

EFFECTO DE LA FUENTE NITROGENADA SOBRE EL CRECIMIENTO DE CEBADA EN UN SUELO CON ALTO CONTENIDO DE ALUMINIO¹

Effect of nitrogen source on barley growing in a high aluminum content soil

Bruno Stange M.², Edmundo Beratto M.³, Adolfo Montenegro B.³,
Amelia Peyrelongue C.³ y Fernando Borie B.²

S U M M A R Y

An experiment in culture cage conditions was conducted in order to test the behaviour of two barley genotypes grown in a soil with a high level of exchangeable aluminum and additions of $N-NO_3^-$, $N-NH_4^+$ and NH_4NO_3 as a source of N-fertilization.

Results showed an acute depressing effect of $N-NH_4^+$ on barley growth specially in seedling emergence, shoot and root weight, spike number/m² and grain number spike. On the contrary, $N-NO_3^-$ addition increased all the parameters above mentioned and NH_4NO_3 addition showed an intermediate behaviour between $N-NH_4^+$ and $N-NO_3^-$ but it was closer to $N-NH_4^+$. These results were in accordance with chemical analysis of the soils which were sampled from plant rhizosphere and with shoot and root analysis. Thus, it was found that $N-NH_4^+$ addition produced a significative decrease in soil pH and a concomitant increase in Al and Mn levels. On the other hand, fertilization with $N-NO_3^-$ showed a high increase in soil pH and an evident decrease in the levels of phytotoxic elements such as Al and Mn. The same trend of such elements were observed in the analysis of shoots and roots from both cultivars.

Key words: barley, aluminium toxicity, acidity, nitrogen source.

INTRODUCCIÓN

La agricultura de la IX Región del país se caracteriza por estar estrechamente ligada a la producción de cereales, principalmente trigo, avena y cebada. De esta última, a nivel nacional, se siembran anualmente alrededor de 23.000 ha, de las cuales más de la mitad se concentran en esta Región (INE, 1994).

En cebada, los efectos de la fertilización nitrogenada y fosfatada inciden fuertemente en la obtención de un buen rendimiento y de un producto de calidad para su industrialización. Sin embargo, la aplicación de N reviste una especial consideración ya que se ha demostrado que al aumentar la dosis de este nutriente, se incrementa el rendimiento del cultivo, aumenta el contenido de proteína del grano e incide en el calibre del mismo, comercialmente conocido como mallaje (Beratto y Peyrelongue, 1986; Peyrelongue y Beratto, 1987; Peyrelongue y Toro, 1992).

En la IX Región, la producción de cebada se localiza en suelos Andisoles y Ultisoles, los que, en el último tiempo, por causas antropogénicas, se han visto afectados por el proceso de acidificación, que incide negativamente en el desarrollo de la mayor parte de los cultivos. Este complejo proceso, que involucra fundamentalmente la aparición de fitotoxicidad a H^+ , aluminio (Al) y manganeso (Mn) (Foy, 1988, 1992), afecta fuertemente el desarrollo y crecimiento de algunos cultivos, especialmente cebada, la que se caracteriza por poseer una elevada sensibilidad frente a aluminio.

Los síntomas de fitotoxicidad de Al, principalmente crecimiento limitado de raíces secundarias altamente absorbentes de agua y nutrientes (Wright, 1989), no siempre se correlacionan con la concentración crítica de este elemento (Parker, Kinraide y Zelazny, 1988). Si bien el contenido de Al es muy importante, otros factores del medio como pH, materia orgánica, efecto protector de otros iones, fuerza iónica de la solución del suelo, presencia de quelatos (Suhayda y Haug, 1986; Kinraide, 1991; Shann y Bertsch, 1993), como también la familia, género y genotipo del cultivo, pueden actuar también en la modificación de la respuesta por parte de la planta (Taylor, 1988).

¹Recepción de originales: 27 de junio de 1994.

²Universidad de La Frontera, Casilla 54-D, Temuco, Chile.

³Centro Regional de Investigación Carillanca (INIA), Casilla 58-D, Temuco, Chile.

En un estudio reciente realizado en solución nutritiva, Borie *et al.* (1994) determinaron diferencias de sensibilidad frente a acidez y Al por parte de una variedad y tres líneas avanzadas de cebada. Adicionalmente, se encontró que la aplicación de N, sea ésta en forma de N amoniacal o N-nítrico, tuvo un efecto decisivo en la producción de acidificación o alcalinización de la solución por parte de las raíces de dichos cultivos. Lo anterior significa que la forma de N aplicada como fertilizante incidiría fuertemente en la aparición o no de fitotoxicidad por aluminio, en cebada cultivada en un suelo con alto contenido de Al de intercambio.

De allí que el objetivo de este trabajo consistió en estudiar, en condiciones de jaula de cultivo, el crecimiento y desarrollo de una línea avanzada y de una variedad de cebada, cultivadas en un suelo con alto porcentaje de saturación de aluminio y en presencia de N-amoniacal y N-nítrico.

MATERIALES Y MÉTODOS

El suelo utilizado corresponde a un Andisol de la serie Crucero, descrita por Mella y Kuhne (1985), y en el cual se había detectado previamente, en experimentos de terreno con cereales, la aparición de serios problemas de fitotoxicidad por Al. Las características químicas de dicho suelo aparecen en Cuadro 1.

