuyó su contenido de carotenoides a medida que el tratamiento con Al aumentaba, demostrándose así, para esta tesis el efecto positivo de la aplicación de la enmienda de CaSO₄ en este cultivar. La exposición a un estrés por aluminio provoca un efecto negativo en el nivel de

carotenoides, lo que concuerda con el estudio realizado por Peixoto *et al.* (2002) donde observaron que la concentración de carotenoides se redujo en plantas de sorgo expuestas a toxicidad por Al en mayor medida en la variedad Al-tolerante que en la Al-sensible. Así también, la pérdida de carotenoides a causa de toxicidad por Al se detectó en *Dimocarpus longan* Lour. (Xiao *et al.*, 2005), soja (Milivocevic *et al.*, 2000) y en *Lens culinaris* (Azmat y Hasan, 2008). En Bluegold la enmienda redujo significativamente ($p=0,0005$) el contenido de carotenoides (15% para la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1), un 17% para los 2000 kg ha^{-1} (T2) y un 20% en los 4000 kg ha^{-1} (T3)). En Brigitta el control y los 2000 kg ha^{-1} (T2) presentaron valores similares $\text{CAR}=0,14 \text{ mg g}^{-1} \text{ PF}$, siendo superiores a los 1000 y 4000 kg ha^{-1} (T1 y T3) $\text{CAR}=0,11 \text{ mg g}^{-1} \text{ PF}$ ($p<0,0001$). Comparando las plantas sin aplicación de la enmienda, Brigitta obtuvo un mayor contenido de carotenoides, seguido por Bluegold, siendo Legacy el cultivar que presentó los menores valores de carotenoides en las plantas control (Figura 13). Con los resultados obtenidos por Azmat y Hasan, (2008) es posible indicar que quizás el contenido de carotenoides no sea tan sensible a la toxicidad de aluminio en condiciones de suelo ya que requiere altas concentraciones para disminuir su concentración lo que fue observado con aplicaciones de 90 ppm de Al en lenteja.

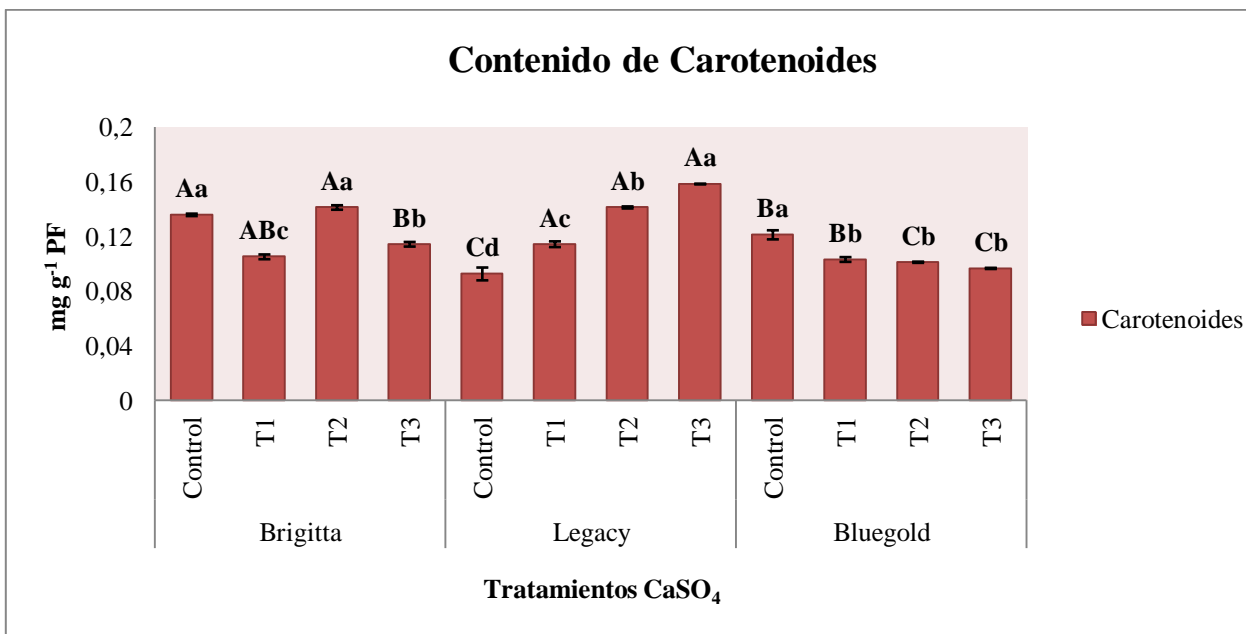


Figura 13. Contenido total de carotenoides (mg g⁻¹ PF) en hoja de cultivares de arándano, establecidos por 60 días en un Andisol serie Gorbea con alta saturación de aluminio y aplicación de CaSO₄. Valores representan el promedio de tres réplicas ± error estándar. Control: 0 kg ha⁻¹, T1: 1000 kg ha⁻¹, T2: 2000 kg ha⁻¹, T3: 4000 kg ha⁻¹. Letras minúsculas indican diferencias significativas (p<0,05) entre tratamientos para un mismo cultivar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivares en un mismo tratamiento.

4.3.4 Análisis Peroxidación Lipídica

La peroxidación de los lípidos (PL) es un síntoma típico de estrés oxidativo, y se considera un índice general de la lesión oxidativa de la membrana (Jones *et al.*, 2006; Yamamoto *et al.*, 2001). Legacy fue el cultivar más afectado por la peroxidación lipídica ante un estrés por aluminio, en comparación a los otros cultivares. Sin embargo al hacer la aplicación de los tratamientos con la enmienda de CaSO₄ estos valores disminuyeron (51%) significativamente (p<0,0001) de forma similar tanto en la dosis de 2000 como en la de 4000 kg ha⁻¹ (T2 y T3) (Figura 14). Cuando una planta está bajo estrés, la producción de ROS puede exceder la capacidad de los sistemas de remoción de estas especies reactivas, lo que resulta en daño oxidativo, lo que puede indicar el por qué esta variedad presentó los valores más altos de PL bajo el tratamiento con suelo con alta

saturación de Al, ya que en los resultados obtenidos en la AA este cultivar presentó los valores más bajos. Bluegold con la dosis de 2000 kg ha⁻¹ (T2) obtuvo la mayor reducción de PL en hojas (~50%) y en raíces (27%) (Figura 14). Los resultados obtenidos en este trabajo se oponen a los obtenidos por Reyes-Díaz *et al.* (2010), donde Bluegold en relación a PL fue el cultivar más sensible a la toxicidad de Al en comparación con Legacy. Brigitta destaca por ser el cultivar que presentó los menores valores de peroxidación, lo que podría indicar algún tipo de resistencia a la toxicidad de aluminio por parte de este cultivar, siendo la dosis de 2000 kg ha⁻¹ (T2) donde se obtuvo la mayor reducción de PL para hoja con ~40% y con la dosis de 4000 kg ha⁻¹ (T3) para raíz con un 20% de reducción (Figura 14). En general los valores de PL de los controles estuvieron por debajo de las plantas tratadas con la enmienda de CaSO₄, lo que indica claramente el efecto negativo que tiene una alta saturación de aluminio en el suelo para los cultivares de arándano estudiados en esta tesis, lo que concuerda con el estudio realizado por Zhang *et al.* (2007) donde se estudió el efecto del aluminio del suelo en dos cultivares de soya y se observó que a medida que la concentración de Al era mayor (200 a 800 mg kg⁻¹), el contenido de MDA aumentaba gradualmente hasta un 64,16% sobre los valores del control (0 mg kg⁻¹). También Qin *et al.* (2010) concluyó en su estudio del efecto del aluminio en células de raíz de *Allium cepa* var. *agrogarum* L. que la alta concentración de MDA demuestra que el Al indirectamente produce radicales superóxido, resultando en aumento de productos de la peroxidación de los lípidos y el estrés oxidativo en las raíces. Por último en la investigación realizada por Dong *et al.* (2002) se observó también un aumento en la concentración de MDA en plantas de trigo a medida que la dosis de Al aumentaba, con esto queda comprobado que el Al está directamente relacionado con el aumento de la peroxidación de lípidos produciendo efectos negativos en las plantas.

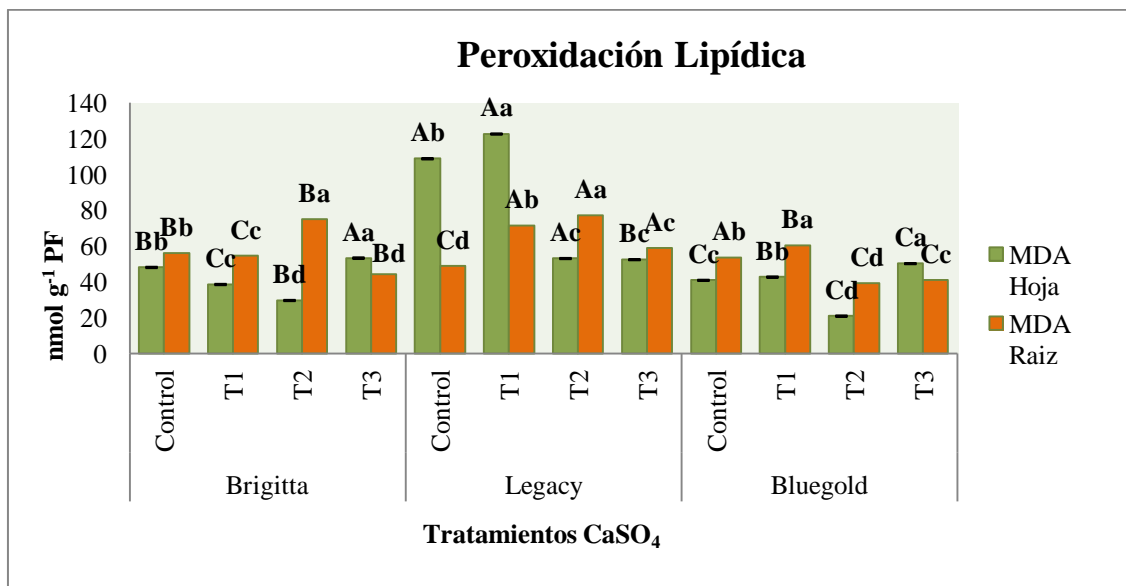


Figura 14. Peroxidación lipídica (nmol g⁻¹ PF) medida en hoja y raíz de cultivares de arándano, establecidos 60 días en un Andisol serie Gorbea con alta saturación de aluminio y aplicación de CaSO₄. Valores representan el promedio de tres réplicas ± error estándar. Control: 0 kg ha⁻¹, T1: 1000 kg ha⁻¹, T2: 2000 kg ha⁻¹, T3: 4000 kg ha⁻¹. Letras minúsculas indican diferencias significativas (p≤0,05) entre tratamientos para un mismo cultivar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivares en un mismo tratamiento.

4.4 Análisis Químico de hojas y raíces.

4.4.1 Contenido de Aluminio

Legacy disminuyó significativamente sus niveles de aluminio tanto en hoja y raíz a medida que la dosis de CaSO₄ aumentaba. Con la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) esta reducción fue de un 7% en hoja y un 47% en raíz (p<0,0001), para la dosis de 2000 kg ha⁻¹ (T2) hubo una disminución de un 24% en hoja y un 91% en raíz (p<0,0001), finalmente la dosis de 4000 kg ha⁻¹ (T3) mostró una reducción de un ~27% para hoja y un 89% en raíz (p<0,0001). Bluegold mostró una reducción para todos los tratamientos en el contenido de aluminio en hoja, siendo un 18% en los 1000 kg

ha⁻¹ (T1) y un ~22% en los tratamientos de 2000 y 4000 kg ha⁻¹ (T2 y T3) (p<0,0002), sin embargo en raíz sólo con la dosis de 4000 kg ha⁻¹ (T3) se obtuvo una reducción de un 47% (p<0,0001) en el contenido de aluminio radical, ya que en los otros tratamientos hubo un incremento de Al de un 38% al aplicar los 1000 kg ha⁻¹ (T1) y de un 11% con la dosis de 2000 kg ha⁻¹ (T2) (p<0,0001) (Figura 15). Esto puede indicar que para este cultivar sea necesario utilizar dosis altas de CaSO₄ para lograr el efecto de reducción del contenido de aluminio en raíz. Brigitta mostró una reducción significativa del contenido de aluminio en hojas y raíces en las plantas con la aplicación de la enmienda de CaSO₄, con la dosis de 1000 kg ha⁻¹ (T1) esta reducción fue de un 53% en hoja y de un ~40% en raíz, con los 2000 kg ha⁻¹ (T2) un ~40% en hoja y un 63% en raíz y finalmente con los 4000 kg ha⁻¹ (T3) se obtuvo una reducción similar tanto en hoja como en raíz con un ~55% (p<0,0001) (Figura 15). Es posible afirmar que la aplicación de CaSO₄ reduce el contenido de aluminio foliar y radical en un suelo con una alta saturación de aluminio, ya que en condiciones de toxicidad por Al, sin la aplicación de esta enmienda, los contenidos de aluminio en ambos órganos se ven incrementados considerablemente, esto concuerda con el trabajo de Reyes-Díaz *et al.* (2010) realizado en plantas de arándano (cv. Legacy y Bluegold) establecidas en cultivo hidropónico (20 días) tratadas con Al, el contenido de Al en la raíz se incrementó en paralelo con el aumento de la concentración de Al del tratamiento, hasta los 100 µM de Al en Legacy y Bluegold, después se mantuvo constante. Bluegold mostró un contenido de aluminio un 40% más alto en sus raíces que Legacy. Sin embargo, la acumulación de Al en la raíz en casi todas las concentraciones de Al y en todas los tiempos de medición fue muy similar en Legacy y Bluegold, siendo hasta 8,5 veces mayor que el control en los tratamientos más altos de Al. Esto no concuerda con los resultados obtenidos en esta tesis, ya que Legacy fue el cultivar que mostró la mayor acumulación de Al radical en las plantas sometidas a estrés de aluminio sin la aplicación de los tratamientos de CaSO₄. Sin embargo al analizar estos cultivares tras la aplicación de la enmienda, es posible observar que Legacy en T2 y T3 disminuyó hasta 7 veces y 3 veces más su contenido de Al en las raíces que Bluegold. Brigitta mostró altas acumulaciones de aluminio tanto en hoja (863 g kg⁻¹ PS) y en raíz (1180 g kg⁻¹ PS) en las plantas sin la aplicación del tratamiento de CaSO₄, sin embargo, como se mencionó anteriormente, estos valores se vieron reducidos significativamente con la aplicación de la enmienda. Al someter los cultivares de arándano, estudiados en esta tesis, a un estrés por aluminio, se tiende a observar una

gran acumulación de Al mayoritariamente en las raíces en comparación con las hojas, esto concuerda con el estudio realizado por Kováčik *et al.* (2010), en el cual el contenido de la parte aérea de *Matricaria chamomilla* no se incrementó significativamente por la aplicación externa de Al en comparación con el control. Sin embargo, el contenido de Al en la raíz aumentó considerablemente, tanto en 60 μM y 120 μM de Al. También en el trabajo realizado por Giannakoula *et al.* (2010) la acumulación de aluminio fue significativamente mayor en las raíces de las dos líneas de maíz (*Zea mays*) estudiadas, incluso con el menor tratamiento de Al (240 μM). Después de 72 h de exposición a 480 μM Al las concentraciones de Al en las raíces se incrementó casi 90 veces en la línea considerada tolerante y 140 veces en la línea sensible en comparación con los valores del control (sin Al). Por último, Tolrá *et al.* (2005) observó en el análisis químico del total de Al en la raíz de *Rumex acetosa* L. fue considerablemente más alta en las plantas expuestas a 50 Al μM durante 5 días. En cuanto a los altos valores obtenidos en el contenido de Al foliar, Chen *et al.* (2005) obtuvo que la concentración de Al en las hojas de mandarina con el tratamiento de aluminio y las hojas de control fue 23-4 y 31-1 $\mu\text{g g}^{-1}$ PS, respectivamente. También, en el estudio de Jiang *et al.* (2008) en *Citrus grandis* se obtuvo una mayor concentración de Al en las hojas tratadas con aluminio en comparación con el control.

La relación del aluminio intercambiable del suelo con el contenido de aluminio en los tejidos vegetales mostró una correlación positiva en los tres cultivares, siendo alta y significativa sólo para el cultivar Legacy para hoja ($p=0,0317$) y raíz ($p=0,0777$) (Anexo 1). La correlación para la relación del contenido de calcio intercambiable y azufre en el suelo con el contenido de aluminio en los tejidos vegetales fueron negativas para los tres cultivares, siendo también alta y significativa sólo para el cultivar Legacy en hoja y raíz ($p<0,05$) (Anexos 2 y 3).

