

4.3.5. Efectos colaterales de la adición de NaH_2PO_4 como fuente de P.

Desde los dos meses de edad, las plántulas de los tratamientos con los niveles medio y alto de P, mostraron unas punturaciones necróticas en el extremo distal y bordes de las hojas más viejas. La magnitud de este daño atribuido al Na aumentó al aumentar la edad de las plántulas.

Visualmente se hizo evidente el hecho de que el daño de Na aumentaba al aumentar el nivel de P aplicado. Asimismo, se observó que el daño fue mayor en las plántulas del S.S. La Fig. 12 correspondiente al nivel Al_0 (controles) en el S.S., a los 4 y 5 meses de edad, ilustra la mayor intensidad del daño al aumentar el nivel de P aplicado. También se observa lo ya anotado en cuanto que el daño aumentó al aumentar la edad de las plántulas. En la Fig. 16 se observa en detalle dicha sintomatología en hojas afectadas de las mismas plántulas que se mostraron en la Fig. 12 A.

Las Figuras 17 y 18 ilustran la diferencia en la magnitud del síntoma en los dos sistemas de aplicación P-Al. Nótese la mayor incidencia de punturaciones en las plántulas del S.S.

Dentro de cada nivel de P, no hubo diferencias visuales en la magnitud del daño mencionado, al aumentar el nivel de Al.



FIGURA 16. Efecto tóxico del Na aplicado como fosfato de sodio. 1a, 4b y 7a, niveles bajo, medio y alto de fosfato respectivamente. Edad de las plántulas, 5 meses.

Teniendo en cuenta que el daño de Na fue más severo en las plántulas del S.S. y dentro de este sistema, la severidad fue mayor en las plántulas con el nivel alto de P, y teniendo en cuenta también que después del cuarto mes de edad las plántulas control (sin Al) fueron afectadas por las mayores adiciones de HCl, al quinto mes de edad, las plántulas P₃Al₀ del S.S. presentaron la más severa afección en cuanto a la sintomatología atribuida a la adición de NaH₂PO₄ y en cuanto a la falta de turgidez en las hojas atribuida al HCl, tal como puede observarse en la Fig. 12 A.

Al cuarto mes de edad, las plántulas a las que se aplicó el nivel bajo de P,

no mostraron ninguna punturación. Al quinto mes, estas plántulas en el S.S., presentaron máximo 2 a 4 pequeñas punturaciones por hoja (Fig. 16, 1a), mientras que las del S.A., no mostraron ninguna punturación.



FIGURA 17. Aspecto de las plántulas testigo (sin Al) con el nivel medio de P. A la derecha en el sistema simultáneo (todo el tiempo en solución con fosfato de sodio). A la izquierda en el sistema al terno (solución con fosfato de sodio, durante tres días y luego tres días en solución sin fosfato de sodio). Nótese la mayor incidencia de punturaciones necróticas (toxicidad de Na) en el sistema simultáneo. Edad 4 meses.

La aparición del síntoma descrito presentó etapas bien definidas. La primera manifestación fue el desarrollo de un color amarillo-dorado en los bordes de las hojas más viejas (Figuras 19a y 19b), lo cual empezó a observarse desde los 35-40 días después de la siembra. El peso siguiente (40, 60 días) fue la formación de punturaciones necróticas en la zona afectada, con bordes bien

definidos (Fig. 19c). Dichas punturaciones, después de este tiempo, se fueron fusionando, aumentando el área de tejido necrosado (Fig. 19d).



FIGURA 18. Plántulas tratadas con el nivel alto de Al y el nivel alto de P. A la derecha en el sistema alterno (P por tres días en solución libre de Al y luego Al durante los tres días siguientes en solución libre de P). A la izquierda, en el sistema simultáneo (P y Al en la misma solución). Nótese la mayor incidencia de punturaciones necróticas (toxicidad de Na) en el sistema simultáneo. Edad, 5 meses.

Dada la mencionada relación entre P aplicado y el mencionado daño, se asoció esta sintomatología con el nivel de Na en solución ya que la fuente de P fue NaH_2PO_4 . Se realizaron análisis de este elemento en las soluciones así como análisis de Na foliar.

En la Tabla 12 se dan los valores de Na encontrados en las diferentes soluciones recién preparadas. Puede verse que en las soluciones de los tratamientos con el nivel alto de P, el Na en solución alcanzó niveles hasta de 66 ppm .



A



B



C



D

FIGURA 19. Diferentes estados del síntoma observado en las plántulas a las que se les aplicó el nivel medio ó el nivel alto de P. A y B : 35-40 días después de la siembra; C : 60 días y D : 5 meses.

TABLA 12. Niveles de Na (ppm) encontrados en las diferentes soluciones-tratamientos.

SISTEMA SIMULTANEO 1		SISTEMA ALTERNIO 2	
Soluciones tratamiento	Na (ppm)	Soluciones tratamiento	Na (ppm)
P1Al ₀	15	P1Al ₀	15
P1Al1	20	P ₀ Al ₀	9
P1Al2	14	P1Al ₀	15
P2Al ₀	33	P1Al1 P ₀ Al1	13
P2Al1	33	P1Al ₀	15
P2Al2	46	P1Al2 P ₀ Al2	7
P3Al ₀	49	P2Al ₀	33
P3Al1	51	P ₀ Al ₀	9
P3Al2	66	P2Al1 P ₀ Al1	13
		P2Al ₀	33
		P2Al2 P ₀ Al2	7
		P3Al ₀	49
		P ₀ Al ₀	9
		P3Al ₀	49
		P3Al1 P ₀ Al1	13
		P3Al ₀	49
		P3Al2 P ₀ Al2	7

T. P y Al en la misma solución.

2. P durante tres días en solución libre de Al y luego Al durante los tres días siguientes en solución libre de P.

Puede verse también en la Tabla 12 que los niveles de Na fueron similares en las soluciones del sistema simultáneo y del sistema alterno. Hay indicios de que el $\text{Al}_2 (\text{SO}_4)_3$ adicionado tuvo contaminación de Na, puesto que para un mismo nivel de P, en varios casos, el Na en solución aumentó al aumentar el Al aplicado.

En el Anexo 5 se presentan los valores de Na foliar a los cuatro meses de edad, en cada uno de los tratamientos ensayados. El análisis de varianza de estos datos mostró un efecto altamente significativo del Al, del P, del Sistema de aplicación P-Al y de la interacción Sistema x P. Aunque los valores de Na foliar obtenidos a los cinco meses de edad no se incluyen, vale la pena anotar que el análisis de varianza para estos datos mostró nuevamente un efecto altamente significativo de los mismos factores mencionados a los cuatro meses de edad.

