

UNIVERSIDAD AUSTRAL DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA DE AGRONOMIA

Estudio de la respuesta fitotóxica a diferentes concentraciones de aluminio por parte de cinco cultivares y cinco líneas de ballica inglesa (*Lolium perenne* L)

Tesis presentada como parte de los requisitos para optar al grado de Licenciado en Agronomía.

Carlos Alberto Soto Alvarez

VALDIVIA – CHILE

2007

PROFESOR PATROCINANTE:

Dante Pinochet T.

Ing. Agr., M. Sc., Ph. D.

PROFESOR COPATROCINANTE:

Oscar Balocchi L.

Ing. Agr., M. Sc., Ph. D.

PROFESOR INFORMANTE:

Ignacio López C.

Ing. Agr., Ph. D.

Agradecimientos

Dios mío, en estos años me has demostrado tu amor de muchas maneras, lo cual se ha resumido en el logro de esta meta. Me sacaste del abismo profundo para levantarme y volver a tener esperanza. Siempre has sido fiel y nunca cambiarás. Todo lo que tengo, proviene de ti y te pertenece. Gracias por tu fortaleza.

Moisés, padre mío, como hombre honesto, trabajador y dedicado a nuestra familia, mereces que se te reconozca en este logro alcanzado, ya que tu esfuerzo ha permitido que obtenga los medios para tener esta profesión, la cual será ejercida con las mismas ganas y entrega con la que me enseñaste a triunfar en la vida, gracias por tu constante apoyo, oraciones, consejos y los valores que me has dado.

Noemí, madre mía, gracias por tus constantes oraciones y la capacidad para apoyarme por todos estos años, todo lo que me has enseñado me ha servido para alcanzar esta meta y me servirá para alcanzar las que quedan por delante. Alégrate porque este triunfo es tuyo también.

Francisco, Hijo mío, tu existencia me dio todos los días la motivación para no dejarme vencer por las pruebas. Gracias por tu amistad y por aguantar mis bromas, espero que seas mi amigo por siempre.

Daniel, mi único hermano, gracias por el gran apoyo que me has dado a pesar de estar en un país tan lejano. Tu ejemplo de esfuerzo me ha dado ganas de vivir nuevamente.

INDICE DE MATERIAS

Capítulo		Página
1	INTRODUCCIÓN	1
2	REVISION BIBLIOGRAFICA	3
2.1	Acidez del suelo	3
2.1.1	Acidez activa	3
2.1.2	Acidez intercambiable	4
2.1.3	Acidez residual	4
2.2	El aluminio	5
2.2.1	Aluminio intercambiable	6
2.2.2	Especies de aluminio en la solución del suelo	6
2.3	Toxicidad del aluminio en las plantas	8
2.3.1	Efectos generales del aluminio en las plantas	8
2.3.1.1	Síntomas de la toxicidad de aluminio en la planta	8
2.3.2	Fitotoxicidad por aluminio en las raíces	9
2.3.3	Fitotoxicidad de aluminio en tallos y hojas	10
2.4	Efectos fisiológicos del aluminio en las plantas	11
2.4.1	Fitotoxicidad de aluminio en las membranas de la planta	11
2.4.2	Efecto del aluminio sobre la división celular	12
2.4.3	Efectos fisiológicos sobre la clorofila y la fotosíntesis	12
2.4.4	Efecto del aluminio sobre la respiración.	12
2.5	Mecanismos de adaptación al estrés del aluminio	13
2.5.1	Tolerancia al aluminio en diferentes plantas	13
2.5.1.1	Cambios de pH en la zona de la raíz	14
2.5.1.2	Cambios en los mecanismos de absorción y transporte del aluminio en la planta	14

Capítulo	Página	
2.5.1.3	Producción de ácidos orgánicos	16
2.5.1.4	Nutrición del calcio de las plantas	17
2.5.1.5	Nutrición del fósforo de las plantas	18
2.5.1.6	Nutrición del nitrógeno de las plantas	19
2.5.2	Tolerancia versus exclusión	19
2.5.3	Control genético de la tolerancia al aluminio	19
2.6	Efectos benéficos del aluminio	20
2.7	Relación aluminio en la cadena planta – animal – hombre	21
3	MATERIAL Y METODO	23
3.1	Ubicación	23
3.2	Control de las condiciones ambientales	23
3.2.1	Temperatura	23
3.2.2	Humedad relativa	23
3.2.3	Luz	24
3.3	Cultivares y Líneas	24
3.4	Material utilizado	24
3.4.1	Preparación y montaje de las Jarras Leonard	24
3.4.1.1	Lavado de las jarras	24
3.4.1.2	Lavado del sustrato	24
3.4.2	Montaje y llenado de las jarras	25
3.5	Pregerminación y trasplante de las semillas	25
3.6	Homogeneización de las jarras	25
3.7	Solución nutritiva	26
3.7.1	Aplicación de la solución nutritiva	26
3.8	Tratamientos	27
3.9	Variables evaluadas	27

Capítulo		Página
3.10	Cosecha del material vegetal	28
3.10.1	Determinación de aluminio en el material vegetal	28
3.11	Diseño experimental y análisis estadístico	28
4	PRESENTACION Y DISCUCION DE RESULTADOS	29
4.1	Contaminación con aluminio en el material experimental	29
4.1.1	Contaminación del sustrato	29
4.1.2	Solución nutritiva	30
4.1.3	Equipo utilizado para la medición	30
4.2	Problemas metodológicos encontrados	30
4.2.1	Establecimiento de las plántulas versus inicio de los tratamientos	30
4.2.2	Problemas de conducción de la mecha	31
4.3	Análisis de las variables evaluadas	31
4.3.1	Producción de materia seca (MS) de los materiales vegetales de <i>Lolium perenne</i> L. evaluados	31
4.3.1.1	Producción de materia seca parte radical	32
4.3.1.2	Producción de materia seca parte aérea	34
4.3.1.3	Producción de materia seca total	39
4.3.1.4	Relación parte aérea parte radical (A/R)	42
4.3.2	Concentración de aluminio de los materiales vegetales de <i>Lolium perenne</i> L evaluados	43
4.3.2.1	Concentración de aluminio radical	45
4.3.2.2	Concentración de aluminio aéreo	48
4.3.2.3	Mecanismos propuestos de tolerancia al Aluminio	50
4.3.3	Absorción de aluminio de los materiales vegetales de <i>Lolium perenne</i> L. evaluados	54
4.3.3.1	Absorción de aluminio radical de los materiales vegetales evaluados	54

Capítulo		Página
4.3.3.2	Absorción de aluminio aéreo de los materiales vegetales evaluados.	56
4.4	Relación materia seca producida y la concentración de Al de los distintos materiales vegetales evaluados	58
4.5	Comportamiento general de los materiales vegetales frente al Aluminio en solución.	63
5	CONCLUSIONES	66
6	RESUMEN	67
	SUMMARY	68
7	BIBLIOGRAFIA	69
	ANEXOS	76

INDICE DE CUADROS

Cuadro		Página
1	Composición de la solución nutritiva	26
2	Cultivares y Líneas de <i>Lolium perenne</i> L. utilizadas en el ensayo con distintos nivel de aluminio en solución.	27
3	Producción de materia seca radical de los distintos materiales vegetales evaluados	35
4	Producción de materia seca aérea de los distintos materiales vegetales evaluados	40
5	Producción de materia seca total de los distintos materiales vegetales evaluados	41
6	Relación Materia seca Aérea v/s Materia seca Radical en tres dosis de aluminio para los 10 cultivares evaluados	43
7	Concentración de aluminio radical de los distintos materiales vegetales evaluados	46
8	Concentración de aluminio aéreo de los distintos materiales vegetales evaluados	49
9	Absorción de aluminio radical de los distintos materiales vegetales evaluados	55
10	Absorción de aluminio aéreo de los distintos materiales vegetales evaluados	57
11	Diferencia de sensibilidad a la toxicidad de Al en solución de los distintos materiales vegetales evaluados.	64

INDICE DE GRAFICOS

Gráficos		Página
1	Relación materia seca aérea v/s concentración de Al aéreo de diez materiales vegetales evaluados	60
2	Relación materia seca radical v/s concentración de Al radical de diez materiales vegetales cultivares evaluados.	60
3	Relación materia seca aérea v/s concentración de Al aéreo de los materiales vegetales sensibles y tolerantes	61
4	Relación materia seca radical v/s concentración de Al radical de los materiales vegetales sensibles y tolerantes.	61
5	Relación materia seca aérea versus concentración aérea del material tolerante.	62
6	Relación materia seca aérea versus concentración aérea de los materiales vegetales sensibles.	62

INDICE DE FIGURAS

Figura		Página
1	Distribución relativa de las especies solubles de aluminio como función del pH.	7
2	Transecto de una raíz de maíz mostrando las vías simplásmicas (A) y apoplásmicas (B) del transporte de iones a través de la raíz.	16

INDICE DE ANEXOS

Anexo		Página
1	Registro de temperatura máxima (max.), mínima (min.) y humedad relativa (HR) de la cámara de crecimiento durante es periodo del ensayo.	77
2	Resultados del aluminio intercambiable presente en el sustrato (cuarzo)	79
3	Promedio, desviación estándar (DS) y varianza (V) para el parámetro producción de materia seca radical para los distintos cultivares evaluadas.	80
4	Promedio, desviación estándar (DS) y varianza (V) para el parámetro producción de materia seca aérea para los distintos cultivares evaluadas.	81
5	Promedio, desviación estándar (DS) y varianza (V) para el parámetro concentración de aluminio radical para los distintos cultivares evaluadas.	83
6	Promedio, desviación estándar (DS) y varianza (V) para el parámetro concentración de aluminio aéreo para los distintos cultivares evaluadas.	84
7	Resultados del experimento realizado a los distintos materiales vegetales evaluados en la parte aérea, materia seca aérea (MSA), concentración de Al aérea (CAA) y absorción de Al aérea (Abs. AA.).	86
8	Resultados del experimento realizado a los distintos materiales vegetales evaluados en la parte radical, materia seca radical (MSR), concentración de Al radical (CAR) y absorción de Al radical (Abs. AR.).	92

1 INTRODUCCION

El sur de Chile presenta un proceso de acidificación mayor de los suelos respecto a otras regiones del país, lo que se distingue como un fenómeno natural producto de las altas precipitaciones. Esto facilita la lixiviación de las bases de intercambio, que pasan a ser reemplazadas por hidrógeno, lo cual genera condiciones ideales para la solubilización de aluminio, el que se transfiere a la solución del suelo. La intervención humana favorece el incremento de este proceso al hacer uso de fertilizantes de reacción ácida, especialmente fertilizantes nitrogenados y la extracción sin reposición de las bases de intercambio, generando en estos suelos niveles de acidez que usualmente se sitúan entre los valores de pH al agua de 5,0 y 6,0 manteniendo un valor promedio de 5,6. Bajo esta condición ácida del suelo, es imprescindible analizar el comportamiento de las plantas, para entender los mecanismos utilizados por determinadas especies en su adaptación a este medio, entre los cuales se encuentran la tolerancia interna al aluminio absorbido desde la solución del suelo y la exclusión externa que realizan los vegetales del aluminio presente en la solución del suelo.

Las praderas, alternativa de bajo costo en la actividad pecuaria, constituyen un importante recurso en el desarrollo tecnológico, y se requiere de la utilización de especies de alto valor forrajero, con la capacidad de adaptarse a condiciones adversas, como es el caso de *Lolium perenne* L. (ballica perenne), que en el sur de Chile es la especie pratense más sembrada. Los principales proveedores de estos nuevos materiales vegetales comerciales son Europa y Nueva Zelandia, por lo que genera la necesidad de evaluar su comportamiento productivo bajo las condiciones de acidez imperantes en los suelos de esta zona.

Dado lo anteriormente expuesto se plantea como hipótesis que cultivares de *Lolium perenne*. presentan mecanismos de adaptación diferentes ante la presencia de Al tóxico en la solución de suelo. Para poder evaluar la hipótesis surgen los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar el efecto tóxico del aluminio aplicado en solución sobre la cantidad de materia seca producida, tanto en su parte radical como también en su parte aérea.
- Inferir el mecanismo estratégico de adaptación utilizados frente a la toxicidad de aluminio, midiendo la concentración de aluminio en la raíz y en la parte aérea.
- Clasificar las variedades y líneas a evaluar de acuerdo a su tolerancia o sensibilidad relativa al aluminio fitotóxico e inferir los mecanismos más usuales en la adaptación al aluminio fitotóxico.

2 REVISION BIBLIOGRAFICA

2.1 Acidez del suelo

La acidez del suelo se relaciona directamente con la presencia del ión H^+ , lo cual se expresa como pH y representa el efecto dominante de los iones de hidrógeno en la solución del suelo (ROWELL, 1992). Se debe considerar que el término involucra conceptos diferentes en cuanto a su medición y la actividad iónica presente en los suelos (BOHN *et al.*, 1993). Se ha hecho necesario distinguir entre los tres tipos de acidez existentes en el suelo, que en sumatoria conforman la acidez total de un suelo, como es la acidez activa, la acidez intercambiable y la acidez residual.

2.1.1 Acidez activa. Cuantifica la actividad de los iones H^+ concentrados en la solución del suelo, la cual se ha logrado evaluar realizando una medición potenciométrica con respecto a un electrodo (BOHN *et al.*, 1993). Expresa la cantidad de iones de H^+ que existen en el medio y que procede de la disociación de las moléculas de valencia ácida; se simboliza por el pH o el menos logaritmo de la concentración de iones H^+ . La escala de pH va desde 1 a 14, los pH ácidos se sitúan entre 1 y 7, la neutralidad a pH 7 y los pH alcalinos de 7 a 14. El pH del suelo es considerado un indicador útil de la presencia de Al^{+3} e H^+ intercambiables. (ROWELL, 1992).

Aunque la acidez activa es muy pequeña comparada con las formas de acidez intercambiable y acidez residual, su relevancia es esencial, ya que la solución del suelo es el medio ambiente de las raíces de las plantas y los microorganismos (BRADY y WEIL, 1999).

2.1.2 Acidez intercambiable Este tipo de acidez que puede ser desplazada desde el complejo de intercambio a través de una sal, corresponde a la acidez activa más todos los iones H^+ que tienen la capacidad de ser intercambiados por otros cationes desde el complejo de intercambio del suelo (ROWELL, 1996). Este tipo de acidez está asociado con la presencia de iones aluminio e hidrogeno intercambiables, usualmente en grandes cantidades en muchos suelos ácidos. Estos iones pueden ser liberados a la solución del suelo por intercambio catiónico, por ello se utiliza en su determinación la sal no tamponada KCl en concentración 1M (BRADY y WEIL, 1999).

2.1.3 Acidez residual. Corresponde a la sumatoria entre la acidez activa, la acidez intercambiable y la acidez producida por todas aquellas otras fuentes del suelo que no son intercambiables, tales como precipitados, reacciones de iones complejos, o adsorciones específicas de iones, iones de hidroxialuminio o iones de hidrógeno y aluminio que están retenidos por la materia orgánica y arcillas silicatadas en formas no intercambiables. En la medida que el pH aumenta, el hidrógeno y el aluminio enlazado son liberados y por lo tanto dejando libres sitios negativos de intercambio catiónico e incrementando la capacidad de intercambio catiónico (BRADY, 1999). Usualmente es considerada en la neutralización de la acidez de un suelo realizada a través del encalado y contribuye al poder tampón de un suelo (ROWELL, 1996; BRADY y WEIL, 1999).

La acidez residual es mucho mayor que acidez activa y acidez intercambiable. Esta puede ser 1000 veces mayor que la acidez activa en un suelo arenoso y 50.000 o incluso 100.000 veces mayor en un suelo arcilloso y/o alto en materia orgánica (BRADY y WEIL, 1999).

2.2 El aluminio

Dentro de los principales constituyentes de la corteza terrestre, figura con un alto porcentaje (mayor a 15%) la presencia de Al_2O_3 , (BOHN *et al.*, 1993). Según esto, el aluminio es el tercero en abundancia después del oxígeno y sílice, alcanzando el 8,1% del total (LOUE, 1988), lo que le permite ser considerado un constituyente importante de la materia mineral del suelo. No obstante, su presencia puede manifestarse en distintas fracciones, entre las que destacan: la fracción en solución, la fracción intercambiable, la fracción no intercambiable y la fracción en los minerales primarios y secundarios del suelo (BOHN *et al.*, 1993). Sin embargo, a medida que aumenta la acidez en los suelos, se liberan a la solución formas fitotóxicas de aluminio (principalmente como Al^{+3}), que al ser relacionada con la sensibilidad a concentraciones micromolares de aluminio, presente en la mayoría de las plantas, hace de esta toxicidad como el mayor factor limitante para la productividad de las plantas en los suelos ácidos (KINRAIDE, 1991).

Por esta razón, existen diversas formas estructurales en las que se encuentra presente el Al (principalmente como octaedro de Al) y en gran parte de los compuestos de minerales precipitados. Este grado de abundancia hace posible que el Al se encuentre en las distintas fases funcionales del suelo. Es decir, la solución del suelo, las fases lábiles dominadas por la adsorción intercambiable y los precipitados lábiles, y las fases no lábiles dominadas por las fracciones de Al no intercambiable, los precipitados no lábiles y el Al estructural del suelo. Por esta razón, la presencia de Al en solución es dominada por el pH del suelo (disolución de precipitados lábiles) y por los mecanismos de adsorción del suelo (tipo y cantidad de arcillas) (RADIC, 2001 y BADE, 2003).

2.2.1 Aluminio intercambiable. Es aquel que se ha logrado extraer con una solución neutra no tamponada, siendo la más usada para este caso el KCl 1M (ROWELL, 1996). El porcentaje de Al intercambiable en el suelo se correlaciona con el pH y la inhibición del crecimiento de las raíces de muchas especies de plantas, la cual puede no ser tan estrecha respecto a las concentraciones, pero sí a las especies de aluminio en solución de suelo que determinan la fitotoxicidad del aluminio hacia las raíces (MARSCHNER, 1995). No obstante, hay divergencias respecto al efecto real que produce la acidez y la toxicidad de aluminio, ya que por una parte existe el problema de la toxicidad de H^+ "per se" y por otra, la especie de aluminio presente en la solución del suelo (ROWELL, 1992).

2.2.2 Especies de aluminio en la solución del suelo. El comportamiento químico de los suelos ácidos se encuentra ligado de manera íntima con las propiedades del aluminio en solución (BOHN *et al.*, 1993). La disociación de las moléculas de agua de la esfera de hidratación del aluminio no ocurre al mismo pH. El H^+ se separa progresivamente en la medida que el pH sube, de esta manera en la medida que el pH cambia, la proporción de especies individuales de aluminio en solución también cambia (MARSCHNER, 1995).

La variabilidad sufrida por las distintas especies de Al respecto al pH, se configura de la siguiente manera: a valores de pH bajo 4,7 predomina el Al^{+3} (especie fitotóxica principal). Entre los pH 4,7 y 6,5 la especie predominante es $Al(OH)_2^+$ (usualmente no fitotóxica), entre un valor de pH de 6,5 a 8,0 la especie predominante es $Al(OH)_3^0$ (usualmente precipitada, como gibsita). Sobre pH 7,5 predomina la especie $Al(OH)_4^-$ (aluminato, no fitotóxica). Además, se ha indicado que entre un pH 4,7 a 7,5 la solubilidad del aluminio es baja, por ello éste es el rango de pH donde el aluminio es precipitado, y permanece como $Al(OH)_3^0$ o en las otras formas monoméricas no fitotóxicas de Al. Bajo pH 4,7 y

sobre 7,5 la concentración de Al en solución se incrementa rápidamente (KINRAIDE, 1991 y SPARKS, 1995).

El aluminio trivalente $\text{Al}(\text{H}_2\text{O})_6^{+3}$ comúnmente referido como Al^{+3} , omitiendo las moléculas de agua de la esfera de solvatación, es la especie iónica en solución que exhibiría la mayor toxicidad para las plantas bajo las condiciones de suelo ácido, comparado con otras especies iónicas de Al como los hidroxialuminios mononucleares (BOHN *et al.*, 1993).

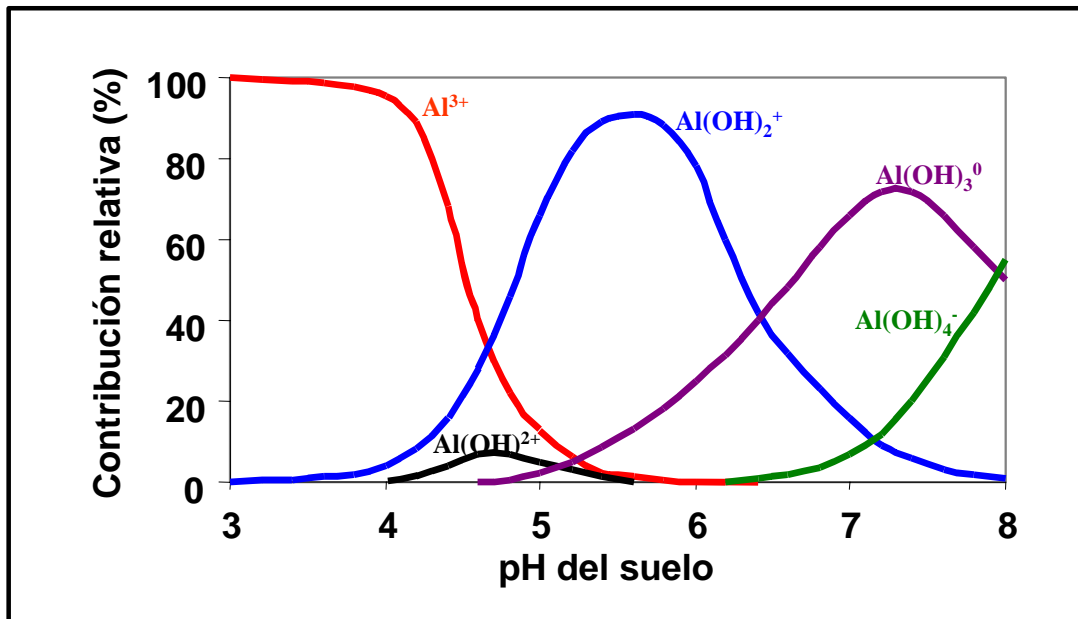


FIGURA 1 Distribución relativa de las especies solubles de aluminio como función del pH.

Fuente: KINRAIDE (1991).

Los resultados contradictorios en relación con la relativa fitotoxicidad de las diferentes especies de aluminio, se explican por varias razones, la principal es que no es posible variar la distribución relativa de las especies de aluminio sin variar el pH, y viceversa. Normalmente, se interpretan resultados

exclusivamente en términos de especies de aluminio mientras que la posible influencia de variaciones de H^+ no es considerada (MARSCHNER, 1995).

2.3 Toxicidad del aluminio en las plantas.

La toxicidad por aluminio es probablemente el factor más importante que limita el crecimiento de las plantas (TISDALE *et al.*, 1993) y es particularmente serio en suelos fuertemente ácidos que son difíciles de encalar (FOY *et al.*, 1978). En todos los suelos ácidos bajo pH 5, pero puede ocurrir a niveles de pH mayores (entre 5,0 y 6,2) dependiendo de la especie vegetal. (FOY *et al.*, 1978).