CUADRO 1. Características químicas del suelo Serie Crucero

TABLE 1. Chemical characteristics of the soil used (Crucero)

Determinación	Valor
pH (H ₂ O) testigo	5,3
P Olsen	22,0 mg/kg
Materia orgánica	10,0%
CIC efectiva	5,4 cmol(+)/kg
Ca intercambiable	1,3 cmol(+)/kg
Mg intercambiable	0,5 cmol(+)/kg
Na intercambiable	0,2 cmol(+)/kg
K intercambiable	0,8 cmol(+)/kg
Al intercambiable	2,5 cmol(+)/kg
Saturación de aluminio	47,0%
Suma de bases	2,8 cmol(+)/kg

Se estudió una variedad de cebada de hábito semi-invernal (Frontera-INIA) para evaluar su crecimiento radical y la producción de fitomasa durante el período vegetativo, y una línea de avanzada (Andes 3.84 (F)), para estudiar crecimiento radical, producción de fitomasa y rendimiento de

grano. Ambos cultivares, con espiga de seis hileras, se les había determinado su grado de sensibilidad a Al en un trabajo recientemente descrito (Borie *et al.*, 1994).

Las cebadas se sembraron en octubre de 1991, en mesones y bajo cubierta de malla (jaula de crecimiento). Se utilizó el diseño experimental de bloques completamente al azar, con tres repeticiones. Las 18 parcelas (tratamientos) estuvieron conformadas por tres surcos de 0,765 m de largo y 0,18 m entre surcos. Se utilizó una dosis de semilla equivalente a 120 kg/ha, desinfectada con Vitavax T (carbocem + thiram). Se fertilizó con las siguientes fuentes de N: NaNO₃, NH₄Cl y NH₄NO₃, en dosis equivalente a 200 kg/ha de N; la fuente fosfatada fue única para todos los tratamientos y se usó superfosfato triple en una dosis equivalente a 300 kg/ha. Además, a cada parcela se agregó el equivalente a 83 kg/ha de K en forma de KCl (muriato de potasio). Toda la fertilización se realizó a la siembra; el P se aplicó localizado en el surco, junto a la semilla y las fuentes de N y K se aplicaron al voleo y luego se incorporaron al suelo.

El suelo de cada parcela se regó periódicamente manteniéndolo con humedad cercana a la capacidad de campo. Para la variedad Frontera-INIA el riego se suprimió en el inicio de encañado o estado 30 de la escala de Zadocks (Zadocks, Chang y Konzac, 1974) y para la línea Andes 3.84 (F), en el estado 77 de la misma escala (grano lechoso). Se hicieron dos aplicaciones de propiconazole (Tilt, 6cc/2 L), en los estados de macolla y encañado para prevenir enfermedades fungosas. A comienzos de macolla se hizo una aplicación de Gusathion 35 (Asinfos metil) para el control de larvas de Noctuidos.

La variedad Frontera-INIA se cosechó al estado 30, evaluándose sólo producción de fitomasa. Por el contrario, Andes 3.84 (F), se cosechó al estado 93 (madurez fisiológica). Los parámetros medidos fueron: porcentaje de emergencia de plántulas desde los 9 a los 22 días, estado fenológico (Zadocks *et al.*, 1974), peso seco de raíz y parte aérea; en la línea Andes 3.84 (F) se determinaron, además, los componentes del rendimiento. Por último, al término del experimento, se determinaron los niveles de Al, macro y microelementos (N, P, Ca, Mg, K, Fe y Mn) en el material foliar y radical, proveniente de los diferentes tratamientos y sus repeticiones, así como también se realizó un análisis químico total al suelo adherido a las raíces (suelo rizosférico). Los resultados se sometieron al análisis de variancia y a la Prueba de comparación de rango múltiple de Duncan.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En ambas cebadas, y en algunos tratamientos, se observó un retraso significativo en la emergencia de las plántulas en los primeros días, siendo más prolongado para la variedad Frontera-INIA (Cuadro 2). Dicho porcentaje, sin embargo, no fue significativo a partir del décimosexto día. No obstante lo anterior, en ambas se observó un notorio retraso en el crecimiento de las plantas en presencia de N-amoniaco solo, con emergencia menos vigorosa y hojas más cloróticas que aquéllas con adición de N-nitrato o N-amoniaco y nítrico. El mayor porcentaje de emergencia observado en los primeros días con nitrato de amonio podría derivarse de un menor efecto de concentración salina producido por éste, toda vez que esta sal presenta dos átomos de N en su molécula (35% de N) y por tanto, su concentración en el suelo es cercana a la mitad de aquélla obtenida con la adición de nitrato de sodio (16% de N).

En cuanto al efecto de las fuentes de N sobre el desarrollo de ambas cebadas se observó un comportamiento similar de las plantas tanto en presencia de NaNO_3 como de NH_4NO_3 , aun cuando las primeras presentaban, visualmente, una mayor fitomasa y un color verde más oscuro. Por el contrario, el amonio como única fuente de N, retrasó el desarrollo de las plantas.