Los valores promedio (*) de Na foliar (ppm) para los tres niveles de Al en sayados fueron :

Al ₀	Al ₁	Al ₂
980,4 (a)	985,0 (a)	1195,9 (b)

(*) Promedios seguidos por la misma letra no difieren estadísticamente al nivel 1% por la prueba de Duncan.

El nivel alto de Al produjo un aumento altamente significativo en la concentración de Na foliar.

En efecto de la interacción P x Sistema de aplicación P-Al se observa en la Tabla 13.

TABLA 13. Efecto de la interacción P x Sistema de aplicación P - Al sobre la concentración foliar de Na (ppm). Los datos son el promedio de los tres niveles de Al.

	P aplicado ¹		
	P ₁	P ₂	P ₃
Sistema Simultáneo ²	488,7 (d)	1244,13 (b)	1980,23 (a)
Sistema Alterno ³	577,8 (cd)	776,1 (c)	1255,6 (b)

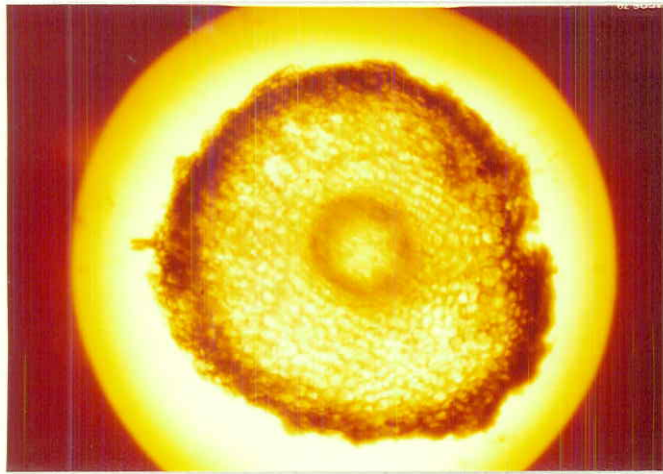
1. Promedios seguidos por la misma letra no difieren estadísticamente al nivel 1% por la prueba de Duncan.
2. P y Al en la misma solución.
3. P por tres días en solución libre de Al y luego Al durante los tres días siguientes en solución libre de P.

Puede verse en la Tabla anterior que el P aplicado aumentó de manera altamente significativa la concentración de Na foliar, siendo este aumento mayor en el sistema simultáneo.

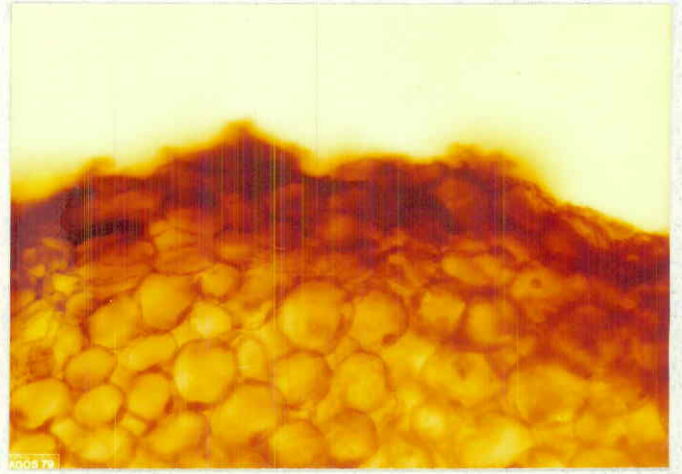
4.4. OBSERVACIONES HISTO-QUIMICAS DE LAS RAICES. EFECTOS MORFOLOGICOS DEL Al Y LOCALIZACION DEL FOSFATO DE ALUMINIO.

Se hicieron observaciones al microscópio de las raíces de las plántulas tratadas con el nivel alto de Al y de los respectivos controles. Las observaciones se hicieron en cortes hechos de acuerdo a la descripción de materiales y métodos.

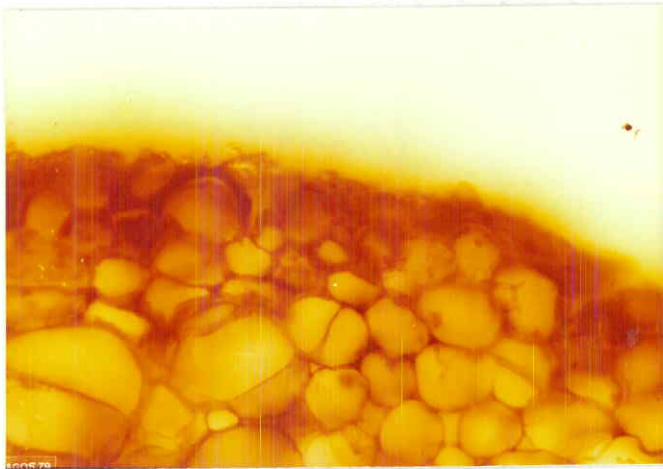
En las plántulas del sistema simultáneo, los efectos del nivel alto de Al dependieron del nivel de P aplicado. Como ya se anotó, con el nivel bajo de P, se observaron anomalías en el patrón de crecimiento de las raíces. Los cortes de raíces primarias de estas plántulas mostraron desorganización de la estructura típica de la epidermis, exodermis y de las 3 ó 4 capas más externas de la corteza con ocurrencia de células de irregular forma y tamaño (Fig. 20). En el cilindro central también se observó desorganización de la estructura especialmente del floema y cambium (Fig. 21), presentándose menor grado de diferenciación que en el control. Mientras más tiempo estuvieron las raíces dentro de la solución, los daños fueron mayores.