2.3.1 Efectos generales del aluminio en las plantas. El aluminio genera respuestas asociadas a la disminución en el crecimiento de las raíces, no obstante si la planta se expone a concentraciones más altas se manifiestan sintomatologías que usualmente se confunden con aquellas generadas por deficiencias de nutrientes en el suelo. (DE LA FUENTE y HERRERA, 1999). Pero como aún no se establecen completamente los mecanismos de toxicidad, dado a los variados síntomas expresados como respuesta fisiológica como resultado de la compleja expresión de la fitotoxicidad de Al en las plantas, sólo se puede indicar que, en general, los suelos fuertemente ácidos y tóxicos al aluminio, se produce una reducción significativa en la profundidad de exploración de las raíces, con la consiguientes susceptibilidad a la sequía y disminuyendo la eficiencia de uso de los nutrientes del suelo (MARSCHNER, 1993, citado por PONCE, 1999).

2.3.1.1 Síntomas de la toxicidad de aluminio en la planta. No resulta una tarea fácil el lograr identificar los síntomas de lesión por causa del aluminio. FOY *et al.* (1978), señala que en algunas plantas, los síntomas foliares se parecen a aquellos de la deficiencia del fósforo (impidiendo el crecimiento global de la

planta, madurez tardía, tallos y hojas de color verde oscuro, hojas púrpuras, amarillas y muerte de las puntas de las hojas). En otra, la toxicidad del aluminio aparece como una deficiencia de calcio (rizado o curvado de las hojas jóvenes y colapso de los puntos de crecimiento o los pecíolos). Además, se ha descrito que las raíces dañadas por aluminio son característicamente gruesas y quebradizas, tanto las puntas de las raíces como las raíces laterales, y se vuelven de color café. Lo cual produce que el sistema radical se ramifique en muchas raíces laterales acortadas y sin estructuras finas, que resultan ineficientes para la absorción de agua y nutrientes. (FOY *et al.*, 1978).

2.3.2 Fitotoxicidad por aluminio en las raíces. La observación de plantas en condiciones de laboratorio permite detectar algunos síntomas de toxicidad por aluminio en un corto tiempo de exposición a este. La reducción del crecimiento de la raíz es el síntoma visible más rápido (DE LA FUENTE y HERRERA, 1999).

Lo que causa el efecto tóxico del aluminio en las raíces, se atribuye al desequilibrio provocado por este metal en el metabolismo de las plantas, ya que éste interfiere con la transferencia de iones y agua a través de las membranas celulares de las raíces (DE LA FUENTE y HERRERA, 1999). De esta forma, el blanco primario del aluminio sería la cofia radical (MARCHSNER, 1995).

El aluminio además induce algunos cambios morfológicos en las raíces, tales como, disminución en la turgencia de las células de la epidermis de la punta de la raíz, ocurrencia de pequeñas depresiones, destrucción de la epidermis y el exterior de las células de la corteza, roturas profundas en el interior de las células de la corteza (WAGATSUMA *et al.*, 1987b, citados por ROY *et al.*, 1988).

No obstante, la disminución de la elongación de raíces como respuesta fitotóxica al aluminio los efectos tóxicos del aluminio sobre la elongación radical son poco comprendidos y fuente de controversia en la literatura científica (DE LA FUENTE y HERRERA, 1999). Según, HUANG *et al.* (1993), cuando las regiones maduras o adultas de la raíz son expuestas a Al, la elongación radical no es significativamente afectada. Ello, se debería a diferencias genotípicas en el efecto del Al sobre la translocación del Ca^{2+} o, alternativamente, a que el aluminio reduciría la secreción de mucílagos producidos por las células periferales de la cofia (MARSCHNER, 1995). También puede deberse a un efecto de interacción entre ambos, así se ha indicado que el Al cambia la homeostasis del Ca^{2+} afectando funciones secretoras de las células de la cofia, y por eso se reduce la secreción de mucilago (MARSCHNER, 1995).

2.3.3 Fitotoxicidad de aluminio en tallos y hojas. En cultivos de arroz, café y cebada se ha demostrado que el efecto tóxico del aluminio provoca una disminución significativa del crecimiento de brotes (ROY *et al.*, 1988). De la misma manera existe clorosis, reducción del crecimiento y bordes enroscados de las hojas más jóvenes, en tanto que las hojas viejas se manifiesta una clorosis marginal, que progresa desde el centro hacia los bordes. En arroz se ha determinado que se provoca necrosis de tejido con concentraciones superiores a 1.000 ppm (ROY *et al.*, 1988).

En algunas plantas se han observado que los síntomas foliares se asemejan a la deficiencia de fósforo, como una reducción del crecimiento, hojas verde oscuro, madurez tardía, pardeamiento de los tallos y amarillamiento de las puntas de las hojas. En otras plantas se asemeja a la deficiencia de calcio, produciéndose el enrollamiento de las hojas jóvenes y el colapso de los puntos de crecimiento (FOY, 1978)

2.4 Efectos fisiológicos del aluminio en las plantas.

Muchas de las investigaciones fisiológicas sobre los mecanismos de la toxicidad de Al han involucrado una sola variedad por especie de planta, sin embargo, los efectos fisiológicos pueden ser muy variables dentro de la misma especie. En general, se ha demostrado que el aluminio interfiere en la división celular de las raíces, precipita el fósforo en formas menos disponibles en las células de la corteza de la raíz, disminuye la respiración de las raíces, interfiere con enzimas que gobiernan la disposición de los polisacáridos de la pared celular, aumenta la rigidez de la pared celular, interfiere con la absorción, transporte y uso de algunos nutrientes (Ca, Mg, P, K) y además de la captación de agua por las plantas (FOY *et al.*, 1978).

2.4.1 Fitotoxicidad de aluminio en las membranas de la planta. Un objetivo potencial para la acción del aluminio es la membrana plasmática que limita al exterior de las células radicales. Al aumentar la permeabilidad a los no electrolitos con la subsecuente disminución de la permeabilidad al agua y en forma parcial a la entrada de lípidos, los iones de aluminio pueden afectar la membrana (ROY *et al.*, 1988). El aluminio puede ligarse a la superficie externa de la membrana plasmática de las células corticales y rizodermales de la raíz, dañando de este modo las funciones de la membrana plasmática (TAYLOR, 1988, citado por MARSCHNER, 1995). Así, el aluminio podría causar fuga de potasio (K) desde el plasmalema, induciendo la infiltración pasiva del aluminio (ROY *et al.*, 1988). Según BENNET (1985), citado por ROY *et al.* (1988), sus experimentos no confirmarían al plasmalema como un sitio primario de acción del Al. El efecto sería sobre el aparato de Golgi, reduciendo el número de cisternas y de vesículas secretoras en la biosíntesis de nuevas membranas destinadas para la incorporación en los plasmalemas. Debido a esto, las fallas en el aparato de Golgi producirían un daño en el plasmalema.

2.4.2 Efecto del aluminio sobre la división celular. Según los resultados obtenidos en experimentos realizados por HORST, 1983, citado por ROY *et al.* (1988), se ha determinado que la división celular, a nivel de las raíces secundarias, manifiesta una drástica reducción luego de cinco horas de exposición a aluminio y que esta se inhibe completamente luego de 10 horas, para revertir el efecto después de 18 horas. La inhibición sería debido a una acumulación de Al en la punta de la raíz y la recuperación posterior, incluso bajo aplicaciones continuas de Al, se considera como un mecanismo de adaptación.

Asimismo, KOCIK (1983) citado por ROY *et al.* (1988), asegura que el sulfato de aluminio en altas concentraciones induce una disminución significativa de la actividad mitótica, pudiendo ésta llegar a ser irreversible. También, se registraron aberraciones cromosomales, micronúcleos y células binucleadas. Varios estudios indican que los ácidos nucleicos pueden proporcionar muchos sitios de adsorción para el Al, trastornando la replicación del ADN (SAMPSON, 1965, citado por ROY *et al.*, 1988).

2.4.3 Efectos fisiológicos sobre la clorofila y la fotosíntesis. Los estudios realizados han demostrado que otro efecto tóxico del aluminio he generado una disminución en el contenido de clorofila en *Anabaena cylindrica*, arroz y alforfón (PETTERSSON,1985, citado por ROY *et al.*, 1988). Este efecto evidenció adicionalmente en *Anabaena* cambios estructurales como la acumulación de gránulos de cianoficinas y degradación de tilacoides. En arroz, se demostró que la toxicidad por aluminio provocó una disminución en la relación entre clorofila A y B, en la fotosíntesis total y en la tasa fotosintética (SARKUNAN,1984, citado por ROY *et al.*, 1988).

2.4.4 Efecto del aluminio sobre la respiración. Al aumentar la concentración de aluminio, los resultados evidenciaron una disminución en la

tasa respiratoria, con una consiguiente reducción de los carbohidratos solubles y azúcares, los cuales conforman componentes utilizados en la respiración (SARKUNAN, 1984, citado por ROY *et al.*, 1988). Además, se reduciría la respiración en las células periferales de la cofia y en las células epidermales del ápice de la raíz, junto con inhibir inmediatamente la actividad metabólica de las células del ápice (BENNET, 1985, citado por ROY *et al.*, 1988).

2.5 Mecanismos de adaptación al estrés del aluminio.

Se considera como el factor más importante en la adaptación de las plantas a los suelos ácidos, a la tolerancia que estas poseen frente a la presencia de aluminio. La variabilidad genética ha generado diferencias dentro de una misma especie, dadas las particulares condiciones existentes en las diferentes regiones, cuyos suelos presentan distintos niveles de pH (MARSCHNER, 1995; FOY *et al.*, 1978).

2.5.1 Tolerancia al aluminio en diferentes plantas. En la actualidad, los mecanismos fisiológicos acerca de la toxicidad o tolerancia al aluminio representan materia de discusión, debido a que la expresión de estas respuestas puede ser muy distinta en diferentes especies y variedades de plantas y de la misma manera, pueden ser controlados por genes y vías bioquímicas diferentes. Las plantas tolerantes deben prevenir la absorción en exceso de aluminio o detoxificarse después de que el aluminio ha sido absorbido (FOY *et al.*, 1978). La suma de estos mecanismos individuales determinan los requerimientos agronómicos para mejorar los suelos ácidos (fertilizantes y particularmente enmiendas calcáreas) (MARSCHNER, 1995).

Dentro de los mecanismos de adaptación de las especies y variedades a la toxicidad del aluminio se encuentran: cambios de pH en la zona de la raíz

(rizosfera), cambios en los mecanismos de absorción y transporte del aluminio en la planta, producción de ácidos orgánicos, nutrición de calcio, del fósforo y del nitrógeno de las plantas. (MARSCHNER,1995; ROY *et al.*, 1988). Así, dentro de ciertos límites, las plantas pueden alterar sus ambientes para su propio beneficio o detrimento (FOY *et al.*, 1978).

2.5.1.1 Cambios de pH en la zona de la raíz. Las diferencias que se producen en la tolerancia de las plantas al aluminio, se puede relacionar con la habilidad de una planta para modificar el pH de la rizósfera. Es así, como estudios comparativos entre variedades sensibles y tolerantes a la toxicidad por aluminio de trigo y cebada, han arrojado como resultado valores de pH más ácidos en la rizósfera de aquellas consideradas sensibles, respecto a las tolerantes (MORTVEDT *et al.*, 1972). Al existir una mayor solubilidad por parte del aluminio en medios con pH ácido con la consiguiente toxicidad del mismo, al realizar un cambio de pH se podría explicar ciertos mecanismos de la tolerancia diferencial al aluminio entre variedades de una misma especie (MORTVEDT *et al.*, 1972).

2.5.1.2 Cambios en los mecanismos de absorción y transporte del aluminio en la planta. La entrada principal de los iones hacia la raíz ocurriría en los primeros centímetros del apice radical, que corresponde a una región de activo metabolismo, de mayor tasa de crecimiento y elongación, con mayor densidad de pelos radicales (DE WILLIGEN y VAN NOORDWIJCK, 1987, citado por PONCE, 1999). Los iones desde la solución del suelo ingresan a los tejidos radicales a través de los procesos de absorción pasiva (HORST, 1995). Aunque se ha logrado determinar que la raíz completa puede tener cantidades considerables de absorción y no sólo la zona del ápice radical (DE WILLIGEN y VAN NOORDWIJCK, 1987, citado por PONCE, 1999).

El intercambio catiónico entre la superficie y los espacios extracelulares, producido por los mecanismos pasivos al interior de la corteza de la raíz, es influido por la carga usualmente negativa en la superficie de las células de la corteza. Dado esto, para que las plantas puedan mantener la neutralidad eléctrica al absorber cationes, las raíces de las plantas liberan H^+ , disminuyendo el pH de la solución del suelo cerca de la superficie de las raíces. Estos procesos no son selectivos y ocurren fuera de la banda de Caspari y plasmalemas, las cuales son barreras a los mecanismos pasivos de absorción (HORST, 1995).

Por lo mismo, ensayos anteriores han demostrado que clones de alfalfa tolerantes al aluminio, presentaron concentraciones más bajas de aluminio en su parte aérea y más altas en las raíces, que la concentración de aluminio en aquellos clones sensibles a la toxicidad. Lo cual sugiere, que existe una reducción en la toxicidad de aluminio debido a una restricción del transporte desde las raíces hacia la parte aérea de las plantas (MORTVEDT et al, 1972). En la mayoría de las especies, la concentración de aluminio en las raíces y su inhabilidad a ser transportado hacia la parte aérea, pareciera ser un mecanismo común de adaptación a la fitotoxicidad de aluminio (FOY, 1988, citado por BENNET y BREEN, 1991).

No existe completa claridad respecto a los mecanismos de transporte del aluminio en las plantas. Las vías de transporte de los iones a través de las células corticales pueden ser simplásmicas o apoplásmicas, pero como el aluminio es un catión polivalente, puede seguir la vía apoplástica, aunque se han realizado mediciones de acumulación en el núcleo, lo que indica que algunos de los iones de aluminio usan también la vía simplástica (ROY *et al*, 1988). El aluminio ha sido localizado en las células meristemáticas en la mayoría de las plantas estudiadas, especialmente en el núcleo y en la pared celular. La utilización de esta vía simplástica es de mucha importancia, debido a

que la toxicidad por aluminio ocurriría más rápidamente por la mayor interacción del aluminio y los componentes celulares (KOCHIAN, 1995).

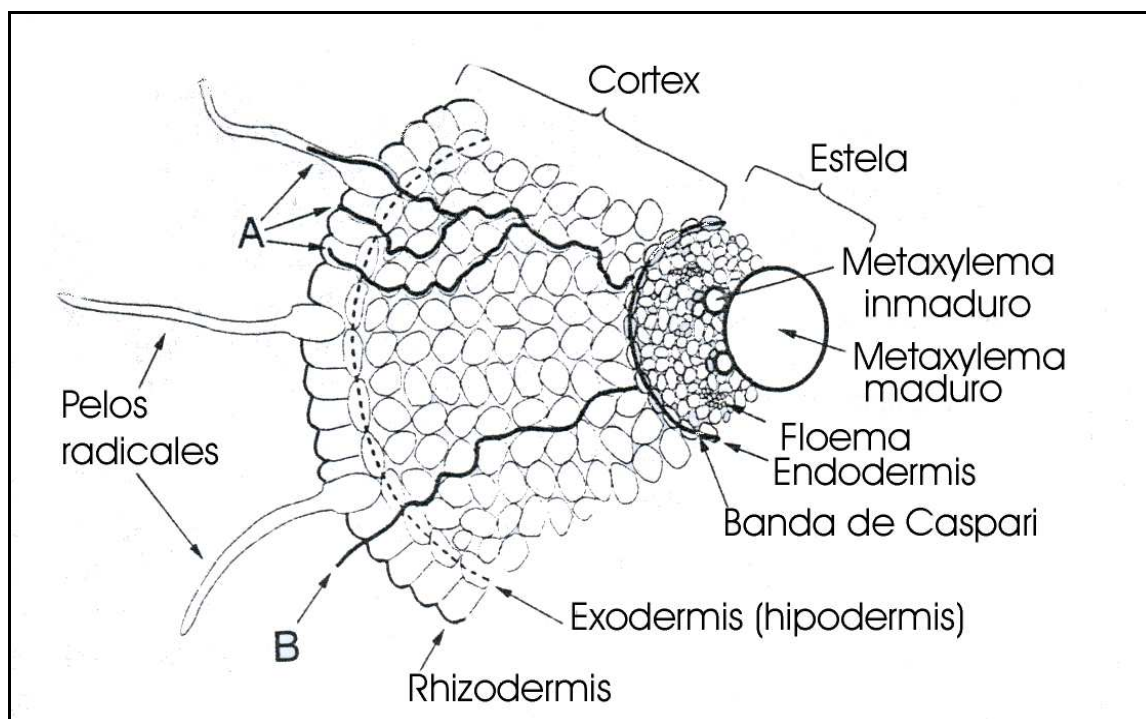


FIGURA 2 Transecto de una raíz de maíz mostrando las vías simplásmicas (A) y apoplásmicas (B) del transporte de iones a través de la raíz.

FUENTE: MARSCHNER (1995).

2.5.1.3 Producción de ácidos orgánicos. La complejación del aluminio en la materia orgánica en forma de quelatos, es uno de los mecanismos utilizados para neutralizar el efecto tóxico del aluminio, con la finalidad de formar complejos solubles e insolubles de Al que no serían tóxicos. Dicha capacidad se relaciona directamente con la posición relativa de los grupos OH/COOH sobre las cadenas de los carbonos principales, favoreciendo la formación de estructuras estables de cinco o seis uniones formadoras de anillos (HUE *et al.*,

1986; ROY *et al.*, 1988). Según ZHANG y TAYLOR (1989) y MIYAZAWA *et al.* (1992), la capacidad de detoxificación de los ácidos orgánicos secretados por la planta disminuye en el siguiente orden: EDTA > cítrico > tartárico > oxálico > húmico > malónico > salicílico > succínico. Sin embargo MARSCHNER (1995), encontró una misma respuesta entre el ácido cítrico y el ácido oxálico.

En las hojas de plantas de té se han encontrado complejos formados entre estos ácidos y el aluminio, donde la tolerancia al aluminio se atribuye a la quelación de aluminio por ácidos orgánicos y fenoles, inhabilitándolas al en las vacuolas. Además, se ha determinado en variedades tolerantes de maíz, cebada y sorgo, concentraciones de ácido cítrico mucho mayores que en cultivares sensibles (ROY *et al.*, 1988 y KOCHIAN, 1995).

2.5.1.4 Nutrición del calcio de las plantas. La tolerancia al aluminio en ciertos cultivares de trigo, cebada y soya ha sido asociado con la habilidad de resistir deficiencias o reducción del transporte de calcio (FOY *et al.*, 1987; MORDVEDT, 1972; ROY *et al.*, 1988). Por lo que al aumentar las concentraciones de calcio, se tiene un claro efecto benéfico en el crecimiento de la raíz bajo estrés de aluminio, ya que se pueden proteger las raíces de los efectos detrimentales del aluminio monomérico de una forma análoga al efecto proteccionista del calcio contra la lesión producida por H^+ y Mn^{2+} , además, al aumentar la concentración de calcio se suple la deficiencia inducida por la toxicidad de aluminio que permite aliviar en cierto grado la inhibición del crecimiento de la raíz (ALVA *et al.*, 1986). Sin embargo, las investigaciones realizadas por RENGEL y ROBINSON (1989) evidenciaron que los mayores índices de tolerancia en raíces y brotes de ballica anual, se vinculaban a menores porcentajes de inhibición de la absorción de Ca y Mg, al comparar cultivares tolerantes y sensibles al aluminio. Además, el flujo de entrada del Ca y Mg fue disminuyendo en la medida que el flujo de Al aumentaba. Respecto a la efectividad con que estos nutrientes minimizan el estrés por aluminio,

WHEELER y DODD (1995), reportaron que el Mg respecto al Ca, en monocotiledóneas fue más efectivo que en dicotiledóneas.

FOY *et al.* (1978) y ROY *et al.* (1988), también reportó que en presencia de aluminio, los cultivares de frijoles resistentes a aluminio producen exudados en los tallos que contienen altas concentraciones de calcio. Lo cual también se observó en todos los ápices de las plantas, en las paredes celulares, mitocondrias y en raíces.

2.5.1.5 Nutrición del fósforo de las plantas. En muchas plantas, la tolerancia a aluminio parece estrechamente relacionada con tolerar bajos niveles de fósforo y su uso eficiente (FOY *et al.*, 1978; ROY *et al.*, 1988). La proporción P/Al molar, es un factor importante que determina la concentración de aluminio que permanece en solución. En estudios realizados por ALVA *et al.* (1986), se observó una reducción significativa en concentraciones de aluminio total y monomérico (Al^{3+} , $\text{Al}(\text{OH})^{2+}$, $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, $\text{Al}(\text{OH})_3^*$, $\text{Al}(\text{SO}_4^+)$) a proporciones molares P/Al 0.2. Blamey *et al.* (1983), citados por ALVA *et al.* (1986), indicaron que se producía una reducción de un 20% en la concentración inicial de aluminio (40 μM), cuando la proporción P/Al molar aumentaba de 0 a 0.2.

Por lo mismo, la detoxificación de aluminio por la adición de fósforo, tal o un agente quelante sintético usualmente está asociada con un aumento en la concentración de P en los tejidos de la planta. Los estudios realizados entregan evidencias que la tolerancia diferencial del aluminio entre las variedades y las especies de planta se ponen en correlación con su habilidad de absorber y utilizar fósforo en la presencia de excesos de aluminio (MORTVEDT *et al.*, 1972). Esta alta concentración de aluminio en la planta produciría coprecipitación del aluminio y fósforo en la planta, generando una inhibición indirecta del crecimiento (FOY y BROWN, 1978, citados por BENAVENTE, 1987).

2.5.1.6 Nutrición del nitrógeno de las plantas. Se plantea que parte del metabolismo del nitrógeno, puede estar involucrado en mecanismos de tolerancia, ya que esta puede relacionarse con la habilidad para usar $\text{NO}_3\text{-N}$ en presencia de $\text{NH}_4\text{-N}$ e incrementar el pH en el medio de crecimiento o rizósfera por parte de algunas especies (DODGE y HIATTI, 1974; FOY y FLEMING, 1978; Foy *et al.*, 1978; citados por ROY *et al.*, 1988). En suelos fuertemente ácidos, la nitrificación es inhibida y el amonio (NH_4^+) pasa a ser la fuente más importante de nitrógeno para las plantas. Muchas plantas que están adaptadas a estos suelos y toleran aluminio, en algunos casos parecen preferir nitrógeno como amonio (NH_4^+), que nitrógeno como nitrato (NO_3^-) (FOY *et al.*, 1978).

2.5.2 Tolerancia versus exclusión. La capacidad de las plantas para tolerar la presencia de aluminio en el interior de sus tejidos, es conocida como el mecanismo de tolerancia y la estrategia utilizada por las plantas para facilitar la exclusión del aluminio desde el ápice radicular o su ingreso a la raíz se le denomina mecanismo de exclusión (KOCHIAN, 1995). Aquellas plantas que toleran el aluminio, se caracterizan por poseer una baja demanda interna de nutrientes, una compartimentalización y recirculación de nutrientes minerales y una alta tolerancia de los tejidos a los elementos tóxicos (Al y Mn). Mientras que las plantas que utilizan el mecanismo de exclusión, son capaces de incrementar la adquisición de nutrientes minerales, de inducir cambios en la rizósfera y excluir aluminio desde sitios sensitivos y de captación (el citoplasma, la interfase membrana plasmática-apoplasma y la cofia). De estos mecanismos, el más utilizado por las plantas como estrategia de adaptación, es el de exclusión (MARSCHNER, 1991).