Frontera-INIA no emitió inflorescencia (espiga), debido a que es una variedad semi-invernal. En cambio, Andes 3.84 (F), que es una línea avanzada de primavera, continuó su desarrollo hasta el llenado de grano. No obstante, en ambos casos hubo un retraso en el crecimiento de las plantas tratadas con N-amoniaco solo, lo que coincide con Bennet, Pesek y Hanway (1964) y Hendricks y Taylorson (1974), quienes señalan que ésto se debería a una inhibición producida por las fuentes amoniacales, sin pronunciarse sobre el mecanismo involucrado. El retraso de emergencia señalado, conllevó un atraso en el desarrollo fenológico, lo que también es señalado por Harada, Takari y Yamada (1968).

El desarrollo de la parte aérea y radical de ambas variedades fue significativamente superior con el uso de N-NO_3^- que con N-NH_4^+ , como única fuente nitrogenada, teniendo este último un claro efecto depresivo, con una producción de materia seca del orden del 28 y 36% de la obtenida con nitrato de sodio, para cebadas Frontera-INIA y Andes 3.84(F), respectivamente (cuadros 3 y 4). Por otra parte, la adición de ambas fuentes de N en relación 1:1, como ocurre con el uso de NH_4NO_3 , produjo un efecto intermedio, aunque significativamente inferior a la fertilización nítrica en términos de materia seca de parte aérea, pero muy cercano a ella en términos de peso radical. Estos resultados concuerdan, en general, con lo señalado por

CUADRO 2. Porcentaje de emergencia de plántulas, en el tiempo, de una línea avanzada (Andes 3.84(F)) y de una variedad (Frontera-INIA) de cebada fertilizadas con tres fuentes nitrogenadas

TABLE 2. Seedling emergence (%) of barley Andes 3.84(F) and Frontera-INIA fertilized with three nitrogen sources

Fuente de N	Emergencia de plántulas (%)									
	Días post-siembra									
	9	10	11	12	13	14	16	17	20	22
Andes 3.84(F)										
NaNO_3	41,2 b	58,1 ab	68,8 ab	83,1 a	91,7 a	89,6 a	92,8 a	93,2 a	93,9 a	92,1 a
NH_4NO_3	60,9 a	71,3 a	82,1 a	88,5 a	93,2 a	94,3 a	94,3 a	95,0 a	95,7 a	93,9 a
NH_4Cl	30,1 b	43,7 b	57,3 b	68,8 b	82,8 a	84,2 a	89,9 a	91,8 a	92,5 a	92,1 a
Frontera-INIA										
NaNO_3	32,2 b	46,2 b	59,5 b	70,6 b	79,6 ab	84,9 ab	88,5 a	91,0 a	91,4 a	90,7 a
NH_4NO_3	58,4 a	70,9 a	78,5 a	85,3 a	93,5 a	94,6 a	96,4 a	96,0	96,0 a	94,2 a
NH_4Cl	14,0 c	26,2 c	38,3 c	53,4 c	60,1 b	74,5 b	84,9 a	87,1 a	88,9 a	89,2 a

Los valores unidos por distintas letras (columna) son estadísticamente diferentes ($P \leq 0,05$), según la Prueba de Rango Múltiple de Duncan (valores promedio de tres repeticiones).

numerosos autores (Kirkby y Mengel, 1967; Wagatsuma y Yamasako, 1985; Malhi, Nyborg y Caldwell, 1988), los cuales informan del efecto depresivo producido sobre el crecimiento de plantas de cebada cultivadas en suelos de carácter ácido y fertilizadas con fuentes amoniacales.

CUADRO 3. Rendimiento y distribución de materia seca (g/m²) de la variedad cebada Frontera-INIA al término de la macolla

TABLE 3. Yield and dry matter distribution (g/m²) of Frontera-INIA barley at the end of tillering

Peso seco (g/m ²)	Fuente de N		
	NaNO ₃	NH ₄ NO ₃	NH ₄ Cl
Hoja	746,9 a	567,5 b	219,3 c
Tallo	408,9 a	292,1 b	96,2 c
Aéreo	1.155,8 a	859,3 b	315,4 c
Radical	189,1 a	166,0 a	72,9 b
Total	1.345,0 a	1.025,4 b	388,3 c

Los valores unidos por distintas letras, son estadísticamente diferentes ($P \leq 0,05$), según la Prueba de Rango Múltiple de Duncan.

CUADRO 4. Rendimiento y distribución de materia seca (g/m²) de la línea avanzada de cebada Andes 3.84(F) al momento de madurez fisiológica

TABLE 4. Yield and dry matter distribution (g/m²) of barley Andes 3.84(F) at maturity

Peso seco (g/m ²)	Fuente de N		
	NaNO ₃	NH ₄ NO ₃	NH ₄ Cl
Hoja	125 a	94 a	35 b
Tallo	167 a	119 b	57 c
Grano	397 a	290 b	146 c
Chaff ¹	72 a	58 b	32 c
Aéreo	762 a	560 b	271 c
Raíz	138 a	125 a	51 b
Total	899 a	702 b	323 c
I.C. ²	0,52 a	0,50 a	0,54 a

¹Chaff: diferencia entre la materia seca de la espiga y el grano.

²I.C.: Índice de cosecha.

Los valores unidos por distintas letras, son estadísticamente diferentes ($P \leq 0,05$), según la Prueba de Rango Múltiple de Duncan (valores promedio de tres repeticiones).