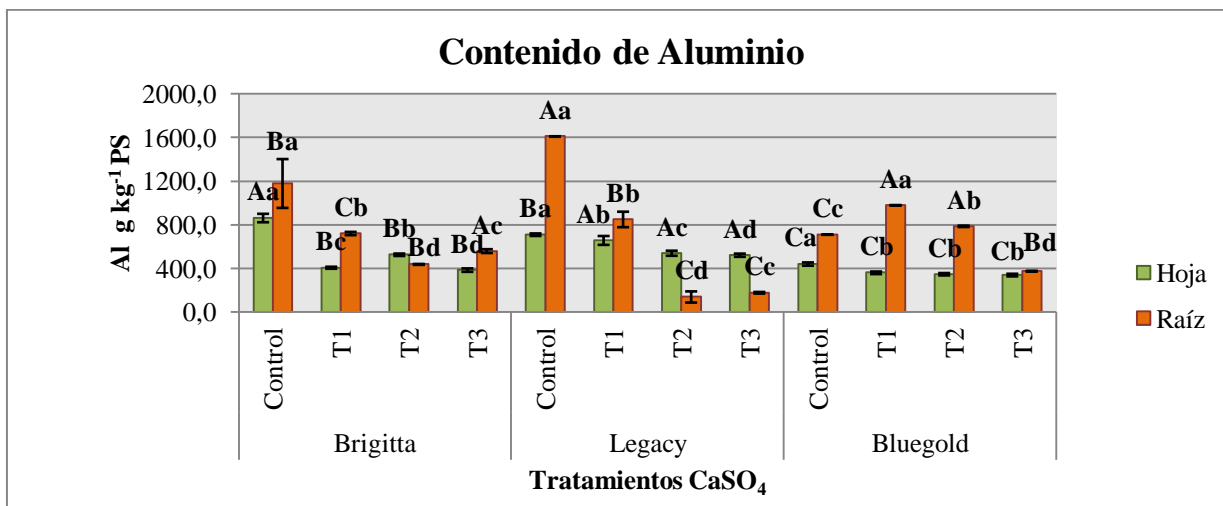


Figura 15. Contenido total de aluminio (g kg^{-1} PS) foliar y radicular en cultivares de arándano, establecidos durante 60 días en un Andisol serie Gorbea con alta saturación de aluminio y aplicación de CaSO_4 . Valores representan el promedio de tres réplicas \pm error estándar. Control: 0 kg ha^{-1} , T1: 1000 kg ha^{-1} , T2: 2000 kg ha^{-1} , T3: 4000 kg ha^{-1} . Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivares en un mismo tratamiento.

4.4.2 Contenido de Calcio

Los cultivares tuvieron un incremento significativo en el contenido de calcio en hojas y raíces al aplicar los tratamientos de CaSO_4 en comparación con las plantas no tratadas (control) (Figura 16). Legacy con la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1) tuvo un incremento de un 20% para hoja y raíz ($p < 0,0001$), con la dosis de 4000 kg ha^{-1} (T3) ~30% en hoja y un 50% en raíz ($p < 0,0001$), sin embargo, para la dosis de 2000 kg ha^{-1} (T2) este incremento fue de solo un 3% para hoja y raíz ($p < 0,0001$). Brigitta con la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1) mostró un incremento de un 4% ($p = 0,0003$) del contenido de Ca^{2+} en hoja y ~60% en raíces ($p < 0,0001$), para los 2000 kg ha^{-1} (T2) este incremento fue de ~10% en hojas ($p = 0,0003$) y de un 34% en raíces ($p < 0,0001$), el tratamiento de 4000 kg ha^{-1} (T3) fue el tratamiento que tuvo el mayor incremento para este cultivar siendo un 13% en hoja ($p = 0,0003$) y de un 118% en raíz ($p < 0,0001$). El cultivar

Bluegold obtuvo un incremento de un 10% para el contenido de Ca^{2+} en hoja ($p < 0,0001$) y de un 13% en raíces ($p = 0,0009$) con el tratamiento de 1000 kg ha^{-1} (T1), para los 2000 kg ha^{-1} (T2) el aumento fue de ~3% en hoja ($p < 0,0001$) y un 6% para raíz ($p = 0,0009$), finalmente con el tratamiento de 4000 kg ha^{-1} (T3) mostró su mayor incremento para hoja con un 26% ($p < 0,0001$), pero para raíz fue de solo un 4% ($p = 0,0009$) (Figura 16). El efecto positivo que tiene la aplicación de CaSO_4 en el contenido de calcio ha sido ampliamente estudiado. En todos estos estudios se ha visto un incremento de estos niveles tanto en hojas como en raíces. Es así como en el trabajo realizado por Hanson y Berkheimer (2004) los niveles de calcio en hojas de arándano se vieron afectadas por los tratamientos. Mientras que el aumento Ca^{2+} de la hoja de yeso (550 kg ha^{-1}) por encima de los niveles de Ca^{2+} del control (sin CaSO_4). Los incrementos de calcio en hojas también se han documentado en otros cultivos, para el trabajo realizado por Viator *et al.* (2002) en hojas de caña de azúcar (*Saccharum spp.*) la concentración de Ca^{2+} aumentó en 0,6, 0,7 y $0,7 \text{ g kg}^{-1}$, con aplicaciones de 2,24; 4,48 y $8,96 \text{ Mg ha}^{-1}$ de yeso, respectivamente. En hojas de trigo Caires *et al.* (2002) observaron que el contenido de Ca^{2+} se incrementó significativamente a medida que aumentaba la dosis de CaSO_4 , con un contenido de $4,1 \text{ g kg}^{-1}$ con la dosis de 0 t ha^{-1} , $4,8 \text{ g kg}^{-1}$ con 3 t ha^{-1} , $5,2 \text{ g kg}^{-1}$ con 6 t ha^{-1} y $5,9 \text{ g kg}^{-1}$ con 9 t ha^{-1} . En nuestro ensayo los valores obtenidos para el contenido de calcio foliar fue de Legacy $4,22 \text{ g kg}^{-1}$ PS (Peso Seco) con 0 kg ha^{-1} (control), $5,08 \text{ g kg}^{-1}$ PS con la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1), $4,34 \text{ g kg}^{-1}$ PS para los 2000 kg ha^{-1} (T2) y $5,46 \text{ g kg}^{-1}$ PS con los 4000 kg ha^{-1} (T3). Brigitta obtuvo $4,91 \text{ g kg}^{-1}$ para el control, $5,08 \text{ g kg}^{-1}$ en T1, $5,36 \text{ g kg}^{-1}$ en T2 y $5,56 \text{ g kg}^{-1}$ PS en T3. Bluegold mostró valores de $6,78 \text{ g kg}^{-1}$ PS para el control, $7,46 \text{ g kg}^{-1}$ PS para T1, $6,95 \text{ g kg}^{-1}$ PS en T2 y $8,55 \text{ g kg}^{-1}$ PS para T3 (Figura 16). Es importante destacar que entre los cultivares de arándano estudiados, Bluegold resultó ser el cultivar que obtuvo los mayores valores de calcio foliar y radical. Legacy y Brigitta tuvieron valores similares en hoja, sin embargo, Legacy superó a Brigitta en el contenido de calcio en raíces. El aumento del contenido de calcio por efecto de CaSO_4 en raíces concuerda con el trabajo de Salas *et al.* (2002) que analizó el sistema radical del palmito (*Bractis gasipaes*) establecido en un Andisol, el efecto de la aplicación de encalado con varias enmiendas (entre ellas CaSO_4). El contenido de Ca se vio incrementado considerablemente desde los $106,2 \text{ mg pote}^{-1}$ (testigo) a $132,3 \text{ mg pote}^{-1}$ en las plantas tratadas con CaSO_4 . Sin embargo, en el estudio realizado por Tolrá *et al.* (2005) el suministro de aluminio ($50 \mu\text{M}$) no afectó la concentración de

Ca en la raíz de *Rumex acetosa* L., mientras que en la parte aérea los niveles de Ca^{2+} fueron inferiores en las plantas tratadas con Al en comparación a las plantas control.

La relación de aluminio intercambiable del suelo y el contenido de calcio en los tejidos vegetales mostró una correlación negativa para los tres cultivares estudiados, siendo Brigitta el cultivar que obtuvo la correlación más alta para hoja con un $R^2 = 0,997$ ($p=0,00346$) y Bluegold la más alta para raíz con un $R^2 = 0,973$ ($p=0,0275$) (Anexo 1). Las correlaciones para la relación del contenido de calcio intercambiable y azufre del suelo con el contenido de calcio en los tejidos vegetales fueron positivas para los tres cultivares, siendo Brigitta el cultivar que obtuvo la correlación más alta para hoja y raíz ($p<0,05$) (Anexos 2 y 3).

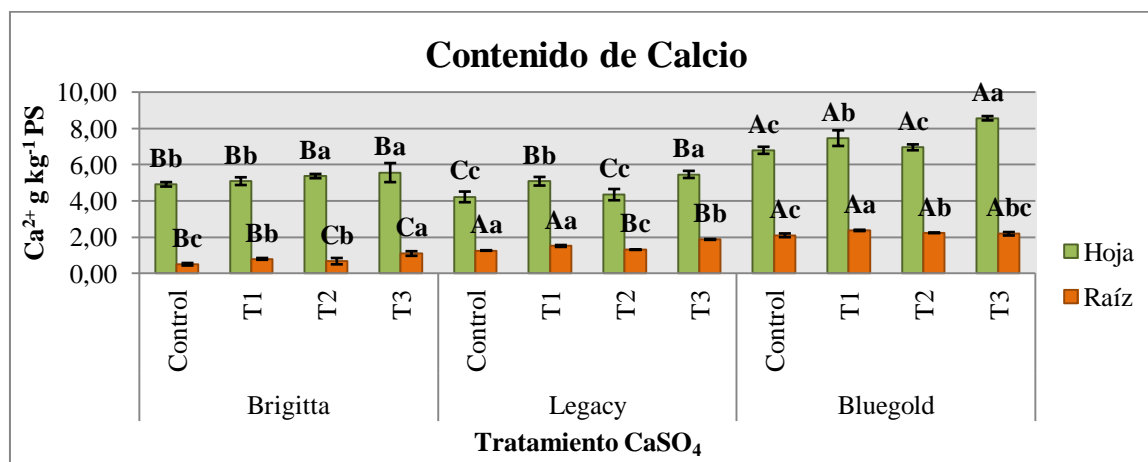


Figura 16. Contenido total de calcio (g kg^{-1} PS) foliar y radicular en cultivares de arándano, establecidos durante 60 días en un Andisol serie Gorbea con alta saturación de aluminio y aplicación de CaSO_4 . Valores representan el promedio de tres réplicas \pm error estándar. Control: 0 kg ha^{-1} , T1: 1000 kg ha^{-1} , T2: 2000 kg ha^{-1} , T3: 4000 kg ha^{-1} . Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivares en un mismo tratamiento.

4.4.3 Contenido de Azufre

En la acumulación de azufre foliar en Bluegold ($p=0,0039$) solo para la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1) fue posible apreciar un incremento de un $\sim 20\%$ (Figura 17). El contenido de azufre en hojas para los otros cultivares no presentó un efecto positivo ante la aplicación de la enmienda de CaSO_4 ya que para Legacy ($p<0,0001$) se produjo una reducción de un $\sim 15\%$ y Brigitta ($p<0,0001$) redujo su contenido de S foliar entre un 2-7% en la dosis de 1000 y 2000 kg ha^{-1} (T1 y T2) respectivamente (Figura 17). El contenido de azufre foliar fue superior para Brigitta en todos los tratamientos, siendo el cultivar que presentó mayor acumulación de este elemento. Se esperaba que tras la aplicación de CaSO_4 se obtuvieran resultados mayores de acumulación de S en los tratamientos, tal como se indica en el estudio realizado por Sanderson y Eaton (2004), al aplicar yeso agrícola en plantas de *V. angustifolium* donde obtuvo una acumulación de S significativamente mayor en los tratamientos que en las plantas control. En el estudio realizado por Viator *et al.* (2002) en caña de azúcar la aplicación de yeso (0 ; $2,24$; $4,48$ y $8,96 \text{ Mg ha}^{-1}$) produjo un aumento en el contenido de S en las hojas entre un $0,6$ - $0,9 \text{ g kg}^{-1}$, también Caires *et al.* (2002) reportó un incremento en los niveles de S en hojas de trigo desde $3,0$ a $4,3 \text{ g kg}^{-1}$ al aplicar de 0 a 9 t ha^{-1} de yeso. Shainberg *et al.* (1989) postuló que los beneficios de la aplicación de yeso en el contenido de nutrientes de los tejidos puede ser debido a efectos antagónicos de Ca en el tejido de la hoja. También en el estudio realizado por Nakamura *et al.* (1990), indican que la cantidad adecuada de calcio puede mejorar el crecimiento de las plantas al actuar como antagonista en la absorción de K y P, lo que mejora el estado nutricional de la planta. Para el contenido de azufre radicular se observó un aumento en Brigitta a medida que la dosis de la enmienda aumentaba, siendo un 7% para la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1), un 14% para 2000 kg ha^{-1} (T2) y un 17% para los 4000 kg ha^{-1} (T3) ($p<0,0001$) mostrando este último el mayor incremento. Legacy manifestó un incremento de tan solo un $\sim 4\%$ en el contenido de S radicular para la dosis de 2000 kg ha^{-1} (T2) ($p=0,0013$). Bluegold aumentó significativamente ($p<0,0001$) su contenido de azufre en las raíces en un 43% en los 2000 kg ha^{-1} (T2) con respecto a los contenidos de S radical obtenidos por las plantas control. En cuanto al efecto que produce la aplicación de esta enmienda en la acumulación de nutrientes por la raíz, Souza y Ritchey (1986) sugieren un

aumento en el desarrollo de la raíz tras la aplicación de yeso lo que produce una mayor absorción de nutrientes del suelo. Legacy fue el cultivar que obtuvo mayor acumulación de azufre radicular en comparación con los otros cultivares (Figura 17). El efecto positivo en la acumulación de azufre radicular obtenido en esta tesis concuerda con el estudio realizado por Farina y Channon (1988) en el cual reportaron una mejor nutrición S después de la aplicación de yeso en cultivos de maíz y alfalfa, y propusieron que esto podría resultar en aumentos significativos de rendimiento del cultivo. Del mismo modo, Sanderson *et al.* (1996) informaron una mejor nutrición de S en repollo (*Brassica oleracii* L. var. *capitata*) después de la aplicación de yeso. También en el trabajo realizado por Salas *et al.* (2002) donde analizó el sistema radical del palmito (*Bractis gasipaes*) establecido en un Andisol, el efecto de la aplicación de encalado con varias enmiendas (entre ellas CaSO_4), obtuvo como resultado un incremento en el contenido de azufre sobre $46,1 \text{ mg pote}^{-1}$ (testigo) a $49,8 \text{ mg pote}^{-1}$.

La relación de aluminio intercambiable del suelo y el contenido de calcio en los tejidos vegetales estudiados mostró una correlación significativamente alta y negativa para Bluegold en hojas ($p=0,0134$) y para Brigitta en raíz ($p=0,0226$) (Anexo 1). La correlación para la relación del contenido de calcio intercambiable y azufre en el suelo con el contenido de azufre en los tejidos vegetales estudiados fue alta y positiva para Brigitta en raíz ($p<0,05$) en comparación a los otros cultivares (Anexo 2 y 3).