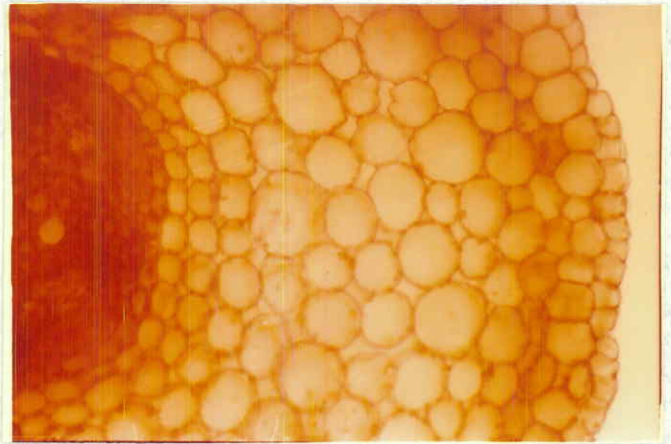
A



B

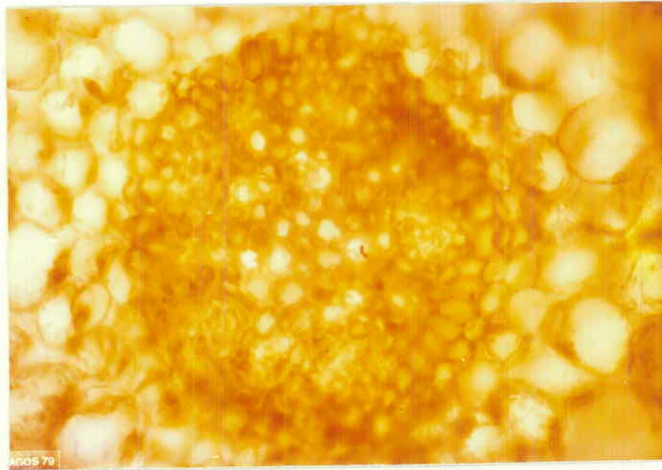


C

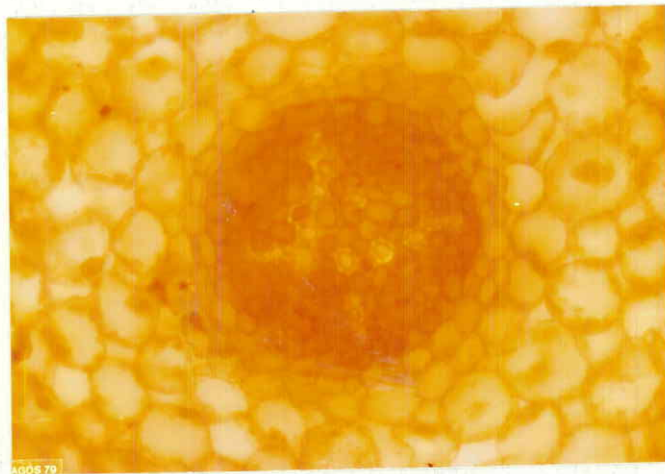


D

FIGURA 20. Efectos morfológicos del nivel alto de Al aplicado en la misma solución con el nivel bajo de P. Las áreas OSCURAS representan sitios de alta concentración de fosfato de aluminio. A. Vista general (X 50). B y C. Detalles de la epidermis y capas externas de la corteza (X 200 y X 300) respectivamente. D. Control (X 320). Todas las fotografías fueron tomadas a los 4 meses de edad excepto la fotografía C, tomada a los 5 meses.



A

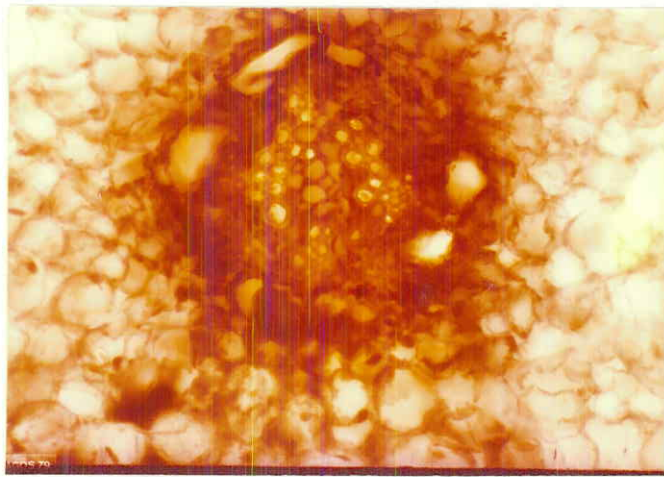


B

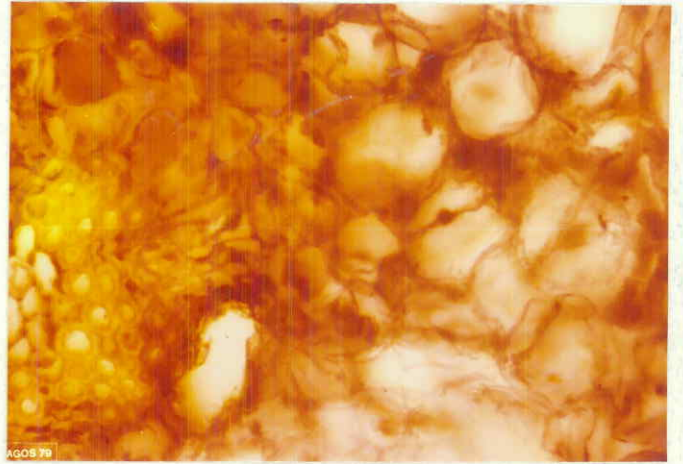
FIGURA 21. A. Efectos del nivel alto de Al aplicado en la misma solución con el nivel bajo de P sobre la morfología del cilindro central (X 256). B. Control (X 200). Edad : 4 meses.

Estos daños fueron más severos en la región más próxima al ápice. En los estados más avanzados se observaron daños severos tales como precipitación del protoplasma y rompimiento de células por lo cual quedaron espacios libres de elementos celulares a manera de huecos dentro de la raíz y en la superficie de ésta (Fig. 22). Este fenómeno fue particularmente severo en la zona adyacente al periciclo (Figuras 22A y 22B) aunque también se observó en la corteza (Fig. 22C). En la superficie de la raíz se observaron protuberancias y depresiones (Fig. 22D).

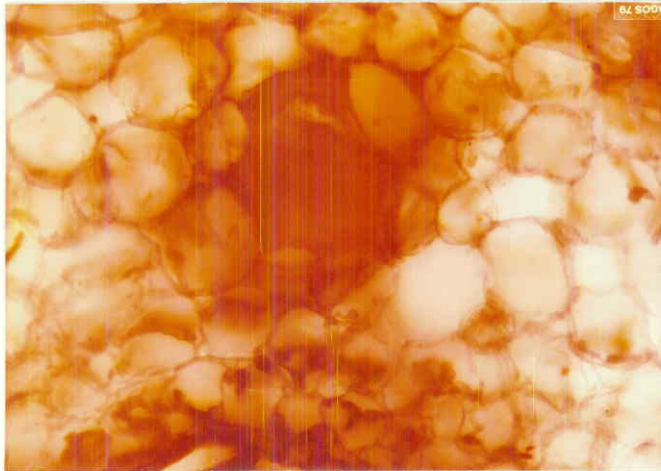
En el mismo S.S. el nivel alto de Al aplicado con el nivel medio de P, produjo efectos menos notorios que los descritos, aunque hubo crecimiento irregular y alguna deformación de las células de la epidermis, exodermis y capas más externas de la corteza (Fig. 23). A los cinco meses de edad se observó ocasionalmente en la corteza de estas raíces huecos con células en el borde con una división atípica (Fig. 24). Poco ó ningún efecto fue observado en el tratamiento al que se aplicó el nivel alto de Al con el nivel alto de P en el S.S.