El sistema radical de las plantas tratadas con fuentes de N-amoniacal se caracterizó por tener raíces más cortas, más gruesas y de color más oscuro que aquéllas tratadas con N-NO₃⁻. En relación a la parte aérea, las plantas con N-amoniacal tuvieron una senescencia más acelerada, con muerte de la mayor parte de las hojas basales, que en el caso de plantas tratadas con N-NO₃⁻. Además, con este último no se observó signos de marchitez. Estos mismos síntomas han sido descritos anteriormente por Bennett *et al.* (1964) y Spratt (1974).

En general, numerosos autores concuerdan que la toxicidad de aluminio inducida por el NH₄⁺ se caracteriza por una restricción en el crecimiento de las plantas, clorosis de las hojas, lesión del tallo (Maynard, Barber y Lachman, 1966; Maynard y Barber, 1968) y, a nivel radical, la aparición de raíces cortas, poco ramificadas, gruesas y más oscuras (Warncke y Barber, 1973).

El efecto de las fuentes nitrogenadas sobre los componentes del rendimiento para cebada Andes 3.84 (F), fue altamente significativo entre los tratamientos, específicamente del número de espigas/m², número de granos/m² y granos/espiga. Por el contrario, no se observó diferencias en el peso del grano. La fuente nítrica tuvo el mejor efecto, NH₄NO₃ un efecto intermedio y la fuente amoniacal el efecto más depresivo (cuadros 5 y 6).

CUADRO 5. Efecto de las fuentes nitrogenadas sobre los componentes de rendimiento de cebada Andes 3.84(F)

TABLE 5. Effect of nitrogen source on yield components of barley Andes 3.84(F)

Peso seco (g/m ²)	Fuente de N		
	NaNO ₃	NH ₄ NO ₃	NH ₄ Cl
Espiga/m ²	275 a	223 b	167 c
Granos/espiga	42,67 a	38,67 a	26,67 b
Granos/m ²	11.741 a	8.620 b	4.440 c
Peso granos (mg)	33,83 a	33,63 a	32,69 a
Rendimiento (g/m ²)	397,0 a	290,0 b	145,6 c

Los valores unidos por distintas letras, son estadísticamente diferentes ($P \leq 0,05$), según la Prueba de Rango Múltiple de Duncan (valores promedio de tres repeticiones).

CUADRO 6. Efecto de las fuentes nitrogenadas sobre el tamaño (mallaje) del grano de cebada Andes 3.84(F)

TABLE 6. Effect of nitrogen source on grain size of barley Andes 3.84(F)

Mallaje (%)	Fuente de N		
	NaNO ₃	NH ₄ NO ₃	NH ₄ Cl
> 2,8 mm	8,76 a	7,26 a	3,48 b
> 2,5 mm	56,49 a	53,31 a	40,93 a
> 2,2 mm	32,39 a	36,00 a	45,25 a
Resto	2,35 b	3,46 b	10,34 a

Los valores unidos por distintas letras, son estadísticamente diferentes ($P \leq 0,05$), según la Prueba de Rango Múltiple de Duncan (valores promedio de tres repeticiones).

Los menores rendimientos alcanzados con el uso de fuentes de N-amoniaco en Andes 3.84(F) indican para esta línea avanzada que, en los períodos de pre-antesis, hubo limitantes que provocaron la disminución en el número de granos/m² como consecuencia de una disminución del número de espiguillas potenciales, lo que incidiría en la menor producción de granos/espiga y, por tanto, en una disminución de los rendimientos (Gilford, 1974).

El peso del grano en Andes 3.84 (F) no fue significativamente diferente con las tres fuentes de N utilizadas. En cuanto al calibre del grano (mallaje), no se observaron diferencias significativas entre las tres fuentes nitrogenadas a nivel de las cribas, 2,8; 2,5 y 2,2 mm. Sin embargo, los niveles inferiores a 2,2 mm aumentaron a valores de 10,34% cuando se fertilizó con NH₄⁺, superando largamente el máximo de tolerancia aceptado, 3%.

De lo anterior, puede inferirse que los problemas de acidez, no afectan el período de crecimiento del grano que coincide con el período de post-antesis. En síntesis, los efectos de la fertilización sobre el rendimiento en grano de cebada se produce en el período de pre-antesis, tanto durante la etapa vegetativa (macolla), como también en la reproductiva (encañado), afectando significativamente la capacidad de almacenamiento de carbohidratos, vía reducción del número de granos/m² (Cuadro 5).

El efecto de las fuentes nitrogenadas sobre los parámetros químicos del suelo son determinantes en la interpretación de los resultados de los cuadros anteriores.

Dentro de las características químicas de los suelos, es interesante destacar que, en ambas variedades, el uso de NaNO₃ alcalinizó el suelo rizosférico alcanzando un pH de 5,5 - 5,6, a diferencia de NH₄Cl que produjo una marcada acidificación (pH 4,3 - 4,4). Es evidente que esta diferencia de aproximadamente 1,2 unidades de pH acarrea importantes cambios en la concentración de Al (cuadros 7 y 8), y, por consecuencia en las formas en que éste se presenta. Así, se conoce que a pH bajo 4,5 predominan las especies de Al monoméricas, altamente fitotóxicas (Wagatsuma y Ezoé, 1985; Wright, 1989; Borie *et al.*, 1992); en cambio, a pH superior a 5,0 comienzan a aparecer otras formas de Al, menos tóxicas, empezando a precipitar Al como Al(OH)₃, insoluble (Wright, 1989).