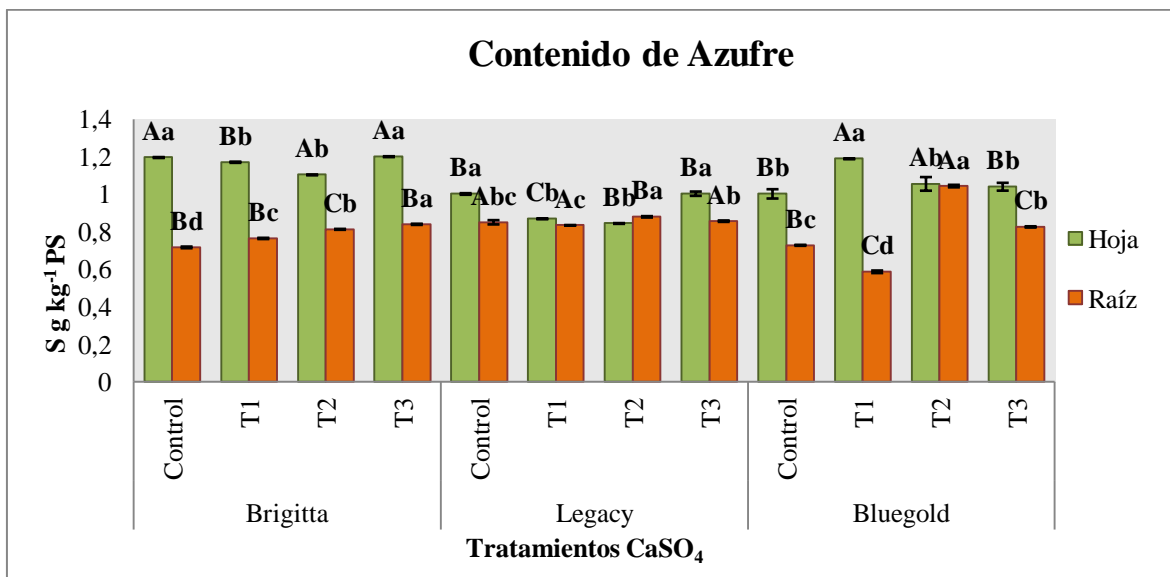


Figura 17. Contenido total de azufre (g kg^{-1} PS) foliar y radicular en cultivares de arándano, establecidos durante 60 días en un Andisol serie Gorbea con alta saturación de aluminio y aplicación de CaSO_4 . Valores representan el promedio de tres réplicas \pm error estándar. Control: 0 kg ha^{-1} , T1: 1000 kg ha^{-1} , T2: 2000 kg ha^{-1} , T3: 4000 kg ha^{-1} . Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivares en un mismo tratamiento.

4.4.4 Contenido de Fósforo

En Brigitta el contenido de fósforo (P) foliar disminuyó significativamente ($p < 0,0001$) a medida que aumenta la dosis de CaSO_4 (Figura 18). Esta reducción fue de un 6% para la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1), de un 17% para los 2000 kg ha^{-1} (T2) y de un 25% para los 4000 kg ha^{-1} (T3). Es posible observar en este cultivar, una relación inversa entre contenido de fósforo foliar y radicular, donde se puede apreciar claramente que a medida que la cantidad de fósforo aumenta a nivel radicular a nivel foliar éste disminuye. Los valores de P radicular expresados tras la aplicación de la enmienda se incrementan significativamente a medida que las dosis de CaSO_4 aumenta, este incremento fue de un 17% para la dosis de 1000 kg ha^{-1} (T1), un 28% en los 2000 kg ha^{-1} (T2) y de un 40% para los 4000 kg ha^{-1} (T3). Bluegold tuvo un comportamiento similar a

Brigitta, pues redujo su acumulación de P foliar en un ~8% en todos los tratamientos de CaSO₄ y aumentó sus valores de P radicular en un 10% para los 1000 kg ha⁻¹ (T1), 25% en los 2000 kg ha⁻¹ (T2) y solo un 3% en los 4000 kg ha⁻¹ (T3). Esto concuerda con el estudio realizado por Salas *et al.* (2002) que analizó el efecto de la aplicación de encalado con varias enmiendas (entre ellas CaSO₄) en el sistema radical del palmito (*Bractis gasipaes*) establecido en un Andisol, obteniendo un incremento en el contenido de fósforo radical desde 42,9 mg pote⁻¹ a 54,2 mg pote⁻¹. En Legacy (p<0,0001) la aplicación de la enmienda tuvo un efecto negativo en la acumulación de P foliar y radicular, teniendo una reducción en promedio de un ~0,6% en T1, un 14% en T2 y 7% en T3 (Figura 18). Se ha mencionado en muchas investigaciones que un estrés por aluminio puede provocar un efecto positivo en la toma de P del suelo por la planta, si el CaSO₄ produce una reducción del aluminio en la solución del suelo puede provocar este descenso de P a nivel foliar. Esto último concuerda con el estudio realizado por Whright (1943) donde observó que el porcentaje de fósforo total fue mayor en las plantas de cebada sometidas a estrés por toxicidad de aluminio que en las plantas control, y llegó a la conclusión que esta acumulación de fósforo en las plantas poco desarrolladas indicaba que quizás el fósforo no estaba siendo utilizado en los procesos metabólicos necesarios. Bluegold fue el cultivar que obtuvo mayor acumulación de fósforo radicular en comparación a los otros cultivares (Figura 18). Cuando las plantas crecen en un suelo donde el aluminio y el fósforo están presentes, es posible prever la reacción de adsorción-precipitación como un proceso continuo que efectivamente reducen la cantidad de fósforo disponible para el transporte a los brotes y la entrada en la solución de la raíz (Clarkson. 1966). En muchas plantas la tolerancia a Al parece estar estrechamente asociado con la eficiencia de uso del fósforo. El Al aumenta notablemente el potencial redox de los tejidos de la raíz, se reduce el contenido de P de alta energía de enlace, y aumenta el contenido de P mineral en las raíces (Slaski *et al.*, 1996). El enlace de Al con los ácidos orgánicos evita la formación de complejos P-Al, que se traduce en una mayor disponibilidad de P en las células de la raíz. Por lo tanto, las plantas tolerantes a Al tienen una menor demanda de P.

La relación del aluminio intercambiable del suelo y el contenido de fósforo en los tejidos vegetales estudiados mostró una correlación alta y positiva para Brigitta en hoja (p=0,00159), sin embargo tuvo una correlación negativa para raíz (p=0,0273) (Anexo 1). La correlación para la

relación del contenido de calcio intercambiable y azufre del suelo con el contenido de fósforo fue negativa para hoja y positiva para raíz en los tres cultivares, siendo esta correlación más alta y significativa solo para el cultivar Brigitta ($p < 0,05$) (Anexos 2 y 3).

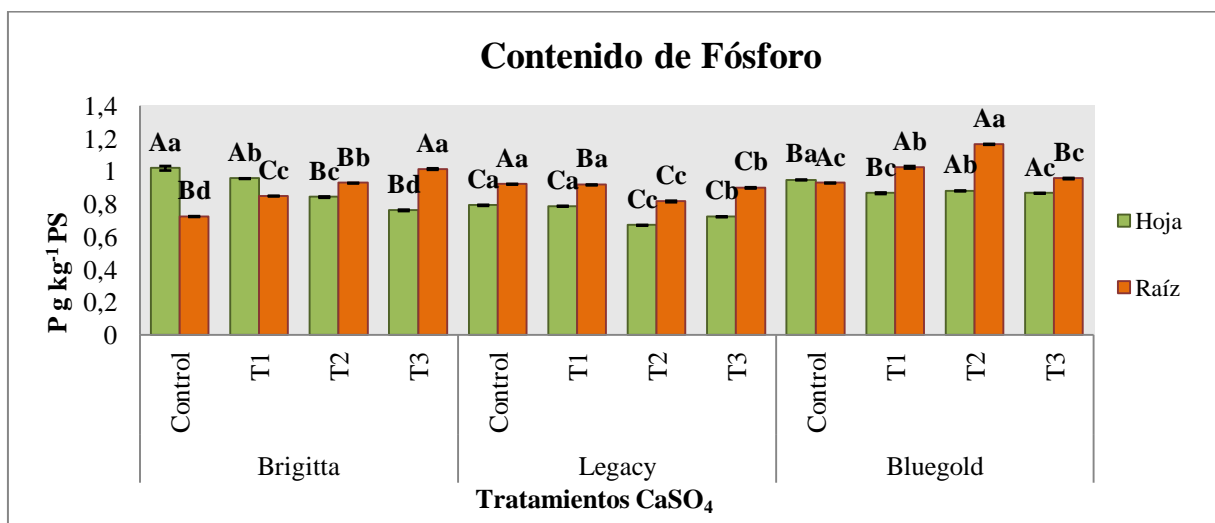


Figura 16. Contenido total de fósforo (g kg^{-1} PS) foliar y radicular en cultivares de arándano, establecidos durante 60 días en un Andisol serie Gorbea con alta saturación de aluminio y aplicación de CaSO_4 . Valores representan el promedio de tres réplicas \pm error estándar. Control: 0 kg ha^{-1} , T1: 1000 kg ha^{-1} , T2: 2000 kg ha^{-1} , T3: 4000 kg ha^{-1} . Letras minúsculas indican diferencias significativas ($p \leq 0,05$) entre tratamientos para un mismo cultivar. Letras mayúsculas indican diferencias significativas entre cultivares en un mismo tratamiento.

5. CONCLUSIONES

Basándose en los resultados obtenidos en los parámetros fotoquímicos es posible señalar a Brigitta como el cultivar con una mayor tolerancia al estrés por aluminio presente en un suelo Andisol, seguido por los cultivares Bluegold y Legacy.

La actividad antioxidante se vio afectada negativamente por Al^{3+} ya que se observó una disminución de este parámetro en los tres cultivares estudiados. Legacy fue el que presentó la menor capacidad antioxidante para hojas pero en cambio obtuvo los mayores valores en raíces. Algo similar ocurrió en Bluegold, cultivar que presentó mayor AA en hojas pero fue menor en las raíces. Esto deja la interrogante si esto tiene alguna relación, quizás la eficiencia de un órgano se priorice de forma diferente en los cultivares. Brigitta, en cambio, presentó un comportamiento similar tanto para hojas y raíces.

Al evaluar la interacción de Al^{3+} con los otros cationes presentes en el suelo fue posible concluir que a pesar de haber muchas investigaciones que relacionan al Al presente en el suelo y a P, en esta investigación no se produjo interacción alguna ya que el contenido de P del suelo no se vio afectado en ninguno de los tratamientos aplicados. En cambio tanto para Ca y S se pudo apreciar que las plantas sometidas a un estrés por Al^{3+} los valores de estos nutrientes se vio afectada negativamente, demostrando así que existe un efecto antagónico entre el contenido de Al^{3+} del suelo y estos cationes.

Al comparar los tratamientos de $CaSO_4$ aplicados fue posible observar que las plantas que no tuvieron aplicación de la enmienda en general siempre estuvieron por debajo de las plantas tratadas con $CaSO_4$, seleccionando a la dosis de 2000 kg ha^{-1} (T2) como el tratamiento que en general entregó los mejores resultados al evaluar los parámetros fotoquímicos y bioquímicos en los tres cultivares, ya que en algunos parámetros si la dosis se aumentaba a los 4000 kg ha^{-1} (T3) muchas veces se producía un efecto negativo en los parámetros fotosintéticos en Legacy (Fv/Fm, PSII y ETR) y en el contenido de pigmentos clorofílicos.

No se observó un efecto positivo en el contenido de pigmentos tras la aplicación de esta enmienda para los cultivares estudiados, los que mantuvieron sus valores constantes (Legacy) e

incluso disminuyeron conforme la dosis de CaSO_4 era aumentada (Brigitta y Bluegold). Solo en el contenido de carotenoides se produjo un efecto positivo al aplicar la enmienda.

Es posible afirmar que al establecer cultivares de arándano alto en un suelo Andisol con una alta saturación de aluminio se provoca un estrés a las plantas afectando negativamente produciéndose una disminución su capacidad antioxidante, cantidad de fenoles totales, contenido de carotenoides, eficiencia fotosintética y un incremento en la peroxidación lipídica.

La aplicación de CaSO_4 es una gran alternativa de enmienda para los cultivares de arándano alto, ya que no presenta grandes modificaciones en el pH ácido del suelo condición fundamental para este cultivo, además mejora el contenido de cationes principalmente el Ca^{2+} , disminuye el contenido de aluminio intercambiable, extractable y la saturación de Al del suelo, también incrementa la capacidad antioxidante, el contenido de fenoles y la eficiencia fotosintética.

6. RESUMEN

Los suelos volcánicos de Chile están constituidos mayoritariamente por Andisoles. Estos suelos poseen pH ácido lo cual puede solubilizar el aluminio presente en silicatos de aluminio y óxidos de aluminio llevándolo a la forma trivalente (Al^{3+}) que es tóxico para las plantas. Convertido en el cultivo de mayor rentabilidad de los últimos años, el arándano (*Vaccinium corymbosum* L.) requiere de suelos con pH entre 4,3 – 5,5. Sin embargo, se especula que la presencia de aluminio sería un factor de estrés para este frutal. El yeso agrícola favorece diversos procesos en el suelo, presenta un bajo efecto sobre el pH, requerido por algunos cultivos, representa una importante fuente de calcio (Ca^{2+}) y azufre (S), disminuye el nivel de aluminio intercambiable y su actividad. Este estudio tuvo por objetivo evaluar los efectos de diferentes dosis de sulfato de calcio sobre la eficiencia fotoquímica y sistema antioxidante en tres cultivares de arándano alto (*Vaccinium corymbosum* L.) sometidos a estrés por toxicidad de aluminio en un suelo Andisol, bajo condiciones controladas de invernadero. Plantas de arándano de los cultivares Brigitta, Legacy y Bluegold de un año se establecieron en macetas con suelo Andisol serie Gorbea (sat. Al = 68%), además de macetas solo con suelo, durante 60 días. Se aplicaron tres tratamientos de $CaSO_4$ en dosis de 0 kg ha^{-1} (Control), 1000 kg ha^{-1} (T1), 2000 kg ha^{-1} (T2) y 4000 kg ha^{-1} (T3).

La aplicación de enmienda ($CaSO_4$) afectó de manera significativa ($p < 0,05$), la actividad antioxidante y el contenido de fenoles en los tres cultivares estudiados. Sin embargo, los niveles de pigmentos clorofílicos se vieron reducidos al aplicar la enmienda. En cuanto al contenido de carotenoides Legacy fue el único cultivar que presentó un aumento a medida que la dosis de $CaSO_4$ aumentaba, alcanzando la mejor respuesta con T3. Legacy fue el cultivar más afectado en la peroxidación lipídica ante un estrés por aluminio, en comparación a los otros cultivares. Sólo en Bluegold fue posible apreciar un aumento en la acumulación de azufre foliar en T1. En Brigitta se presentó una relación inversa entre contenido de fósforo foliar y radicular. El contenido de calcio foliar y radicular, se vio incrementado positivamente por la aplicación de $CaSO_4$. El contenido de aluminio foliar y radicular se vio reducido significativamente por los tratamientos de $CaSO_4$. Brigitta mantuvo buenos niveles Fv/Fm, $\Phi PSII$ y ETR. Legacy fue el cultivar que obtuvo los valores más bajos tanto para Fv/Fm, $\Phi PSII$ y ETR. Bluegold comenzó

con menores valores de Φ PSII al inicio, pero luego registró valores similares a Brigitta en las otras mediciones. Bluegold a los 15 días obtuvo una disminución significativa (42%) de todos los valores ETR siendo las plantas control las que registraron la mayor disminución para los tratamientos esta reducción fue de un 30% para T1 y T2, siendo T3 el tratamiento que obtuvo la menor disminución de este parámetro (14%). Brigitta los valores de NPQ del control siempre se mantuvieron por sobre los tratamientos demostrando el efecto negativo del estrés por aluminio en las plantas, siendo T3 el que obtuvo los mejores resultados a los 7, 15 y 60 días. En Legacy T3 fue el tratamiento que mantuvo los valores NPQ más bajos a los 7 a 60 días, con excepción de los 30 días donde fue T2 el tratamiento que obtuvo los valores más bajos de NPQ. Para Bluegold T2 el tratamiento que obtuvo los menores valores para este parámetro a los 7, 15 y 30 días. Al evaluar los análisis de suelo no se observaron cambios en el contenido de MO y P del suelo, pero si un aumento significativo de S y Ca^{2+} ; una reducción importante de Na^+ (problema para el cultivo), Al intercambiable, extractable y saturación de Aluminio.

Basándose en los resultados obtenidos es posible señalar a Brigitta como el cultivar con mayor tolerancia al estrés por aluminio presente en un suelo Andisol, seguido por los cultivares Bluegold y Legacy. Es posible afirmar que al establecer cultivares de arándano alto en un suelo Andisol con una alta saturación de aluminio provoca un estrés a las plantas afectando negativamente produciéndose una disminución su capacidad antioxidante, cantidad de fenoles totales, contenido de carotenoides, eficiencia fotosintética y un incremento en la peroxidación lipídica. La aplicación de CaSO_4 es una gran alternativa de enmienda para los cultivares de arándano alto, ya que no presenta grandes modificaciones en el pH ácido del suelo condición fundamental para este cultivo, además mejora el contenido de cationes principalmente el Ca^{2+} , así como la capacidad antioxidante, el contenido de fenoles y la eficiencia fotosintética. También disminuye el contenido de aluminio intercambiable, extractable y el % de saturación de Al en los suelos.