2.5.3 Control genético de la tolerancia al aluminio. La posible existencia del funcionamiento de mecanismos celulares diferentes, pueden otorgar tolerancia a la toxicidad por aluminio en las plantas. La tolerancia al aluminio en algunos cultivares de trigo es multigénica, pero es condicionada por un solo gen

dominante en otros cultivares (ANIOL y GUSTAFSON 1994, citados por DE LA FUENTE y HERRERA, 1999). Un mismo nivel de acidez que origina una determinada cantidad de aluminio soluble, puede ser tóxica para una especie e inocua para otra, debido a sus distintas sensibilidades o tolerancias, además, existen diferencias dentro de una misma especie. Esto se explica por el diferente origen natural de las especies (características suelo-clima donde se han generado naturalmente) y por el mejoramiento genético que ha dado lugar a variedades, cultivares y tipos dentro de una misma especie. Las gramíneas, por ejemplo, poseen mayor tolerancia a la toxicidad por aluminio que las forrajeras leguminosas, pero también es posible reconocer comportamientos diferentes dentro de tipos de ballicas, tréboles y alfalfa (SUAREZ, 1996).

La severidad de la inhibición en el crecimiento de las raíces es un apropiado indicador de las diferencias genotípicas con respecto a la toxicidad al aluminio (MARSCHNER, 1995).

La tolerancia al aluminio parece ser resultado del uso de material genético proveniente de regiones ácidas, con el objetivo de magnificar la expresión de una característica deseada. Se ha postulado además, que no existen variedades tolerantes a bajo pH-aluminio de poblaciones seleccionadas en programas de mejoramiento en suelos sin problemas de acidez (VENEGAS, 1993).

2.6 Efectos benéficos del aluminio.

Según estudios realizados, se ha determinado que ocasionalmente, bajas concentraciones de aluminio producen efectos benéficos en muchas plantas como arroz, leguminosas tropicales, eucaliptos, té, durazno, remolacha, maíz y trigo (ROY *et al.*, 1988). KONISHI *et al.* (1985), citados por MARSCHNER (1995), señalan además, que plantas como el té no solo toleran

altos niveles de aluminio, sino que presentan un fuerte crecimiento con dosis bajas de Al. Por su parte, Foy (1983), citado por MARSCHNER (1995), sugiere que especies tolerantes a efectos tóxicos del aluminio, frente a bajas dosis se produce un efecto estimulador del crecimiento, pero los mecanismos de tal estimulación del crecimiento son poco claras.

Los mecanismos de los efectos benéficos pueden ser diferentes para los diferentes genotipos tales como, aumento de la solubilidad y disponibilidad del Fe en suelos calcáreos, corrigiendo o previniendo deficiencias de Fe (FOY *et al.*, 1978); FOY 1984, citados por ROY *et al.* (1988); bloqueando sitios cargados negativamente en las paredes celulares y por consiguiente promoviendo la captación de fósforo (FOY *et al.* 1978, MULLETTE 1975), citados por ROY *et al.* (1988), corrigiendo o previniendo la toxicidad por fósforo (FOY *et al.* 1978); CLARK (1977), citados por ROY *et al.* (1988), previniendo la toxicidad por cobre y manganeso (LIEBIG *et al.* 1942; REES y SIDRAK 1961, citados por ROY *et al.* 1988), sirviendo como fungicida (KO y HORA 1972; LEWIS 1973; citados por ROY *et al.* 1988), reduciendo crecimientos aéreos indeseables en semilleros ricos en nitrógeno (BORKENHAGEN y IYER, 1972, citados por ROY *et al.* 1988) y alterando la distribución de reguladores de crecimiento en raíces (FOY *et al.*, 1978).

2.7 Relación aluminio en la cadena planta – animal – hombre.

Es posible que los déficit nutricionales que se presenten en el suelo se transfieran a los animales vía consumo de forraje. Aun cuando el aluminio no provoca alteraciones metabólicas en animales por si mismo, disminuye ostensiblemente la disponibilidad de otros elementos necesarios para el normal funcionamiento del animal (ALFARO, 1997). Los estudios realizados revelan que el exceso de aluminio en el suelo produce deficiencia por falta de magnesio, lo que puede provocar hipomagnesemia, ya que en el rumen de

animales muertos por hipomagnesemia se han encontrado valores de 2373 ppm de aluminio, mientras que en promedio para animales sanos alcanza a 405 ppm, lo cual sugiere la existencia de una relación entre ambas anomalías (Fontenot 1979; citado por ALFARO, 1997).

Según los resultados obtenidos en estudios realizados por ALFARO (1997), se estableció que aquellos animales alimentados con forraje proveniente de sectores con suelos ácidos presentaron una concentración sanguínea de aluminio 22,4% mayor que los animales alimentados en sectores con suelos no acidificados. También se ha reportado concentraciones significativas de Al en la leche de vaca (FERNÁNDEZ, 1999, citado por RADIC, 2001).

3 MATERIAL Y METODO

3.1 Ubicación

El experimento se realizó en la Cámara de Crecimiento del Laboratorio de Forrajeras, ubicada en el Instituto de Producción Animal de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Austral de Chile, Valdivia. El período de crecimiento de las plantas tuvo una duración de 90 días divididos en dos fases. La primera fase consta del crecimiento de la especie sin inclusión de aluminio en la solución nutritiva por un período de 30 días, asegurando un buen establecimiento y la segunda fase en la cual se aplicó las dosis definitivas de Al en la solución nutritiva por un período de 60 días.

3.2 Control de las condiciones ambientales

Las condiciones ambientales del experimento, se regularon con el fin de obtener un ambiente homogéneo de crecimiento y desarrollo de las plantas.

3.2.1 Temperatura. La temperatura de la cámara se controló con la ayuda de un sistema de aire acondicionado manteniendo una temperatura promedio de $22^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$. Las temperaturas registradas durante el período experimental se registraron diariamente a través de un termómetro de máxima y mínima.

3.2.2 Humedad relativa. Esta se controló con un sistema de ventilación y los valores de humedad relativa durante el ensayo se registraron diariamente a través de un higrómetro.

3.2.3 Luz. Se utilizó un fotoperíodo de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad. La duración del fotoperíodo se controló mediante un sistema automático a través de relojes sincronizados. Este fotoperíodo entrega a la cámara 12.000 lux.

3.3 Cultivares y líneas evaluados

La especie correspondió a *Lolium perenne* L. y los materiales vegetales utilizados fueron Yatsyn 1, Meridian, Impact, Nevis y Nui, además de las líneas LP 59, Línea 20, Línea 21 Línea 22 y Línea 23, los cuales en su conjunto se les denominará materiales vegetales evaluados.

3.4 Material utilizado

Se utilizó Jarras Leonard confeccionadas a partir de botellas de 750 cm³ de capacidad, las cuales fueron cortadas por la mitad. La parte superior de las jarras presentaban un alto de 8,5 cm y un área de 40,7 cm² lo que corresponde a un volumen de 346 cm³. Como sustrato se utilizó cuarzo, previamente lavado, además se uso mecha de algodón y fibra de vidrio para conducir la solución nutritiva.

3.4.1 Preparación y montaje de las Jarras Leonard

En esta etapa se realizó el lavado de las jarras, lavado del sustrato, el montaje y llenado de las jarras.

3.4.1.1 Lavado de las jarras. Esto se realizó con agua potable y detergente y se realizaron enjuagues sucesivos con agua destilada.

3.4.1.2 Lavado del sustrato. El cuarzo se lavó con agua potable para eliminar impurezas, seguido de un lavado con ácido clorhídrico (3 molar) para finalizar

con enjuagues sucesivos de agua destilada. Posteriormente se determinó el aluminio intercambiable en el sustrato utilizado en el ensayo, por medio del método (KCl 1 molar) para la determinación de este elemento en los suelos (PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE, 1975).

3.4.2 Montaje y llenado de las jarras. En cada jarra se montó una mecha confeccionada a partir de mechas de estufa a parafina de algodón y fibra de vidrio para la conducción de la solución nutritiva por capilaridad desde el recipiente inferior hacia el recipiente superior de la jarra. La mecha se sujetó a la altura del gollete de la botella con un anillo de goma, para impedir su deslizamiento, y al mismo tiempo para soportar el volumen de cuarzo seco depositado en el recipiente superior. Dentro del volumen ocupado por el cuarzo, la mecha se dividió en cinco partes que se distribuyeron en diferentes direcciones de manera de permitir una mayor superficie de contacto con la arena de cuarzo y posteriormente con las raíces.

3.5 Pregerminación y trasplante de las semillas

Las semillas fueron germinadas sobre papel filtro saturado con agua destilada en un germinador de vidrio. Una vez germinadas se seleccionaron 9 plantas homogéneas que se trasplantaron a las Jarras Leonard para el comienzo del ensayo.

3.6 Homogeneización de las jarras

Para evitar la muerte por deshidratación sumada al estrés del trasplante, las plántulas fueron regadas durante 20 días con solución nutritiva sin aluminio sobre el sustrato. Finalmente se agregó la solución nutritiva en el

recipiente inferior de la jarra hasta completar el mes. En esta etapa se procedió a eliminar las plantas menos vigorosas dejando siete plantas por Jarra Leonard.

3.7 Solución nutritiva

Se utilizó la composición de la solución nutritiva propuesta por RENGEL y ROBINSON (1989), en experimentos de similares características a éste. La composición de la solución nutritiva en $\mu\text{mol L}^{-1}$ se presenta en el Cuadro 1.

CUADRO 1 Composición de la solución nutritiva.

NUTRIENTE	$\mu\text{Mol AI/L}$
N-NO ₃	3.710
N-NH ₄	300
H ₂ PO ₄ ⁻	100
K	750
Ca	1.380
B	13
Na	85.8
Cl	85.8
Mo	1.5
Mg	270
Mn	5.5
Zn	1.2
Cu	0.3
Fe	18
SO ₄	277

FUENTE: RENGEL y ROBINSON (1989).

3.7.1 Aplicación de la solución nutritiva. Las soluciones nutritivas fueron renovadas diariamente, utilizando un volumen aproximado de 125 mL por jarra. Una vez por semana se controló el pH para mantener un nivel constante de 4,2.

Utilizando hidróxido de sodio (NaOH), para corregir cuando el pH tendió hacia ácido y ácido clorhídrico (HCl) cuando el pH se movió hacia lo básico.

3.8 Tratamientos

Las dosis de aluminio aplicadas, como sulfato de aluminio hidratado ($\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 18 \text{H}_2\text{O}$), los cultivares y líneas de *Lolium perenne*. usados en el estudio, se presentan en el Cuadro 2.

CUADRO 2 Cultivares y líneas de *Lolium perenne* L. utilizadas en el ensayo con distintos nivel de aluminio en solución.

Especie	Variedad comercial	Nivel de aluminio ($\mu\text{Mol Al L}^{-1}$)
Cultivares	Yatsyn 1	0 -70 -140 -280 -560 -840
	Meridian	
	Impact	
	Nevis	
	Nui	
Líneas	LP 59	
	Línea 20	
	Línea 21	
	Línea 22	
	Línea 23	

3.9 Variables evaluadas

Se midieron las siguientes variables:

- Producción de materia seca radical (g jarra^{-1}).
- Producción de materia seca aérea (g jarra^{-1}).

- Producción de materia seca total (g jarra⁻¹).
- Concentración del aluminio radical (mg kg⁻¹ de MS).
- Concentración del aluminio aéreo (mg kg⁻¹ de MS).

A partir de la producción de MS y la concentración de aluminio se estimó:

- Absorción de aluminio en las raíces (mg Al jarra⁻¹).
- Absorción de aluminio aéreo (mg Al jarra⁻¹).

3.10 Cosecha del material vegetal. Las plantas fueron cosechadas en un día. Se separó la parte aérea de las raíces de las plantas. El material vegetal se secó a 60°C por 48 horas y se determinó, en base a peso la materia seca de la parte aérea y radical (PUC, 1975).

3.10.1 Determinación de aluminio en el material vegetal. El material vegetal fue picado finamente. En crisoles descontaminados se pesó la parte aérea y la parte radical.

Las muestras fueron calcinadas en una mufla a 550 °C por 5 horas. En las cenizas se determinó el aluminio a través de la metodología propuesta por PUC (1975), utilizando espectrofotometría de absorción atómica.

3.11 Diseño experimental y análisis estadístico. El ensayo se manejó como un experimento completamente al azar, con seis tratamientos de Al para cada uno de los 10 materiales vegetales evaluados y cada tratamiento tuvo 4 repeticiones. Para detectar si existieron diferencias significativas entre los tratamientos se realizó un análisis de varianza de Fisher, utilizándose el test de Tukey (5% nivel de significancia) para la separación de medias, cuando existieron diferencias estadísticas. El programa estadístico utilizado fue Statgraphics 2.0.

4 PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

4.1 Contaminación del material experimental con aluminio

Los ensayos realizados con aluminio han presentado dificultades para evitar la contaminación de los materiales utilizados (FOY *et al.*, 1978; ROY *et al.*, 1988; TICE *et al.*, 1992). Experimentos realizados con anterioridad por AUBEL (2002) y VENEGAS (2005), han mostrado que el agua destilada representa la menor fuente de contaminación de Al, sugiriendo que los principales contaminantes, serían el sustrato utilizado y la contaminación de Al en la solución nutritiva. Se considera común que exista un cierto grado de contaminación con aluminio, en estudios de toxicidad por Al en las plantas. Dicha situación ha sido reportada por FOY *et al.* (1978), WHEELER y DODD (1995), concordando con RADIC (2001), AUBEL (2002) y VENEGAS (2005), en los que se ha usado una metodología similar a la utilizada en este estudio.

4.1.1 Contaminación del sustrato. En acuerdo con RADIC (2001), AUBEL (2002) y VENEGAS (2005), el análisis del cuarzo; el sustrato utilizado para el crecimiento de las plantas en las jarras Leonard, determinó que el aluminio por medio del método de extracción con cloruro de potasio (KCl), presentó en promedio hubo una contaminación de $0.45 \text{ mg Al kg}^{-1}$ de cuarzo.

4.1.2 Solución nutritiva. En este experimento, al igual que en el desarrollado por VENEGAS (2005), no se detectó presencia de aluminio en la solución sin adición de éste.

4.1.3 Equipo utilizado para la medición. El espectrofotómetro de absorción atómica trabaja de manera óptima en el rango sobre los 5 $\mu\text{g/mL}$. Valores entre 0 y 5 $\mu\text{g/mL}$ eventualmente no serían exactos, pero no representan un factor significativo, dentro de las concentraciones que se evalúan en este estudio.

4.2 Problemas metodológicos encontrados

Al considerar las dificultades presentadas en los experimentos realizados con anterioridad por RADIC (2001), AUBEL (2002) y VENEGAS (2005), circunscrito al estrés producido por el transplante de las plántulas desde el germinador a las jarras Leonard y lo relacionado a la conducción de la solución nutritiva a través de la mecha, fue pertinente manejar estos aspectos con la finalidad de minimizar los efectos negativos que influirían sobre el experimento.

4.2.1 Establecimiento de las plántulas e inicio de los tratamientos. Debido a que RADIC (2001), AUBEL (2002) y VENEGAS (2005) observaron una aparente disminución del crecimiento, la cual fue atribuida a un estrés hídrico, dada la evidente falta de desarrollo radical de las plántulas, previo al establecimiento de los tratamientos se realizó una etapa de 5 días con tres riegos diarios de agua destilada sobre la arena de cuarzo y adicionalmente se aplicó aspersión fina con agua destilada sobre la parte aérea de las plántulas, manejo que se mantuvo por 15 días a excepción del riego con agua destilada, que durante los 10 días siguientes se realizó con solución nutritiva sin adición de Al. Luego se procedió a proporcionar la solución nutritiva en el recipiente durante 5 días adicionales, para finalmente dar inicio al experimento bajo las condiciones de tratamientos de adición de Al. Este procedimiento usado por AUBEL (2002) y VENEGAS (2005) tras evidenciar los problemas encontrados por RADIC (2001) en ensayos similares a este, pero con modificaciones que permitieron minimizar aún más la muerte de plántulas.

4.2.2 Problemas de conducción de la mecha. Tomando en cuenta lo observado por VENEGAS (2005) respecto a la dificultad en la conducción de la solución por parte de la mecha, ésta se sometió a remojo previo durante 15 días en agua destilada, lo que mejoró la capacidad conductora del material.

4.3 Análisis de las variables evaluadas

En este experimento las variables evaluadas fueron la producción de materia seca radical, materia seca aérea y materia sea total, además de la concentración de Al, que permitieron determinar su absorción en la parte aérea y radical.

4.3.1 Producción de materia seca (MS) de los materiales vegetales de *Lolium perenne* evaluados. En los cuadros 3 y 4 se observa que al aumentar la dosis de Al en la solución nutritiva, existe una disminución significativa de la producción de MS, en todos los materiales vegetales de ballica perenne evaluados.

Durante el crecimiento de las plantas se observaron síntomas visuales de toxicidad, tales como: plantas pequeñas, menor desarrollo radical, raíces de color café oscuras, gruesas y poca ramificación, cambio de color en el follaje (verde pálido, colores rojizos y amarillos) en la medida que se aumentó la concentración de aluminio en solución y una mayor cantidad de hojas secas en las últimas semanas del experimento. Los efectos descritos han sido señalados en la literatura por FOY *et al.* (1978); MARSCHNER (1995) y AUBEL (2002), como la sintomatología típica que acompaña a la toxicidad por Al.

4.3.1.1 Producción de materia seca parte radical (MSR). Los resultados expuestos en el Cuadro 3, muestran que al aumentar la concentración de Al en

solución, la producción de MSR disminuye en forma significativa para todos los materiales vegetales en estudio. Ello es indicativo de la sensibilidad de la especie a la toxicidad de aluminio en la producción de MSR, mostrando diferencias significativas entre los tratamientos de aluminio. Estos efectos relacionados con la disminución del crecimiento radical, medidos en producción de MS, se han descrito con anterioridad en experimentos realizados por HUE *et al.*, (1986) RENGEL y ROBINSON (1989), DE LA FUENTE y HERRERA (1999) y PIÑEROS (2002).

En los materiales vegetales evaluados se observó que existen dos tendencias diferentes de sensibilidad a la toxicidad por Al. Los grupos de promedios homogéneos representan el comportamiento de las líneas y variedades evaluadas a los tratamientos de adición de aluminio que comparten un mismo nivel de producción de MS, sin diferencias significativas entre ellas. Se presentaron tres materiales vegetales con dos grupos de promedios homogéneos, como son Línea 20, Impact y Nevis; dejando a los siete cultivares restantes con tres grupos de promedios homogéneos. Sin embargo, los materiales vegetales dentro cada grupo, presentaron distintos niveles de tolerancia dentro del mismo grupo.

De los cultivares que presentaron dos grupos de promedios homogéneos, se observa (Cuadro 3) que Línea 20 presentó la menor sensibilidad, en tanto, Impact se comportó como el más sensible y Nevis se posicionó en un nivel intermedio entre ambos. Así, los materiales vegetales Línea 20 y Nevis mostraron una disminución significativa de la producción de MSR en la dosis de $280 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$, en tanto Impact, mostró dicha disminución en la dosis de $140 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$, lo que es indicativo de una mayor sensibilidad a la dosis de Al aplicada.

Por su parte, en los cultivares que presentaron tres grupos de promedios homogéneos, se observó que Línea 21, Línea 22, Línea 23, Lp 59 y Meridian presentaron su máxima toxicidad en la dosis de $280 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$, aspecto que se manifiesta con una mínima producción de MSR. Estos difirieron de Yatsyn y Nui, los cuales presentaron su máxima toxicidad al aluminio en la dosis de $560 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$, donde se registra su mínima producción de MSR. Entre estos dos cultivares se destaca Yatsyn, el cual mantiene incluso en este nivel ($560 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$) una producción cuantitativamente mayor respecto a todos los demás cultivares.

Al considerar la dosis de Al sobre la cual todos los materiales vegetales manifestaron la primera disminución significativa de MSR, se observaron diferencias entre los materiales vegetales evaluados. Por un lado, están los que disminuyeron a partir de la dosis de $70 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$ (Línea 21, Línea 23, Meridian y Nui); en tanto, Línea 22, Lp59 e Impact la disminución ocurrió a partir de la dosis de $140 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$. Las Línea 20, Yatsyn y Nevis presentaron este comportamiento a partir de la dosis de $280 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$.

El consideramos el valor de la menor producción de MS radical, es decir, el nivel de Al aplicado a partir del cual el material vegetal, expresó estadísticamente su mínima producción de raíces, se observó que los cultivares Yatsyn y Nui lo presentaron al nivel de los $560 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$, su mínima producción de raíces, mientras que Línea 20, línea 21, Línea 22, Línea 23, Lp 59, Meridian y Nevis lo presentaron con el nivel de $280 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$. El cultivar Impact tuvo su menor productividad de raíces a partir de $140 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$.

A partir de estas disminuciones de producción de raíces se estimó preliminarmente que el material vegetal más tolerante al aumento de la concentración de Al en producción de raíces fue Yatsyn, en tanto que los

materiales vegetales más sensibles en producción de raíces fueron Impact, Línea 21, línea 23 y Meridian, con un comportamiento intermedio los otros materiales vegetales (Línea 20, Línea 22, Lp 59, Nevis y Nui).

4.3.1.2 Producción de materia seca parte aérea (MSA). Según los resultados obtenidos en el experimento (Cuadro 4) se observó que en la medida que la dosis de aluminio adicionado en la solución nutritiva aumentó, se produjo una disminución significativa en la producción de MSA en todos los cultivares de *L. perenne*. Este efecto ha sido descrito por RENGEL y ROBINSON (1989), DELHAIZE *et al.* (1995), PONCE (1999), RADIC (2001) y PIÑEROS *et al.* (2002).

El cultivar Nevis presentó dos grupos de promedios homogéneos. Por su parte la Línea 23 y el cultivar Yatsyn presentaron cuatro grupos de promedios homogéneos y los materiales vegetales restantes (Línea 20, Línea 21, Línea 22, Lp 59, Meridian, Impact y Nui) presentaron tres grupos de promedios homogéneos.

CUADRO 3 Producción de materia seca radical de los distintos materiales vegetales evaluados.