CUADRO 7. Efecto a nivel rizosférico de las fuentes nitrogenadas sobre los cationes de intercambio, saturación de Al, Al intercambiable, Mn y pH del suelo cultivado con cebada Andes 3.84(F)

TABLE 7. Effect of nitrogen source on exchangeable cations, Al saturation, exchangeable Al, Mn and pH of soil grown with barley Andes 3.84(F)

	Fuente de N		
	NaNO ₃	NH ₄ NO ₃	NH ₄ Cl
Ca, cmol(+)/kg	2,08 a	1,98 a	2,11 a
Mg, cmol(+)/kg	0,72 a	0,71 a	0,68 a
Na, cmol(+)/kg	1,36 a	0,37 b	0,37 b
K, cmol(+)/kg	0,71 a	0,72 a	0,85 a
Suma de bases, cmol(+)/kg	4,86 a	3,78 b	4,01 b
Al, cmol(+)/kg	1,37 b	2,14 a	2,29 a
CIC, cmol(+)/kg	6,23 a	5,92 a	6,31 a
Saturación Al, (%)	22,03 b	36,23 a	36,31 a
Mn, mg/kg	9,73 b	10,17 b	21,80 a
pH, (H ₂ O)	5,47 a	4,81 b	4,37 c
pH, (CaCl ₂)	4,67 a	4,43 b	4,31 c

Los valores unidos por distintas letras, son estadísticamente diferentes ($P \leq 0,05$), según la Prueba de Rango Múltiple de Duncan (valores promedio de tres repeticiones).

CUADRO 8. Efecto a nivel rizosférico de las fuentes nitrogenadas sobre los cationes de intercambio, saturación de Al, Al intercambiable, Mn y pH del suelo, cultivados con cebada Frontera-INIA

TABLE 8. Effect of nitrogen source on exchangeable cations, Al saturation, exchangeable Al, Mn and pH of soil grown with barley Frontera-INIA

	Fuente de N		
	NaNO ₃	NH ₄ NO ₃	NH ₄ Cl
Ca, cmol(+)/kg	1,83 a	1,69 ab	1,52 b
Mg, cmol(+)/kg	0,68 a	0,67 a	0,54 b
Na, cmol(+)/kg	0,94 a	0,27 b	0,25 b
K, cmol(+)/kg	0,58 b	0,75 a	0,67 ab
Suma de bases, cmol(+)/kg	4,03 a	3,39 b	2,98 c
Al, cmol(+)/kg	1,44 b	2,02 a	2,12 a
ClC, cmol(+)/kg	5,47 a	5,41 a	5,11 b
Saturación Al, (%)	26,41 c	37,37 b	41,57 a
Mn, mg/kg	10,87 b	11,37 b	26,07 a
pH, (H ₂ O)	5,57 a	4,07 ab	4,29 b
pH, (CaCl ₂)	4,87 a	4,61 b	4,13 c

Los valores unidos por distintas letras, son estadísticamente diferentes ($P \leq 0,05$), según la Prueba de Rango Múltiple de Duncan (valores promedio de tres repeticiones).

Como resultado de los cambios de pH en el entorno radical, es comprensible encontrar valores significativamente superiores de concentración de algunos elementos cuando se fertiliza con N-amoniaco, tales como Al, Mn y Fe y, por ello, esperar una mayor absorción de éstos por parte de las plantas, como se demuestra en los cuadros 9 y 10. La mayor concentración de Al a nivel rizosférico, y en especial de las formas bajo las cuales éste se encuentra, explicarían la inhibición del crecimiento radical y el mayor engrosamiento de las raíces, conjuntamente con la menor ramificación lateral de éstas observada con la adición de N-NH₄⁺. Esto coincide con lo señalado por Wrigth (1989) en relación a la fitotoxicidad de Al.

Aunque la fitotoxicidad de Al es más importante que la de Mn (Foy, 1988), la de este último afecta, solamente, a la parte aérea, observándose inhibición de la absorción de Ca y Mg, pérdida de turgencia y manchas cloróticas en hojas. Este último síntoma se observó en las hojas de las dos variedades de cebada en los primeros estadios de crecimiento con N-NH₄⁺ y concuerda con los niveles de Mn observados en la parte aérea.

CUADRO 9. Efecto de las fuentes nitrogenadas sobre la concentración aérea y radical de nutrientes en cebada Andes 3.84 (F)

TABLE 9. Effect of nitrogen source on nutrient concentration of shoots and roots from barley Andes 3.84(F)