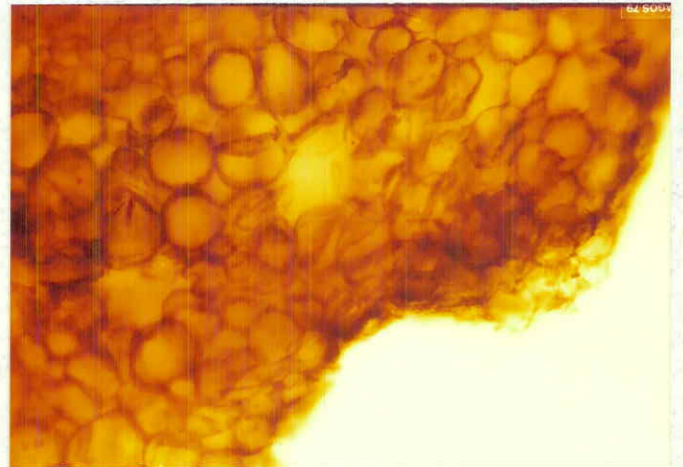
A



B

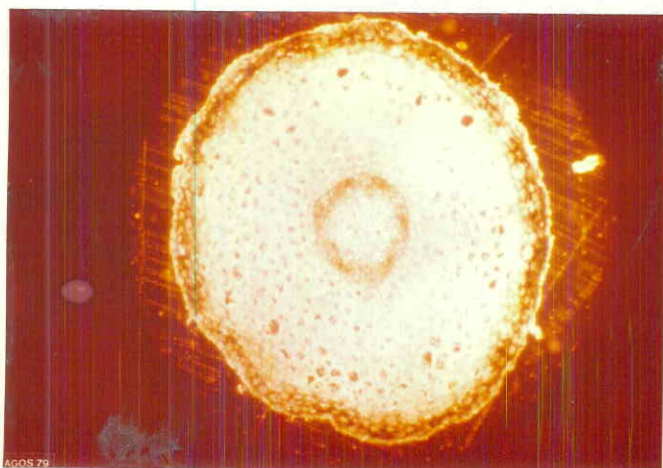


C

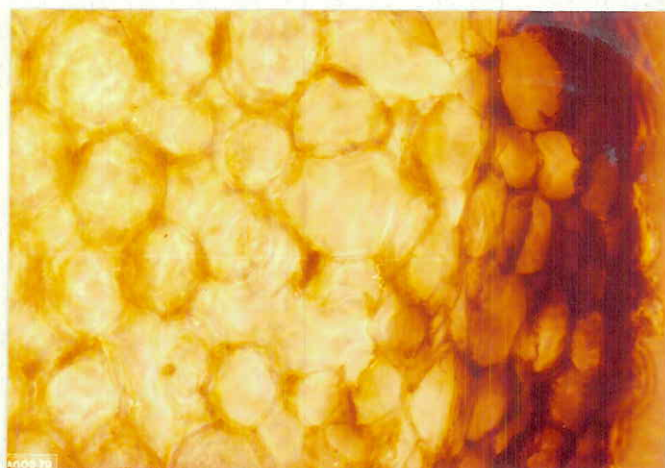


D

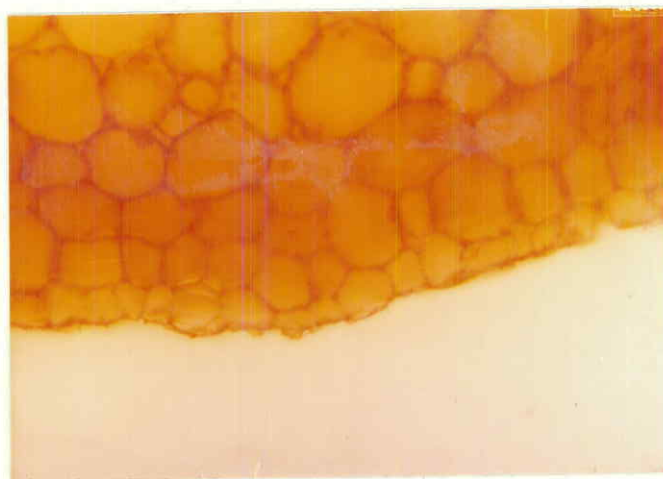
FIGURA 22. Daños observados a los cinco meses de edad en el tratamiento en el que se aplicó el nivel alto de Al en la misma solución con el nivel bajo de P. A. Vista del cilindro central (X 200). B. Zona correspondiente al periciclo, a la derecha, la corteza; a la izquierda los vasos conductores (X 320). C. Porción de la corteza mostrando precipitación de contenidos celulares (X 200). D. Región correspondiente a la epidermis mostrando protuberancia y depresión y en la corteza, espacios sin células (X 50).



A

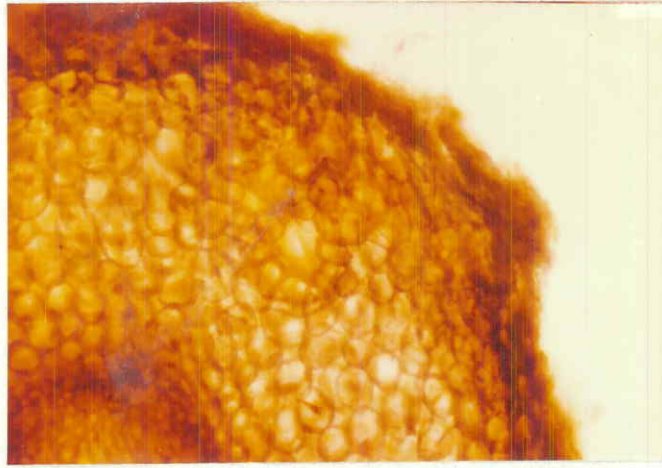


B

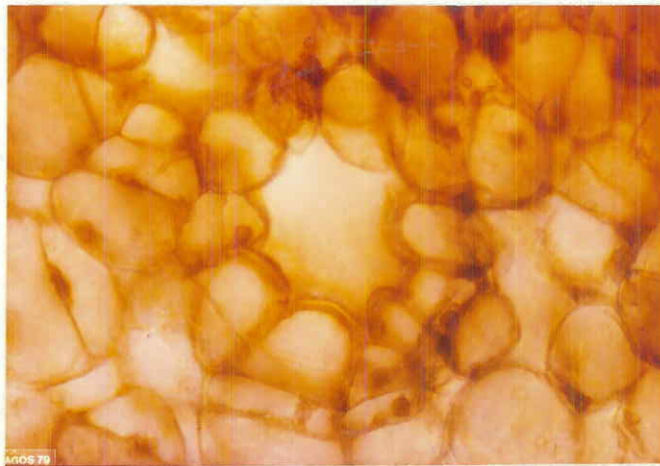


C

FIGURA 23. Efectos del nivel alto de Al aplicado en la misma solución con el nivel medio de P. Las áreas OSCURAS representan sitios con alta concentración de fosfato de aluminio. A. Vista general (X 50). B. Detalle de la epidermis y corteza del corte anterior (X 312). C. Detalle de la epidermis y corteza del control (X 320). Edad : 4 meses.