7. SUMMARY

Volcanic soil in Chile are mostly constituted from Andisols, these soils have low pH which can solubilize the aluminum from aluminum silicates and aluminum oxides taking it to the trivalent form (Al^{3+}) which is toxic to plants. Become the most profitable crop in recent years, the blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) requires soils with pH between 4.3 to 5.5. However, it is speculated that the presence of aluminum would be a stress factor for this crop. There are various effects that favors agricultural gypsum in the soil, such as a low effect on pH required for some crops, represents an important source of calcium (Ca^{2+}) and sulfur (S), decreases the level of exchangeable aluminum and activity. This study aims to evaluate the effects of different doses of calcium sulfate on the photochemical efficiency and antioxidant system in three cultivars of highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.) undergoing aluminum toxicity in an Andisol under controlled conditions in greenhouse. One year old blueberry plants of the cultivars Brigitta, Legacy and Bluegold were established in pots on an Andisol soil of Gorbea series (sat. Al = 68%), for 60 days. We applied three treatments of CaSO_4 at rates of 0 kg ha⁻¹ (Control), 1000 kg ha⁻¹ (T1), 2000 kg ha⁻¹ (T2) and 4000 kg ha⁻¹ (T3).

The amendment (CaSO_4) application affected significantly ($p < 0.05$), the antioxidant activity and phenolic content in the three studied cultivars. However, the chlorophyll pigment levels were reduced by applying the amendment. As for the content of carotenoids, Legacy was the only cultivar that expressed an augment as the dose of CaSO_4 increased, reaching the best response in the T3. Legacy was the most affected cultivar in its lipid peroxidation with an aluminum stress, compared to other cultivars. Bluegold was only possible to see an increase in foliar sulfur accumulation in T1. The calcium content of leaf and root, was positively increased by the application of CaSO_4 . The aluminum content of leaf and root was significantly reduced by treatment of CaSO_4 . Brigitta presented an inverse relationship between foliar phosphorus and root. Brigitta maintained good levels Fv/Fm, ΦPSII and ETR. Legacy was a cultivar obtained the lowest values for both Fv/Fm, ΦPSII and ETR. Bluegold began with lower values of ΦPSII at first of experiment, but then recorded Brigitta values, similar to the other measurements.

Bluegold at 15 days decrease significantly (42%) of ETR values being the control plants that had the biggest fall for this reduction treatment was 30% for T1, T2 and T3 being the treatment that received the lowest decrease in this parameter (14%). Brigitta NPQ values were always maintained in the control over the treatments showing the negative effect of aluminum stress in plants, with T3 which performed best at 7, 15 and 60 days. In Legacy, T3 was the treatment remained lower NPQ values at 7 to 60 days, with the exception of 30 days where the treatment was T2 values obtained a lower NPQ. The best treatment for Bluegold was T2, who obtained the lowest values for this parameter at 7, 15 and 30 days. The application of CaSO_4 in the soil analysis showed no changes in OM content and soil P, but a significant increase of S and Ca^{2+} , a significant reduction in Na^+ (problem for this crop), Al exchange, Al extractable and % aluminum saturation.

Based on our results it is possible to place Brigitta as the cultivar with an increased tolerance to stress aluminum when growing in an Andisol under the conditions provided in this study, followed by Bluegold and Legacy, presenting sensitivity to aluminum. Arguably, the highbush blueberry cultivars established on an Andisol with high aluminum saturation will cause stress to plants producing negatively effects in their antioxidant capacity, the amount of total phenols, lipid peroxidation, carotenoid content and photosynthetic efficiency. We concluded that the application of CaSO_4 is a great alternative of amendment for highbush blueberry cultivars, since no major changes in the acid soil pH (fundamental condition for the development of this crop) and improvement of content of cations mainly Ca^{2+} and antioxidant capacity, phenol content and photosynthetic efficiency. It also decreases the content of exchangeable Al, extractable Al and % sat. Al in soils.

8. REFERENCIAS

- Agbenin, J.O. 2003.** Extractable iron and aluminum effects on phosphate sorption in a savanna Alfisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 67: 589-595.
- Ali, B., Hasan, S.A., Hayat, S., Hayat, Q., Yadav, S., Fariduddin, Q., Ahmad, A. 2008.** A role for brassinosteroids in the amelioration of aluminium stress through antioxidant system in mung bean (*Vigna radiata* L. Wilczek). *Environ. Exp. Bot.* 62, 153–159.
- Allende, J. y Vial, C. 2005.** Análisis comercial y visión general del arándano en Chile. In: Ciclo de seminarios frutícolas de actualización técnico comercial. Berries: arándanos y frambuesas. Asociación de exportadores de Chile (ASSOEX) A.G. Santiago, Chile. 69 p.
- Anderson, J.M., Park, Y.I., Chow, W.S. 1997.** Photoinactivation and photoprotection of photosystem II in the nature. *Physiologia Plantarum* 100: 214-223.
- Arora, A., Byrem, T.M., Nair, M.G., Strasburg, G.M. 2000.** Modulation of liposomal membrane fluidity by flavonoids and isoflavonoids. *Archives of Biochemistry and Biophysics* 373: 102-109.
- Arora, A., Sairam, R.K., Srivastava, G.C. 2002.** Oxidative stress and antioxidative system in plants. *Curr. Sci.* 82:1227-1238.
- Asada, K., Kiso, K., Yoshikawa, K. 1974.** Univalent reduction of molecular oxygen by spinach chloroplasts on illumination. *J. Biol. Chem.* 249: 2175–2181
- Arora, A., Sairam, R.K. y Srivastava, G.C. 2002.** Oxidative stress and antioxidative system in plants. *Current Science*, Vol. 81, N° 10. 12p.
- Asada, K. y Nakano, Y. 1978.** Affinity for oxygen in photoreduction of molecular oxygen and scavenging of hydrogen peroxide in spinach chloroplast. *Photochem. Photobiol.* 28, 917–920.
- Asada, K., Takahashi, M. 1987.** Production and scavenging of active oxygen in photosynthesis. In: Kyle, D.J., *et al.* (Eds.), *Photoinhibition*. Elsevier, Amsterdam, pp. 227–287.
- Asada, K. 1994.** Production and action of active oxygen species in photosynthetic tissues. In: Foyer, C.H., Mullineaux, P.M. (Eds.), *Causes of Photooxidative Stress and Amelioration of Defense Systems in Plants*. CRC Press, Boca Raton, FL, pp. 77–104.
- Azmat, Rafia y Hasan, Sehrish. 2008.** Photochemistry of light harvesting pigments and some biochemical changes under aluminium stress. *Pak. J. Bot.*, 40(2): 779-784.

- Bakker, M.R. 1999.** The effect of lime and gypsum applications on a sessile oak (*Quercus petraea* (M.) Liebl.) stand at la croix-scaille (French Ardennes) fine root dynamics. *Plant Soil* 206, 109 - 121.
- Barber, S. 1984.** Liming materials and practices. In Adams, F. ed. *Soil acidity and liming*. 2 ed. Madison, Wisconsin, US. P 171-209. (Agronomy Monograph no.12).
- Barceló J. y Poschenrieder C. 2002.** Fast root growth responses, root exudates, and internal detoxification as clues to the mechanisms of aluminum toxicity and tolerance: a review. *Env. Exp. Bot.* 48: 75-92.
- Barceló, J., Nicolás, G., Sabater, B., Sánchez, R. 2003.** *Fisiología Vegetal*. Ed. Pirámide, S.A., Madrid.
- Barnhisel, R. y Bertsch, P.M. 1982.** Aluminum. In: page, A.L.; Miller, R.H.; Keeney, D.B. (Ed.) *Methods of soil analysis: Part 2. Chemical and microbiological properties*. Madison: ASA. p.275-300.
- Berlett, B.S. y Stadtman, E.R. 1997.** Protein oxidation in aging, disease, and oxidative stress. *Journal of Biological Chemistry* 272: 20313-20316
- Besoain M., E. 1985.** Génesis y transformación de los minerales en suelos derivados de cenizas volcánicas del centro-sur de Chile. P. 275-284. In J. Tosso T. (ed). *Suelos Volcánicos de Chile*. Talleres Gráficos INIA, Santiago, Chile, 723p.
- Besoain, M.E. 1999.** Los suelos volcánicos y la fertilización fosfatada. P. 13-21. In: E. Besoain M., C. Rojas W. y A. Montenegro B. (eds.). *Las rocas fosfóricas y sus posibilidades de uso agrícola en Chile*. Colección Libros INIA N°2, INIA, Santiago, Chile, 328p.
- Bielecki, R.L. 1973.** Phosphate pools, phosphate transport, and phosphate availability. *Annual Rev. Plant. Physiol.* 24: 225–252
- Bilger, W., Schreiber, U., Bock, M. 1995.** Determination of the quantum efficiency of photosystem II and of non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence in the field. *Oecologia* 102: 425-432.
- Blokhina, O., Virolainen, E., Fagerstedt, K. 2003.** Antioxidants, oxidative damage and oxygen deprivation stress_a review. *Annals of Botany* 91: 179-194.
- Bohn, H.L., Barrow, N.J., Rajan, S.S.S., Parfitt, R.L. 1986.** Reactions of inorganic sulfur in soils. In: Tabatabai, M.A. (Ed.), *Sulfur in Agriculture*, Agron. Monogr, vol. 27. ASA, CSSA, and ISSSA, Madison, WI, pp. 233 – 249.
- Bolan, N.S., Syers, J.K., Sumner, M.E. 1993.** Calcium-induced sulfate adsorption by soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 57, 691 - 696.

Brady, D.J., Edwards, D.G., Asher, C.J., Blamey, P.C. 1993. Calcium amelioration of aluminium toxicity effects on root hair development in soybean [*Glycine max* (L.) merr.]. *New Phytol.* 123, 531 - 538.

Braeuner, Mario; Ortiz, Rodolfo y MacVea, Charles. 2005. Efectos de la aplicación de cal dolomítica y yeso agrícola en cafetales (*Coffea arabica*) afectados con Mal de Viñas en Guatemala. *Manejo Integrado de Plagas y Agroecología (Costa Rica) No. 76* p. 17- 2

Buzeta, A. 1997. Chile: Berries para el 2000. Santiago, Fundación Chile. 133p.

Caires, E.F., Feldhaus, I.C., Barth, G., Garbuio, F.J. 2002. Lime and gypsum application on the wheat crop. *Scientia Agric.* 59, 357 - 364.

Caires, E.F., Churka, S., Garbuio, F.J., Ferrari, R.A., Morgano, M.A. 2006. Soybean yield and quality as a function of lime and gypsum applications. *Sci. Agric.* 63, 370 -379.

Casierra-Posada, F. 2001. Fundamentos fisiológicos, bioquímicos y anatómicos del estrés por aluminio en vegetales. *Revista Comalfi* 28(2), 8-19.

Casierra-Posada, F. 2002. Alteraciones inducidas por aluminio en el citoesqueleto de las plantas. *Revista Comalfi* 29(2), 23-30.

Casierra-Posada, Fanor y Aguilar-Avenidaño, Oscar. 2007. Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Una revisión. *Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas*, Vol. 1 - No.2 - pp. 246-257.

Castillo, F.J. y Greppin, H. 1988. Extracellular ascorbic acid and enzyme activities related to ascorbic acid metabolism in *Sedum album* L. leaves after ozone exposure. *Environmental and Experimental Botany* 28, 231–238.

Cakmak, I. y Horst, W.J. 1991. Effect of aluminium on lipid peroxidation, superoxide dismutase, catalase, and peroxidase activities in root tips of soybean (*Glycine max*). *Physiol. Plant.* 83, 463–468.

Censo fruticola. 2007. Información: www.censoagropecuario.cl

Chen, Li-Song; Qi, Yi-Ping; Smith, Brandon Rhett y Liu, Xing-Hui. 2005a. Aluminum-induced decrease in CO₂ assimilation in citrus seedlings is unaccompanied by decreased activities of key enzymes involved in CO₂ assimilation. *Tree Physiology*, 25: 317 – 324.

Chen, Li-Song; Qi, Yi-Ping y Liu, Xing-Hui. 2005b. Effects of Aluminum on Light Energy Utilization and Photoprotective Systems in Citrus Leaves. *Annals of Botany* 96: 35 – 41.

Chinnici, F., Bendini, A., Gaiani, A., Riponi, C. 2004. Radical scavenging activities of peels and pulps from cv. Golden Delicious apples as related to their phenolic composition. *J. Agr. Food Chem* 52: 4684–4689.

CIREN. 1999. Estudio agrocológico. IX Región. Publicación 122. Centro de Información de Recursos Naturales, Santiago, Chile. 326 p.

Clarkson, D.T. 1993. Roots and the delivery of solutes to the xylem. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B* 341: 5-17.

Couto, W., Lathwell D.J. y Bouldin D.R. 1979. Sulphate sorption by two Oxisols and on Alfisol of the tropics. *Soil Sci.* 127:108-116.

Cumming, J.R. y Weinstein L.H. 1990. Aluminum-mycorrhizal interactions in the physiology of pitch pine seedlings. *Plant Soil* 125, 7-18.

Delhaize E., Gruber B.D., Ryan P.R. 2007. The roles of organic anion permeases in aluminium resistance and mineral nutrition. *FEBS Lett.* 581: 2255–2262.

Demming, B. y Bjorkman O. 1987. Comparison of the effect of excessive light on chlorophyll fluorescence (77K) and photon yield of O₂ evolution in leaves of higher plants. *Planta* 171: 171184.

Dong, B., Sang, W.L., Jiang, X., Zhou J.M., Kong, F.X., Hu, W. y Wang L.S. 2002. Effects of aluminum on physiological metabolism and antioxidant system of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Chemosphere* 47: 87 – 92.

Du, Z. y Bramlage, W.J., 1992. Modified thiobarbituric acid assay for measuring lipid oxidation in sugar-rich plant tissue extracts. *J. Agric. Food Chem.* 40, 1566–1570

Ehlenferldt, Mark K. y Prior, Ronald L. 2001. Oxygen radical absorbance capacity (ORAC) and phenolic and anthocyanin concentration in fruit and leaf tissues of highbush blueberry. *J. Agric. Food Chem.* 49: 2222-2227.

Eticha, D., Staß, A., Horst, W.J. 2005. Localization of aluminum in the maize root apex: can morin detect cell wall-bound aluminum. *Exp. Bot.* 56 (415): 1351-1357.

Farina, M. P. W. y Channon, P. 1988. Acid-subsoil amelioration. II. Gypsum effects on growth and subsoil chemical properties. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 52:175-180.

Farina, M. P. W., Chanon, P y Thibaud, G. R. 2000. A comparison of strategies for ameliorating subsoil acidity: II. Long-term soil effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 64: 652 – 658.

Fassbender, H. 1975. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. San José, CR, IICA. 398 p.

Fassbender, H.W. y Bornemisza, E. 1987. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. 2 Ed. San Jose, Costa Rica, "CA. 420 p.

Foyer CH, Descourvières P, Kunert KJ. 1994a. Protection against oxygen radicals: an important defence mechanism studied in transgenic plants. *Plant Cell Environ.* 17: 507-523

Foyer, C.H., Lelandais, M., Kunnert, K.J. 1994b. Photooxidative stress in plants. *Physiologia Platarum* 92: 696-717.

Furihata, T., Suzuki, M., Sakurai, H. 1992. Kinetic characterization of two phosphate uptake systems with different affinities in suspension-cultured *Catharanthus roseus* protoplasts. *Plant Cell Physiol* 33: 1151–1157.

Gallardo, F., Borie, F., Alvear, M. y Von Baer, E. 1999. Evaluation of aluminum tolerance of three barley cultivars by two short-term screening methods and field experiments. *Soil Sci. Plant Nutr.*, 45: 713-719.

Garrido, F., Illera, V., Vizcaíno, C., García-González, M.T. 2003. Evaluation of industrial by-products as soil acidity amendments: chemical and mineralogical implications. *Eur. J. Soil Sci.* 54, 411 - 422.

Garzón, Teresa. 2003. Estudio de la compartimentación celular en plantas modelo sometidas a estrés por aluminio. Tesis Grado Doctora de Ciencias. Universitat Autònoma de Barcelona. Barceló J., Gunsé B.

Genty, B., Briantais, J.M., Baker, N.R. 1989. The relationship between the quantum yield of photosynthetic electron transport and quenching of chlorophyll fluorescence. *Biochimica and Biophysica Acta* 990: 87-92.