Fuente de N	N	P	K	Ca	Mg	Al	Mn	Fe
Raíz								
NaNO ₃	1,55	0,14	0,15	0,29	0,08	0,68	390	3.427
NH ₄ NO ₃	1,54	0,16	0,17	0,56	0,07	1,06	406	3.632
NH ₄ Cl	1,62	0,17	0,19	0,52	0,08	0,69	442	2.640
Hojas								
NaNO ₃	2,56	0,11	5,62	1,18	0,49	0,074	69	436
NH ₄ NO ₃	2,75	0,14	6,00	1,69	0,60	0,103	106	564
NH ₄ Cl	3,24	0,21	6,59	2,02	0,49	0,121	121	1.100
Tallo								
NaNO ₃	0,81	0,023	0,50	0,59	0,07	0,005	90	435
NH ₄ NO ₃	1,43	0,056	0,79	0,28	0,12	0,009	196	725
NH ₄ Cl	1,35	0,047	0,72	0,26	0,11	0,007	165	900
Chaff								
NaNO ₃	0,75	0,043	0,27	0,14	0,07	0,005	115	460
NH ₄ NO ₃	1,05	0,053	0,30	0,27	0,12	0,006	176	398
NH ₄ Cl	1,18	0,103	0,30	0,27	0,14	0,006	242	368
Grano								
NaNO ₃	1,98	0,22	0,12	0,03	0,14	0,002	34	81
NH ₄ NO ₃	1,96	0,25	0,15	0,04	0,16	0,003	42	92
NH ₄ Cl	2,05	0,24	0,13	0,05	0,14	0,002	44	78

N, P, Ca, Al: %.
Mn, Fe: mg/kg.

CUADRO 10. Efecto de las fuentes nitrogenadas sobre la concentración aérea y radical de nutrientes en cebada Frontera-INIA

TABLE 10. Effect of nitrogen source on nutrient concentration of shoots and roots from barley Frontera-INIA

Fuente de N	N	P	K	Ca	Mg	Al	Mn	Fe
Raíz								
NaNO ₃	0,47	0,085	0,16	0,051	0,026	0,52	107,1	1.672,4
NH ₄ NO ₃	0,49	0,085	0,19	0,051	0,034	0,66	81,2	1.739,6
NH ₄ Cl	0,58	0,077	0,25	0,040	0,046	0,30	104,8	918,2
Hojas								
NaNO ₃	0,91	0,051	0,33	0,086	0,054	0,013	23,65	56,13
NH ₄ NO ₃	0,83	0,051	0,33	0,130	0,071	0,011	46,65	59,83
NH ₄ Cl	0,93	0,063	0,36	0,136	0,060	0,009	63,38	47,58
Tallo								
NaNO ₃	0,52	0,050	0,28	0,04	0,046	0,012	26,78	50,71
NH ₄ NO ₃	0,52	0,054	0,26	0,06	0,048	0,014	35,32	63,25
NH ₄ Cl	0,62	0,074	0,30	0,07	0,500	0,014	49,29	58,40

N, P, Ca, Mg, Al: %.
Mn, Fe: mg/kg.

Se ha postulado, como expresión de fitotoxicidad de Al en suelos y en soluciones nutritivas, que es más importante la relación Ca/Al o Mg/Al que la concentración de cada uno de ellos en forma particular. Así, la relación Ca/Al es 1,52 y 1,27, para el caso de N-nitrato de sodio y 0,92 y 0,72 para N-cloruro de amonio en cebada Andes y Frontera-INIA, respectivamente. Sin embargo, en ambas cebadas, las concentraciones de Al y porcentaje de saturación de Al cuando se añadió NH₄NO₃, fue más cercana a la respuesta obtenida con N-NH₄⁺ que aquélla con N-NO₃⁻, y la relación Ca/Al fue de 0,92 y 0,84 para cebada Andes 3.84(F) y Frontera-INIA, respectivamente. Dado que Al compite con Ca en el apoplasto (Marschner, 1991), al haber menor cantidad de Al externo habría menor posibilidad de desplazar al Ca y, por tanto, cabe esperar una menor expresión de fitotoxicidad, lo que de hecho ocurre con la adición de N-NO₃⁻ (cuadros 7 y 8).

El rendimiento, expresado en g/m², tal como se aprecia en los cuadros 3 y 4, multiplicado por la concentración de nutrientes en la raíz y parte aérea (cuadros 9 y 10), estarían señalando la absorción de estos elementos por parte de ambas cebadas. Aunque la absorción de todos los macro y micronutrientes, conjuntamente con el Al, fue significativamente mayor con N-NO₃⁻ que con N-NH₄⁺, la concentración de éstos, con los diferentes tratamientos fue notablemente diferente. Así, en general, las concentraciones de todos los elementos, salvo Al y Fe, son más elevadas en la

parte aérea que en la raíz. Esta similitud de comportamiento de Al y Fe ha sido reportada por Clark (1977) y es natural para el caso de Al, ya que éste no es un elemento esencial para el crecimiento vegetal. Por su parte, la concentración de K, Ca y Mg es superior en las hojas, no existiendo diferencias significativas entre las fuentes de N-NO₃⁻ y N-NH₄⁺ en el caso de ambas cebadas. Adicionalmente, en cebada Andes 3.84 (F), se determinó mayor concentración de N y P en el grano.

Por otra parte, se esperaría que el P se encontrara en mayor proporción en la rizósfera de plantas fertilizadas con N-NH₄⁺, puesto que la acidificación radical puede incrementar el P en la solución del suelo (Chen y Barber, 1990), e, incluso, aumentar la movilización de P (Haynes, 1990; Gahoonia *et al.*, 1992). Si ello fuera así, parece normal encontrar una mayor concentración de P en la planta (cuadros 9 y 10), conjuntamente con el hecho de que la extrusión de H⁺ favorece la absorción de aniones H₂PO₄⁻. Adicionalmente, se sabe que la absorción de la forma H₂PO₄⁻, que es la habitualmente encontrada a pH menor de 4,5, es hasta 10 veces mayor que la forma HPO₄⁻², presente a pH superiores a 5,0.