A



B

FIGURA 24. Efectos del nivel alto de Al aplicado en la misma solución con el nivel medio de P a los cinco meses de edad. A. Espacio libre de células en la corteza (X 126). B. Detalle del corte anterior mostrando división celular atípica (X 400).

En el S.A , el efecto del nivel alto de Al con ninguno de los niveles de P alcanzó la severidad del tratamiento P₁Al₂ - simultáneo (bajo nivel de P aplicado con el alto nivel de Al en el S.S.). Cualitativamente el efecto de dicho nivel de Al fue similar con los tres niveles de P. Hubo deterioro y desorganización de las células epidermales y de las corticales más externas como se ilustra en las Figuras 25, 26 y 27. En esta zona, hubo algunas irregularidades en la forma y tamaño de las células y la superficie de la raíz tuvo bordes irregulares. A nivel haces vasculares, en ninguno de los casos se observaron las anomalías observadas en el tratamiento P₁Al₂- simultáneo (Fig. 26C).

El desarrollo de un color azul oscuro sobre la superficie de las puntas de raíz no seccionadas de los tratamientos con el nivel alto de Al en el S.S., mostró una interacción definida de Al y fosfato sobre la superficie de tales raíces. Poca ó ninguna coloración se observó en los controles. La Figura 28 ilustra esta reacción. La cápsula radical ó cofia mostró también acumulación de fosfato (Fig. 28B). En el tratamiento en el que se presentaron los más severos efectos del Al (P₁Al₂- simultáneo), la cofia se observó rota y la superficie de la raíz tuvo depresiones notorias como se ilustra en la Fig. 28A.

La localización é intensidad del color azul que se observó en los cortes transversales de tales raíces, mostraron que dicha interacción entre Al y fosfato no solamente ocurrió en la superficie de la raíz sino también dentro de la raíz.

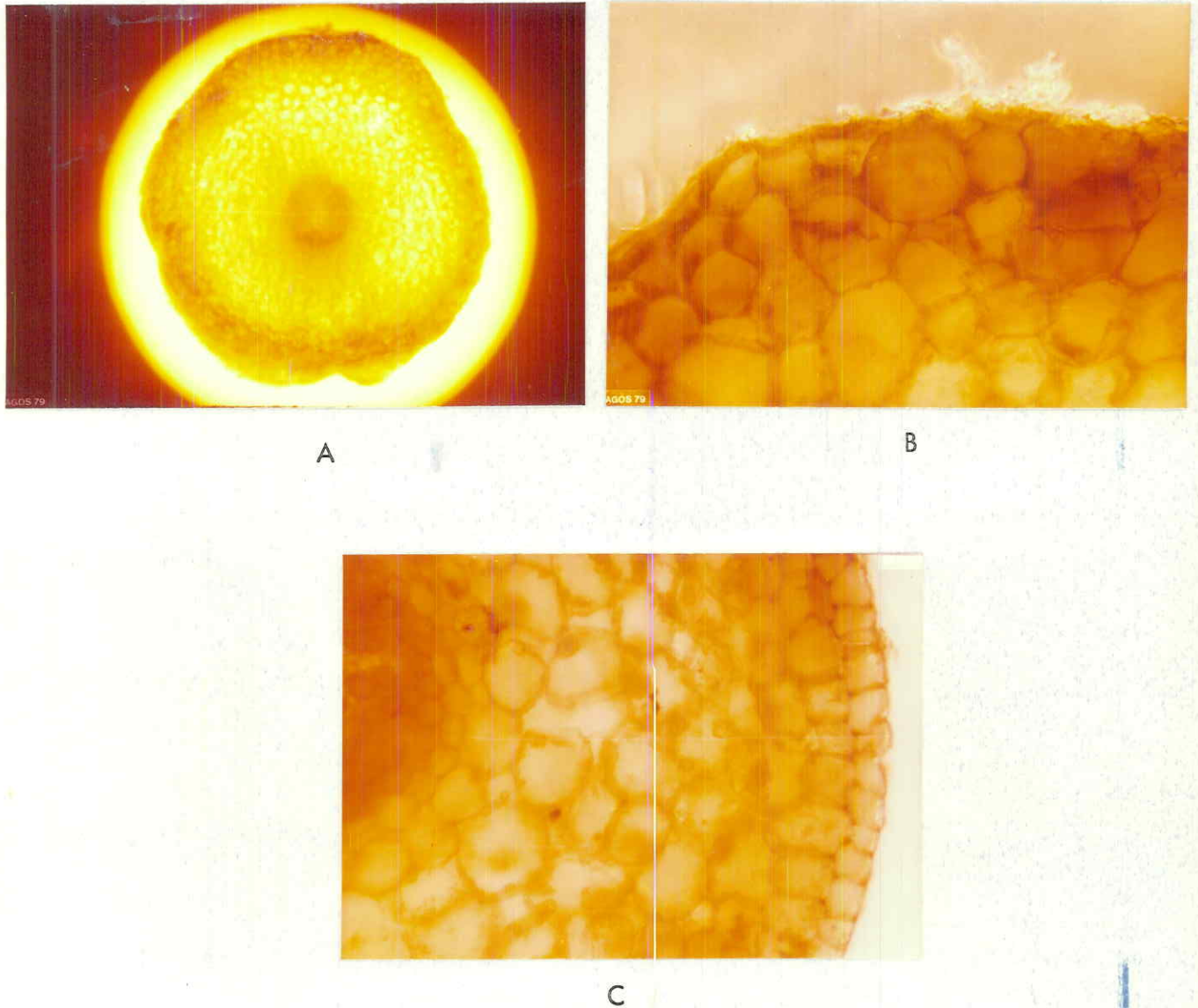


FIGURA 25. Efectos del nivel alto de Al aplicado con el nivel bajo de P. El P por tres días en solución libre de Al y luego el Al por tres días en solución libre de P. A. Vista general (X 50). B. Detalle de la epidermis y corteza del corte anterior (X 312). C. Control (X 320). Edad: 4 meses.