Tratamiento	Producción de materia seca radical (\pm d.e.) (g jarra ⁻¹)										
	Adición de Al	Línea 20		Línea 21		Línea 22		Línea 23		Lp 59	
0 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,46 \pm 0,05	a	0,44 \pm 0,01	a	0,43 \pm 0,03	a	0,42 \pm 0,03	a	0,39 \pm 0,06	a
70 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,45 \pm 0,08	a	0,30 \pm 0,11	b	0,42 \pm 0,02	a	0,29 \pm 0,05	b	0,41 \pm 0,06	a
140 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,39 \pm 0,03	a	0,26 \pm 0,03	b	0,27 \pm 0,08	b	0,33 \pm 0,03	b	0,28 \pm 0,05	b
280 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,18 \pm 0,04	b	0,13 \pm 0,02	c	0,08 \pm 0,01	c	0,13 \pm 0,02	c	0,16 \pm 0,02	c
560 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,19 \pm 0,03	b	0,10 \pm 0,01	c	0,12 \pm 0,01	c	0,14 \pm 0,01	c	0,10 \pm 0,01	c
840 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,12 \pm 0,02	b	0,13 \pm 0,01	c	0,13 \pm 0,04	c	0,14 \pm 0,02	c	0,05 \pm 0,03	c
Adición de Al	Yatsyn	Meridian		Impact		Nevis		Nui			
0 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,41 \pm 0,02	a	0,46 \pm 0,03	a	0,32 \pm 0,10	a	0,42 \pm 0,08	a	0,40 \pm 0,06	a
70 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,45 \pm 0,04	a	0,35 \pm 0,08	b	0,27 \pm 0,04	a	0,40 \pm 0,13	a	0,27 \pm 0,02	b
140 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,36 \pm 0,05	ab	0,29 \pm 0,01	b	0,21 \pm 0,01	b	0,30 \pm 0,01	ab	0,23 \pm 0,03	b
280 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,32 \pm 0,01	b	0,14 \pm 0,01	c	0,11 \pm 0,01	b	0,20 \pm 0,02	b	0,27 \pm 0,03	b
560 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,21 \pm 0,03	c	0,18 \pm 0,02	c	0,14 \pm 0,01	b	0,19 \pm 0,03	b	0,10 \pm 0,02	c
840 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,18 \pm 0,02	c	0,13 \pm 0,02	c	0,11 \pm 0,01	b	0,16 \pm 0,04	b	0,13 \pm 0,02	c

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ($p \leq 0,05$, TUKEY).

Entre los materiales vegetales que presentaron tres grupos homogéneos existen diferencias evidentes en el comportamiento frente al Al aplicado. Se observó que presentaron diferentes comportamientos frente a las dosis de 70 y 140 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$, mostrando todos su tercer grupo homogéneo de promedios a partir de la dosis de 280 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$. Línea 20 y el cultivar Meridian mostraron un valor intermedio de producción de MSA en el nivel de 70 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$, entre los tratamientos sin adición de Al y la dosis de 140 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$. Por su parte, Línea 21, Lp 59 y los cultivares Impact y Nui, presentaron una disminución en la producción de MSA solo a partir de 140 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ (Cuadro 4). Una situación diferente fue observada para la Línea 22, la cual presentó su mayor producción de MSA en el nivel de 70 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$.

En los dos materiales que presentaron cuatro grupos de promedios homogéneos (Línea 23 y Yatsyn) también se observan comportamientos diferentes frente a los tratamientos. La Línea 23 muestra una disminución del rendimiento de MSA a partir de la dosis de 70 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$, que se acentúa en la dosis de 140 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$, para disminuir a un nivel constante a partir de la dosis 280 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$. Por su parte, Yatsyn mostró su primera disminución solo a partir de 140 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$, luego disminuye a un tercer nivel en la dosis de 280 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$, para caer al cuarto nivel en la dosis 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$.

Línea 20 Impact y Nui manifiestan una menor producción de MSA en la misma dosis de aluminio (280 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$), mostrando además una respuesta de mayor sensibilidad frente al aumento de Al. Es en esta misma dosis, donde todos los cultivares presentaron su máxima toxicidad reflejado en su mínima producción de MSA, exceptuando a Yatsyn, que se diferencia de todos los cultivares, manifestando su máxima toxicidad en la dosis de 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ mostrando niveles más altos de tolerancia frente a los aumentos de Al en la solución nutritiva.

Al considerar la dosis bajo la cual los cultivares responden con una disminución significativa de la producción de MSA, Línea 23 la presenta en la dosis de $70 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$, los cultivares Línea 20, Línea 21, Lp59, Yatsyn Meridian, Impact y Nui muestran dicha disminución en los $140 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$, mientras que en Nevis esto ocurre en la dosis de $280 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$. Línea 22 presenta una situación especial, donde su producción de MSA se ve aumentada en la dosis de $70 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$, situación que ha sido observada en experimentos anteriormente realizados por PONCE (1999), RADIC (2001) y AUBEL (2002), pero al aumentar la dosis de Al, presenta sensibilidad reflejada en la disminución significativa de MSA a partir de la dosis $140 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$.

Considerando la producción de MSA de los cultivares evaluados, se puede apreciar que los cultivares cuyo comportamiento tiende a presentar mayor tolerancia frente al aumento de Al en la solución nutritiva, son Yatsyn y Nevis, destacando que Yatsyn presenta una superioridad en la producción de MSA sobre Nevis hasta la dosis de $560 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$ donde ésta última presenta una declinación contrastando con Yatsyn que mantiene su producción. El cultivar que manifiesta mayor sensibilidad es Línea 23, dejando a los restantes en una situación intermedia de respuesta frente al Al.

La disminución más considerable en la producción de MSA de los cultivares evaluados se produjo entre los tratamientos sin adición de Al y $280 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$. A partir de ese tratamiento y las sucesivas dosis crecientes, los rendimientos de MSA no se ven afectados estadísticamente aunque existe una disminución del rendimiento, aunque cabe destacar que Yatsyn presenta una diferencia estadística en el de mayor adición de Al y en general evidencia la mayor producción de MSA, quedando como el cultivar de mayor rendimiento entre todos los materiales vegetales evaluados.

4.3.1.3 Producción de materia seca total (MST). La producción de materia seca total es un parámetro que se ve influenciado fuertemente por la cantidad de biomasa aérea. Se puede apreciar que en la medida aumenta la concentración de Al en la solución nutritiva, disminuye la producción de materia seca total en todos los cultivares de *L. perenne*. En este experimento se puede apreciar que el comportamiento de la producción de MST fue semejante al observado para las dos variables anteriores. Existió una disminución de la producción de MST a medida que aumentó la concentración de Al en la solución.

Las diferentes respuestas de los cultivares frente a la adición de Al en la solución nutritiva reflejadas en la comparación múltiple de promedios, muestran que el cultivar Nevis presenta dos grupos de promedios homogéneos, los cultivares Línea 22 y Línea 23 cuatro grupos y los restantes presentaron tres grupos de promedios homogéneos.

En los cultivares evaluados se observa que Nevis mantiene una producción estadísticamente homogénea hasta los 140 μmol de Al L^{-1} , los restantes han sufrido disminuciones significativas dentro de este rango, destacando que Yatsyn, a pesar de mostrar disminuciones de rendimiento dentro del mismo, su producción de MST es similar o mayor.

Todos los cultivares evaluados presentaron su máxima toxicidad, reflejadas en el menor nivel de producción de MST a partir de la dosis de 280 μmol de Al L^{-1} , dosis bajo la cual las producciones son mínimas, destacando la diferencia que se produce en el caso de Yatsyn, que muestra su máxima toxicidad en la dosis de 840 μmol de Al L^{-1} , quedando por sobre los demás cultivares en su comportamiento frente al Al, presentando una tendencia más tolerante.

CUADRO 4 Producción de materia seca aérea de los distintos materiales vegetales evaluados.

Tratamiento	Producción de materia seca aérea (\pm d.e.) (g jarra ⁻¹)										
	Adición de Al	Línea 20		Línea 21		Línea 22		Línea 23		Lp 59	
0 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		2,44 \pm 0,47	a	2,33 \pm 0,36	a	1,96 \pm 0,31	b	2,82 \pm 0,32	a	2,50 \pm 0,56	a
70 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		2,15 \pm 0,23	ab	2,53 \pm 0,33	a	2,64 \pm 0,31	a	2,24 \pm 0,21	b	2,70 \pm 0,41	a
140 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		1,60 \pm 0,55	b	1,34 \pm 0,12	b	1,51 \pm 0,27	b	1,56 \pm 0,18	c	1,68 \pm 0,45	b
280 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,45 \pm 0,34	c	0,75 \pm 0,18	c	0,67 \pm 0,12	c	0,50 \pm 0,22	d	0,70 \pm 0,18	c
560 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,43 \pm 0,11	c	0,50 \pm 0,13	c	0,67 \pm 0,22	c	0,35 \pm 0,12	d	0,46 \pm 0,23	c
840 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,33 \pm 0,05	c	0,26 \pm 0,06	c	0,40 \pm 0,05	c	0,18 \pm 0,09	d	0,14 \pm 0,02	c
Adición de Al	Yatsyn	Meridian		Impact		Nevis		Nui			
0 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	2,62 \pm 0,42	a	2,31 \pm 0,16	a	1,86 \pm 0,36	a	2,75 \pm 0,69	a	2,09 \pm 0,36	a	
70 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	3,07 \pm 0,27	a	2,08 \pm 0,25	ab	2,17 \pm 0,23	a	2,39 \pm 0,68	a	1,99 \pm 0,14	a	
140 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	2,07 \pm 0,14	b	1,62 \pm 0,41	b	1,33 \pm 0,27	b	2,07 \pm 0,16	ab	1,45 \pm 0,19	b	
280 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	1,44 \pm 0,32	bc	0,71 \pm 0,15	c	0,48 \pm 0,13	c	0,93 \pm 0,19	c	0,51 \pm 0,16	c	
560 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	1,55 \pm 0,29	bc	0,53 \pm 0,05	c	0,33 \pm 0,14	c	0,79 \pm 0,08	c	0,55 \pm 0,07	c	
840 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	0,66 \pm 0,30	d	0,36 \pm 0,18	c	0,27 \pm 0,19	c	0,63 \pm 0,21	c	0,53 \pm 0,18	c	

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ($p \leq 0,05$, Tukey).

CUADRO 5 Producción de materia seca total de los distintos materiales vegetales evaluados.

Tratamiento	Producción de materia seca radical (\pm d.e.) (g jarra ⁻¹)					
	Adición de Al	Línea 20	Línea 21	Línea 22	Línea 23	Lp 59
0 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		2,89 \pm 0,50 a	2,77 \pm 0,35 a	2,39 \pm 0,29 b	3,24 \pm 0,35 a	2,89 \pm 0,56 a
70 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		2,60 \pm 0,26 ab	2,83 \pm 0,37 a	3,06 \pm 0,31 a	2,53 \pm 0,24 b	3,11 \pm 0,47 a
140 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		1,99 \pm 0,54 b	1,59 \pm 0,12 b	1,77 \pm 0,32 c	1,89 \pm 0,15 c	1,95 \pm 0,50 b
280 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,63 \pm 0,37 c	0,88 \pm 0,17 c	0,75 \pm 0,13 d	0,62 \pm 0,22 d	0,86 \pm 0,17 c
560 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,62 \pm 0,12 c	0,60 \pm 0,13 c	0,78 \pm 0,23 d	0,50 \pm 0,11 d	0,56 \pm 0,23 c
840 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		0,44 \pm 0,04 c	0,39 \pm 0,07 c	0,53 \pm 0,03 d	0,32 \pm 0,07 d	0,19 \pm 0,05 c
Adición de Al	Yatsyn	Meridian	Impact	Nevis	Nui	
0 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	3,02 \pm 0,42 ab	2,77 \pm 0,18 a	2,18 \pm 0,40 a	3,17 \pm 0,76 a	2,49 \pm 0,36 a	
70 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	3,52 \pm 0,28 a	2,43 \pm 0,24 a	2,44 \pm 0,25 a	2,79 \pm 0,77 a	2,26 \pm 0,13 a	
140 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	2,42 \pm 0,15 bc	1,91 \pm 0,40 b	1,53 \pm 0,26 b	2,36 \pm 0,16 a	1,68 \pm 0,21 b	
280 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	1,75 \pm 0,32 c	0,85 \pm 0,15 c	0,59 \pm 0,13 c	1,13 \pm 0,19 b	0,77 \pm 0,13 c	
560 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	1,76 \pm 0,28 c	0,71 \pm 0,06 c	0,46 \pm 0,14 c	0,98 \pm 0,11 b	0,65 \pm 0,07 c	
840 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	0,84 \pm 0,30 d	0,49 \pm 0,20 c	0,39 \pm 0,19 c	0,79 \pm 0,24 b	0,66 \pm 0,17 c	

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ($p \leq 0,05$, TUKEY).

Tomando en cuenta la dosis de Al en la cual los cultivares manifiestan su primera disminución significativa de MST, los que presentan dicha respuesta en la dosis de 70 μmol de Al L^{-1} son Línea 21, Línea 23, Meridian y Línea 23, que en los demás cultivares ocurre en la dosis de 140 μmol de Al L^{-1} quedando Nevis dentro de la salvedad comentada en el párrafo anterior.

Considerando la producción de MST de los cultivares evaluados, se aprecia que Yatsyn y Nevis presentan una respuesta más tolerante frente a la adición de Al, en tanto que las más sensibles son Línea 20, Línea 22, Línea 23 e Impact, quedando Línea 21, Lp59, Meridian y Nui en una situación intermedia. Bajo estas circunstancias, el cultivar Yatsyn continúa manteniendo una superioridad respecto a los demás cultivares al evidenciar una producción de MST más alta hasta la dosis de 840 μmol de Al L^{-1} inclusive.

4.3.1.4 Relación parte aérea parte radical (A/R) en los materiales vegetales a través de los distintos tratamientos de Al en solución. La relación entre la parte aérea parte radical (A/R) fue utilizada como un índice entre el comportamiento aéreo en relación al comportamiento radical frente al aumento de Al en la solución nutritiva. Ello permitiría inferir las posibles estrategias utilizadas por los cultivares como mecanismo de tolerancia, frente a la toxicidad por Al.

CUADRO 6 Relación Materia seca Aérea v/s Materia seca Radical en tres dosis de aluminio para los 10 cultivos evaluados.

Cultivar	Promedio		Promedio		Promedio	
	140 μmol de Al (mg kg^{-1}) \pm d.s.		280 μmol de Al (mg kg^{-1}) \pm d.s.		560 μmol de Al (mg kg^{-1}) \pm d.s.	
Línea 20	4,18 \pm 1,49	n.s.	2,38 \pm 1,33	a	2,29 \pm 0,60	a
Línea 21	5,21 \pm 0,75	n.s.	6,05 \pm 1,93	bc	5,05 \pm 1,28	abcd
Línea 22	5,93 \pm 1,78	n.s.	8,21 \pm 0,92	c	5,50 \pm 1,61	bcd
Línea 23	4,74 \pm 0,86	n.s.	3,95 \pm 1,83	ab	2,46 \pm 0,87	abc
Lp59	5,94 \pm 0,66	n.s.	4,51 \pm 1,46	ab	4,29 \pm 1,95	abc
Yatsyn	5,89 \pm 0,89	n.s.	4,51 \pm 0,93	ab	7,68 \pm 2,20	d
Meridian	5,62 \pm 1,75	n.s.	4,93 \pm 1,28	ab	3,05 \pm 0,28	abc
Impact	6,37 \pm 1,61	n.s.	4,35 \pm 1,32	ab	2,33 \pm 1,00	ab
Nevis	6,95 \pm 0,60	n.s.	4,77 \pm 1,01	ab	4,26 \pm 0,43	abc
Nui	6,31 \pm 0,89	n.s.	1,98 \pm 0,84	a	5,53 \pm 1,45	cd

En las diferentes dosis analizadas (140, 280 y 560 μmol de Al L^{-1}) dado que los materiales vegetales presentan respuestas diferentes en su disminución tanto en la producción de MSR como de MSA, se evaluó la relación A/R. Como se observa en el Cuadro 6, no existieron diferencias significativas en la relación A/R entre los cultivares, en la dosis de 140 μmol de Al L^{-1} . Esta situación varió en la dosis de 280 μmol de Al L^{-1} . Los materiales vegetales Nui y Línea 20, disminuyeron relativamente más la producción de su parte aérea que de sus raíces y se diferenciaron de la Línea 22 y la Línea 21 que disminuyeron relativamente más sus raíces que la parte aérea, estando los otros materiales vegetales en una situación intermedia entre estos dos comportamientos diferenciados.

En la dosis de 540 μmol de Al L^{-1} los cultivares más afectados en la parte aérea frente a la reducción en la producción de MSR son los cultivares Línea 20 e Impact, quedando con una menor incidencia en este aspecto, los cultivares Yatsyn y Nui.

Al observar estos indicadores, se puede apreciar que el cultivar Línea 20 ofrece una relación más estrecha en su disminución de MSA cuando la parte radical se ve afectada en la reducción de producción en las dosis de 280 μmol de Al L^{-1} y 560 μmol de Al L^{-1} .

4.3.2 Concentración de aluminio de los materiales vegetales de *Lolium perenne* evaluados. Los resultados que se discuten y presentan a continuación, corresponden a la concentración de Al (mg kg^{-1}) de la parte aérea y radical de los materiales vegetales de ballica perenne.

4.3.2.1 Concentración de aluminio radical (CAR). Una estrategia mediante la cual se evita la toxicidad de Al, cuando está en altas concentraciones, es lo observado con anterioridad por RADIC (2001), AUBEL (2002) y VENEGAS (2005), que consiste en que usualmente las gramíneas lo acumulan en las raíces, evitando de esta forma el traspaso del Al hacia los puntos sensibles de su crecimiento, comportamiento también observado en los experimentos realizados por FOY (1978).

La CAR varió entre 50 y 4800 mg kg⁻¹, con las distintas dosis de Al aplicadas. Usualmente supera una concentración de 1000 mg kg⁻¹ a partir de las dosis de 280 μmol Al L⁻¹ o 140 μmol Al L⁻¹, dependiendo del cultivar. El efecto observado fue similar al expuesto por RENGEL Y ROBINSON (1989), WHEELER *et al.* (1992) y BADE (2003).

Los resultados expuestos en el Cuadro 7, muestran que al aumentar la concentración de Al en solución, éste también aumenta su concentración en el tejido vegetal. Esto indica que la especie permite el ingreso del Al a las raíces y concentra este elemento en el material vegetal.

En los materiales vegetales evaluados se observó que existen dos tendencias diferentes de concentrar el Al en las raíces por parte de los diferentes cultivares. Se presentaron tres materiales vegetales con dos grupos de promedios homogéneos, como son Línea 22 y Línea 23; dejando a Línea 21, Lp59, Yatsyn, Meridian, Impact y Nui dentro de la tendencia que presentó tres grupos de promedios homogéneos. Comportamientos particulares se observó en Línea 20 y Nevis que presentaron cuatro y cinco grupos de promedios homogéneos, respectivamente. Sin embargo, los materiales vegetales dentro cada grupo, presentaron distintos niveles de concentración de Al dentro del mismo grupo.

CUADRO 7 Concentración de aluminio radical de los distintos materiales vegetales evaluados.

Tratamiento	Concentración promedio de Al radical (\pm d.s.) (mg kg^{-1})														
Adición de Al	Línea 20			Línea 21			Línea 22			Línea 23			Lp 59		
0 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	242	\pm 98	a	120	\pm 145	a	78	\pm 24	a	84	\pm 7	a	78	\pm 25	a
70 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	548	\pm 55	a	366	\pm 70	a	365	\pm 39	a	397	\pm 68	a	433	\pm 60	a
140 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	936	\pm 36	b	713	\pm 67	a	1212	\pm 318	a	853	\pm 192	a	905	\pm 50	ab
280 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	1846	\pm 213	c	2239	\pm 453	b	3252	\pm 260	b	3494	\pm 634	b	1529	\pm 405	b
560 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	4507	\pm 295	d	3430	\pm 1070	c	3488	\pm 921	b	4321	\pm 448	b	2705	\pm 815	c
840 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	4333	\pm 171	d	3495	\pm 495	c	2835	\pm 738	b	3635	\pm 463	b	2666	\pm 263	c
Adición de Al	Yatsyn			Meridian			Impact			Nevis			Nui		
0 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	73	\pm 9	a	120	\pm 24	a	79	\pm 9	a	85	\pm 31	a	50	\pm 9	a
70 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	737	\pm 107	ab	576	\pm 29	ab	483	\pm 80	ab	483	\pm 78	ab	992	\pm 93	abc
140 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	814	\pm 192	ab	1042	\pm 97	b	1171	\pm 166	b	828	\pm 81	b	728	\pm 376	ab
280 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	1759	\pm 207	b	3395	\pm 425	c	3800	\pm 572	c	2155	\pm 498	c	1209	\pm 67	abc
560 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	3295	\pm 1075	c	3703	\pm 311	c	3337	\pm 627	c	3928	\pm 240	d	2725	\pm 1305	c
840 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	3153	\pm 169	c	3653	\pm 286	c	3360	\pm 240	c	4794	\pm 343	e	2595	\pm 1388	c

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ($p \leq 0,05$, TUKEY).

De los cultivares que presentaron dos grupos de promedios homogéneos, se observa (Cuadro 7) que Línea 22 y Línea 23 mostraron un comportamiento estadísticamente igual, donde el primer aumento significativo de la concentración de Al ocurrió en la dosis de $280 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$ a diferencia de Nui, la que manifestó una diferencia estadística significativamente superior en la dosis de $560 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$. De los tres materiales vegetales que presentaron estos dos grupos de promedios homogéneos, Línea 22 y Línea 23 evidencian un comportamiento muy similar, incluso en la cantidad total de Al que concentraron, la cual se estabiliza en su máximo punto a partir de los $280 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$ para ambas, a diferencia de Nui que alcanza su concentración más alta de Al en la dosis de $560 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$ diferenciándose de las primeras por concentrar una menor cantidad de Al en total en la parte radical.

Para los cultivares que presentaron tres grupos de promedios homogéneos, se observó que Línea 21, Lp 59 y Yatsyn manifiestan su primer aumento significativo en la CAR a partir de la dosis de $280 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$ a diferencia de Meridian e Impact que presentaron dicho aumento en la dosis de $140 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$, alcanzando en la dosis siguiente el nivel máximo de CAR donde ésta se estabiliza, correspondiente a $560 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$ para Línea 21, Lp50 y Yatsyn; y $280 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$ para Meridian e Impact.

Considerando la dosis de Al aplicada sobre la cual todos los materiales vegetales manifestaron su primer aumento significativo de la CAR, se observaron diferencias entre los materiales vegetales evaluados. Por un lado están Línea 20, Meridian, Impact y Nevis, que presentan dicho aumento a partir de la dosis de $140 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$; en tanto, Línea 21, Línea 22, Línea 23, Lp59 y Yatsyn lo manifiesta en la dosis de $280 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$, dejando a Nui como el único material vegetal que presentó este comportamiento a partir de la dosis de $560 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$.

Los casos particulares que se diferencian de los materiales vegetales ya comentados son Línea 20, que presentó cuatro grupos de promedios homogéneos y Nevis, que presentó cinco, situación que sólo se diferencia significativamente, en la dosis donde cada material alcanza su máxima CAR, que para el caso de Línea 20 corresponde a $560 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$ y para Nevis esto ocurre en la dosis de $840 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$.

4.3.2.2 Concentración de aluminio aéreo (CAA). En los resultados de la concentración aérea que se presentan en el Cuadro 8, se observa que los distintos materiales vegetales evaluados manifestaron un aumento significativo de la concentración de Al a medida que la concentración en la solución aumentó. Resultados similares fueron discutidos por RADIC (2001), AUBEL (2002) y VENEGAS (2005).