Si bien este estudio se ha realizado en condiciones extremas, como lo son el utilizar un suelo con un muy elevado contenido de Al y la aplicación de fuentes nitrogenadas puras, en una dosis ligeramente superior a la agronómica, los resul-

tados destacan el aspecto negativo de la aplicación de fuentes amoniacales a los cultivos cuando el suelo está acidificado. Es conocido que el ión amonio, por efecto de hidrólisis, posee carácter ácido; si a ello se adiciona la acidificación producida en el suelo por el proceso de nitrificación microbiológica (dos H^+ por cada NH_4^+), además de la acidificación fisiológica recientemente demostrada en cebada creciendo en solución nutritiva en presencia de este ión (Borie *et al.*, 1994), es fácil explicarse los valores de pH del entorno radical y del porcentaje de Al que aparecen en los cuadros 7 y 8. Por el contrario, la disminución del Al producida a ese nivel por el nitrato de sodio podría deberse a un desplazamiento del Al de intercambio por parte del Na^+ agregado y, fundamentalmente, a la precipitación del hidróxido, debido a los OH^- producidos fisiológicamente por la raíz (Borie *et al.*, 1994).

En síntesis, en este estudio y bajo las condiciones experimentales descritas, ha quedado claramente demostrado que la fertilización del cultivo de cebada con sólo N-amoniaco, conlleva la disminución drástica del pH rizosférico, zona donde se produce la absorción de los elementos, sean éstos nutrientes o tóxicos y, por tanto, en presencia de Al se aumentan las posibilidades de encontrar fitotoxicidad, en especial, en aquellos cultivos que son muy sensibles a la acidificación, como lo es la cebada. Por el contrario, la adición de N-nitrato, al aumentar la alcalinización alrededor de las raíces disminuye tal riesgo. Lo anterior, permite concluir lo importante que resulta la correcta aplicación de los fertilizantes nitrogenados en suelos acidificados. O bien se utilizan fertilizantes no acidificantes como nitrato de sodio o potasio o, en caso contrario, es fundamental la corrección de la acidez del suelo mediante la aplicación al suelo de materiales encalantes, previa a la siembra.

RESUMEN

Se evaluó el comportamiento de una línea avanzada de cebada de primavera y una variedad de cebada semi-invernal (Andes 3.84 (F) y Frontera-INIA, respectivamente), frente a los niveles de acidificación que poseía un suelo de la serie Crucero. Para ello, se diseñó un experimento, en mesones bajo malla (jaula), en el que se hizo crecer ambos cultivares en presencia de tres fuentes de N-fertilizante: $N-NH_4^+$, $N-NO_3^-$ y NH_4NO_3 .

Los resultados señalaron un claro efecto depresivo de la fertilización amoniaco, en especial sobre el porcentaje de emergencia de plántulas, peso seco de la raíz y parte aérea y componentes del rendimiento. Por el contrario, en la fertilización con $N-NO_3^-$ se encontraron elevados todos los parámetros anteriores. La adición de nitrato de amonio produjo un efecto intermedio, pero más

cercano al del N-nitrato. Estos comportamientos se correlacionaron estrechamente con los resultados de los análisis químicos del suelo rizosférico realizados al final del experimento, como también con la concentración de nutrientes y elementos tóxicos, como Al y Mn, presentes en raíz y parte aérea. Así, la diferencia de pH entre los dos tratamientos extremos fue de 1,2 unidades. Mientras N-amoniaco produjo una significativa acidificación del entorno rizosférico, N-nitrato, en cambio, produjo un leve aumento del pH del suelo. Ello se tradujo en el aumento de Al y Mn libres en el caso de N-amoniaco, con el consecuente desarrollo de toxicidad, observándose un efecto contrario con la adición de N-nitrato.

Palabras claves: cebada, toxicidad por aluminio, acidez, fuente nitrogenada.

LITERATURA CITADA

- BENNETT, W.F., PESEK, J. and HANWAY, J.J. 1964. Effect of nitrate and ammonium growth of corn in nutrient solution sand culture. *Agronomy Journal* 56: 342-345.
- BERATTO M., E. y PEYRELONGUE C., A. 1986. Contenido de proteína en el grano de cebada. I. Efecto de variedades, localidades, año y época de siembra. *Investigación y Progreso Agropecuario Carillanca* 5(4): 12-14.
- BORIE B., F., MORALES L., A. y PINO B., M. 1992. Influencia del aluminio y acidez sobre la elongación radical de trébol rosado y trébol blanco. *Agricultura Técnica (Chile)* 52: 134-138.
- BORIE B., F., STANGE J., B., MORALES L., A. y PINO B., M. 1994. Efecto de aluminio y acidez sobre la elongación radical de cebada y avena. *Agricultura Técnica (Chile)* 54: 224-230.
- CLARK, R.B. 1977. Effect of aluminium on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn. *Plant & Soil* 47(3): 653-662.
- CHEN, J.H. and BARBER, S.A. 1990. Soil pH and phosphorus and potassium uptake by maize evaluated with an uptake model. *Soil Science Society of America Journal* 54: 1.032-1.036.