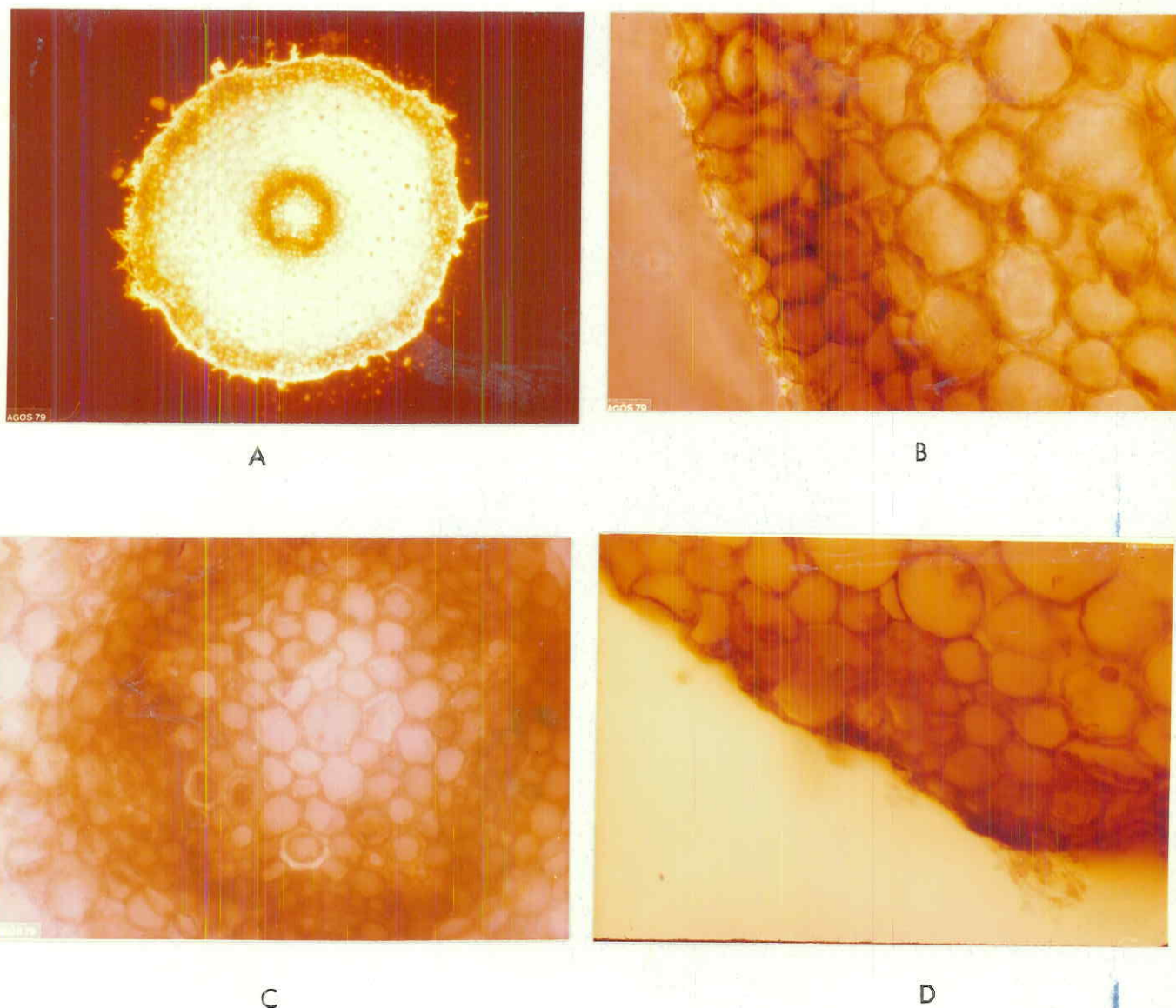
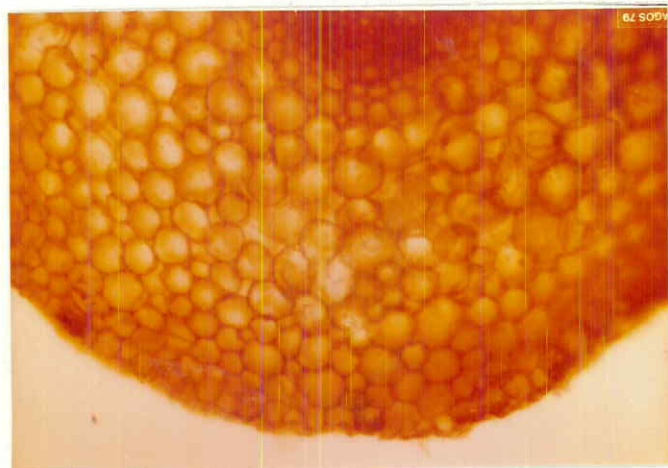


FIGURA 26. Efectos del nivel alto de Al aplicado con el nivel medio de P. El P por tres días en solución libre de Al y luego el Al por tres días en solución libre de P. A. Vista general (X 50), a los 2 meses de edad. B. Detalle de la epidermis y corteza del corte anterior (X 312). C. Detalle del cilindro central del mismo corte (X 312). D. Detalle de la corteza y epidermis a los 5 meses de edad (X 320).