Giannakoula, A., Moustakas, M., Syros, T., Yupsanis, T. 2010. Aluminum stress induces up-regulation of an efficient antioxidant system in the Al-tolerant maize line but not in the Al-sensitive line. *Environ Exp Bot*, 67:487-494.

Gough, R.E., Shutak, V.G., y Hauke, R.L. 1978. Growth and development of highbush blueberry. II. Reproductive growth, histological studies, *J. Am. Soc. Hort. Sci.*, 103, 476.

Gough, R.E. 1994. The Highbush Blueberry and its Management. Food Products Press, Binghamton, NY.

Grace S, y Logan BA. 2000. Energy dissipation and radical scavenging by the plant phenylpropanoid pathway. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London B* 355: 1499-1510.

Guerrero, R. 1991. La acidez del suelo - Su naturaleza, sus implicaciones y su manejo. pp. 141-163. En: Silva M. (ed.). Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego. Sociedad Colombiana de la Ciencia de Suelo. Montoya & Araújo Ltda. Impresiones, Bogotá.

Guerrero, R. 1993. Las propiedades químicas del suelo y su significado agronómico. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 41 p.

Halliwell, B. y Gutteridge, J.M.C. 1985. Free Radicals in Biology and Medicine. Clarendon Press, Oxford.

Hanson, E. y Berkheimer, S. 2004. Effect of Soil Calcium Applications on Blueberry Yield and Quality. *Small Fruits Review*. (3) 133-139.

Harbinson J. y Hedley C.L. 1993. Changes in P700 oxidation during the early stages of the induction of photosynthesis. *Plant Physiol*. 103: 649-660.

Haung, A. 1984. Molecular aspects of aluminium toxicity in plants. *Rev. Plant Sci*. 1(4), 345 – 373

Heath, R.L. y Parker, L. 1968. Photoperoxidation in isolated chloroplast. I. Kinetics and stoichiometry of fatty acid peroxidation. *Arch. Biochem. Biophys*. 125, 189-198.

Hede, A.R., Skovmand, B., López-Cesati, J. 2001. Acid soil and aluminum toxicity, In: Reynolds, M.P., Ortiz-Monasterio, J.J., y Mchab, A. (eds.). Application of physiology in wheat breeding. International Maize and Wheat Improvement Center p. 172 - 182.

Heim, A., Luster, J., Brunner I., Frey B. y Frossar, E. 1999. Effects of Aluminium treatment on Norway spruce roots: Al binding forms, element distribution and release of organic substance. *Plant and Soil*, 216: 103-116.

Holford, I.C.R. 1997. Soil phosphorus: its measurement, and its uptake by plants. *Aust. J. Soil Res*. 35: 227–239

Hossain, Z.A.K., Koyama, H., Hara, T. 2006. Growth and cell wall properties of two wheat cultivars differing in their sensitivity to aluminum stress. *J. Plant Physiol*. 163(1): 39-47.

Hue, N.V. 2005. Responses of coffee seedlings to calcium and zinc amendments to two Hawaiian acid soils. *J. Plant Nutr*. 27, 261 - 274.

Huxtable, R. 1986. Thiols, disulfides and thioesters, in *Biochemistry of Sulfur* (Frieden E ed) pp 230–245, Plenum Press, New York.

Inostroza-Blancheteau C., Reyes-Diaz M., Aquea F., Nunes-Nesi A., Alberdi M., Arce-Johnson P. 2011. Biochemical and molecular changes in response to aluminium stress in

highbush blueberry (*Vaccinium corymbosum* L.). *Plant Physiology and Biochemistry*, doi:10.1016/j.plaphy.2011.04.009

Instituto Colombiano Agropecuario. 1992. Fertilización en diversos cultivos – Quinta aproximación. Manual de asistencia técnica No. 25. Produmedios. Bogotá. 64 p.

Jan, F., Yamashita, K., Matsumoto, H., Maeda, M. 2001. Protein and peroxidase changes in various root-cell fractions of two upland rice cultivars differing in Al tolerance. *Environ. Exp. Bot.* 46, 141–146.

Jiang, Huan-Xin., Chen, Li-Song., Zheng, Jin-Gui., Shuang, Han., Tang, Ning., Smith, B. R. 2008. Aluminum-induced effects on photosystem II photochemistry in *Citrus* leaves assessed by the chlorophyll a fluorescence transient. *Tree Physiology* 28, 1863 – 1871.

Jones, D.L., Blancaflor, E.B., Kochian, L.V., Gilroy, S. 2006. Spatial coordination of aluminum uptake, production of reactive oxygen species, callosa production and wall rigidification in maize roots. *Plant Cell Environ* 29: 1309-1318.

Kidd, P.S., Lluogan, M., Poschhenrieder, C., Gunsé, B., Barceló, J. 2001. The role of root exudates in aluminum resistance and silicon induced amelioration of aluminum toxicity in three varieties of maize (*Zea mays* L.). *Exp. Bot.* 52(359): 1339-1352.

Kinraide, T.B. 1998. Three mechanisms for the calcium alleviation of mineral toxicities. *Plant Physiol.* 118:513-520.

Kováčik, J., Klejdus, B., Hedbavny J. 2010. Effect of aluminium uptake on physiology, phenols and amino acids in *Matricaria chamomilla* plants. *Journal of Hazardous Materials* 178: 949–955.

Kparmwang, T., Esu, I.E., Chude, V.O. 1997. Sulphate adsorption–desorption characteristics of three ultisols and an alfisol developed on basalts in the Nigerian savanna. *Discov. Innov.* 9, 197 – 204.

Kochian, L.V., Hoekenga, O.A., Piñeros, M.A. 2004. How do crop plants tolerate acid soils? Mechanism of aluminum tolerance and phosphorous efficiency. *Annu. Rev. Plant Biol.* 55: 459-493.

Lee, J. y Pritchard, M.V. 1984. Aluminium toxicity expresión on nutrient uptake, growth and root morfology of *Trifolium repens* L. *Plant Soil* 82(1): 101 – 116.

Lemus, F. 1989. ¿Síndrome de toxicidad de aluminio, manganeso y hierro en el café, o “Mal de Viñas”? Laboratorio de análisis de suelos y plantas, AGROSA (nombre actual: Soluciones Analíticas), Guatemala.

Lichtenthaler, H. y Wellburn, A. 1983. Determination of total carotenoids and chlorophyll a and b of leaf extract in different solvents. *Biochemical Society transaction* 603: 591 – 592.

- Liu, J., Magalhaes, J.V., Shaff, J., Kochian, L.V. 2009.** Aluminum-activated citrate and malate transporters from the MATE and ALMT families function independently to confer Arabidopsis aluminum tolerance. *Plant J.* 57: 389–399
- Liu, Q., Yang, J.L., He, L.S., Li Y.Y., Zheng, S.J. 2008.** Effect of aluminum on cell wall, plasma membrane, antioxidants and root elongation in triticale. *Biologica Plantarum* 52(1): 87-92.
- Lukaszewski, K.M. y Blevins, D.G. 1996.** Root growth inhibition in boron-deficient or aluminum-stressed squash may be a result of impaired ascorbate metabolism. *Plant Physiol.* 112, 1135–1140.
- Luwe, M.W.F., Takahama, U. y Heber, U. 1993.** Role of ascorbate in detoxifying ozone in the apoplast of spinach (*Spinacia oleracea* L.) leaves. *Plant Physiology* 101, 969–976.
- Lyrene P.M. y Muñoz, C. 1997.** Blueberry production in Chile. *J. Small Fruit Viticulture* 5, 1 - 20.
- Ma, J.F. 2000.** Role of organic acids in detoxification of aluminum in higher plants. *Plant Cell Physiol.* 41(4), 383-390.
- Ma, J.F., Ryan, P.R., Delhaize, E. 2001.** Aluminium tolerance in plants and the complexing role of organic acids. *Trends Plant Sci.* 8: 273–278
- Ma, Q., Rengel, Z., Kuo, J. 2002.** Aluminum toxicity in Rye (*Secale cereale*): Root growth and dynamics of cytoplasmic calcium in intact roots tips. *Annals of Botany Company:* 89: 241-244.
- Manu, P.O., Wagatsuma, T., Ishikawa, S., Tawaraya, K. 2001.** The plasma membrane strength of the root tip cells and root phenolic compounds are correlated with Al tolerance in several common woody plants. *Soil Sci. Plant Nutri.* 47: 359-375.
- Marschner, H. 1986.** Mineral nutrition of higher plants. New York : Academic Press. 674 p.
- Marschner, H. 1995.** Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. Academic Press. London, UK.
- Martini, J.A. y Mutters, R.G. 1984.** Effects of liming and fertilization on sulfur availability, mobility and uptake in cultivated soils of South Carolina. *Soil Science*, Baltimore, v.138, n.6, p. 403-410.
- Matsumoto, y Hirasawa, E. 1976.** Localization of absorbed Al. in pea root and its binding to nuclei acids. *Plant and Cell Physiol.* 17: 117-137.
- Matzner, E. y Prenzel, J. 1992.** Acid deposition in german solling area - Effects on soil solution chemistry and Al movilization. *Water, Air, Soil Pollut.* 61, 221-234.

Maxwell, K. y Johnson, G.N. 2000. Chlorophyll fluorescence. A practical guide. *Journal of Experimental Botany* 51: 659-668.

McLaughlin, S.B., Wimmer, R. 1999. Transley Review No. 104 – Calcium physiology terrestrial ecosystem processes. *New Phytol.* 142, 373–417.

Meriga, B., Reddy, B.K., Rao, K.R., Kishor, P.B.K., 2004. Aluminium induced production of oxygen radicals, lipid peroxidation and DNA damage in seedlings of rice (*Oryza sativa*). *J. Plant Physiol.* 161, 63–68.

Mora, María de la Luz. 1994. Effects of ammendments use on soil chemical properties, En: Management alternatives of soils with acidification risk, Borie, B., Fernando (ed.)- Temuco (Chile): Universidad de la Frontera, 1994. p. 6-22

Mora, M.L., Schnettler, B., Demanet, R. 1999. Effect of liming and gypsum on soil chemistry, yield, and mineral composition of ryegrass grown in an acidic Andisol. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 30, 1251 - 1266.

Mora, Alfaro M.L., Williams P., Sterhr W., Demanet R. 2004. Effect of fertilizer input on soil acidification in relation to growth and chemical composition of pasture, and animal production. *R. C. Suelo Nutr. Veg.* 4(1):29-40.

Moran, J.F., Becana, M., Iturbe-Ormaetxe, I., Frechilla, S., Klucas, R.V., Aparicio-Trejo, P. 1994. Drought induces oxidative stress in pea plants. *Planta* 194: 346-352

Mortia A, Yanagisawa O, Takatsu S, Maeda S, Hiradate S. 2008. Mechanism for the detoxification of aluminum in roots of tea plant (*Camellia sinsensis* (L) Kuntze). *Phytochem.* 69: 147-153.

Munné-Bosch, S., Jubany-Marí, T., Alegre, L. 2001. Drought-induced senescence is characterized by a loss of antioxidant defences in chloroplasts. *Plant Cell Environ.* 24, 1319–1327.

Munne-Bosch, S. y Alegre, L. 2000. Changes in carotenoids, tocopherols and diterpenes during drought and recovery, and the biological significance of chlorophyll loss in *Rosmarinus officinalis* plants. *Planta*, 210, pp. 925–931.

Munné-Bosch S. y Alegre L. 2002. Plant aging increases oxidative stress in chloroplasts. *Planta* 214: 608–615.

Nakamura, Y., Tanaka K., Ohta E., y Sakata M. 1990. Protective effects of external Ca^{2+} on elongation and intracellular concentration of K^+ in intact mung bean roots under high NaCl stress. *Plant Cell Physiol.* 31:815-821.

Nichol, B.E., Oliveira L.A., Glass A.D.M., y Siddiqi M.Y. 1993. The effects of aluminum on the influx of calcium, potassium, ammonium, nitrate, and phosphate in an aluminum sensitive cultivar of barley (*Hordeum vulgare* L.) *Plant Physiol.* 101: 1263-1266.

Núñez, J. 1985. Fundamentos de edafología. 2 ed. San José, CR, UNED. 185 p.

Ofei-Manu, P., Wagatsuma, T., Ishikawa, S., Tawaraya, K. 2001. The plasma membrane strength of the root tip cells and root phenolic compounds are correlated with Al tolerance in several common woody plants. *Soil Sci. Plant Nutr.* 47, 359–375.

Perdomo, R. y Hampton, H. 1970. Ciencia y tecnología del suelo Centro de Producción de Materiales Universidad de San Carlos de Guatemala.

Piñeros, M. y Testeer, M. 1995. Characterization of a voltage dependent calcium selective channel from wheat roots. *Planta*, 195, 478-488.

Plaster, J.E. 2005. La ciencia del suelo y su manejo. Segunda reimpression. Internacional Thompson Editores. Madrid, España. 419 p.

Potash and phosphate Institute, 1997. Manual internacional de fertilidad de suelos. Norcross, G.A. U.S.A. 146 p.

Qin Rang, Jiao Yunqiu, Zhang Shanshan, Jiang Wusheng, Liu Donghua. 2010. Effects of aluminum on nucleoli in root tip cells and selected physiological and biochemical characters in *Allium cepa* var. *agrogarum* L. *BMC Plant Biology.* 10: 225.

Rai, V.P., Vajpayee, S.N., Singh y Mehrotra, S. 2004. Effect of chromium accumulation on photosynthetic pigments, oxidative stress defense system, nitrate reduction, proline level and eugenol content of *Ocimum tenuiflorum* L. *Plant Science*, 167: 1159-1169.

Raiji, B. van. 1988. Gesso agrícola na melhoria do ambiente radicular no sub-solo. ANDA, Sao Paulo. 88 p.

Rendig, V.V., Oputa, C., McComb, E.A. 1976. Effects of sulfur deficiency on non-protein nitrogen, soluble sugars and N:S ratios in young corn (*Zea mays* L.) plants. *Plant Soil* 44, 423 – 437.

Rengel, Z., Elliott, D. C. 1992. Mechanism of aluminium inhibition of net $^{45}\text{Ca}^{2+}$ uptake by *Amaranthus* protoplasts. *Plant Physiol.* 98, 632- 638.

Rennenberg H., Bonas U., Schmitz K., y Bergmann L. 1982. Phloem transport of sulfur in *Ricinus*. *Planta* Volume 155, Number 1, 82-88

Rennenberg H. 1984. The fate of excess sulfur in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology* 35, 121–153.

Reuveny, Z., Dougall, D.K., and Trinity, P.M. 1980. Regulatory coupling of nitrate and sulfate assimilation pathways in cultured tobacco cells. *Proc. Natl Acad. Sci. U S A.* 77, 6670–6672.

Reyes-Díaz, Marjorie; Alberdi, Miren y Mora, Maria de la Luz. 2009. Short-term Aluminum Stress Differentially Affects the Photochemical Efficiency of Photosystem II in Highbush Blueberry Genotypes. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 134(1): 14 – 21.

Reyes-Diaz, Marjorie; Inostroza-Blancheteau, Claudio; Millaleo, Rayen; Cruces, Edgardo; Wulff-Zottele, Cristian; Alberdi, Miren; de la Luz Mora, Maria. 2010. Long-term Aluminum Exposure Effects on Physiological and Biochemical Features of Highbush Blueberry Cultivars. *Journal of the American Society for Horticultural Science*, 135 (3): 212-222. ISI

Reeve, N.G y Summer, M.E. 1972. Amelioration of subsoil acidity in Natal oxisols by leaching of surface applied amendments. *Agrochemophysica*, v.4, p. 1-6.

Rice-Evans C.A., Miller N.J., Paganga G. 1997. Antioxidant properties of phenolic compounds. *Trends in Plant Sciences* 2: 152-159.

Rich, P.R. y Bonner, W.D.J. Jr. 1978. The site of superoxide generation in higher plant mitochondria. *Arch. Biochem. Biophys.* 188, 206–213.

Richardson, A.E. 1994. Soil microorganisms and phosphorus availability. *Soil Biota* 50–62

Rincón, Álvaro y Ligarreto, Gustavo A. 2008. Fertilidad y extracción de nutrientes en la asociación maíz-pastos en suelos ácidos del piedemonte Llanero de Colombia. *Agronomía Colombiana* [en línea], vol. 26 [citado 2011-08-15]. Disponible en Internet: <http://redalyc.uaemex.mx/src/inicio/ArtPdfRed.jsp?iCve=180314732017>. ISSN 0120-9965.