- FOY, C.D. 1988. Plant adaptation to acid, aluminium-toxic soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19: 959-987.
- FOY, C.D. 1992. Soil chemical factors limiting plant root growth. En: J.L. Hatfield y B.A. Stewart (ed.). *Limitations to plant root growth*. London, Springer-Verlag. *Advances in Soil Science* 19: 97-149.
- GAHOONIA, T., CLAASEN, N. and JUNGK, A. 1992. Mobilization of phosphate in different soils by ryegrass supplied with ammonium or nitrate. *Plant & Soil* 140: 241-248.
- GILFORD, R.M. 1974. Photosynthetic limitations to cereal yield. In: *Mechanism of regulations of plant growth*. Royal Society New Bulletin 12: 887-893.
- HARADA, T., TAKARI, H. and YAMADA, Y. 1968. Effect of nitrogen source on the chemical components in young plants. *Soil Science and Plant Nutrition* 14(2): 47-55.
- HAYNES, R.J. 1990. Active ion uptake and maintenance of cation-anion balance: A critical examination of their role in regulating rhizosphere pH. *Plant & Soil* 126: 247-264.
- HENDRICKS, S. and TAYLORSON, R.B. 1974. Production of seed germination by nitrate, nitrite, hydroxylamine, and ammonium salts. *Plant Physiology* 54: 304-309.
- INSTITUTO NACIONAL DE ESTADÍSTICAS, 1994. *Estadísticas Agropecuarias, Año Agrícola 1992/1993*. INE. Santiago, Chile.
- KINRAIDE, T.B. 1991. Identity of the rhizotoxic aluminium species. *Plant & Soil* 134: 167-178.
- KIRKBY, E.A. and MENGEL, K. 1967. Ionic balance in different tissues of the tomato plant in relation to nitrate, urea, or ammonium nutrition. *Plant Physiology* 42: 6-14.
- MALHI, S.S., NYBORG, M. and CALDWELL, C.D. 1988. Effect of ammonium and nitrate in growth and yield of barley on acid soils. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 19(7-12): 1.049-1.063.
- MARSCHNER, H. 1991. Mechanisms of adaptation of plants to acid soils. *Plant & Soil* 143: 1-20.
- MAYNARD, D.N. BARBER, A.V. and LACHMAN, W.H. 1966. Ammonium induced stem and leaf lesion of tomato plant. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 88: 516-520.
- MAYNARD, D.N. and BARBER, A.V. 1968. Influence of potassium on the utilization of ammonium by tomato plant. *Journal of the American Society for Horticultural Science* 92: 537-542.
- MELLA, A.L. y KÜHNE, A.G. 1985. Sistemática y descripción de las Familias, Asociaciones y Series de suelos derivados de materiales piroclásticos de la zona central-sur de Chile. En: Juan Tosso (ed.). *Suelos volcánicos de Chile*. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Santiago, Chile. p.: 698-699.
- PARKER, D.R., KINRAIDE, T.B. and ZELAZNY, L.W. 1988. Aluminium speciation and phytotoxicity in dilute hydroxy-aluminium solutions. *Soil Science Society of America Journal* 46: 438-444.
- PEYRELONGUE C., A. y BERATTO M., E. 1987. Contenido de proteína en el grano de cebada. II. Efecto de la fertilización nitrogenada, contenido inicial de nitrógeno y materia orgánica del suelo. *Investigación y Progreso Agropecuario Carillana* 6(1): 15-17.
- PEYRELONGUE C., A. y TORO Q., C. 1992. Efecto de salitre sódico y urea en rendimiento y calidad de cebada maltera, en suelos de la IX Región. *Agricultura Técnica (Chile)* 52: 435-445.
- SHANN, J.R. and BERTSCH. 1993. Differential cultivar response to polynuclear hydroxo-aluminium complexes. *Soil Science Society of America Journal* 57: 116-120.
- SPRATT, E.D. 1974. Effect of ammonium and nitrate forms of fertilizer-N and their time of application on utilization of N by wheat. *Agronomy Journal* 66: 57-61.
- SUHAYDA, C.G. and HAUG, A. 1986. Organic acids reduce aluminium toxicity in maize root membranes. *Physiologia Plantarum* 68: 189-195.
- TAYLOR, G.J. 1988. The physiology of aluminium tolerance in higher plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis of American Journal* 15: 1.179-1.194.
- WAGATSUMA, T. and YAMASAKO, K. 1985. Relationship between differential aluminium tolerance and plant induced pH change of medium among barley cultivars. *Soil Science and Plant Nutrition* 31: 521-535.
- WAGATSUMA, T. and EZOE, Y. 1985. Effect of pH on ionic species of aluminum in medium and on aluminium toxicity under solution culture. *Soil Science and Plant Nutrition* 31: 547-561.
- WARNCKE, D.D. and BARBER, S.A. 1973. Ammonium and nitrate uptake by corn as influenced by nitrogen concentration and $\text{NH}_4^+/\text{NO}_3^-$ ratio. *Agronomy Journal* 65: 950-953.
- WRIGHT, J. 1989. Soil aluminium toxicity and plant growth. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 20(15-16): 1.479-1.497.
- ZADOCKS, J.C., CHANG, T.T. and KONZAK, C.F. 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14: 415-421.