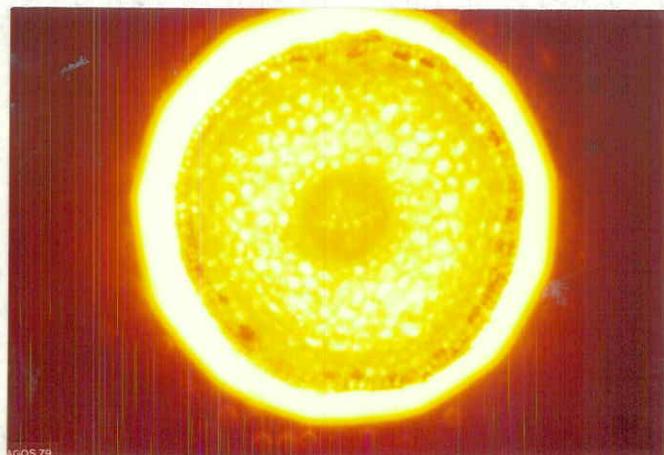
A



B



C

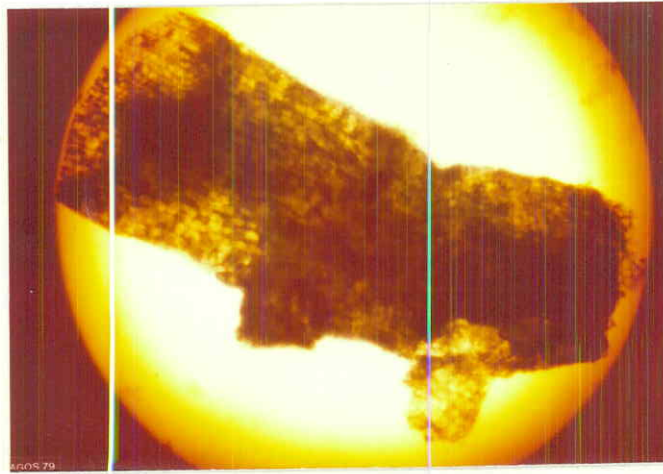


D

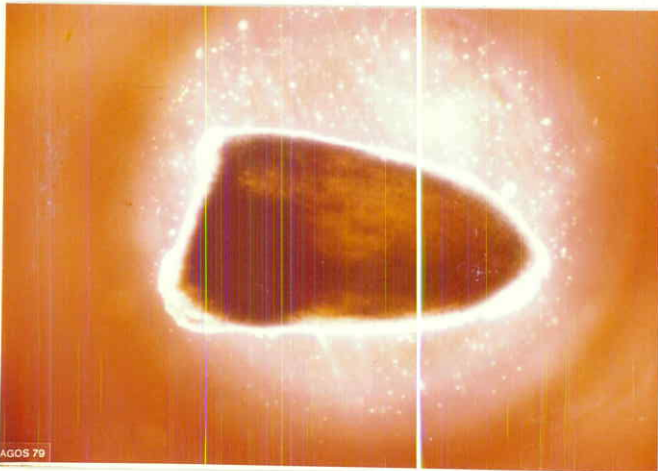
FIGURA 27. Efectos del nivel alto de Al aplicado con el nivel alto de P. El P por tres días en solución libre de Al y luego el Al por tres días en solución libre de P. A. Vista general (X 320) a los 2 meses de edad. B. Detalle de la corteza y epidermis (X 320) a los 4 meses de edad. C. Detalle de la corteza y epidermis (X 256) a los 5 meses de edad. D. Control a los 4 meses de edad (X 78).

Hubo desarrollo de color en las regiones epidermales y corticales más externas correspondientes a la región libremente difusible ó espacio intracelular libre. Poca ó ninguna coloración fue observada en el tejido vascular en los casos en que la epidermis se encontró sin rupturas (Figuras 20A y 23A). En los casos en que hubo rompimiento de la epidermis u otro tipo de daño como espacios sin células dentro de la corteza, hubo desarrollo de coloración en regiones internas de la corteza y en algunos casos acumulación alta más allá de la endodermis (Fig. 22).

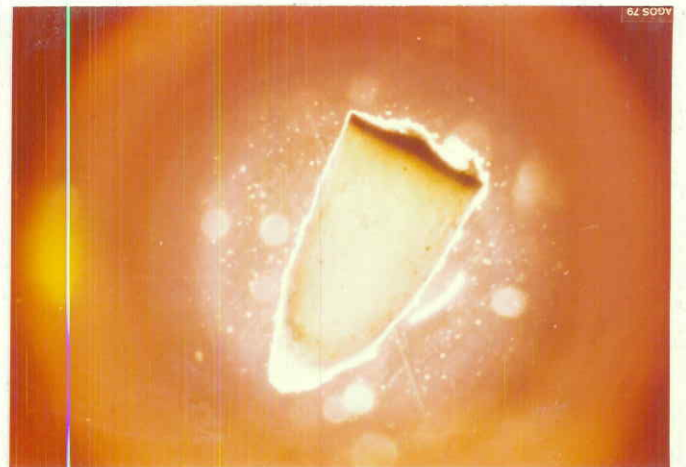
En los cortes de las raíces del S.A., se observó poca ó ninguna coloración para fosfato de aluminio comparada con la observada en las raíces del S.S. (Figuras 25, 26 y 27).



A



B



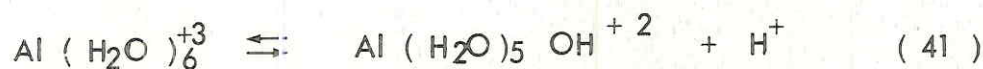
C

FIGURA 28. Puntas de raíces primarias mostrando el desarrollo de color azul, reacción positiva para fosfato de aluminio. A. Tratamiento al que se aplicó el nivel alto de Al con el nivel bajo de P en la misma solución (X 50), obsérvese la cofia rota (extremo derecho), la depresión en la superficie de la raíz y el brote de una raíz secundaria inhibida. B. Tratamiento al que se aplicó el nivel alto de Al con el nivel medio de P en la misma solución (X 40). C. Control del anterior tratamiento (P_2Al_6) (X 30). Edad : 4 meses.

5. DISCUSION

5.1. COMPORTAMIENTO DEL Al Y P EN LAS SOLUCIONES

Antes de ajustar el pH a 3,5, el pH de las soluciones recién preparadas fue una función del Al aplicado. A medida que hubo más Al, el pH se hizo más ácido. La adición de $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ también aportó acidez a las soluciones pero en menor magnitud que el Al. El carácter ácido de una solución con Al se debe a que este ión en solución atrae electrones de las moléculas de agua y surgen protones:



La constante de ionización del Al ($K = 1 \times 10^{-5}$) indica que es un ácido tan fuerte como el acético (41).

El incremento en el pH en soluciones nutritivas en la que crecen plantas ha sido ampliamente discutido. Barlett y Riego (4), explican este hecho por la toma de nitratos y amonio por las raíces. Con base a lo observado en este trabajo, podría decirse que en soluciones conteniendo Al, éste ejerce un efecto regulador ó tampón en el sentido que no permite incrementos grandes en el pH como los observados en las soluciones sin Al. Las mayores adiciones de

HCl que fue necesario hacer a las soluciones controles para mantener el pH a 3,5, afectaron a las correspondientes plántulas después de los 4 meses de edad, tiempo a partir del cual las variaciones en el pH se hicieron mayores. Este efecto impidió evaluar el efecto del Al cuando las plántulas tuvieron más de esta edad. Tal hecho establece la necesidad de tamponizar el pH de las soluciones en futuros trabajos con Al en solución nutritiva. Se hace necesario estudiar diferentes métodos de tamponizar el pH y su relación con la toxicidad de Al pues se tienen referencias de que usando sustancias del tipo Amberlita IRC-50 no es posible producir toxicidad (53).

Reid et al. (53), reportan una situación similar en cuanto que soluciones con Al requieren menor ajuste de pH. Manneti y Santos (40) ajustando el pH cada dos días anotan que en los controles sin Al, no hubo buen desarrollo de las plántulas de café que crecieron en solución nutritiva. Este hecho puede estar relacionado con las mayores adiciones de ácido que es necesario hacer a soluciones sin Al, aunque los autores no mencionan nada al respecto.