Ritchey, K.D. y Snuffer, J.D. 2002. Limestone, gypsum, and magnesium oxide influence restoration of an abandoned Appalachian pasture. *Agron. J.* 94, 830 - 839.

Rojas W.C. y Rodriguez, N. 1997. Manual de muestreo de suelos para análisis de fertilidad. Santiago, servicio agrícola ganadero. 23 p.

Rojas W, Carlos. 2002. Disponibilidad del fósforo y su corrección. Centro Regional de Investigación La Platina. Serie Actas INIA N° 15. p. 67-81

Ryan, P.R. and Kochian, L.V. 1993. Interaction between aluminum toxicity and calcium uptake at the root apex in near-isogenic lines of wheat (*Triticum aestivum* L.) differing in aluminum tolerance. *Plant Physiol.* 102: 975-982.

Sadzawka R. Angélica, Carrasco R, María Adriana, Grez Z., Renato y Mora G., María de la Luz. 2006. IVth International *Symposium on Deteriorated Volcanic Soils*. July, 1 to 8, Morelia, Tlaxcala, México. (8 p.)

- Sadzawka R. Angélica. 2004.** Manual de azufre en suelos y plantas. Serie Remehue. no. 71.p. 116-130.
- Sadzawka R.A. y Porte O.L. 1985.** Aluminio activo y hierro en suelos volcánicos. Agricultura Técnica (Chile) 45(4):329-334.
- Sadzawka, M. y M. Carrasco. 1985.** Fósforo, In J. Tosso (ed.), Suelos volcánicos de Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias. Santiago, Chile.
- Sadzawka, A., Carrasco, M., Demanet R., Grez, R., Mora, M.L., Neaman, A. 2007.** Métodos de análisis de tejidos vegetales. Segunda edición. Instituto de Investigaciones Agropecuarias, Serie Actas INIA N°40, Santiago, Chile. 140 p.
- Saigusa, M., and Toma, M. 1997.** Mechanism of reduction of exchangeable aluminum by gypsum application. *Soil Sci. Plant Nutr.* 43, 343 - 349.
- Sakihama Yasuko, Cohen Michael F., Grace Stephen C., Yamasaki Hideo. 2002.** Plant phenolic antioxidant and prooxidant activities: phenolics-induced oxidative damage mediated by metals in plants. *Toxicology* 177: 67–80.
- Salas, R. Smyth, T., Alpízar, D., Boniche, J., Alvarado, A., Rivera, A. 2002.** Corrección de la acidez del suelo con Ca y Mg y su efecto en el desarrollo del sistema radical del palmito en la etapa de previvero. *Agronomía Costarricense* 26(2): 87 – 94.
- Sanderson, K.R., Sanderson J.B., y Ivany J.A. 1996.** Supplemental soil sulphur increases cabbage yield. *Can. J. Plant Sci.* 76:857-859.
- Sanderson, K.R., Eaton, L. J. 2004.** Gypsum—An alternative to chemical fertilizers in lowbush blueberry production. *Small Fruits Review* 3, 57 - 71.
- Scott and Eagleson, 1988.** In: T. Scott and M. Eagleson, Editors, *Concise Encyclopedia, Biochemistry* (second ed.), Walter de Gruyter, New York (1988).
- Schachtman Daniel P., Reid Robert J., y Ayling S.M. 1998.** Phosphorus Uptake by Plants: From Soil to Cell. *Plant Physiol.* 116: 447–453
- Scherer HW. 2001.** Sulphur in crop production. *European Journal of Agronomy* 14: 81-111.
- Shainberg, I., M. E. Sumner, W. P. Miller, M. P. W. Farina, M. A. Pavan, and M. V. Fey. 1989.** Use of gypsum on soils: A review. *Adv. Soil Sci.* 9:1-111.
- Sherer H.W. 2001.** Sulphur in crop production – invited paper (review). *European Journal of Agronomy.* 14: 81 – 111.

Shutak, V.G., Hindle R. y Christopher E.P. 1957. Growth studies of the cultivated blueberry. Univ. Rhode Is. Agr. Expt. Sta. Bull. 339.

Silva I.R., Ferrufino A., Sanzonowicz C., Smyth T.J., Israel D.W. y Thomas E. C.Jr. 2005. Interactions between magnesium, calcium, and aluminum on soybean root elongation. R. Bras. Ci. Solo, 29:747-754.

Simontacchi M., A. Galatro and S. Puntarulo, 2001. El estrés oxidativo en las plantas. *Rev. Ciencia Hoy* [en línea]. 10: 1-2.

Simonovicová, M., Huttová, J., Mistrík, I., Siroká, B., Tamás, L. 2004. Root growth inhibition by aluminum is probably caused by cell death due to peroxidase mediated hydrogen peroxide production. *Protoplasma* 224, 91–98.

Singleton, V.L. y Rossi, J.A. 1965. Colorimetry of total phenolics with phosphomolybdic-phospho-tungstic acid reagents. *Am. J. Enol. Vitic.* 16:144-158.

Sivaguru, M.; H. Matsumoto y W. Horst. 2000. Control of the response to aluminum stress. En: Nick, P. (ed.). *Plant microtubules: Potential for microbiology.* Springer, Heidelberg. pp. 103-120.

Soil Survey Staff. 2006. Keys to Soil taxonomy. 10th Edition. USDA. NRCS, Washington DC. 341pp.

Soto, R. 1993. Efecto de las Características Físicas y Químicas de Diferentes Mezclas de Sustratos en el Crecimiento de Arándanos en Maceta. Tesis Ing. Agr. Santiago, Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 64p.

Souza, D.M.G. y Ritchey K.D. 1986. Uso do gesso no solo de cerrado. Pp. 199-244 In: D. F. Brasilia (ed.). *An. Sem. Uso Fosfogesso Agricultura.* EMBRAPA, Brazil.

Takahama U, Oniki T. 1997. A peroxide/phenolics/ascorbate system can scavenge hydrogen peroxide in plant cells. *Physiologia Plantarum* 101: 845-852.

Takahashi, T., Ikeda, Y., Nakamura, H., Nanzyo, M. 2006. Efficiency of gypsum application to acid Andosols estimated using aluminum release rates and plant root growth. *J. Soil Sci. Plant Nutr.* 52, 584 - 592.

Tamás, L., Huttová, J., Mistrík, I. 2003. Inhibition of Al-induced root elongation and enhancement of Al-induced peroxidase in Al-sensitive and Al-resistant barley cultivars are positively correlated. *Plant Soil* 250, 193–200.

Tambusi E. 2004. Fotosíntesis, Fotoprotección, Productividad y Estrés Abiótico: Algunos casos de estudio. Tesis para grado de Doctor en Biología, programa de doctorado “La Fisiología de las plantas i el ambient”. Universitat de Barcelona. España.

Thomas, G.W., Hargrove, W.L., 1984. The chemistry of soil acidity. In: Adams, F. (Ed.), Soil Acidity and Liming, Agronomy Series No. 12. Madison, WI, pp. 3–56. Chapter 1.

Tisdale, S.L. et al. 1990. Soil Fertility and Fertilizers. Macmillan Publishing Company, New York, pp. 732.

Tolrá RP, Poschenrieder C, Luppi B, Barceló J. 2005. Aluminum induced changes in profiles of both organic acids and phenolic substances underlie Al tolerance in *Rumex acetosa L.* Env. Exp. Bot. 54: 231-238.

Toma, M., Sumner, M. E., Weeks, G., Saigusa, M. 1999a. Long-term effects of gypsum on crop yield and subsoil chemical properties. Soil Sci. Soc. Am. J. 39, 891 - 895.

Toma, M., Hiradate, S., y Saigusa, M. 1999b. Chemical species of Al in a gypsum-treated Kitakami Andosol. Soil Sci. Plant Nutrition 45: 279 – 285.

Toma, M., Saigusa, M., Gafoku, N., Sumner, M. E. 2005. Effects of gypsum on amelioration of subsoil acidity in Andisols. JIFS 2, 69 - 71.

Trejo-Téllez, L., & Gómez-Merino, F. 2007. Respuestas fisiológicas y bioquímicas de plantas de tabaco a concentraciones de aluminio en invernadero. *Terra Latinoamericana*, 25, 251-259.

Tripathi, B.N. and J.P. Gaur. 2006. Physiological behavior of *Scenedesmus sp.*, during exposure to elevated levels of Cu and Zn and after withdrawal of metal stress. *Protoplasma*, 229: 1-9.

Triwavas, A., Gilroy, S. 1991. Signal transduction in plant cells. Trends in genetics 7, 356-361.

Tuna, A. L., Kaya, C., Ashraf, M., Altunlu, H., Yokas, I., Yagmur, B. 2007. The effects of calcium sulphate on growth, membrane stability and nutrient uptake of tomato plants grown under salt stress. Environ. Exp. Bot. 59, 173 – 178.

Ullrich-Eberius C, Novacky A, van Bel A. 1984. Phosphate uptake in *Lemna gibba* G1: energetics and kinetics. Planta 161: 46–52

Valenzuela, J. 1988. Requerimientos Agroclimaticos de las Especies de Arándano. Instituto de Investigación Agropecuaria. Seminario: El cultivo del Arándano. Temuco, 30 de Noviembre y 1 y 2 de Diciembre de 1988. pp 17- 23.

Viator, R. P., Kovar, J. L. y Hallmark, W. B. 2002. Gypsum and compost effects on sugarcane root growth, yield and plant nutrients. Agron. J. 94: 1332 – 1336.

von Uexküll HR, Mutert E. 1995. Global extent, development and economic impact of acid soils. *Plant Soil*, 171:1-15.

- Wainwright, M. 1984.** Sulfur Oxidation in Soils. *Advances in Agronomy Volume 37*: 349-396.
- Wallnöfer, P.R. y G. Engelhardt. 1995.** Schadstoffe aus dem Boden. 118-140 p. En: Hock, B. y E. *Elstner* (eds.). *Schadwirkungen auf Pflanzen*. Académica Spektrum, Berlin.
- White PJ. 2000.** Calcium channels in higher plants. *Biochimica et Biophysica Acta* 1465: 171 – 189.
- White PJ. 2001.** The pathways of calcium movement to the xylem. *Journal of Experimental Botany* 52: 891-899.
- White PJ, Whiting SN, Baker AJM, Broadley MR. 2002.** Does zinc move apoplastically to the xylem in roots of *Thlaspi caerulescens*? *New Phytologist* 153: 199 – 211.
- Worthen, E y Aldrich, S. 1967.** *Suelos agrícolas* 2 ed. Distrito. Federal, MX, UTHEA.
- Wright RL. 1989.** Soil aluminum toxicity and plant growth. *Commun Soil Sci Plant Anal* 20: 1479-1497.
- Yamamoto Y, Yukiko Kobayashi Y, Matsumoto H. 2001.** Lipid peroxidation is an early symptom triggered by aluminum, but not the primary cause of elongation inhibition in pea roots. *Plant Physiol* 125: 199–208.
- Yang JL, Zhang LY, Zhang YJ, Wu SS, Wu YR, Zheng P. 2008.** Cell wall polysaccharides are specifically involved in the exclusion of aluminum from the rice root apex. *Plant Physiol* 146: 602-611.
- Zapata H. R.D. 2004.** La química de la acidez del suelo. Disponible en: <http://www.unalmed.edu.co/%7Eerdzapata/AcidezdelSuelo.zip>; consulta: 15 de enero de 2011.
- Zhang XB, Peng L, Yang YS, Xu GD. 2007.** Effect of Al in soil on photosynthesis and related morphological and physiological characteristics of two soybean genotypes. *Botanical Studies* 48: 435-444.
- Zheng SJ, Yang JL, He YF, Yu XH Zhang L, You JF, Shen RF. 2005.** Immobilization of aluminum with phosphorus in roots is associated with high aluminum resistance in buckwheat. *Plant Physiol*. 138: 297- 303.

9. ANEXOS

Anexo 1. Relación del aluminio intercambiable del suelo con la actividad antioxidante, peroxidación lipídica, contenido de fenoles totales, contenido de aluminio, calcio, azufre y fósforo en hoja y raíz, en tres cultivares de arándano establecidos por 60 días en un Andisol con alta saturación de aluminio con aplicación de CaSO_4 .

Actividad antioxidante	Hoja		Raíz	
	Coefficiente Correlación	Valor P	Coefficiente Correlación	Valor P
Legacy	-0,83	0,17	0,0353	0,965
Brigitta	-0,313	0,687	0,779	0,221
Bluegold	-0,954	0,0456	0,319	0,681
Peroxidación lipídica				
Legacy	0,86	0,14	-0,323	0,677
Brigitta	-0,14	0,86	0,154	0,846
Bluegold	0,0737	0,926	-0,56	0,44
Contenido de aluminio				
Legacy	0,968	0,0317	0,922	0,0777
Brigitta	0,683	0,317	0,801	0,199
Bluegold	0,375	0,625	-0,765	0,235
Contenido de calcio				
Legacy	-0,626	0,374	-0,747	0,253
Brigitta	-0,997	0,00346	-0,822	0,178
Bluegold	0,0423	0,958	-0,973	0,0275
Contenido de azufre				
Legacy	-0,00842	0,992	-0,461	0,539
Brigitta	0,122	0,878	-0,977	0,0226
Bluegold	-0,987	0,0134	0,453	0,547
Contenido de fósforo				
Legacy	0,738	0,262	0,447	0,553
Brigitta	0,998	0,00159	-0,973	0,0273
Bluegold	0,564	0,436	-0,368	0,632
Contenido de Fenoles totales				
Legacy	-0,829	0,171		
Brigitta	-0,728	0,272		
Bluegold	-0,205	0,795		

Anexo 2. Relación del calcio intercambiable del suelo con la actividad antioxidante, peroxidación lipídica, contenido de fenoles totales, contenido de aluminio, calcio, azufre y fósforo en hoja y raíz, en tres cultivares de arándano establecidos por 60 días en un Andisol con alta saturación de aluminio con aplicación de CaSO_4 .

Actividad antioxidante	Hoja		Raíz	
	Coefficiente Correlación	Valor P	Coefficiente Correlación	Valor P
Legacy	0,722	0,278	-0,209	0,791
Brigitta	0,164	0,836	-0,817	0,183
Bluegold	-0,276	0,724	0,561	0,439
Peroxidación lipídica				
Legacy	-0,83	0,17	0,157	0,843
Brigitta	0,236	0,764	-0,328	0,672
Bluegold	0,123	0,877	-0,789	0,211
Contenido de aluminio				
Legacy	-0,916	0,0838	-0,839	0,161
Brigitta	-0,787	0,213	-0,769	0,231
Bluegold	-0,795	0,205	-0,723	0,277
Contenido de calcio				
Legacy	0,677	0,323	0,819	0,181
Brigitta	0,968	0,0325	0,931	0,0693
Bluegold	0,795	0,205	-0,00792	0,992
Contenido de azufre				
Legacy	0,181	0,819	0,381	0,619
Brigitta	0,0222	0,978	0,955	0,0448
Bluegold	-0,162	0,838	0,517	0,483
Contenido de fósforo				
Legacy	-0,638	0,362	-0,309	0,691
Brigitta	-0,968	0,0319	0,976	0,0244
Bluegold	-0,667	0,333	0,168	0,832
Contenido de Fenoles totales				
Legacy	0,726	0,274		
Brigitta	0,667	0,333		
Bluegold	0,897	0,103		

Anexo 3. Relación del azufre del suelo con la actividad antioxidante, peroxidación lipídica, contenido de fenoles totales, contenido de aluminio, calcio, azufre y fósforo en hoja y raíz, en tres cultivares de arándano establecidos por 60 días en un Andisol con alta saturación de aluminio con aplicación de CaSO₄.