En los materiales vegetales evaluados se observó que existe una marcada tendencia a presentar aumentos estadísticamente significativos de la CAA a partir de la dosis de $280 \mu\text{mol de Al L}^{-1}$, pero con situaciones diferentes en las dosis inmediatamente superiores pudiéndose diferenciar entre los materiales vegetales dos tendencias diferentes de concentrar el Al en la parte aérea. Se presentaron cinco materiales vegetales con tres grupos de promedios homogéneos, como son Línea 20, Línea 21, Lp59, Impact y Nui; conformando otro conjunto con cuatro grupos de promedios homogéneos, en los cultivares Línea 22, Línea 23, Meridian y Nevis, dejando a Yatsyn en una situación especial, con sólo dos grupos de promedios homogéneos.

CUADRO 8 Concentración de aluminio aéreo de los distintos materiales vegetales evaluados.

Tratamiento	Concentración promedio de Al aéreo (\pm d.e.) (mg kg ⁻¹)					
	Adición de Al	Línea 20	Línea 21	Línea 22	Línea 23	Lp 59
0 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		10 \pm 1 a	13 \pm 2 a	12 \pm 3 a	12 \pm 3 a	10 \pm 3 a
70 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		22 \pm 5 a	24 \pm 2 a	20 \pm 6 a	23 \pm 8 a	20 \pm 2 ab
140 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		28 \pm 1 a	27 \pm 4 a	34 \pm 6 ab	27 \pm 4 a	28 \pm 3 ab
280 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		88 \pm 47 b	75 \pm 20 b	74 \pm 27 bc	83 \pm 10 b	78 \pm 4 b
560 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		88 \pm 14 b	130 \pm 34 c	124 \pm 19 c	154 \pm 51 c	170 \pm 32 c
840 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$		158 \pm 40 c	113 \pm 68 c	225 \pm 44 d	212 \pm 10 d	188 \pm 59 c
Adición de Al	Yatsyn	Meridian	Impact	Nevis	Nui	
0 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	10 \pm 1 a	13 \pm 4 a	16 \pm 9 a	20 \pm 12 a	18 \pm 3 a	
70 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	37 \pm 5 a	24 \pm 4 a	24 \pm 6 a	26 \pm 7 a	31 \pm 3 a	
140 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	35 \pm 12 a	27 \pm 1 a	39 \pm 12 a	25 \pm 0,5 a	31 \pm 5 a	
280 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	68 \pm 17 a	94 \pm 15 b	102 \pm 26 bc	82 \pm 9 b	90 \pm 12 b	
560 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	65 \pm 33 a	142 \pm 9 c	134 \pm 20 cd	112 \pm 6 c	147 \pm 12 c	
840 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	168 \pm 71 b	181 \pm 36 d	170 \pm 51 d	175 \pm 14 d	177 \pm 54 c	

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ($p \leq 0,05$, TUKEY).

De los cultivares que presentaron tres grupos de promedios homogéneos, se observa (Cuadro 8) que Línea 21 y Nui describieron un comportamiento estadísticamente similar, donde el primer aumento significativo de la concentración de Al ocurrió en la dosis de 280 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ y la máxima CAA se estabiliza en la dosis de 560 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$. Esto se asemeja mucho a lo que ocurre en Lp59, con una leve diferencia entre las dosis 70 y 140 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$. Luego, se observó que los otros tres materiales vegetales restantes que presentaron tres grupos de promedios homogéneos (Línea20, Línea23 e Impact), comparten la característica de alcanzar su máximos nivel de CAA en la dosis de 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$.

Por su parte, en los materiales vegetales que se observaron cuatro grupos de promedios homogéneos, se observó que describen una comportamiento estadísticamente similar al aumentar la dosis sobre los 140 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$, con un aumento significativo de la CAA al aumentar la dosis de Al, alcanzando su nivel máximo en la dosis de 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$.

Un caso particular se observó en Yatsyn, que mantuvo una concentración sin variaciones significativas hasta la dosis de 560 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$, dejando a la dosis de 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ como el nivel máximo donde Yatsyn evidenció su primer aumento significativo en la CAA.

4.3.2.3 Mecanismos propuestos de tolerancia al Aluminio. Al considerar las tendencias ya descritas anteriormente al aumentar las dosis de Al en la solución nutritiva respecto a los efectos que se observaron en la producción de materia seca, tanto aérea como radical, es preciso considerar los mecanismos que están siendo utilizados por estos cultivares para minimizar los efectos tóxicos del aluminio una vez que ingresa al tejido vegetal.

Se asume entonces que al aumentar la dosis de Al en solución, sin que la concentración de Al en la materia seca radical aumente, y por ende no tenga un efecto en la disminución en la producción de la misma, estaría actuando el mecanismo de exclusión. Asimismo, cuando la concentración de Al aumenta en el tejido vegetal y su consiguiente producción no es disminuida se estaría hablando que la planta tiene la capacidad de utilizar un mecanismo de tolerancia interna frente a la presencia tóxica del Al, de la misma manera se puede considerar para la parte aérea de la planta, donde no ocurra una disminución significativa de la producción de materia seca frente al aumento en la concentración de Al en esta zona, por lo que la planta estaría haciendo uso de mecanismos de tolerancia interna a este nivel.

A pesar de que algunos materiales vegetales fueron clasificados como sensibles al Al en solución, evidenciaron el uso de los diferentes mecanismos para tolerar en alguna medida la toxicidad por Al, tal es el caso observado en Línea 21, que presentó una similitud con Lp59, donde se comparten mecanismos de exclusión, tolerancia radical y aérea en las mismas dosis excepto en dosis bajas de aplicación de Al, donde Línea 21 manifiesta el uso del mecanismo de exclusión entre las dosis de 70 y 140 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ mientras que con Lp59 esto ocurre al agregar Al a la solución desde 0 a 70 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$. En ambas situaciones, no hay una disminución significativa de la materia seca radical, como tampoco se observó un aumento significativo de la concentración de Al en la raíz. Tal situación se repite entre las dosis de 560 a 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ para los dos materiales vegetales por igual, sin registrarse disminuciones estadísticamente significativas en la producción de materia seca radical, sin que haya un aumento significativo de la concentración de Al en el tejido radical. Luego, al considerar lo que ocurre entre las dosis de 280 y 560 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ se observó que en el tejido radical hubo un aumento significativo en la concentración de Al, pero sin una disminución significativa de la producción de materia seca a este nivel, lo cual muestra que la planta está utilizando un

mecanismo de tolerancia interna radical, efecto que también se observó en la parte aérea en estas mismas dosis, lo cual incluiría también el uso de la tolerancia a nivel aéreo.

Al considerar lo ocurrido con los materiales vegetales Línea 21 y Lp59, fue posible observar otra similitud, pero en menor grado, para dos cultivares clasificados como sensibles, como es el caso de Línea 22 y Línea 23 pero ahora sólo haciendo uso de dos mecanismos de tolerancia a la toxicidad por Al, se observó que ambos evidenciaron el uso del mecanismo de exclusión entre las dosis de 280 y 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ donde no hay aumento significativo de la concentración de Al en el tejido radical, ni tampoco existe una disminución significativa de la producción de materia seca radical. La diferencia en el uso de este mecanismo se da en las dosis de 0 a 70 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ donde es Línea 22 la que minimiza el ingreso de Al a la planta, mientras que Línea 23 hace uso de este mecanismo al aumentar la dosis desde 70 a 140 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$. Ahora Línea 23 presentó un rango más amplio en el uso del mecanismo de tolerancia aérea, puesto que la concentración de Al en el tejido aéreo no tuvo aumentos significativos desde la dosis de 280 a 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$, mientras que Línea 22 evidenció el uso de este mecanismo entre la dosis de 560 a 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$.

De esta forma, los materiales vegetales clasificados como sensibles a la toxicidad por Al, presentaron mecanismos de tolerancia frente al aumento del Al en la solución, pero con usos en diferentes grados por cada uno, quedando Meridian en una situación en la cual se observó la participación del mecanismo de exclusión en el rango entre 280 y 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ y el mecanismo de tolerancia aérea en este mismo rango de dosis, quedando excluida la posibilidad del uso de mecanismo interna del tejido radical, ya que se producían disminuciones significativas en la producción de materia seca al incrementar significativamente la concentración de Al en el tejido.

Para el caso de los cultivares clasificados como tolerantes a la toxicidad por Al, utilizan estrategias diferentes para adaptarse, ya que, Yatsyn da evidencias de que sólo usa el mecanismos de exclusión, en las dosis de 0 a 140 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ y luego entre las dosis de 560 y 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$. En el caso de Nui, éste material vegetal evidenció el uso de dos estrategias, como es la exclusión, entre las dosis de 560 a 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ y el uso de la tolerancia aérea entre las dosis de 280 y 560 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$.

Finalmente, aquellos materiales vegetales que quedaron en una situación intermedia, presentaron formas particulares para tolerar la toxicidad por Al, ya que al considerar lo planteado anteriormente, se observó que Línea 20 no manifestó un alza significativa del Al en las raíces ni una disminución de la materia seca al pasar del tratamiento sin Al de la dosis de 70 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ por lo que estaría haciendo uso de mecanismos de exclusión, para dar lugar a mecanismos de tolerancia cuando se aumenta la dosis a 140 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$, al igual que lo ocurrido entre la dosis de 280 a 560 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$. En este material vegetal se observó que la planta complementa el uso de los 3 mecanismo de tolerancia antes mencionados, ya que en la dosis de 560 a 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ se evidencia una tolerancia en la parte aérea, ya que no se produce una disminución en la producción de materia seca aérea al aumentar la dosis de Al.

Asimismo Impact y Nevis manifiestan formas diferentes de soportar el aumento de Al en la solución, ya que Impact evidencia la utilización de los tres mecanismos, que para el caso de la exclusión lo desarrolla entre la dosis de 280 y 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$, la tolerancia radical se observó la utiliza entre las dosis de 140 y 280 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$, y al aumentar la dosis de Al de 560 a 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ se hace presente el mecanismo de tolerancia aérea, situación que en Nevis ocurre entre las dosis de 280 a 840 $\mu\text{mol de Al L}^{-1}$ al igual que el

mecanismo de tolerancia radical, dejando el mecanismo de exclusión sin evidencias de haberlo utilizado.

4.3.3 Absorción de aluminio de los materiales vegetales de *Lolium perenne* evaluados. La absorción de Al, resulta de la multiplicación de la MS (g jarra^{-1}) por la concentración de Al (mg kg^{-1}), por lo que los resultados de absorción se presentan como $\text{mg de Al jarra}^{-1}$. A continuación se presentan y se discuten los resultados de la absorción de aluminio aéreo y radical de los materiales vegetales de ballica inglesa evaluados.

4.3.3.1 Absorción de aluminio radical de los materiales vegetales evaluados. El Cuadro 9 muestra la absorción de aluminio de la parte radical. Se observó una tendencia a aumentar la concentración en las raíces mientras mantienen el contenido de aluminio en la parte aérea. En el caso de las raíces, se observa que la absorción aumenta en las dosis de $70 \mu\text{mol Al L}^{-1}$ y $140 \mu\text{mol Al L}^{-1}$, no limitando significativamente la productividad de materia seca (g jarra^{-1}) hasta la dosis de $140 \mu\text{mol Al L}^{-1}$ e inclusive hasta la dosis de $280 \mu\text{mol Al L}^{-1}$, dependiendo del material vegetal evaluado. Al aumentar la concentración de Al en solución por sobre las dosis mencionadas anteriormente, la planta disminuye la producción de MS (g jarra^{-1}) disminuyendo también la absorción de Al.

La absorción de Al es un indicador que relaciona la producción de MS y la concentración de Al. Aun cuando dos cultivares puedan tener niveles de absorción similares, estos pueden estar dominados por concentración de Al o por producción de MS. La absorción radical, claramente está dominada por la concentración de Al radical, debido a la gran similitud de los cultivares en la producción de MS radical (Cuadro 3). Esto produjo que el comportamiento de concentración de Al radical (Cuadro 7), sea muy parecido al de absorción de Al radical (Cuadro 9).

CUADRO 9 Absorción de aluminio Radical de los distintos materiales vegetales evaluados.

Tratamiento	Producción de materia seca radical (\pm d.e.) ($\mu\text{g jarra}^{-1}$)				
Adición de Al	Línea 20	Línea 21	Línea 22	Línea 23	Lp 59
0 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	112 \pm 47 a	53 \pm 64 a	34 \pm 12 a	35 \pm 3 a	30 \pm 11 a
70 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	249 \pm 56 ab	116 \pm 58 a	152 \pm 19 ab	115 \pm 15 a	178 \pm 47 b
140 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	361 \pm 28 bc	184 \pm 27 ab	306 \pm 41 bc	281 \pm 47 b	254 \pm 55 b
280 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	332 \pm 99 bc	290 \pm 95 bc	265 \pm 43 bc	436 \pm 75 c	244 \pm 88 b
560 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	860 \pm 161 c	340 \pm 113 bc	420 \pm 120 c	622 \pm 54 cd	280 \pm 84 b
840 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	510 \pm 101 d	452 \pm 44 c	371 \pm 146 c	502 \pm 77 d	139 \pm 66 a
Adición de Al	Yatsyn	Meridian	Impact	Nevis	Nui
0 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	30 \pm 4 a	55 \pm 12 a	25 \pm 9 a	36 \pm 16 a	20 \pm 4 a
70 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	337 \pm 72 bc	203 \pm 42 b	131 \pm 26 ab	185 \pm 30 ab	269 \pm 33 b
140 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	283 \pm 34 ab	303 \pm 30 c	245 \pm 32 b	246 \pm 28 bc	167 \pm 86 ab
280 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	559 \pm 65 cd	487 \pm 38 d	428 \pm 86 c	423 \pm 105 c	321 \pm 38 b
560 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	679 \pm 246 d	646 \pm 26 d	466 \pm 93 c	734 \pm 116 d	279 \pm 145 b
840 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	569 \pm 76 cd	469 \pm 80 e	383 \pm 18 c	763 \pm 138 d	346 \pm 195 b

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ($p \leq 0,05$, TUKEY).

El comportamiento observado en la variable concentración radical y absorción radical de los distintos materiales vegetales evaluados, sugiere que a bajos niveles de Al en solución, la planta no limita el aumento de concentración de Al en sus tejidos y no limita la producción de materia seca, pero al aumentar la concentración de Al en solución, la planta disminuye la producción de MS y por ende la absorción, disminuyendo la concentración de Al. Esto ha sido señalado por MARSCHNER (1995) como un mecanismo de tolerancia por exclusión del estrés de Al. Este comportamiento de las ballicas en general también fue descrito por AUBEL (2002) y VENEGAS (2005) en ensayos similares.

4.3.3.2 Absorción de aluminio aéreo de los materiales vegetales evaluados.

En el Cuadro 10 se muestra la absorción de aluminio de la parte aérea. Se puede observar que la mayoría de las especies tienen una absorción similar a lo largo de los tratamientos no superando los 100 μg Al/jarra, salvo en situaciones irrelevantes. Lo que contrasta con los resultados obtenidos en la parte radical (Cuadro 9), donde los valores de absorción fueron superiores a 100 μg Al/jarra. Esto se debería al mecanismo de tolerancia presentado por las gramíneas, las cuales acumulan el aluminio en las raíces y posteriormente lo translocan a la parte aérea. El valor umbral de esta translocación podría variar entre los materiales vegetales, siendo aquellos más tolerantes los que aumentan la concentración en las raíces sin disminuir su producción. Situación similar fue observada por RADIC (2001), AUBEL (2002) y VENEGAS (2005) en ensayos similares con distintos materiales vegetales de gramíneas.

CUADRO 10 Absorción de aluminio Aéreo de los distintos materiales vegetales evaluados.

Tratamiento Adición de Al	Producción de materia seca radical (\pm d.e.) ($\mu\text{g jarra}^{-1}$)				
	Línea 20	Línea 21	Línea 22	Línea 23	Lp 59
0 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	26 \pm 5 a	31 \pm 4 a	23 \pm 6 a	36 \pm 9 a	25 \pm 2 a
70 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	47 \pm 10 a	63 \pm 12 a	53 \pm 13 bc	52 \pm 14 a	56 \pm 8 ab
140 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	45 \pm 15 a	37 \pm 6 a	50 \pm 5 ab	43 \pm 11 a	46 \pm 8 ab
280 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	51 \pm 67 a	54 \pm 10 a	47 \pm 13 ab	40 \pm 15 a	54 \pm 11 ab
560 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	37 \pm 9 a	68 \pm 37 a	79 \pm 15 cd	52 \pm 13 a	73 \pm 29 b
840 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	50 \pm 8 a	29 \pm 16 a	89 \pm 17 d	37 \pm 17 a	25 \pm 5 a
Adición de Al	Yatsyn	Meridian	Impact	Nevis	Nui
0 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	28 \pm 5 a	30 \pm 10 a	29 \pm 14 a	51 \pm 27 a	37 \pm 3 a
70 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	114 \pm 19 b	51 \pm 14 a	51 \pm 6 a	61 \pm 23 a	63 \pm 10 ab
140 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	72 \pm 26 ab	43 \pm 10 a	53 \pm 27 a	51 \pm 4 a	45 \pm 12 a
280 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	94 \pm 10 ab	65 \pm 9 a	50 \pm 19 a	75 \pm 6 ab	46 \pm 16 a
560 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	97 \pm 47 ab	76 \pm 11 a	42 \pm 17 a	88 \pm 9 ab	81 \pm 13 b
840 $\mu\text{mol Al L}^{-1}$	102 \pm 59 ab	70 \pm 48 a	53 \pm 47 a	109 \pm 32 b	89 \pm 25 b

Diferente letra indica diferencia significativa de medias dentro de la columna ($p \leq 0,05$, TUKEY).

4.4 Relación entre la materia seca producida y la concentración de Al de los distintos materiales vegetales evaluados

Para determinar el nivel de Al bajo el cual se produce toxicidad, tanto en la parte aérea como radical, podría realizarse al describir la producción de materia seca en función de la concentración de Al. Esto también permite determinar la variación en el comportamiento de los materiales vegetales con respecto al nivel de Al en el material vegetal, lo cual sugiere los mecanismos de tolerancia o sensibilidad utilizados por la planta.

En las Figura 1 y 2 se ratifica el efecto tóxico del Al, ya que se muestra que, en general, la MS es más alta en la medida que la concentración de Al aérea y radical es menor en la estructura correspondiente. Esta relación de materia seca aérea en función de la concentración de Al se hace más estrecha en la parte aérea (Figura 1) que para las raíces (Figura 2). Asimismo se determinó que la concentración aérea fue mucho menor que la concentración radical, lo que afirma que el Al es mantenido en las raíces por parte de los materiales vegetales evaluados, mostrando la tendencia a almacenarlo en la parte radical y translocarlo en una menor medida hacia la parte aérea.

La Figura 1 muestra que la mayoría de los materiales vegetales no ven afectada su productividad, mientras las concentraciones de Al aéreo sean relativamente bajas, aspecto que disminuye de manera exponencial a partir desde cierto punto en que aumenta la concentración de Al. Esto indicaría que los materiales vegetales evaluados, evitan inicialmente el traspaso del Al absorbido hacia la parte aérea, estructura en la que bajas concentraciones de Al sería tóxico y evitar de esta manera una disminución significativa de la producción de MSA, alcanzando un punto donde esta capacidad se ve sobrepasada y la concentración aérea de Al aumenta significativamente, con la consiguiente disminución en el rendimiento. Este efecto se observó en todos

los materiales vegetales, al igual que en la parte radical, donde se puede observar en la Figura 2 (relación MSR y concentración de Al radical).

Al observar de manera aislada los materiales vegetales sensibles (Línea 21, Línea 23, Meridian e Impact) y tolerantes (Yatsyn), se puede ver con mayor detalle que el comportamiento de estos materiales vegetales sigue una tendencia muy similar a lo ya descrito anteriormente en las Figuras 1 y 2, donde al aumentar la concentración de Al se produce una disminución significativa de la producción de materia secas.

Al graficar la relación entre la MSA y la concentración de Al correspondiente, se pudo realizar la comparación del comportamiento entre lo que ocurre con los materiales vegetales sensibles versus Yatsyn que figura como el material vegetal tolerante, frente al aumento de la concentración de Al en la solución nutritiva. Para ello se agrupó en la Figura 5, aquellos materiales vegetales sensibles a la toxicidad de Al (Línea 21, Línea 23, Meridian e Impact), donde se registraron disminuciones en la producción de MSA al igual que lo descrito por Yatsyn en la Figura 6, pero con la diferencia que entre los materiales vegetales más sensibles respecto a Yatsyn, es posible que exista un umbral de Al en la parte aérea por sobre el cual existe una disminución evidente de la productividad. Este umbral de Al estaría siendo parte intrínseca de la especie, pero con diferencias entre materiales vegetales atribuibles a la estrategia utilizada por parte de la planta, para minimizar la translocación del Al absorbido a la parte aérea, relacionado además con la capacidad de tolerar el aumento en la concentración de Al en la parte aérea, sin el consiguiente efecto sobre la disminución de la productividad.