Actividad antioxidante	Hoja		Raíz	
	Coefficiente Correlación	Valor P	Coefficiente Correlación	Valor P
Legacy	0,831	0,169	-0,0498	0,95
Brigitta	0,289	0,711	-0,695	0,305
Bluegold	-0,481	0,519	0,664	0,336
Peroxidación lipídica				
Legacy	-0,842	0,158	0,324	0,676
Brigitta	0,0689	0,931	-0,217	0,783
Bluegold	0,0329	0,967	-0,892	0,108
Contenido de aluminio				
Legacy	-0,961	0,0388	-0,92	0,0805
Brigitta	-0,874	0,126	-0,865	0,135
Bluegold	-0,675	0,325	-0,796	0,204
Contenido de calcio				
Legacy	0,652	0,348	0,767	0,233
Brigitta	0,961	0,0385	0,912	0,0883
Bluegold	0,687	0,313	-0,205	0,795
Contenido de azufre				
Legacy	0,00902	0,991	0,43	0,57
Brigitta	-0,117	0,883	0,974	0,0257
Bluegold	-0,368	0,632	0,649	0,351
Contenido de fósforo				
Legacy	-0,717	0,283	-0,423	0,577
Brigitta	-0,957	0,0435	0,993	0,00693
Bluegold	-0,501	0,499	0,167	0,833
Contenido de Fenoles totales				
Legacy	0,817	0,183		
Brigitta	0,774	0,226		
Bluegold	0,797	0,203		

Anexo 4. Tabla análisis de varianza contenido de fósforo en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Brigitta. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	4,9166667	1,63889	6,5556	0,0151*
Error	8	2,0000000	0,25000		
C. Total	11	6,9166667			

Coefficiente de variación (%): 1,86

Anexo 5. Tabla análisis de varianza contenido de Potasio en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Brigitta. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	1685,5130	561,838	11,3077	0,0030*
Error	8	397,4906	49,686		
C. Total	11	2083,0036			

Coefficiente de variación (%): 3,94

Anexo 6. Tabla análisis de varianza pH en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Brigitta. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,16162500	0,053875	24,1231	0,0002*
Error	8	0,01786667	0,002233		
C. Total	11	0,17949167			

Coefficiente de variación (%): 0,99

Anexo 7. Tabla análisis de varianza contenido de K (cmol+kg) en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Brigitta. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,01102500	0,003675	11,3077	0,0030*
Error	8	0,00260000	0,000325		
C. Total	11	0,01362500			

Coefficiente de variación (%): 3,94

Anexo 8. Tabla análisis de varianza contenido de Na (cmol+kg) en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Brigitta. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00173333	0,000578	17,3333	0,0007*
Error	8	0,00026667	0,000033		
C. Total	11	0,00200000			

Coefficiente de variación (%): 7,22

Anexo 9. Tabla análisis de varianza contenido de Ca (cmol+kg) en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Brigitta. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	5,5545000	1,85150	460,0000	<,0001*
Error	8	0,0322000	0,00403		
C. Total	11	5,5867000			

Coefficiente de variación (%): 6,07

Anexo 10. Tabla análisis de varianza contenido de Mg (cmol+kg) en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Brigitta. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,01526667	0,005089	8,1422	0,0082*
Error	8	0,00500000	0,000625		
C. Total	11	0,02026667			

Coefficiente de variación (%): 4,69

Anexo 11. Tabla análisis de varianza contenido de Al intercambiable (cmol+kg) en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Brigitta. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,14342500	0,047808	47,4132	<,0001*
Error	8	0,00806667	0,001008		
C. Total	11	0,15149167			

Coefficiente de variación (%): 3,78

Anexo 12. Tabla análisis de varianza contenido de % de saturación aluminio en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Brigitta. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	992,22873	330,743	354,1486	<,0001*
Error	8	7,47128	0,934		
C. Total	11	999,70001			

Coefficiente de variación (%): 3,22

Anexo 13. Tabla análisis de varianza de CICE en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Brigitta. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	3,5299667	1,17666	95,9230	<,0001*
Error	8	0,0981333	0,01227		
C. Total	11	3,6281000			

Coefficiente de variación (%): 3,75

Anexo 14. Tabla análisis de varianza de suma de bases en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Brigitta. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	5,0115583	1,67052	183,2380	<,0001*
Error	8	0,0729333	0,00912		
C. Total	11	5,0844917			

Coefficiente de variación (%): 4,51

Anexo 15. Tabla análisis de varianza contenido de Azufre en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Brigitta. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	6002,9167	2000,97	252,7544	<,0001*
Error	8	63,3333	7,92		
C. Total	11	6066,2500			

Coefficiente de variación (%): 3,48

Anexo 16. Tabla análisis de varianza contenido de aluminio extractable en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Brigitta. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	2744,2500	914,750	4,3234	0,0434*
Error	8	1692,6667	211,583		
C. Total	11	4436,9167			

Coefficiente de variación (%): 1,56

Anexo 17. Tabla análisis de varianza contenido de Fósforo en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Bluegold. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	298,25000	99,4167	397,6667	<,0001*
Error	8	2,00000	0,2500		
C. Total	11	300,25000			

Coefficiente de variación (%): 2,19

Anexo 18. Tabla análisis de varianza contenido de Potasio en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Bluegold. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	2735,2959	911,765	17,0397	0,0008*
Error	8	428,0668	53,508		
C. Total	11	3163,3627			

Coefficiente de variación (%): 3,41

Anexo 19. Tabla análisis de varianza pH en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Bluegold. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,16335833	0,054453	75,9806	<,0001*
Error	8	0,00573333	0,000717		
C. Total	11	0,16909167			

Coefficiente de variación (%): 0,57

Anexo 20. Tabla análisis de varianza contenido de K (cmol+kg) en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Bluegold. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,01789167	0,005964	17,0397	0,0008*
Error	8	0,00280000	0,000350		
C. Total	11	0,02069167			

Coefficiente de variación (%): 3,41

Anexo 21. Tabla análisis de varianza contenido de Na (cmol+kg) en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Bluegold. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00540000	0,001800	72,0000	<,0001*
Error	8	0,00020000	0,000025		
C. Total	11	0,00560000			

Coefficiente de variación (%): 7,14

Anexo 22. Tabla análisis de varianza contenido de Ca (cmol+kg) en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Bluegold. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	6,0831583	2,02772	439,2172	<,0001*
Error	8	0,0369333	0,00462		
C. Total	11	6,1200917			

Coefficiente de variación (%): 5,73

Anexo 23. Tabla análisis de varianza contenido de Mg (cmol+kg) en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Bluegold. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,01142500	0,003808	35,1538	<,0001*
Error	8	0,00086667	0,000108		
C. Total	11	0,01229167			

Coefficiente de variación (%): 1,77

Anexo 24. Tabla análisis de varianza contenido de Al intercambiable en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Bluegold. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	1,1388917	0,379631	813,4940	<,0001*
Error	8	0,0037333	0,000467		
C. Total	11	1,1426250			

Coefficiente de variación (%): 3,36

Anexo 25. Tabla análisis de varianza % de saturación de aluminio en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Bluegold. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	1278,3366	426,112	897,6444	<,0001*
Error	8	3,7976	0,475		
C. Total	11	1282,1342			

Coefficiente de variación (%): 3,33

Anexo 26. Tabla análisis de varianza CICE en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Bluegold. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	7,6983333	2,56611	608,5639	<,0001*
Error	8	0,0337333	0,00422		
C. Total	11	7,7320667			

Coefficiente de variación (%): 2,14

Anexo 27. Tabla análisis de varianza suma de bases en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Bluegold. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	5,1950917	1,73170	464,8852	<,0001*
Error	8	0,0298000	0,00372		
C. Total	11	5,2248917			

Coefficiente de variación (%): 2,55

Anexo 28. Tabla análisis de varianza contenido de Azufre en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Bluegold. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	14944,250	4981,42	287,3894	<,0001*
Error	8	138,667	17,33		
C. Total	11	15082,917			

Coefficiente de variación (%): 4,75

Anexo 29. Tabla análisis de varianza contenido de aluminio extractable en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Bluegold. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	261140,33	87046,8	22,5126	0,0003*
Error	8	30932,67	3866,6		
C. Total	11	292073,00			

Coefficiente de variación (%): 7,10

Anexo 30. Tabla análisis de varianza contenido de Fósforo en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Legacy. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	10,000000	3,33333	10,0000	0,0044*
Error	8	2,666667	0,33333		
C. Total	11	12,666667			

Coefficiente de variación (%): 2,11

Anexo 31. Tabla análisis de varianza contenido de Potasio en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Legacy. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	779,6931	259,898	7,2857	0,0112*
Error	8	285,3779	35,672		
C. Total	11	1065,0710			

Coefficiente de variación (%): 3,38

Anexo 32. Tabla análisis de varianza pH en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Legacy. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,28989167	0,096631	56,8415	<,0001*
Error	8	0,01360000	0,001700		
C. Total	11	0,30349167			

Coefficiente de variación (%): 0,86

Anexo 33. Tabla análisis de varianza contenido de K (cmol+kg) en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Legacy. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00510000	0,001700	7,2857	0,0112*
Error	8	0,00186667	0,000233		
C. Total	11	0,00696667			

Coefficiente de variación (%): 3,38

Anexo 34. Tabla análisis de varianza contenido de Na (cmol+kg) en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Legacy. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00249167	0,000831	16,6111	0,0008*
Error	8	0,00040000	0,000050		
C. Total	11	0,00289167			

Coefficiente de variación (%): 6,79

Anexo 35. Tabla análisis de varianza contenido de Ca (cmol+kg) en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Legacy. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	9,0874000	3,02913	532,9853	<,0001*
Error	8	0,0454667	0,00568		
C. Total	11	9,1328667			

Coefficiente de variación (%): 6,09

Anexo 36. Tabla análisis de varianza contenido de Mg (cmol+kg) en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Legacy. Comparación entre tratamientos

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,01700000	0,005667	4,7222	0,0352*
Error	8	0,00960000	0,001200		
C. Total	11	0,02660000			

Coefficiente de variación (%): 6,29

Anexo 37. Tabla análisis de varianza contenido de aluminio intercambiable en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Legacy. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,10702500	0,035675	73,8103	<,0001*
Error	8	0,00386667	0,000483		
C. Total	11	0,11089167			

Coefficiente de variación (%): 2,65

Anexo 38. Tabla análisis de varianza % de saturación de aluminio en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Legacy. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	1228,1901	409,397	164,7595	<,0001*
Error	8	19,8785	2,485		
C. Total	11	1248,0686			

Coefficiente de variación (%): 5,48

Anexo 39. Tabla análisis de varianza CICE en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Legacy. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	8,4620333	2,82068	104,4051	<,0001*
Error	8	0,2161333	0,02702		
C. Total	11	8,6781667			

Coefficiente de variación (%): 5,18

Anexo 40. Tabla análisis de varianza suma de bases en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Legacy. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	10,444892	3,48163	134,7293	<,0001*
Error	8	0,206733	0,02584		
C. Total	11	10,651625			

Coefficiente de variación (%): 6,86

Anexo 41. Tabla análisis de varianza contenido de Azufre en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Legacy. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	7272,0000	2424,00	1322,182	<,0001*
Error	8	14,6667	1,83		
C. Total	11	7286,6667			

Coefficiente de variación (%): 1,86

Anexo 42. Tabla análisis de varianza contenido de aluminio extractable en suelo Andisol con alta saturación de aluminio con establecimiento de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.), cultivar Legacy. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	20516,917	6838,97	36,5720	<,0001*
Error	8	1496,000	187,00		
C. Total	11	22012,917			

Coefficiente de variación (%): 1,29

Anexo 43. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos al inicio.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00009060	0,000030	0,2817	0,8382
Error	36	0,00385940	0,000107		
C. Total	39	0,00395000			

Coefficiente de variación (%): 1,23

Anexo 44. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 15 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,03300410	0,011001	40,0819	<,0001*
Error	36	0,00988100	0,000274		
C. Total	39	0,04288510			

Coefficiente de variación (%): 2,30

Anexo 45. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 30 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00213620	0,000712	5,1022	0,0048*
Error	36	0,00502420	0,000140		
C. Total	39	0,00716040			

Coefficiente de variación (%): 1,42

Anexo 46. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 45 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00036490	0,000122	1,6460	0,0197
Error	36	0,00266020	0,000074		
C. Total	39	0,00302510			

Coefficiente de variación (%): 1,01

Anexo 47. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 60 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00052880	0,000176	4,5017	0,0088*
Error	36	0,00140960	0,000039		
C. Total	39	0,00193840			

Coefficiente de variación (%): 0,74

Anexo 48. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos al inicio.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00030069	0,000100	0,2729	0,8445
Error	36	0,01322209	0,000367		
C. Total	39	0,01352279			

Coefficiente de variación (%): 7,86

Anexo 49. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 15 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00538580	0,001795	14,4202	<,0001*
Error	36	0,00448187	0,000124		
C. Total	39	0,00986768			

Coefficiente de variación (%): 6,83

Anexo 50. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 30 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,02198858	0,007330	73,7294	<,0001*
Error	36	0,00357880	0,000099		
C. Total	39	0,02556739			

Coefficiente de variación (%): 3,15

Anexo 51. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 45 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00917043	0,003057	38,6573	
Error	36	0,00284668	0,000079		<,0001*
C. Total	39	0,01201711			

Coefficiente de variación (%): 2,09

Anexo 52. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 60 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00214810	0,000716	10,2865	<,0001*
Error	36	0,00250593	0,000070		
C. Total	39	0,00465403			

Coefficiente de variación (%): 1,91

Anexo 53. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos al inicio.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	2,792804	0,930935	1,4647	0,2404
Error	36	22,881032	0,635584		
C. Total	39	25,673837			

Coefficiente de variación (%): 2,39

Anexo 54. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 15 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	484,41755	161,473	234,6424	<,0001*
Error	36	24,77391	0,688		
C. Total	39	509,19146			

Coefficiente de variación (%): 3,52

Anexo 55. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 30 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	47,917806	15,9726	45,8772	<,0001*
Error	36	12,533766	0,3482		
C. Total	39	60,451572			

Coefficiente de variación (%): 1,34

Anexo 56. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 45 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	1049,6600	349,887	268,4713	<,0001*
Error	36	46,9172	1,303		
C. Total	39	1096,5772			

Coefficiente de variación (%): 2,03

Anexo 57. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 60 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	35,788615	11,9295	16,1326	<,0001*
Error	36	26,620799	0,7395		
C. Total	39	62,409414			

Coefficiente de variación (%): 1,56

Anexo 58. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos al inicio.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00015746	0,000052	0,3072	0,8200
Error	36	0,00615108	0,000171		
C. Total	39	0,00630854			

Coefficiente de variación (%): 0,56

Anexo 59. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 15 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	1,5701161	0,523372	2544,407	<,0001*
Error	36	0,0074050	0,000206		
C. Total	39	1,5775211			

Coefficiente de variación (%): 1,97

Anexo 60. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 30 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,42261295	0,140871	901,5177	<,0001*
Error	36	0,00562535	0,000156		
C. Total	39	0,42823830			

Coefficiente de variación (%): 0,68

Anexo 61. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 45 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	4,1233867	1,37446	7076,028	<,0001*
Error	36	0,0069927	0,00019		
C. Total	39	4,1303794			

Coefficiente de variación (%): 0,68

Anexo 62. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 60 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,02468193	0,008227	103,1040	<,0001*
Error	36	0,00287266	0,000080		
C. Total	39	0,02755459			

Coefficiente de variación (%): 0,54

Anexo 63. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos al inicio.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00178683	0,000596	3,7342	0,0196*
Error	36	0,00574209	0,000160		
C. Total	39	0,00752892			

Coefficiente de variación (%): 1,52

Anexo 64. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 15 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00053934	0,000180	0,7575	0,5253
Error	36	0,00854405	0,000237		
C. Total	39	0,00908339			

Coefficiente de variación (%): 1,84

Anexo 65. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 30 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00180090	0,000600	4,6147	0,0078*
Error	36	0,00468305	0,000130		
C. Total	39	0,00648395			

Coefficiente de variación (%): 1,35

Anexo 66. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 45 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00205994	0,000687	2,1065	0,1165
Error	36	0,01173486	0,000326		
C. Total	39	0,01379480			

Coefficiente de variación (%): 2,16

Anexo 67. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 60 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00014975	0,000050	0,4384	0,7269
Error	36	0,00409897	0,000114		
C. Total	39	0,00424872			

Coefficiente de variación (%): 1,26

Anexo 68. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos al inicio.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00106797	0,000356	2,6864	0,0610
Error	36	0,00477052	0,000133		
C. Total	39	0,00583850			

Coefficiente de variación (%): 3,59

Anexo 69. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 15 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,06871134	0,022904	15,2559	<,0001*
Error	36	0,05404698	0,001501		
C. Total	39	0,12275832			

Coefficiente de variación (%): 9,21

Anexo 70. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 30 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00272092	0,000907	2,3461	0,0089
Error	36	0,01391710	0,000387		
C. Total	39	0,01663802			

Coefficiente de variación (%): 4,65

Anexo 71. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 45 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,01046689	0,003489	5,2946	0,0040*
Error	36	0,02372278	0,000659		
C. Total	39	0,03418967			

Coefficiente de variación (%): 7,26

Anexo 72. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 60 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,01941445	0,006471	39,8697	<,0001*
Error	36	0,00584338	0,000162		
C. Total	39	0,02525783			