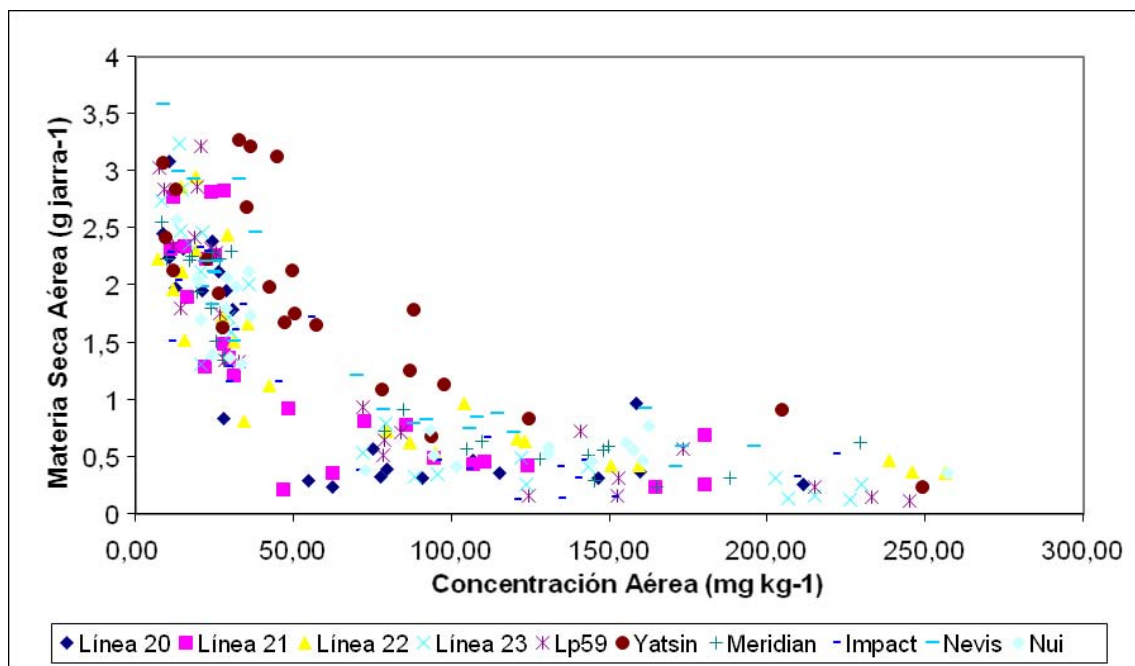


GRAFICO 1 Relación materia seca aérea v/s concentración de Al aéreo de diez materiales vegetales evaluados

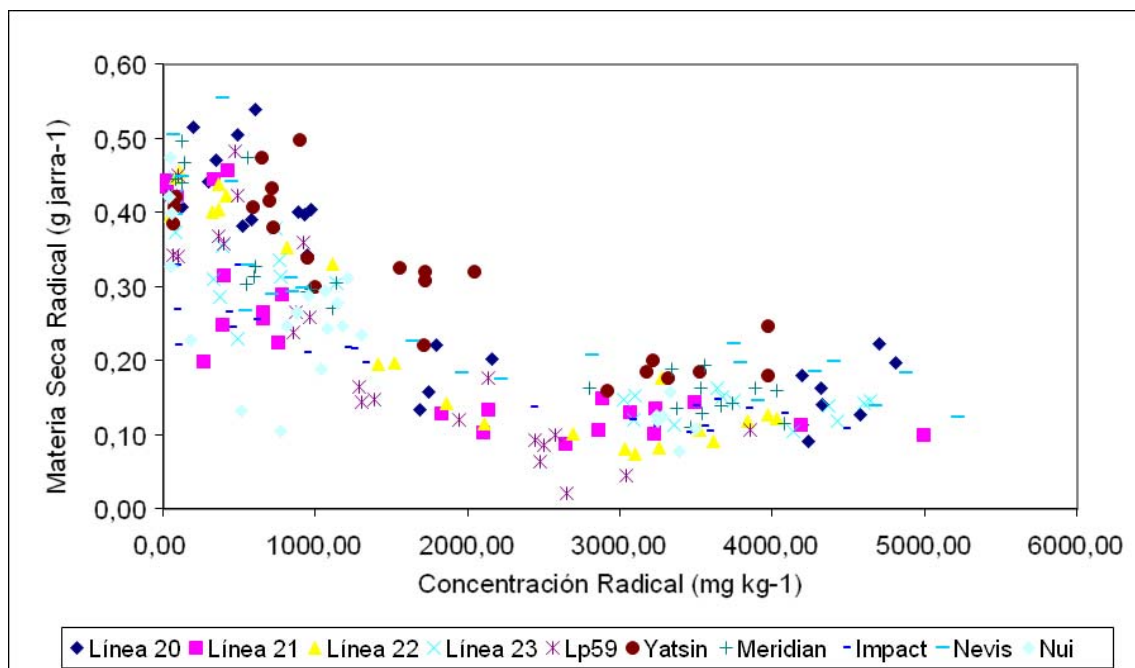


GRAFICO 2 Relación materia seca radical v/s concentración de Al radical de diez materiales vegetales evaluados

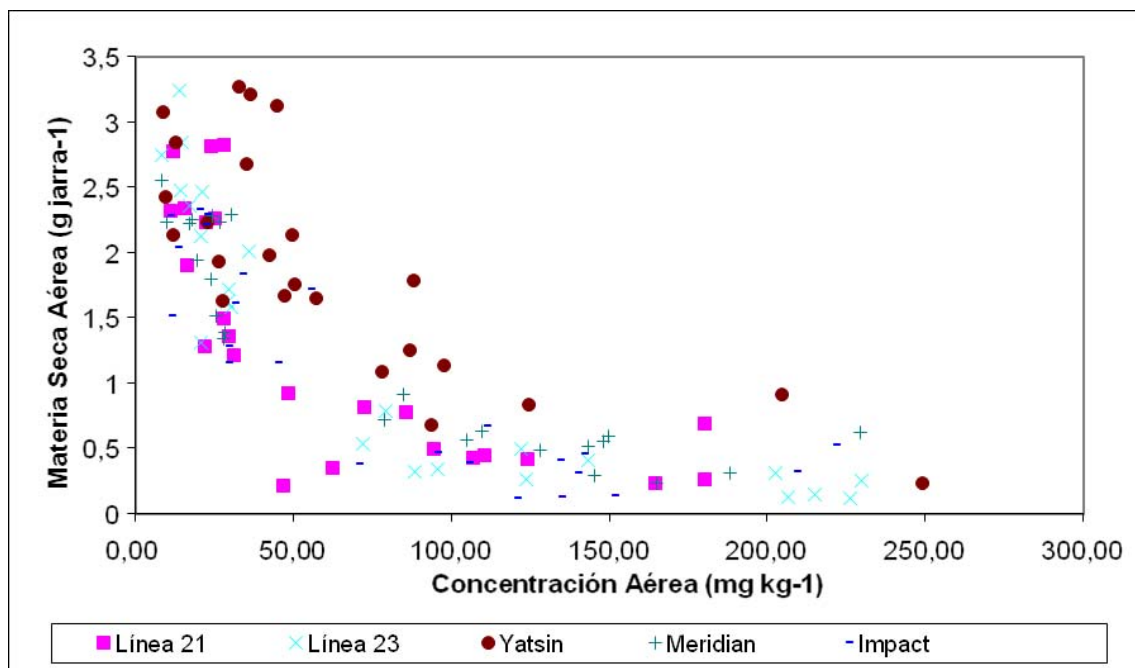


GRAFICO 3 Relación materia seca aérea v/s concentración de Al aéreo de los materiales vegetales sensibles y tolerantes

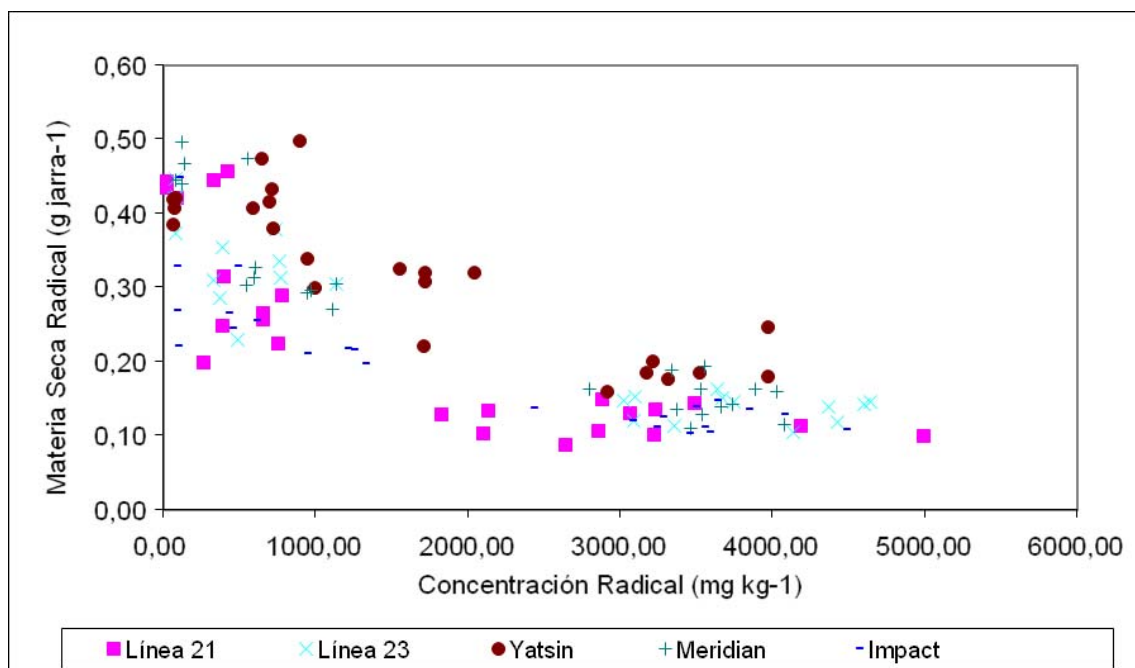


GRAFICO 4 Relación materia seca radical v/s concentración de Al radical de los materiales vegetales sensibles y tolerantes.

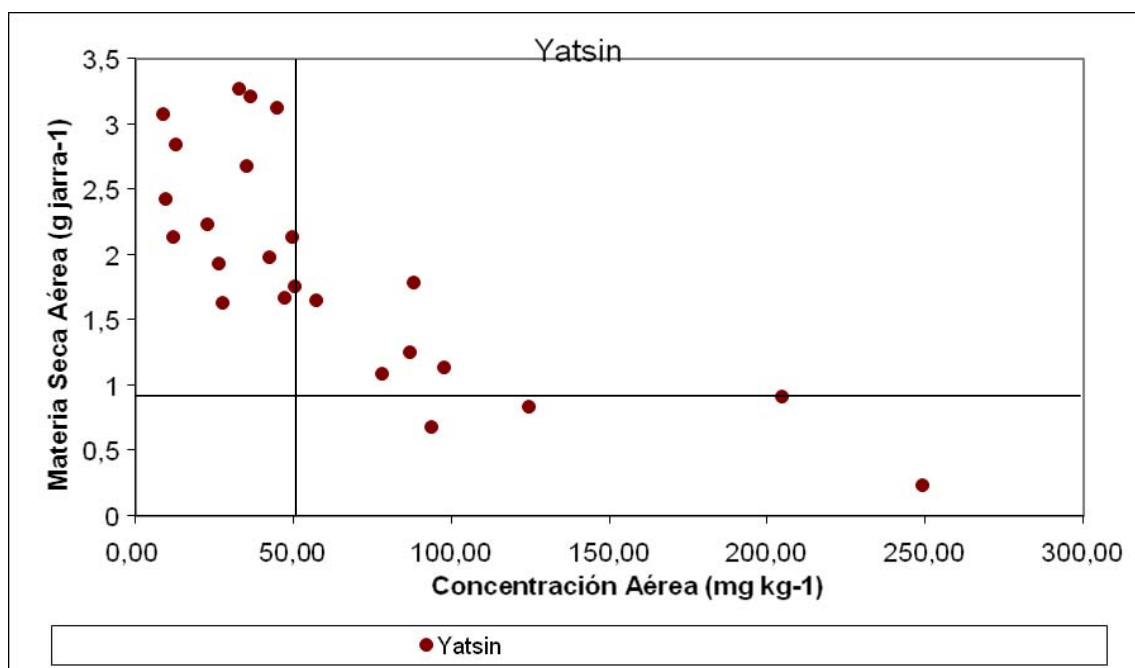


GRAFICO 5 Relación materia seca aérea versus concentración aérea del cultivar tolerante.

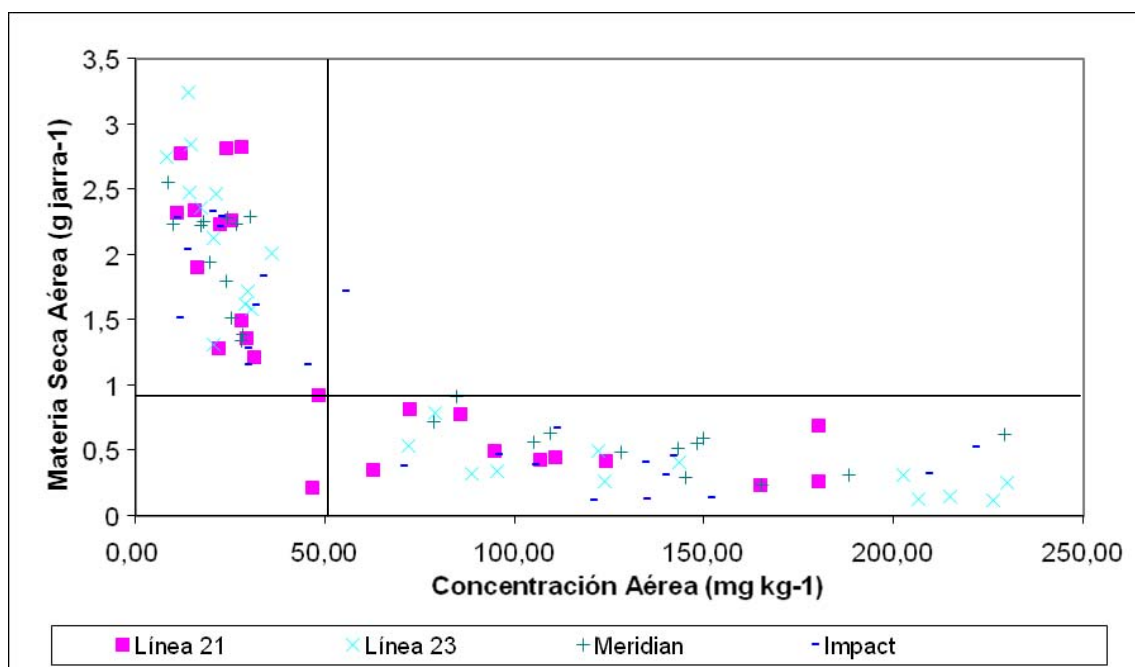


GRAFICO 6 Relación materia seca aérea versus concentración aérea de los cultivares sensibles.

4.5 Comportamiento general de los materiales vegetales frente al aluminio en solución

El efecto principal observado es la disminución en la producción de materia seca en todos los materiales vegetales evaluados, en la medida que se aumentó la concentración de Al en solución. Asimismo, el otro aspecto relevante provocado al aumentar la dosis de Al, es que de igual manera aumentó la concentración de Al en la parte radical, en una proporción evidentemente mayor que lo registrado en la parte aérea. Además, se logró observar que todos los materiales vegetales evaluados tuvieron un comportamiento similar al aumentar la concentración de Al en la solución nutritiva, pero haciendo uso de mecanismos distintos y con eficiencias diferentes, con el fin de minimizar el daño por toxicidad al aumentar en forma progresiva la concentración de Al, generando de este modo, tres grupos principales de respuesta frente al Al en solución, considerando también el comportamiento productivo aéreo y radical; en dichos grupos se encuentran los materiales vegetales más sensibles, los más tolerantes y aquellos que manifiestan una situación intermedia.

Las estrategias utilizadas por los materiales vegetales para tolerar el aumento de la concentración de Al en la solución, se muestran en el Cuadro 11, pudiéndose observar que para la mayor parte de los materiales vegetales evaluados, los mecanismos de exclusión y tolerancia aérea fueron los mecanismos más utilizados, combinando en algunos casos con la utilización adicional de la tolerancia radical, mostrando preferencias por parte de los materiales vegetales evaluados, respecto a uno u otro mecanismo en particular, o combinaciones de éstos en especial, para evitar la disminución en la producción de materia seca, como respuesta frente al efecto tóxico del Al.

CUADRO 11 Diferencia de sensibilidad a la toxicidad de Al en solución de los distintos materiales vegetales evaluados.

Material vegetal	Sensibilidad a la toxicidad de Al en solución			Mecanismo de adaptación		
	T	ST	S	Exclusión	T. Radical	T. Aérea
Línea 20		██████		E	TR	TA
Línea 21			██████	E	TR	TA
Línea 22		██████		E		TA
Línea 23			██████	E		TA
Lp 59		██████		E	TR	TA
Yatsyn	██████			E		
Meridian			██████	E		TA
Impact			██████	E	TR	TA
Nevis		██████			TR	TA
Nui		██████		E		TA

Tolerante (T); Semitolerante (ST); Sensible (S); Exclusión (E); Tolerancia radical (TR); Tolerancia aérea (TA).

El material vegetal que se clasificó como tolerante, se diferencia sustancialmente de los demás, al hacer uso preferencial del mecanismo de exclusión, para evitar la toxicidad producida por en Al en solución, que le permitió mantener una producción mayor de materia seca frente a concentraciones de Al más altas.

Los materiales vegetales de Línea 20, Línea 21, Lp 59 e Impact, manifestaron el uso de una combinación de los tres mecanismos de tolerancia, dentro de dosis diferentes de Al. No todos respondieron de la misma manera ni en las mismas dosis, el caso es particular para cada material vegetal.

En el caso de haber utilizado dos mecanismos preferenciales de tolerancia al Al, se observó que Línea 22, Línea 23, Meridian y Nui, presentaron la exclusión y la tolerancia aérea, como los mecanismos más marcados frente al aumento de Al en la solución, quedando Nevis, como el material vegetal que utilizó como mecanismo para tolerar el Al en solución, la tolerancia radical y aérea. De esta forma y usando la MSA como la variable más importante para determinar el grado de sensibilidad, se logró realizar una clasificación de tolerancia o sensibilidad para los materiales vegetales evaluados, por ser la MSA la estructura más sensible a los efectos tóxicos del Al.

5 CONCLUSIONES

- Todos los cultivares y líneas de *Lolium perenne* evaluados presentaron variación en su respuesta frente a las diferentes dosis de Al en solución, sugiriendo diferentes mecanismos de adaptación y de tolerancia frente a los efectos fitotóxicos del Al.
- Nueve de los diez materiales vegetales evaluados evidenciaron el uso de mecanismos de exclusión, lo que se infiere al observar un aumento de la concentración de aluminio en las raíces por debajo del promedio al aumentar las dosis de aluminio en la solución nutritiva.
- Dos cultivares y tres líneas presentaron tolerancia radical, evidenciado por una mayor acumulación del Al en la parte radical respecto a la parte aérea, sin que ello genere una disminución significativa del rendimiento en las raíces.
- Los materiales vegetales exceptuando a Yatsin, presentaron tolerancia aérea al observar un aumento en la concentración de aluminio en los tejidos sin que la producción de materia seca disminuyera proporcionalmente dentro del promedio.
- En los materiales vegetales evaluados se determinaron tres grupos de tolerancia, donde los más sensibles son Línea 21, Línea 23, Meridian e Impact, el más tolerante resultó ser Yatsyn, que se destaca por utilizar el mecanismo de exclusión como estrategia de adaptación al aluminio fitotóxico; dejando a los restantes materiales vegetales en una situación de tolerancia intermedia.

6 RESUMEN

El objetivo de este estudio fue evaluar el comportamiento de diez materiales vegetales de ballica inglesa (*Lolium perenne* L), dentro de los cuales se encontraban los cultivares Meridian, Impact, Nevis y Nui y las líneas LP 59, Línea 20, Línea 21, Línea 22. Línea 23, utilizando como control el cultivar Yatsyn 1, frente a dosis crecientes de aluminio en solución, aplicado a jarras Leonard con cuarzo como sustrato. El experimento se realizó entre los meses de Julio de 2004 y Octubre de 2004 en una cámara de crecimiento del Instituto de Producción Animal de la Universidad Austral de Chile, bajo condiciones ambientales controladas de temperatura ($22^{\circ} \pm 2^{\circ}\text{C}$), humedad relativa y de fotoperíodo (16 h luz; 8 h oscuridad). Se transplantaron siete plántulas por cultivar a cada jarra. Se utilizaron seis tratamientos con cuatro repeticiones, en un diseño completamente al azar. La solución nutritiva utilizada ($125 \text{ mL jarra}^{-1}$) fue renovada diariamente y presentó un pH constante de 4,2. Las concentraciones de aluminio en solución fueron: 70; 140, 280; 560 y $840 \mu\text{Mol Al L}^{-1}$ (aportados como sulfato de aluminio) además de un control, sin adición de aluminio. Las especies fueron cosechadas a los 90 días después del transplante. Se evaluó separadamente la producción de materia seca de la parte aérea y radical. Posteriormente el material vegetal fue calcinado y a través de espectrofotometría de absorción atómica se determinaron las concentraciones de Al ($\text{mg kg}^{-1} \text{MS}$) en el material vegetal. Los resultados obtenidos fueron estadísticamente analizados a través de análisis de la varianza y se aplicó el test de Tukey para evaluar la diferencia entre medias.

Los resultados mostraron que en todos los materiales vegetales de *Lolium perenne* L. evaluados la productividad de las raíces como la productividad de la parte aérea disminuyó a mayores concentraciones de Al en solución, pero en algunos casos esta disminución de la productividad no fue significativa o solo se

observó en la última dosis de $840 \mu\text{Mol Al L}^{-1}$, lo que indicaría que los materiales vegetales presentan diferentes sensibilidades a la toxicidad de Al en solución.

De acuerdo a la variable producción de materia seca, se puede establecer una clasificación con respecto a los materiales vegetales evaluados, donde se observó que existen tres grupos de sensibilidad al aluminio en solución, siendo mayormente tolerante el cultivar Yatsyn 1, quedando en situación intermedia los cultivares Nevis y Nui y las líneas LP 59, Línea 20 y Línea 22; por último los más sensibles serían Meridian, Impact, Línea 21 y Línea 23, además se deja de manifiesto que todos los materiales vegetales utilizan distintos mecanismos para tolerar las concentraciones de Al crecientes en la solución, pero la eficiencia de estos mecanismos varía en cada material vegetal, lo que queda demostrado en las diferentes concentraciones de Al encontradas tanto en la parte aérea como radical. Todos los materiales vegetales evaluados presentaron, en mayor o menor grado, mecanismos de exclusión del Al, excepto en Nevis, donde se observó un comportamiento distinto, al presentar aparentemente un mecanismo de tolerancia interna, que le proporcionaría la capacidad de tolerar mayores concentraciones de aluminio en su interior.

A bajos niveles de Al en solución, la planta no limita el aumento de concentración de aluminio en sus tejidos ni la productividad de MS. Al aumentar la concentración de aluminio en solución la planta disminuye su producción de MS y por ende la absorción. Al aumentar la dosis de Al en solución, la planta disminuye la productividad de MS e incrementa la concentración de Al en sus tejidos, comportamiento que puede inferirse como una característica de la especie.

SUMMARY

The purpose of this study was to evaluate the behavior of ten vegetable materials from perennial ryegrass (*Lolium perenne* L), from which there were the cultivars Meridian, Impact, Nevis and Nui; and the lines LP 59, line 20, line 21, line 22. Line 23 utilized the cultivars Yatsyn 1, to a feed of solution of aluminum applied to Leonard jars with quartz as a substrate. The experiment was performed between the months of July and October of 2004 in a growing chamber at the Animal Production Institute of the University Austral of Chile, from which the environmental conditions were controlled ($22^{\circ} \pm 4^{\circ}\text{C}$, relative humidity, and photoperiods of 16h light, 8h dark). Seven plants per jar were transplanted and there were six treatments with four repetitions in a random design. The nutritive solution utilized (125mL jar^{-1}) was daily renewed and the pH was kept at a constant of 4.2. The concentrations of aluminum in solution were 70, 140, 280, 560, 840 $\mu\text{M Al}$ (delivered as aluminum sulfate) in addition of a control, which had not aluminum addition. The species were harvested 90 days after transplant. Evaluations of the dry matter were and radical were done separately. Ultimately the vegetable material was burned to ashes and through an atomic photometric spectroscopy analysis the concentrations of Al (mg kg^{-1}) were determined in the vegetable material. The obtained results were analyzed statistically through the variance analysis; likewise, the Tukey test was applied to evaluate the difference between medians.

The results showed that in all evaluated vegetable materials of *Lolium perenne* L. the productivity of the roots and the productivity of the stems decreased at higher concentrations of solutions of Al, yet in some cases this decrease of productivity was not significant or was only observed in the last

dose of 840 μ M Al; which indicates that the vegetable materials have different sensitivities to the toxicity of solution of Al.

According to the variable of dry material produced, it was possible to establish a classification within the vegetable materials evaluated, from which it was observed occurrences of three groups of sensitivity to the solution of aluminum. The most tolerant appeared to be the cultivars Yatsyn 1; being in this middle the cultivars Nevis and Nui and the lines LP 59, Line 20, and Line 22; and lastly the most sensitive were Meridian, Impact, Line 21, and Line 23. Furthermore, it appears that all the vegetable materials used different mechanisms to tolerate increase in concentrations of Al in the solutions, however, the efficiency of these mechanisms varies in every vegetable material, which is demonstrated in the different concentrations of Al found in the aerial parts as in the roots. All the evaluated vegetable materials presented, more or less, mechanisms of exclusion of Al, except in Nevis where was observed a different behavior as it presented a mechanism of internal tolerance that gives its capability of tolerate higher concentrations of aluminum in its interior.

At low levels of Al in a solution, the plant does not limit the increase of concentration of aluminum nor the production of MS. The increase in concentration of Al in a solution causes the plant to decrease its production of MS and consequently the absorption. As Al is augmented in a dose solution, the plant decreases its production of MS and increases the concentration of Al in its tissues, behavior that can be inferred as a characteristic of the species.

7 BIBLIOGRAFIA

- ALFARO, M. 1997. Acidificación de suelos: Efectos sobre la pradera y la producción animal. *Tierra Adentro* (Chile) 5: 36-38.
- ALVA, A.K., EDWARDS, D.G., ASHER, C.J. y BLAMEY, F.P. 1986. Effects of phosphorus/aluminium molar ratio and calcium concentration on plant response to aluminium toxicity. *Soil Science Society of American Journal* (EEUU) 50:133-137.
- AUBEL, M. 2002. Evaluación del comportamiento de seis cultivares de Ballica inglesa (*Lolium perenne* L.) ante distintos niveles de aluminio en solución. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 127 p.
- BADE, S. 2003. Clasificación preliminar de accesiones de *Bromus valdivianus* Phil., *Agrostis capilaris* L. y *Holcus lanatus* L., según tolerancia al aluminio en solución. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 109 p.
- BALIGAR, V.C., WRIGHT, R.J., KINRAIDE, T.B., FOY, C.D. y ELGIN, J.H. 1987. Aluminum effects on growth, mineral uptake, and efficiency ratios in Red clover cultivars. *Agronomy Journal* (EEUU). 79: 1038-1044.
- BENABENTE, P. 1987. Toxicidad de aluminio como causal del daño radical en remolacha. Tesis Lic. Agr. Chillan. Universidad de Concepción, Facultad de Agronomía. 85 p.

- BENNET, R.J. y BRENN, C.M. 1991. The aluminium signal: New dimensions to mechanisms of aluminium tolerance. *Plant and Soil (Holanda)* 134: 153-166.
- BLAMEY, F.P., EDWARDS, D.G. y ASHER, J.C. 1983. Effects of aluminum, OH:Al and P:Al molar ratios, and ionic strength on Soybean root elongation in solution culture. *Soil Science (EEUU)* 136: 197-207.
- BOHN, H., McNEAL, B. y O'CONNOR, G. 1993. *Química de suelos*. 3^a ed. Limusa. México D.F., México. 370 p.
- BRADY, N. y WEIL, R. 2000. *Elements of the nature and properties of soils*. . New Jersey. EEUU Prentice Hall. 559 p.
- BRADY, N. y WEIL, R. 1999. *The nature and properties of soils*. 12th. New Jersey, (EEUU). Prentice Hall. 881 p.
- DE LA FUENTE, J.M. y HERRERA, L. 1999. Advances in the understanding of aluminum toxicity and the development of aluminum-tolerant transgenic plants. *Advances in Agronomy (EEUU)* 66: 103-120.
- DELHAIZE, E. y RYAN, P.R. 1995. Aluminum toxicity and tolerance in plants. *Plant Physiology (EEUU)*107: 315-321.
- DELHAIZE, E. y RYAN, P.R y RANDALL, P.J. 1993. Aluminum tolerance in Wheat (*Triticum aestivum* L.). II. Aluminum-stimulated excretion of malic acid from root apices. *Plant Physiology (EEUU)*103: 695-702.
- DOMINGUEZ, A. 1997. *Tratado de fertilización*. Madrid, España. Mundi-Prensa. 613 p.

- FOY, C.D.; CHANEY, R.L. y WHITE, M.C. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. Annual Review of Plant Physiology (EEUU) 29: 511 - 566. buscar a FOY, 1988.
- GARZÓN, T. 2003. Estudio de la compartimentación celular en plantas modelos sometidas a estrés por aluminio. (On Line). http://www.tdx.cesca.es/TESIS_UAB/AVAILABLE/TDX-1025104-171232/tg11de1.pdf (Sep 2004)
- GRAUER, U. 1993. Modelling anion amelioration of aluminium phytotoxicity. Plant and Soil (Holanda) 157: 319-331.
- GRAUER, U. y HORST W. 1992. Modelling cation amelioration of aluminium phytotoxicity. Soil Science Society of American Journal (EEUU) 56: 166-172.
- HORST, W. 1995. The role of the apoplast in aluminium toxicity and resistance of higher plants: A review. Zeitschrift Pflanzenernahr Bodenk (Alemania) 158: 419-428.
- HUANG, J.W., GRUNES, D.L. y KOCHIAN, L.V. 1993. Aluminium effects on Calcium ($^{45}\text{Ca}^{2+}$). Translocation in Aluminium-Tolerant and Aluminium-Sensitive Wheat (*Triticum aestivum*) cultivars. Plant Physiology (EEUU) 102: 85-93.
- HUE, N.V., CRADDOCK, G.R. y ADAMS, F. 1986. Effects of organic acids on Aluminium toxicity in subsoils. Soil Science Society of American Journal (EEUU) 50: 28 - 34.

- KINRAIDE, T.B. 1991. Identity of the aluminium species. *Plant and Soil* (Holanda) 134: 167-178.
- KOCHIAN, L. 1995. Cellular mechanisms of aluminium toxicity and resistance in plants. *Annual Review of Plant Physiology* (EEUU) 46: 237-260.
- KUO, S., BRAUEN, S.E. y JELLUM, E.J. 1992. The effects of aluminum and phosphate on the growth of Annual Bluegrass and Bentgrass in some acidic western Washington soil. *Soil Science* (EEUU) 153 (5).
- LOUE, A. 1988. Los microelementos en agricultura. Madrid, España. Mundi Prensa. 354 p.
- MARSCHNER, H. 1995. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2th ed. San Diego, USA. Academic Press. 889 p.
- MARSCHNER, H. 1991. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. *Plant and Soil* 134: 1-20.
- MORTVEDT, J., GIORDANO, P. y LINDSAY, W. 1972. *Micronutrients in agriculture*. 2th ed. Madison, (EEUU). Committee. 666 p.
- MIYAZAWA, M. CHIERICE, G.O. y PAVAN, M.A. 1992. Amenizacão da toxicidade de alumínio as raízes do trigo pela complexação com ácidos orgânicos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo* 16: 209-215.
- PIÑEROS, M., MAGALHAES, J.V., ALVES, V. C. y KOCHIAN, L.V. 2002. The physiology and biophysics of an aluminum tolerance mechanism based on root citrate exudation in Maize. *Plant Physiology* (EEUU)129: 1194-1206.

- PONCE, J. 1999. Evaluación del comportamiento de cinco especies pratenses ante distintos niveles de aluminio en solución. Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 110 p.
- PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE (PUC). 1975. Manual de análisis de suelos. Santiago. Pontificia Universidad Católica de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. 77 p.
- RADIC, S. 2003. Fitotoxicidad por aluminio en condiciones de campo sobre tres poaceas forrajeras: (*Bromus valdivianus* PHIL., *Holcus lanatus* L. *Lolium perenne* L.). Tesis Ms.Sc. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agraria 134 p.
- RADIC, S. 2001. Estudio de tolerancia a la toxicidad por aluminio de cuatro ecotipos de bromo (*Bromus valdivianus* Phil). Tesis Lic. Agr. Valdivia. Universidad Austral de Chile, Facultad de Ciencias Agrarias. 112 p.
- RENGEL, Z. y ROBINSON, D.L. 1989. Aluminium effects on growth and macronutrient uptake by annual ryegrass. *Agronomy Journal* (EEUU) 81:208-215.
- ROWELL, D.L. 1996. *Soil Science; Methods and Applications*. Inglaterra. Longman. 350 p.
- ROWELL, D.L. 1992. Acidez y alcalinidad del suelo. In: Wild, A. (ed). *Condiciones de suelo y desarrollo de las plantas según Russell*. Madrid, España. Mundi-Prensa. pp: 885-940.
- ROY, A.K., SHARMA, A. y TALUKDER, G. 1988. Some aspects of aluminium toxicity in plants. *The Botanical Review* (EEUU) 54(2): 145 - 178.

- RYAN, P. y KOCHIAN L.V. 1993. Interaction between Aluminium toxicity and Calcium uptake at the root apex in Near-isogenic lines wheat (*Triticum aestivum*) differing in Aluminium tolerance. *Plant Physiology* (EEUU) 102: 975-982.
- SOLÓRZANO, H. 2004. El aluminio: su relación con la enfermedad de Alzheimer. (On Line) <<http://www.hector.solorzano.com/articulos/aluminio.html>> (Mar. 2005)
- SPARKS, D. 1995. Chapter 9: The chemistry of soil acidity. In: Sparks, D. *Environmental soil chemistry*. Academic Press INC. New York, USA. 203-217.
- TICE, K., PARKER, D., y DeMASON, D. 1992. Operationally defined apoplastic and symplastic aluminum fractions in root tips of aluminum-intoxicated Wheat. *Plant Physiology* (EEUU)100: 309-318.
- TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, I.D. y HAVLIN, J.L. 1993. *Soil Fertility and Fertilizers*. 5th ed. MacMillan. (EEUU). 634 p.
- WHEELER, D. y DODD B. 1995. Effect of aluminium on yield and plant chemical concentrations of some temperate legumes. *Plant and Soil* (Holanda).173:133-145.
- WHEELER, D.M., EDMEADES, D.C., CHRISTIE, R.A. 1992 a. Effect of aluminum on plant chemical concentrations in some temperate grass grow in solution culture at low ionic strength. *Journal of Plant Nutrition* (EEUU) 15(4): 387-402.

ZHANG, G. y TAYLOR, G. 1989. Kinetics of aluminium uptake by excised roots of aluminium-tolerant and aluminium-sensitive cultivars of Wheat (*Triticum aestivum*). Journal of Agricultural Science (EEUU)133: 371-377..

ANEXOS

ANEXO 1 Registro de temperatura máxima (max.), mínima (min.) y humedad relativa (HR) de la cámara de crecimiento durante es periodo del ensayo.

Fecha	T° min.	T° max.	HR
14-ago-04	20	23	65
15-ago-04	20	22	65
16-ago-04	20	23	70
17-ago-04	19	24	65
18-ago-04	18	24	65
19-ago-04	21	22	65
20-ago-04	20	25	70
21-ago-04	21	23	65
22-ago-04	22	23	65
23-ago-04	20	24	70
24-ago-04	20	23	65
25-ago-04	20	22	65
26-ago-04	20	23	65
27-ago-04	19	24	63
28-ago-04	18	24	75
29-ago-04	21	22	65
30-ago-04	20	25	65
31-ago-04	21	23	60
01-sep-04	22	23	65
02-sep-04	20	24	65
03-sep-04	20	23	80
04-sep-04	20	22	70
05-sep-04	20	23	70
06-sep-04	19	24	65
07-sep-04	18	24	65
08-sep-04	21	22	65
09-sep-04	20	25	72.5
10-sep-04	21	23	70
11-sep-04	22	23	65
12-sep-04	20	24	72

ANEXO 1 Continuación.

Fecha	T° min.	T° max.	HR
13-sep-04	20	23	73
14-sep-04	20	22	68
15-sep-04	20	23	65
16-sep-04	19	24	60
17-sep-04	18	24	75
18-sep-04	21	22	70
19-sep-04	20	25	80
20-sep-04	21	23	80
21-sep-04	22	23	75
22-sep-04	20	24	80
23-sep-04	20	23	80
24-sep-04	20	22	75
25-sep-04	20	23	70
26-sep-04	19	24	75
27-sep-04	18	24	75
28-sep-04	21	22	75
29-sep-04	20	25	80
30-sep-04	21	23	70
01-oct-04	22	23	70
02-oct-04	20	24	65
03-oct-04	20	23	65
04-oct-04	20	22	65
05-oct-04	20	23	60
06-oct-04	19	24	65
07-oct-04	18	24	65
08-oct-04	21	22	70
09-oct-04	20	25	70
10-oct-04	21	23	70
11-oct-04	22	23	70
12-oct-04	20	24	65

ANEXO 2 Resultados del aluminio intercambiable presente en el sustrato (cuarzo).

Repeticiones	Al intercambiable (mg kg ⁻¹)
1	0.73
2	0.50
3	0.80
4	0.38
5	0.58
6	0.50
7	0.45
8	0.39
9	0.33
10	0.46
11	0.43
12	0.46
13	0.35
14	0.32
15	0.22
16	0.33
17	0.59
18	0.75
19	0.11
20	0.54
Media	0.46 ± 0.17

ANEXO 3 Promedio, desviación estándar (DS) y varianza (V) para el parámetro producción de materia seca radical para los distintos cultivares evaluadas.

Dosis	Línea 20			Línea 21		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	0,46	0,05	0,00	0,44	0,01	0,00
70	0,45	0,08	0,01	0,30	0,11	0,01
140	0,39	0,03	0,00	0,26	0,03	0,00
280	0,18	0,04	0,00	0,13	0,02	0,00
560	0,19	0,03	0,00	0,10	0,01	0,00
840	0,12	0,02	0,00	0,13	0,01	0,00

Dosis	Línea 22			Línea 23		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	0,43	0,03	0,00	0,42	0,03	0,00
70	0,42	0,02	0,00	0,29	0,05	0,00
140	0,27	0,08	0,01	0,33	0,03	0,00
280	0,08	0,01	0,00	0,13	0,02	0,00
560	0,12	0,01	0,00	0,14	0,01	0,00
840	0,13	0,04	0,00	0,14	0,02	0,00

Dosis	LP 59			Yatsin		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	0,39	0,06	0,00	0,41	0,02	0,00
70	0,41	0,06	0,00	0,45	0,04	0,00
140	0,28	0,05	0,00	0,36	0,05	0,00
280	0,16	0,02	0,00	0,32	0,01	0,00
560	0,10	0,01	0,00	0,21	0,03	0,00
840	0,05	0,03	0,00	0,18	0,02	0,00

ANEXO 3 Continuación.

Dosis	Meridian			Impact		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	0,46	0,03	0,00	0,32	0,10	0,01
70	0,35	0,08	0,01	0,27	0,04	0,00
140	0,29	0,01	0,00	0,21	0,01	0,00
280	0,14	0,01	0,00	0,11	0,01	0,00
560	0,18	0,02	0,00	0,14	0,01	0,00
840	0,13	0,02	0,00	0,11	0,01	0,00

Dosis	Nevis			Nui		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	0,42	0,08	0,01	0,40	0,06	0,00
70	0,40	0,13	0,02	0,27	0,02	0,00
140	0,30	0,01	0,00	0,23	0,03	0,00
280	0,20	0,02	0,00	0,27	0,03	0,00
560	0,19	0,03	0,00	0,10	0,02	0,00
840	0,16	0,04	0,00	0,13	0,02	0,00

ANEXO 4 Promedio, desviación estándar (DS) y varianza (V) para el parámetro producción de materia seca aérea para los distintos cultivares evaluadas.

Dosis	Línea 20			Línea 21		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	2,44	0,47	0,22	2,33	0,36	0,13
70	2,15	0,23	0,05	2,53	0,33	0,11
140	1,60	0,55	0,30	1,34	0,12	0,01
280	0,45	0,34	0,12	0,75	0,18	0,03
560	0,43	0,11	0,01	0,50	0,13	0,02
840	0,33	0,05	0,00	0,26	0,06	0,00

ANEXO 4 Continuación.

Dosis	Línea 22			Línea 23		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	1,96	0,31	0,10	2,82	0,32	0,10
70	2,64	0,31	0,10	2,24	0,21	0,04
140	1,51	0,27	0,07	1,56	0,18	0,03
280	0,67	0,12	0,01	0,50	0,22	0,05
560	0,67	0,22	0,05	0,35	0,12	0,01
840	0,40	0,05	0,00	0,18	0,09	0,01

Dosis	LP 59			Yatsin		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	2,50	0,56	0,31	2,62	0,42	0,18
70	2,70	0,41	0,17	3,07	0,27	0,07
140	1,68	0,45	0,20	2,07	0,14	0,02
280	0,70	0,18	0,03	1,44	0,32	0,10
560	0,46	0,23	0,05	1,55	0,29	0,08
840	0,14	0,02	0,00	0,66	0,30	0,09

Dosis	Meridian			Impact		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	2,31	0,16	0,03	1,86	0,36	0,13
70	2,08	0,25	0,06	2,17	0,23	0,05
140	1,62	0,41	0,17	1,33	0,27	0,07
280	0,71	0,15	0,02	0,48	0,13	0,02
560	0,53	0,05	0,00	0,33	0,14	0,02
840	0,36	0,18	0,03	0,27	0,19	0,04

Dosis	Nevis			Nui		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	2,75	0,69	0,47	2,09	0,36	0,13
70	2,39	0,68	0,46	1,99	0,14	0,02
140	2,07	0,16	0,03	1,45	0,19	0,04
280	0,93	0,19	0,04	0,51	0,16	0,03
560	0,79	0,08	0,01	0,55	0,07	0,01
840	0,63	0,21	0,05	0,53	0,18	0,03

ANEXO 5 Promedio, desviación estándar (DS) y varianza (V) para el parámetro concentración de aluminio radical para los distintos cultivares evaluadas.

Dosis	Línea 20			Línea 21		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	242,82	98,91	9784,16	120,82	145,37	21131,90
70	548,62	55,55	3085,38	366,86	70,91	5028,41
140	936,91	36,26	1314,89	713,92	67,02	4492,35
280	1846,77	213,89	45746,84	2239,54	453,36	205534,94
560	4507,91	295,80	87496,18	3430,52	1070,11	1145131,34
840	4333,50	171,26	29328,53	3495,27	495,76	245782,24

Dosis	Línea 22			Línea 23		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	78,77	24,77	613,58	84,34	7,09	50,24
70	365,92	39,41	1553,22	397,44	68,73	4724,15
140	1212,99	318,09	101183,79	853,65	192,36	37003,79
280	3252,21	260,12	67664,93	3494,67	634,70	402841,03
560	3488,81	921,38	848948,90	4321,54	448,61	201250,90
840	2835,49	738,55	545457,06	3635,67	463,47	214799,92

Dosis	LP 59			Yatsin		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	78,67	25,28	638,88	73,65	9,25	85,60
70	433,33	60,62	3674,58	737,93	107,79	11618,46
140	905,08	50,29	2529,10	814,27	192,53	37069,23
280	1529,14	405,33	164295,48	1759,11	207,18	42922,31
560	2705,31	815,78	665490,39	3295,30	1075,47	1156646,32
840	2666,17	263,09	69218,78	3153,72	169,33	28672,63

ANEXO 5 Continuación.

Dosis	Meridian			Impact		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	120,05	24,37	593,80	79,46	9,38	88,06
70	576,82	29,91	894,83	483,75	80,67	6507,17
140	1042,08	97,13	9434,12	1171,97	166,59	27752,40
280	3395,60	425,86	181359,17	3800,46	572,29	327518,92
560	3703,63	311,76	97193,10	3337,65	627,83	394167,25
840	3653,97	286,07	81837,72	3360,02	240,87	58019,66

Dosis	Nevis			Nui		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	85,26	31,36	213751,07	50,19	9,45	89,26
70	483,18	78,36	7102117,55	992,77	93,16	8679,35
140	828,57	81,23	5978567,49	728,83	376,91	142062,50
280	2155,70	498,59	4259441,19	1209,86	67,45	4549,97
560	3928,61	240,22	5785752,12	2725,71	1305,77	1705038,87
840	4794,12	343,84	5211692,80	2595,09	1388,19	1927071,02

ANEXO 6 Promedio, desviación estándar (D.S) y varianza (V) para el parámetro concentración de aluminio aéreo para los distintos cultivares evaluadas.

Dosis	Línea 20			Línea 21		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	10,90	1,68	2,81	13,71	2,65	7,03
70	22,40	5,63	31,68	24,92	2,42	5,86
140	28,19	1,77	3,15	27,72	4,00	16,01
280	88,52	47,77	2281,96	75,33	20,16	406,38
560	88,21	14,12	199,42	130,46	34,04	1158,59
840	158,27	40,03	1602,16	113,62	68,62	4708,73

ANEXO 6 Continuación.

Dosis	Línea 22			Línea 23		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	12,44	3,70	13,66	12,82	3,03	9,19
70	20,39	6,23	38,87	23,85	8,23	67,77
140	34,25	6,26	39,25	27,55	4,63	21,46
280	74,07	27,07	732,97	83,90	10,31	106,20
560	124,78	19,27	371,33	154,87	51,04	2604,70
840	225,11	44,34	1965,85	212,62	10,42	108,54

Dosis	LP 59			Yatsin		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	10,80	3,00	8,99	10,82	1,86	3,46
70	20,86	2,38	5,65	37,44	5,25	27,60
140	28,48	3,07	9,45	35,29	12,74	162,41
280	78,35	4,97	24,68	68,17	17,15	294,26
560	170,67	32,46	1053,51	65,19	33,24	1104,67
840	188,99	59,39	3527,15	168,04	71,44	5103,33

Dosis	Meridian			Impact		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	13,47	4,99	24,87	16,33	9,86	97,21
70	24,66	4,46	19,90	24,19	6,10	37,16
140	27,19	1,29	1,65	39,33	12,62	159,33
280	94,57	15,03	225,77	102,39	26,86	721,54
560	142,44	9,84	96,90	134,14	20,20	408,09
840	181,97	36,13	1305,29	170,94	51,15	2616,27

Dosis	Nevis			Nui		
	Media	DS.	V.	Media	DS.	V.
0	20,33	12,71	161,51	18,36	3,53	12,46
70	26,15	7,02	49,23	31,61	3,39	11,50
140	25,00	0,45	0,20	31,00	5,16	26,67
280	82,14	9,94	98,78	90,60	12,37	153,00
560	112,05	6,24	38,94	147,14	12,17	148,18
840	175,29	14,53	211,09	177,78	54,94	3018,89

ANEXO 7 Resultados del experimento realizado a los distintos materiales vegetales evaluados en la parte aérea, materia seca aérea (MSA), concentración de Al aérea (CAA) y absorción de Al aérea (Abs. AA.).