Coefficiente de variación (%): 3,00

Anexo 73. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos al inicio.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	8,176814	2,72560	4,2409	0,0115*
Error	36	23,137241	0,64270		
C. Total	39	31,314056			

Coefficiente de variación (%): 1,95

Anexo 74. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 15 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	353,99966	118,000	31,8371	<,0001*
Error	36	133,42915	3,706		
C. Total	39	487,42881			

Coefficiente de variación (%): 3,66

Anexo 75. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 30 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	92,63738	30,8791	20,9647	<,0001*
Error	36	53,02473	1,4729		
C. Total	39	145,66211			

Coefficiente de variación (%): 2,39

Anexo 76. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 45 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	83,82416	27,9414	10,3017	<,0001*
Error	36	97,64317	2,7123		
C. Total	39	181,46733			

Coefficiente de variación (%): 3,75

Anexo 77. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 60 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	773,65542	257,885	172,4913	<,0001*
Error	36	53,82223	1,495		
C. Total	39	827,47764			

Coefficiente de variación (%): 2,45

Anexo 78. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos al inicio.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00146729	0,000489	0,5381	0,6592
Error	36	0,03272435	0,000909		
C. Total	39	0,03419164			

Coefficiente de variación (%): 1,74

Anexo 79. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 15 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	1,3713912	0,457130	128,0699	<,0001*
Error	36	0,1284978	0,003569		
C. Total	39	1,4998890			

Coefficiente de variación (%): 3,18

Anexo 80. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 30 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,20178977	0,067263	130,3863	<,0001*
Error	36	0,01857156	0,000516		
C. Total	39	0,22036133			

Coefficiente de variación (%): 1,33

Anexo 81. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 45 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	3,2708187	1,09027	5672,494	<,0001*
Error	36	0,0069193	0,00019		
C. Total	39	3,2777381			

Coefficiente de variación (%): 0,78

Anexo 82. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 60 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,01095112	0,003650	9,8459	<,0001*
Error	36	0,01334707	0,000371		
C. Total	39	0,02429820			

Coefficiente de variación (%): 1,21

Anexo 83. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos al inicio.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00056610	0,000189	2,2115	0,1036
Error	36	0,00307180	0,000085		
C. Total	39	0,00363790			

Coefficiente de variación (%): 1,21

Anexo 84. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 15 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,01262287	0,004208	17,9547	<,0001*
Error	36	0,00843650	0,000234		
C. Total	39	0,02105938			

Coefficiente de variación (%): 1,94

Anexo 85. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 30 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00001290	4,3e-6	0,0401	0,0098
Error	36	0,00386100	0,000107		
C. Total	39	0,00387390			

Coefficiente de variación (%): 1,24

Anexo 86. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 45 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,01850100	0,006167	16,8607	<,0001*
Error	36	0,01316740	0,000366		
C. Total	39	0,03166840			

Coefficiente de variación (%): 2,59

Anexo 87. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico Fv/Fm de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 60 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00376867	0,001256	1,2614	0,0302
Error	36	0,03585130	0,000996		
C. Total	39	0,03961997			

Coefficiente de variación (%): 3,99

Anexo 88. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos al inicio.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00020935	0,000070	0,4585	0,7129
Error	36	0,00547857	0,000152		
C. Total	39	0,00568792			

Coefficiente de variación (%): 5,33

Anexo 89. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 15 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,05567449	0,018558	191,6695	<,0001*
Error	36	0,00348566	0,000097		
C. Total	39	0,05916014			

Coefficiente de variación (%): 4,65

Anexo 90. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 30 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,01144026	0,003813	22,5587	<,0001*
Error	36	0,00608559	0,000169		
C. Total	39	0,01752585			

Coefficiente de variación (%): 2,93

Anexo 91. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 45 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,08232762	0,027443	261,1092	<,0001*
Error	36	0,00378359	0,000105		
C. Total	39	0,08611122			

Coefficiente de variación (%): 6,75

Anexo 92. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico PSII de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 60 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,07163551	0,023879	272,3004	<,0001*
Error	36	0,00315690	0,000088		
C. Total	39	0,07479241			

Coefficiente de variación (%): 3,60

Anexo 93. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos al inicio.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	2,694922	0,898307	1,2519	0,3054
Error	36	25,832209	0,717561		
C. Total	39	28,527131			

Coefficiente de variación (%): 3,46

Anexo 94. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 15 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	1053,4792	351,160	509,1091	<,0001*
Error	36	24,8311	0,690		
C. Total	39	1078,3104			

Coefficiente de variación (%): 3,08

Anexo 95. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 30 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	226,21531	75,4051	19,6811	<,0001*
Error	36	137,92868	3,8314		
C. Total	39	364,14399			

Coefficiente de variación (%): 3,57

Anexo 96. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 45 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	50,15803	16,7193	9,2519	0,0001*
Error	36	65,05686	1,8071		
C. Total	39	115,21489			

Coefficiente de variación (%): 5,82

Anexo 97. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico ETR de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 60 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	1224,7321	408,244	185,3988	<,0001*
Error	36	79,2712	2,202		
C. Total	39	1304,0033			

Coefficiente de variación (%): 4,66

Anexo 98. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos al inicio.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,00878284	0,002928	21,6099	<,0001*
Error	36	0,00487713	0,000135		
C. Total	39	0,01365997			

Coefficiente de variación (%): 1,072

Anexo 99. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 15 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,91599379	0,305331	601,7959	<,0001*
Error	36	0,01826521	0,000507		
C. Total	39	0,93425900			

Coefficiente de variación (%): 3,16

Anexo 100. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 30 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	1,1106707	0,370224	168,2226	<,0001*
Error	36	0,0792286	0,002201		
C. Total	39	1,1898994			

Coefficiente de variación (%): 2,54

Anexo 101. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 45 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	3,4518104	1,15060	550,8145	<,0001*
Error	36	0,0752009	0,00209		
C. Total	39	3,5270112			

Coefficiente de variación (%): 5,53

Anexo 102. Tabla análisis de varianza parámetro fotoquímico NPQ de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos a los 60 días.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	2,0075201	0,669173	538,6502	<,0001*
Error	36	0,0447234	0,001242		
C. Total	39	2,0522434			

Coefficiente de variación (%): 4,98

Anexo 103. Tabla análisis de varianza actividad antioxidante en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	6	29627884	4937981	17781960	<,0001*
Error	9	2,49926476	0,277696		
C.Total	15	29627887			

Coefficiente de variación (%): 0,0054

Anexo 104. Tabla análisis de varianza actividad antioxidante en raíz de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	6	5059860,2	843310	1202507	<,0001*
Error	9	6,3	0,701293		
C.Total	15	5059866,5			

Coefficiente de variación (%): 0,022

Anexo 105. Tabla análisis de varianza actividad antioxidante en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	6	9754292,9	1625715	2054450	<,0001*
Error	9	7,1	0,791314		
C. Total	15	9754300,1			

Coefficiente de variación (%): 0,0104

Anexo 106. Tabla análisis de varianza actividad antioxidante en raíz de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	6	13960333	2326722	4698376	<,0001*
Error	9	4,45696531	0,495218		
C. Total	15	13960338			

Coefficiente de variación (%): 0,019

Anexo 107. Tabla análisis de varianza actividad antioxidante en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	6	16987137	2831190	13607249	<,0001*
Error	9	1,87258318	0,208065		
C. Total	15	16987139			

Coefficiente de variación (%): 0,0063

Anexo 108. Tabla análisis de varianza actividad antioxidante en raíz de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	6	5732223,0	955370	2230449	<,0001*
Error	9	3,9	0,428331		
C. Total	15	5732226,8			

Coefficiente de variación (%): 0,012

Anexo 109. Tabla análisis de varianza contenido de azufre en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	0,13777069	0,017221	4,9407	0,0039*
Error	15	0,05228454	0,003486		
C. Total	23	0,19005523			

Coefficiente de variación (%): 5,51

Anexo 110. Tabla análisis de varianza contenido de azufre en raíces de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	0,66402028	0,083003	422,8695	<,0001*
Error	15	0,00294426	0,000196		
C. Total	23	0,66696455			

Coefficiente de variación (%): 1,76

Anexo 111. Tabla análisis de varianza contenido de azufre en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	0,03636279	0,004545	122,4509	<,0001*
Error	15	0,00055680	0,000037		
C. Total	23	0,03691958			

Coefficiente de variación (%): 0,52

Anexo 112. Tabla análisis de varianza contenido de azufre en raíces de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	0,05318635	0,006648	81,3146	<,0001*
Error	15	0,00122640	0,000082		
C. Total	23	0,05441275			

Coefficiente de variación (%): 1,15

Anexo 113. Tabla análisis de varianza contenido de azufre en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	0,12988808	0,016236	63,4017	<,0001*
Error	15	0,00384123	0,000256		
C. Total	23	0,13372930			

Coefficiente de variación (%): 1,72

Anexo 114. Tabla análisis de varianza contenido de azufre en raíces de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	0,00851477	0,001064	6,1188	0,0013*
Error	15	0,00260918	0,000174		
C. Total	23	0,01112395			

Coefficiente de variación (%): 1,54

Anexo 115. Tabla análisis de varianza contenido de fenoles en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	49904,551	6238,07	22454,90	<,0001*
Error	15	4,167	0,28		
C. Total	23	49908,718			

Coefficiente de variación (%): 0,29

Anexo 116. Tabla análisis de varianza contenido de fenoles en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	46668,516	5833,56	11327,81	<,0001*
Error	15	7,725	0,51		
C. Total	23	46676,240			

Coefficiente de variación (%): 0,39

Anexo 117. Tabla análisis de varianza contenido de fenoles en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	24281,517	3035,19	3354,793	<,0001*
Error	15	13,571	0,90		
C. Total	23	24295,088			

Coefficiente de variación (%): 0,75

Anexo 118. Tabla análisis de varianza contenido de fósforo en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	0,02782065	0,003478	81,8184	<,0001*
Error	15	0,00063756	0,000043		
C. Total	23	0,02845821			

Coefficiente de variación (%): 0,73

Anexo 119. Tabla análisis de varianza contenido de fósforo en raíces de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	0,20159799	0,025200	180,4418	<,0001*
Error	15	0,00209484	0,000140		
C. Total	23	0,20369283			

Coefficiente de variación (%): 1,16

Anexo 120. Tabla análisis de varianza contenido de fósforo en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	0,23902273	0,029878	83,7212	<,0001*
Error	15	0,00535310	0,000357		
C. Total	23	0,24437583			

Coefficiente de variación (%): 2,11

Anexo 121. Tabla análisis de varianza contenido de fósforo en raíces de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	0,27442988	0,034304	592,8043	<,0001*
Error	15	0,00086800	0,000058		
C. Total	23	0,27529788			

Coefficiente de variación (%): 0,87

Anexo 122. Tabla análisis de varianza contenido de fósforo en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	0,06088689	0,007611	192,9399	<,0001*
Error	15	0,00059170	0,000039		
C. Total	23	0,06147859			

Coefficiente de variación (%): 0,85

Anexo 123. Tabla análisis de varianza contenido de fósforo en raíces de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	0,04433642	0,005542	100,4084	<,0001*
Error	15	0,00082793	0,000055		
C. Total	23	0,04516435			

Coefficiente de variación (%): 0,84

Anexo 124. Tabla análisis de varianza contenido de calcio en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	3,1638022	1,05460	205,2771	<,0001*
Error	8	0,0410996	0,00514		
C. Total	11	3,2049018			

Coefficiente de variación (%): 1,50

Anexo 125. Tabla análisis de varianza contenido de calcio en raíces de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	2,3775462	0,792515	130,6219	<,0001*
Error	8	0,0485380	0,006067		
C. Total	11	2,4260842			

Coefficiente de variación (%): 4,35

Anexo 126. Tabla análisis de varianza contenido de aluminio en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	74747,596	24915,9	791,2375	<,0001*
Error	8	251,918	31,5		
C. Total	11	74999,514			

Coefficiente de variación (%): 0,92

Anexo 127. Tabla análisis de varianza contenido de aluminio en raíces de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	4317546,2	1439182	34606,89	<,0001*
Error	8	332,7	42		
C. Total	11	4317878,9			

Coefficiente de variación (%): 0,93

Anexo 128. Tabla análisis de varianza contenido de calcio en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	5,7226669	1,90756	130,0359	<,0001*
Error	8	0,1173556	0,01467		
C. Total	11	5,8400225			

Coefficiente de variación (%): 1,63

Anexo 129. Tabla análisis de varianza contenido de calcio en raíces de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,11506159	0,038354	16,5311	0,0009*
Error	8	0,01856087	0,002320		
C. Total	11	0,13362246			

Coefficiente de variación (%): 2,17

Anexo 130. Tabla análisis de varianza contenido de aluminio en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	19466,105	6488,70	24,6215	0,0002*
Error	8	2108,303	263,54		
C. Total	11	21574,408			

Coefficiente de variación (%): 4,36

Anexo 131. Tabla análisis de varianza contenido de aluminio en raíz de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	571200,63	190400	178,5221	<,0001*
Error	8	8532,29	1067		
C. Total	11	579732,92			

Coefficiente de variación (%): 4,58

Anexo 132. Tabla análisis de varianza contenido de calcio en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,74491827	0,248306	22,9544	0,0003*
Error	8	0,08653903	0,010817		
C. Total	11	0,83145730			

Coefficiente de variación (%): 1,99

Anexo 133. Tabla análisis de varianza contenido de calcio en hojas de raíz de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	0,54351472	0,181172	58,7288	<,0001*
Error	8	0,02467906	0,003085		
C. Total	11	0,56819378			

Coefficiente de variación (%): 7,16

Anexo 134. Tabla análisis de varianza contenido de aluminio en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	437894,29	145965	13351,57	<,0001*
Error	8	87,46	11		
C. Total	11	437981,75			

Coefficiente de variación (%): 0,61

Anexo 135. Tabla análisis de varianza contenido de aluminio en raíz de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	3	950277,22	316759	8899,320	<,0001*
Error	8	284,75	36		
C. Total	11	950561,97			

Coefficiente de variación (%): 0,82

Anexo 136. Tabla análisis de varianza peroxidación lipídica en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	2827,5536	353,444	1270,972	<,0001*
Error	15	4,1713	0,278		
C. Total	23	2831,7250			

Coefficiente de variación (%): 1,36

Anexo 137. Tabla análisis de varianza peroxidación lipídica en raíces de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	1841,9710	230,246	1463,341	<,0001*
Error	15	2,3601	0,157		
C. Total	23	1844,3312			

Coefficiente de variación (%): 0,82

Anexo 138. Tabla análisis de varianza peroxidación lipídica en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	1972,3571	246,545	1314,010	<,0001*
Error	15	2,8144	0,188		
C. Total	23	1975,1715			

Coefficiente de variación (%): 1,022

Anexo 139. Tabla análisis de varianza peroxidación lipídica en raíces de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	2940,6207	367,578	1642,361	<,0001*
Error	15	3,3572	0,224		
C. Total	23	2943,9778			

Coefficiente de variación (%): 0,82

Anexo 140. Tabla análisis de varianza peroxidación lipídica en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	24386,952	3048,37	17322,18	<,0001*
Error	15	2,640	0,18		
C. Total	23	24389,592			

Coefficiente de variación (%): 0,49

Anexo 141. Tabla análisis de varianza peroxidación lipídica en raíces de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	8	2930,0203	366,253	2184,818	<,0001*
Error	15	2,5145	0,168		
C. Total	23	2932,5348			

Coefficiente de variación (%): 0,64

Anexo 142. Tabla análisis de varianza contenido de Carotenoides en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Bluegold, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	5	0,00109020	0,000218	27,3868	0,0005*
Error	6	0,00004777	7,961e-6		
C. Total	11	0,00113797			

Coefficiente de variación (%): 2,67

Anexo 143. Tabla análisis de varianza contenido de Carotenoides en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Brigitta, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	5	0,00267292	0,000535	68,4765	<,0001*
Error	6	0,00004684	7,807e-6		
C. Total	11	0,00271976			

Coefficiente de variación (%): 2,25

Anexo 144. Tabla análisis de varianza contenido de Carotenoides en hojas de plantas de arándano (*V. corymbosum* L.) cultivar Legacy, establecidas en suelo Andisol con alta saturación de aluminio. Comparación entre tratamientos.

Fuente	Grados libertad	Suma de cuadrados	Cuadrados medios	Valor F	Probabilidad
Modelo	5	0,00765280	0,001531	82,0817	<,0001*
Error	6	0,00011188	0,000019		
C. Total	11	0,00776468			

Coefficiente de variación (%): 3,40