Tratamiento adición de (Al $\mu\text{mol Al L}^{-1}$)	Material vegetal evaluado	MSA (g jarra ⁻¹)	CAA (mg kg ⁻¹)	Abs. AA. ($\mu\text{g jarra}^{-1}$)
0	Línea 20	1,97	12,90	25,41
0	Línea 20	2,24	10,97	24,57
0	Línea 20	3,08	10,94	33,70
0	Línea 20	2,45	8,79	21,54
70	Línea 20	2,32	15,41	35,75
70	Línea 20	1,95	21,10	41,14
70	Línea 20	2,38	24,29	57,81
70	Línea 20	1,95	28,79	56,15
140	Línea 20	1,78	30,70	54,65
140	Línea 20	2,12	26,56	56,30
140	Línea 20	1,67	27,54	46,00
140	Línea 20	0,83	27,96	23,21
280	Línea 20	0,29	54,86	15,91
280	Línea 20	0,23	62,68	14,42
280	Línea 20	0,32	77,80	24,89
280	Línea 20	0,96	158,74	152,39
560	Línea 20	0,57	75,10	42,81
560	Línea 20	0,31	91,05	28,23
560	Línea 20	0,39	79,82	31,13
560	Línea 20	0,46	106,86	49,16
840	Línea 20	0,36	115,36	41,53
840	Línea 20	0,31	146,50	45,41
840	Línea 20	0,37	159,79	59,12
840	Línea 20	0,26	211,42	54,97
0	Línea 21	1,9	16,33	31,03
0	Línea 21	2,34	15,61	36,54
0	Línea 21	2,32	11,02	25,57
0	Línea 21	2,77	11,88	32,90
70	Línea 21	2,82	28,11	79,26
70	Línea 21	2,23	22,38	49,91
70	Línea 21	2,26	25,23	57,02
70	Línea 21	2,81	23,98	67,39
140	Línea 21	1,28	22,03	28,20
140	Línea 21	1,36	29,50	40,12
140	Línea 21	1,49	28,13	41,91
140	Línea 21	1,21	31,22	37,78
280	Línea 21	0,92	48,40	44,53
280	Línea 21	0,78	85,81	66,93
280	Línea 21	0,49	94,71	46,41
280	Línea 21	0,81	72,42	58,66

ANEXO 7 Continuación

560	Línea 21	0,43	106,83	45,94
560	Línea 21	0,69	180,30	124,41
560	Línea 21	0,42	124,04	52,10
560	Línea 21	0,45	110,66	49,80
840	Línea 21	0,26	180,29	46,88
840	Línea 21	0,21	46,83	9,83
840	Línea 21	0,35	62,59	21,91
840	Línea 21	0,23	164,76	37,90
0	Línea 22	1,52	15,52	23,59
0	Línea 22	1,96	11,95	23,42
0	Línea 22	2,12	14,88	31,55
0	Línea 22	2,23	7,41	16,52
70	Línea 22	2,86	14,29	40,87
70	Línea 22	2,31	19,06	44,02
70	Línea 22	2,95	19,12	56,39
70	Línea 22	2,44	29,11	71,03
140	Línea 22	1,51	31,36	47,35
140	Línea 22	1,73	27,77	48,05
140	Línea 22	1,12	42,37	47,45
140	Línea 22	1,66	35,50	58,94
280	Línea 22	0,81	34,56	27,99
280	Línea 22	0,53	95,09	50,40
280	Línea 22	0,72	79,82	57,47
280	Línea 22	0,62	86,83	53,84
560	Línea 22	0,96	104,03	99,87
560	Línea 22	0,63	123,49	77,80
560	Línea 22	0,65	120,99	78,65
560	Línea 22	0,42	150,62	63,26
840	Línea 22	0,46	238,63	109,77
840	Línea 22	0,35	256,18	89,66
840	Línea 22	0,37	246,13	91,07
840	Línea 22	0,42	159,48	66,98
0	Línea 23	2,74	8,29	22,72
0	Línea 23	2,47	14,29	35,28
0	Línea 23	3,24	14,00	45,36
0	Línea 23	2,84	14,70	41,76
70	Línea 23	2,01	35,91	72,17
70	Línea 23	2,36	17,35	40,94
70	Línea 23	2,46	21,41	52,67
70	Línea 23	2,12	20,73	43,95
140	Línea 23	1,31	20,65	27,06
140	Línea 23	1,72	29,76	51,19
140	Línea 23	1,58	30,60	48,34
140	Línea 23	1,62	29,17	47,26
280	Línea 23	0,34	95,57	32,49
280	Línea 23	0,53	72,19	38,26

ANEXO 7 Continuación

280	Línea 23	0,32	88,67	28,38
280	Línea 23	0,79	79,16	62,54
560	Línea 23	0,25	230,02	57,50
560	Línea 23	0,26	123,81	32,19
560	Línea 23	0,41	143,58	58,87
560	Línea 23	0,49	122,09	59,82
840	Línea 23	0,31	202,60	62,81
840	Línea 23	0,13	206,75	26,88
840	Línea 23	0,15	214,89	32,23
840	Línea 23	0,12	226,24	27,15
0	Lp59	2,84	9,12	25,89
0	Lp59	3,03	7,65	23,16
0	Lp59	2,34	12,09	28,28
0	Lp59	1,79	14,34	25,67
70	Lp59	2,41	18,70	45,07
70	Lp59	2,86	19,82	56,68
70	Lp59	3,21	20,71	66,48
70	Lp59	2,32	24,20	56,15
140	Lp59	1,75	26,86	47,00
140	Lp59	1,33	32,76	43,57
140	Lp59	1,34	28,55	38,25
140	Lp59	2,28	25,76	58,73
280	Lp59	0,64	78,78	50,42
280	Lp59	0,71	84,20	59,78
280	Lp59	0,51	78,36	39,96
280	Lp59	0,93	72,06	67,01
560	Lp59	0,31	153,09	47,46
560	Lp59	0,72	141,01	101,53
560	Lp59	0,23	214,98	49,44
560	Lp59	0,56	173,59	97,21
840	Lp59	0,16	124,66	19,95
840	Lp59	0,14	233,30	32,66
840	Lp59	0,11	245,25	26,98
840	Lp59	0,15	152,74	22,91
0	Yatsin	2,13	11,90	25,34
0	Yatsin	2,42	9,62	23,27
0	Yatsin	3,07	8,91	27,35
0	Yatsin	2,84	12,85	36,49
70	Yatsin	3,27	32,94	107,73
70	Yatsin	3,12	45,00	140,41
70	Yatsin	2,68	35,32	94,66
70	Yatsin	3,21	36,49	117,13
140	Yatsin	1,93	26,44	51,04
140	Yatsin	2,23	22,83	50,91
140	Yatsin	1,98	42,26	83,68
140	Yatsin	2,13	49,61	105,67

ANEXO 7 Continuación

280	Yatsin	1,65	57,15	94,30
280	Yatsin	1,09	78,15	85,18
280	Yatsin	1,25	86,88	108,60
280	Yatsin	1,75	50,51	88,39
560	Yatsin	1,78	87,95	156,55
560	Yatsin	1,67	47,24	78,90
560	Yatsin	1,63	27,69	45,14
560	Yatsin	1,13	97,87	110,59
840	Yatsin	0,68	93,80	63,78
840	Yatsin	0,23	249,06	57,28
840	Yatsin	0,83	124,59	103,41
840	Yatsin	0,91	204,73	186,31
0	Meridian	2,22	17,41	38,64
0	Meridian	2,55	8,53	21,75
0	Meridian	2,25	18,11	40,76
0	Meridian	2,23	9,85	21,96
70	Meridian	1,94	19,63	38,09
70	Meridian	1,79	24,11	43,16
70	Meridian	2,28	24,38	55,59
70	Meridian	2,29	30,50	69,84
140	Meridian	1,39	28,24	39,25
140	Meridian	1,34	28,18	37,76
140	Meridian	1,51	25,53	38,55
140	Meridian	2,23	26,83	59,84
280	Meridian	0,72	78,80	56,74
280	Meridian	0,56	105,02	58,81
280	Meridian	0,91	84,88	77,24
280	Meridian	0,63	109,59	69,04
560	Meridian	0,55	148,23	81,53
560	Meridian	0,59	149,92	88,46
560	Meridian	0,51	143,31	73,09
560	Meridian	0,48	128,28	61,58
840	Meridian	0,31	188,15	58,33
840	Meridian	0,29	145,28	42,13
840	Meridian	0,23	165,09	37,97
840	Meridian	0,62	229,37	142,21
0	Impact	1,61	31,03	49,95
0	Impact	2,04	13,00	26,52
0	Impact	1,51	10,93	16,50
0	Impact	2,28	10,38	23,67
70	Impact	1,83	33,18	60,72
70	Impact	2,21	21,76	48,08
70	Impact	2,33	19,64	45,77
70	Impact	2,29	22,17	50,78

ANEXO 7 Continuación

140	Impact	1,15	44,66	51,35
140	Impact	1,15	29,00	33,35
140	Impact	1,28	28,97	37,08
140	Impact	1,72	54,68	94,05
280	Impact	0,38	69,99	26,60
280	Impact	0,47	95,12	44,70
280	Impact	0,41	133,95	54,92
280	Impact	0,67	110,51	74,04
560	Impact	0,14	151,14	21,16
560	Impact	0,31	139,31	43,18
560	Impact	0,46	141,26	64,98
560	Impact	0,39	104,85	40,89
840	Impact	0,13	134,23	17,45
840	Impact	0,32	208,57	66,74
840	Impact	0,12	120,06	14,41
840	Impact	0,52	220,91	114,87
0	Nevis	2,46	37,86	93,15
0	Nevis	1,98	21,04	41,67
0	Nevis	2,99	13,44	40,18
0	Nevis	3,58	8,97	32,11
70	Nevis	2,21	21,94	48,48
70	Nevis	1,51	31,37	47,37
70	Nevis	2,92	18,49	54,00
70	Nevis	2,92	32,79	95,74
140	Nevis	1,83	24,51	44,85
140	Nevis	2,12	24,77	52,52
140	Nevis	2,11	25,17	53,11
140	Nevis	2,2	25,53	56,16
280	Nevis	1,21	69,95	84,64
280	Nevis	0,91	78,46	71,40
280	Nevis	0,82	92,12	75,54
280	Nevis	0,79	88,03	69,54
560	Nevis	0,87	114,42	99,55
560	Nevis	0,84	108,29	90,97
560	Nevis	0,71	119,67	84,97
560	Nevis	0,74	105,81	78,30
840	Nevis	0,59	172,85	101,98
840	Nevis	0,41	170,92	70,08
840	Nevis	0,92	161,59	148,67
840	Nevis	0,59	195,80	115,52
0	Nui	1,69	20,67	34,93
0	Nui	2,57	13,12	33,71
0	Nui	2,06	19,45	40,07
0	Nui	2,03	20,20	41,00
70	Nui	1,98	32,21	63,77
70	Nui	2,06	29,16	60,07
70	Nui	2,12	36,17	76,69
70	Nui	1,79	28,91	51,74

ANEXO 7 Continuación

140	Nui	1,31	33,47	43,84
140	Nui	1,39	24,32	33,80
140	Nui	1,36	29,93	40,71
140	Nui	1,73	36,30	62,81
280	Nui	0,41	101,77	41,73
280	Nui	0,73	93,29	68,10
280	Nui	0,51	94,40	48,15
280	Nui	0,38	72,92	27,71
560	Nui	0,62	155,38	96,34
560	Nui	0,55	157,66	86,71
560	Nui	0,45	144,46	65,01
560	Nui	0,58	131,05	76,01
840	Nui	0,77	162,79	125,35
840	Nui	0,35	257,22	90,03
840	Nui	0,47	160,44	75,40
840	Nui	0,52	130,66	67,94

ANEXO 8 Resultados del experimento realizado a los distintos materiales vegetales evaluados en la parte radical, materia seca radical (MSR), concentración de Al radical (CAR) y absorción de Al radical (Abs. AR.).

Tratamiento adición de (Al $\mu\text{mol Al L}^{-1}$)	Material vegetal evaluado	MSR (g jarra $^{-1}$)	CAR (mg kg $^{-1}$)	Abs. AR. ($\mu\text{g jarra}^{-1}$)
0	Línea 20	0,47	346,00	162,36
0	Línea 20	0,44	300,58	132,46
0	Línea 20	0,51	197,15	101,37
0	Línea 20	0,41	127,56	51,97
70	Línea 20	0,39	578,47	225,51
70	Línea 20	0,38	519,83	197,79
70	Línea 20	0,54	609,47	327,91
70	Línea 20	0,50	486,71	245,15
140	Línea 20	0,34	951,28	324,50
140	Línea 20	0,40	890,14	356,75
140	Línea 20	0,40	975,76	393,95
140	Línea 20	0,40	930,45	369,72
280	Línea 20	0,16	1743,81	275,70
280	Línea 20	0,13	1687,30	224,17
280	Línea 20	0,20	2160,71	436,59
280	Línea 20	0,22	1795,26	395,24
560	Línea 20	0,18	4199,16	750,89
560	Línea 20	0,16	4317,65	702,65
560	Línea 20	0,20	4814,24	944,17
560	Línea 20	0,22	4700,58	1045,69
840	Línea 20	0,09	4237,34	384,58
840	Línea 20	0,11	4193,13	472,23
840	Línea 20	0,13	4576,39	576,53
840	Línea 20	0,14	4327,14	607,79
0	Línea 21	0,44	26,59	11,76
0	Línea 21	0,43	28,75	12,47
0	Línea 21	0,44	333,73	148,14
0	Línea 21	0,42	94,20	39,67
70	Línea 21	0,20	262,32	51,92
70	Línea 21	0,25	389,09	96,19
70	Línea 21	0,31	396,35	124,45
70	Línea 21	0,46	419,70	191,64
140	Línea 21	0,29	784,16	225,92
140	Línea 21	0,22	758,34	170,28
140	Línea 21	0,27	656,40	173,95
140	Línea 21	0,26	656,80	168,05
280	Línea 21	0,13	1828,83	233,76
280	Línea 21	0,10	2106,32	217,16
280	Línea 21	0,15	2887,17	427,76
280	Línea 21	0,13	2135,84	283,13

ANEXO 8 Continuación

560	Línea 21	0,11	2858,84	304,64
560	Línea 21	0,10	4994,53	499,05
560	Línea 21	0,09	2642,74	230,71
560	Línea 21	0,10	3225,96	326,66
840	Línea 21	0,14	3231,25	436,35
840	Línea 21	0,11	4191,06	471,33
840	Línea 21	0,13	3066,90	399,98
840	Línea 21	0,14	3491,89	503,18
0	Línea 22	0,45	82,30	36,70
0	Línea 22	0,45	109,28	49,63
0	Línea 22	0,42	74,36	31,33
0	Línea 22	0,39	49,14	19,39
70	Línea 22	0,40	365,06	147,16
70	Línea 22	0,40	320,28	128,29
70	Línea 22	0,42	416,51	175,67
70	Línea 22	0,44	361,82	158,20
140	Línea 22	0,35	810,57	286,05
140	Línea 22	0,33	1113,31	366,55
140	Línea 22	0,19	1411,00	274,84
140	Línea 22	0,20	1517,07	298,65
280	Línea 22	0,09	3616,79	324,93
280	Línea 22	0,07	3103,52	225,75
280	Línea 22	0,08	3033,21	243,14
280	Línea 22	0,08	3255,31	267,33
560	Línea 22	0,13	3972,54	502,21
560	Línea 22	0,12	3843,19	453,04
560	Línea 22	0,12	4027,87	486,08
560	Línea 22	0,11	2111,61	241,95
840	Línea 22	0,11	3521,80	372,96
840	Línea 22	0,14	1857,90	264,05
840	Línea 22	0,18	3270,31	577,80
840	Línea 22	0,10	2691,96	272,21
0	Línea 23	0,42	78,13	32,90
0	Línea 23	0,37	83,92	31,29
0	Línea 23	0,45	80,96	36,08
0	Línea 23	0,42	94,37	39,81
70	Línea 23	0,31	333,59	103,33
70	Línea 23	0,29	371,23	106,19
70	Línea 23	0,35	390,71	138,23
70	Línea 23	0,23	494,21	112,95
140	Línea 23	0,38	738,42	279,49
140	Línea 23	0,34	765,19	256,98
140	Línea 23	0,31	769,52	240,20
140	Línea 23	0,30	1141,45	347,71
280	Línea 23	0,11	3359,88	377,72
280	Línea 23	0,15	3097,01	472,05

ANEXO 8 Continuación

280	Línea 23	0,12	3093,63	371,73
280	Línea 23	0,12	4428,15	525,80
560	Línea 23	0,15	4642,78	673,76
560	Línea 23	0,15	3673,30	554,01
560	Línea 23	0,14	4369,12	605,73
560	Línea 23	0,14	4600,98	656,56
840	Línea 23	0,10	4140,25	433,15
840	Línea 23	0,16	3636,48	592,53
840	Línea 23	0,14	3744,97	542,65
840	Línea 23	0,15	3020,98	442,81
0	Lp59	0,34	63,96	21,88
0	Lp59	0,45	100,39	45,10
0	Lp59	0,34	99,70	33,98
0	Lp59	0,42	50,63	21,34
70	Lp59	0,36	396,87	142,04
70	Lp59	0,42	492,05	207,96
70	Lp59	0,48	476,95	229,80
70	Lp59	0,37	367,43	134,99
140	Lp59	0,27	872,59	231,69
140	Lp59	0,26	967,01	249,37
140	Lp59	0,24	856,73	203,27
140	Lp59	0,36	923,99	331,66
280	Lp59	0,18	2133,40	376,84
280	Lp59	0,14	1300,85	186,23
280	Lp59	0,16	1291,38	212,95
280	Lp59	0,15	1390,91	203,88
560	Lp59	0,09	2442,31	226,60
560	Lp59	0,11	3858,12	406,49
560	Lp59	0,10	2578,56	257,24
560	Lp59	0,12	1942,25	232,57
840	Lp59	0,06	2473,50	154,64
840	Lp59	0,04	3043,88	134,72
840	Lp59	0,02	2646,98	54,42
840	Lp59	0,09	2500,33	215,33
0	Yatsin	0,42	87,04	36,56
0	Yatsin	0,38	68,09	26,15
0	Yatsin	0,41	72,54	29,52
0	Yatsin	0,42	66,91	28,06
70	Yatsin	0,47	649,22	307,04
70	Yatsin	0,50	894,48	445,11
70	Yatsin	0,43	713,50	308,22
70	Yatsin	0,41	694,54	288,04
140	Yatsin	0,38	720,87	273,82
140	Yatsin	0,41	589,28	239,85
140	Yatsin	0,34	949,19	321,28
140	Yatsin	0,30	997,74	298,02

ANEXO 8 Continuación

280	Yatsin	0,32	1719,39	550,31
280	Yatsin	0,32	2045,99	652,30
280	Yatsin	0,31	1720,23	529,90
280	Yatsin	0,32	1550,83	503,49
560	Yatsin	0,18	3971,78	711,98
560	Yatsin	0,19	3520,76	651,69
560	Yatsin	0,25	3974,53	977,89
560	Yatsin	0,22	1714,12	377,66
840	Yatsin	0,18	3312,87	584,59
840	Yatsin	0,18	3170,68	586,01
840	Yatsin	0,20	3215,48	644,96
840	Yatsin	0,16	2915,84	463,85
0	Meridian	0,47	145,04	67,66
0	Meridian	0,50	122,31	60,69
0	Meridian	0,44	126,16	55,49
0	Meridian	0,44	86,67	38,54
70	Meridian	0,47	556,52	263,61
70	Meridian	0,30	546,14	164,79
70	Meridian	0,31	598,34	187,07
70	Meridian	0,33	606,27	197,69
140	Meridian	0,30	1137,49	345,82
140	Meridian	0,29	947,13	277,19
140	Meridian	0,30	970,49	287,83
140	Meridian	0,27	1113,21	301,52
280	Meridian	0,13	3376,75	454,64
280	Meridian	0,14	3742,86	532,09
280	Meridian	0,14	3661,04	507,79
280	Meridian	0,16	2801,74	455,34
560	Meridian	0,16	3889,56	629,87
560	Meridian	0,19	3553,18	684,91
560	Meridian	0,19	3344,02	631,08
560	Meridian	0,16	4027,75	639,93
840	Meridian	0,11	4079,96	467,89
840	Meridian	0,13	3540,34	453,09
840	Meridian	0,11	3463,50	381,61
840	Meridian	0,16	3532,08	575,45
0	Impact	0,33	71,29	23,38
0	Impact	0,45	88,50	39,59
0	Impact	0,22	86,61	19,16
0	Impact	0,27	71,43	19,20
70	Impact	0,25	444,13	108,87
70	Impact	0,25	598,43	152,37
70	Impact	0,26	414,74	109,55
70	Impact	0,33	477,68	156,60

ANEXO 8 Continuación

140	Impact	0,21	933,07	196,43
140	Impact	0,22	1198,30	259,77
140	Impact	0,22	1240,19	266,77
140	Impact	0,20	1316,32	258,97
280	Impact	0,13	4062,85	524,19
280	Impact	0,10	3442,14	353,03
280	Impact	0,11	4473,21	480,33
280	Impact	0,11	3223,63	356,79
560	Impact	0,14	3828,62	519,24
560	Impact	0,15	3621,26	532,61
560	Impact	0,14	3479,98	483,58
560	Impact	0,14	2420,72	329,32
840	Impact	0,11	3537,57	391,40
840	Impact	0,10	3573,84	369,82
840	Impact	0,12	3063,75	367,96
840	Impact	0,12	3264,94	405,44
0	Nevis	0,40	86,35	34,23
0	Nevis	0,33	56,30	18,39
0	Nevis	0,45	128,53	57,47
0	Nevis	0,50	69,84	35,24
70	Nevis	0,27	537,85	143,51
70	Nevis	0,33	555,64	182,66
70	Nevis	0,55	387,23	214,63
70	Nevis	0,44	451,98	199,54
140	Nevis	0,30	911,47	271,09
140	Nevis	0,31	840,95	261,32
140	Nevis	0,29	716,78	207,32
140	Nevis	0,29	845,10	247,43
280	Nevis	0,21	2813,98	580,86
280	Nevis	0,17	2214,94	386,99
280	Nevis	0,18	1957,42	356,76
280	Nevis	0,23	1636,46	370,00
560	Nevis	0,22	3751,27	834,36
560	Nevis	0,20	3785,73	744,81
560	Nevis	0,15	3901,67	568,71
560	Nevis	0,18	4275,77	790,42
840	Nevis	0,18	4878,58	891,61
840	Nevis	0,14	4677,15	649,66
840	Nevis	0,20	4402,13	874,88
840	Nevis	0,12	5218,63	639,39
0	Nui	0,42	38,79	16,33
0	Nui	0,40	61,80	24,64
0	Nui	0,33	48,85	15,93
0	Nui	0,47	51,29	24,27
70	Nui	0,29	954,80	273,74
70	Nui	0,24	1076,26	261,17
70	Nui	0,26	878,94	231,69
70	Nui	0,29	1061,09	312,72

ANEXO 8 Continuación

140	Nui	0,19	1037,25	195,67
140	Nui	0,23	181,10	41,09
140	Nui	0,27	883,26	234,58
140	Nui	0,25	813,71	200,24
280	Nui	0,28	1143,24	316,27
280	Nui	0,23	1301,25	304,08
280	Nui	0,25	1180,84	289,99
280	Nui	0,31	1214,09	377,27
560	Nui	0,11	3497,50	375,07
560	Nui	0,08	3393,98	261,06
560	Nui	0,12	3237,74	401,41
560	Nui	0,10	773,61	80,98
840	Nui	0,13	513,41	67,69
840	Nui	0,16	3331,22	522,93
840	Nui	0,12	3286,37	409,81
840	Nui	0,12	3249,36	383,88