El hecho de que en las soluciones control, el pH haya variado más en el S.S. puede asociarse con el hecho de que en el S.A. las plántulas control se alternaron entre soluciones con P (sin Al) y soluciones sin P (sin Al). De esta manera las plántulas pudieron alterar menos el pH de cada una de estas soluciones que las plántulas control del S.S., las cuales estuvieron todo el tiempo en

la misma solución (con P, sin Al).

Aunque a medida que pasó el tiempo se mantuvo la diferencia entre la variación en el pH en las soluciones control y en las soluciones con Al, al aumentar la edad de las plántulas el incremento en el pH atribuido a la toma de nitratos y amonio, aumentó tanto en las soluciones control y en menor magnitud, en las soluciones con Al. De esta manera, los niveles promedio de Al y P solubles que pudieron ser mantenidos en las soluciones conteniendo Al y P, disminuyeron al aumentar la edad de las plántulas. Esto podría tener importancia en un medio donde no hubiera permanente ajuste de pH. La nutrición de amonio y nitratos podría proteger a las plantas de la toxicidad de Al, aumentando el pH y produciendo precipitación de Al (en caso de suministro adecuado de P). Este aspecto ha sido discutido por Barlett y Riego (4).

La relación 1:1 (en meq/l) que se observó entre PO_4^{\equiv} y Al^{+3} precipitados (antes de poner las plántulas en las soluciones) fue una clara evidencia de que el precipitado formado tuvo una composición básica $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$. A pH 3,5 el ión Al^{+3} en solución predomina como $\text{Al}(\text{OH})_2^+$ (7), el cual es inestable y queda libremente intercambiable con H_2PO_4^- resultando la formación del precipitado mencionado arriba (45). De esta manera, el hidróxido de aluminio fija el fósforo por una reacción de adsorción-precipitación, proceso que ha sido también descrito en suelos (7).

La descripción de la apariencia de los precipitados observados es la misma que hace Munns (45) sobre precipitados de fosfato de Al en soluciones.

En las soluciones que después de su preparación fue necesario adicionar Na OH para ajustar el pH a 3,5, la relación 1:1 no se cumplió exactamente. La concentración de Al^{+3} precipitado excedió ligeramente a la de PO_4^{\equiv} precipitado. Es posible que en este caso, además de fosfato de Al, se pudo haber precipitado algún $Al(OH)_3$.

Algunos investigadores como Magistad (39), Barlett y Riego (4), hacen referencia a que el P precipita al Al solamente cuando el pH es cercano a 5,0. Las observaciones en este trabajo a pH 3,5 aunque contrarias a las referencias anteriores, tienen alguna relación con los datos de solubilidad a pH 4,0 presentados por Munns (45) quien concluyó que aplicando a soluciones nutritivas 0,3 me/l de Al, concentraciones de fosfato superiores a 0,5 me/l provocaron visible reacción entre Al y fosfato. En este trabajo a pH 3,5, solamente con 0,68 me/l de Al^{+3} y 0,89 me/l de PO_4^{\equiv} aplicados no hubo reacción evidente (solución P_1Al_1 - simultáneo). Aumentado el Al a 4,2 me/l ó aumentando la concentración de PO_4^{\equiv} a 3,8 ó 6,8 me/l hubo visible precipitación de estos dos iones. Las cantidades de Al y fosfato precipitadas en las diferentes soluciones dependieron de las cantidades aplicadas de estos dos iones.

5.2. EFECTOS DE LOS TRATAMIENTOS SOBRE EL CRECIMIENTO DE LAS PLANTAS

Respecto a la evaluación estadística del efecto de los tratamientos es importante hacer referencia al hecho de que de las variables de crecimiento consideradas el peso seco de las raíces en los tres muestreos realizados, presentó el mayor coeficiente de variación lo cual implica una alta varianza dentro de tratamientos debida a error experimental independiente del efecto de tratamientos.

Entre las causas de dicha variación se tiene que, en el momento de los muestreos, dado que en cada recipiente crecían tres plántulas (dispuestas una para cada muestreo) y dado el tipo de recipiente utilizado (boca angosta) pudo ocurrir algún desprendimiento de pequeñas partes de raíces en el momento del muestreo. Lógicamente, no toda la variación que se presentó en los datos del peso seco de las raíces puede ser atribuida a tales factores. Se debe considerar también la variación debida al manejo de las soluciones, la variabilidad del material utilizado y de las condiciones experimentales, factores a los cuales estuvieron también sujetos los otros parámetros de crecimiento evaluados.

De las variables de crecimiento usadas para medir el efecto de los tratamientos, la longitud del tallo resultó ser la más adecuada porque detectó pequeñas diferencias entre tratamientos y además fue una variable estable, esto es, presentó bajo coe-

ficiente de variación.

Lo anterior guarda relación con lo observado por Owen et al. (46) en plántulas de algodón que crecieron en suelo, caso en el cual se concluyó que la altura de la planta era una variable adecuada y práctica para evaluar el efecto tóxico del Al.

En el presente trabajo, cuando las plántulas estuvieron expuestas durante cuatro meses a soluciones nutritivas que tuvieron niveles promedio de 31,22 ppm de Al soluble y 4,1 ppm de P (correspondientes a 37,8 ppm de Al y 9,3 ppm de P aplicados) se produjo una definida toxicidad de Al caracterizada por un crecimiento pobre de la parte aérea y un patrón anormal de crecimiento de las raíces lo cual corresponde a lo descrito por varios autores en otras plantas (18, 26, 46, 58).

Las hojas de tales plántulas tuvieron concentraciones de Al, Fe, K, Mg y Na significativamente aumentadas por efecto del Al. Estos elementos se correlacionaron en forma negativa con el crecimiento siendo en todos los casos la correlación significativa, excepto con el Na; con el Mg la correlación fue altamente significativa. Por el contrario, la concentración foliar de P, Ca y Mn fue significativamente disminuída por efecto del Al. Estos elementos se correlacionaron positivamente con el crecimiento, siendo altamente significativa esta correlación con el

Mn y significativa con el Ca. Con el P, la correlación solo alcanzó significancia con el número de hojas.

5.2.1. Efecto de la precipitación de fosfato de aluminio en las soluciones.

Los efectos deletéreos de 37,8 ppm de Al aplicados en la misma solución con 9,3 ppm de P, fueron contrarrestados aumentando el P aplicado a 39,6 ó 71,5 ppm de P, casos en los cuales el nivel de Al soluble se redujo a 12,85 y 7,13 ppm respectivamente. Bajo estas condiciones las plántulas tuvieron menores concentraciones foliares de Al y mayores de P con diferencias significativas respecto a las plántulas en las que se produjo toxicidad.

Estos efectos se asocian con una disminución del Al soluble por un efecto precipitante del P en las soluciones, el cual ha sido ampliamente discutido en suelos y en soluciones nutritivas (4, 35, 36, 64). Estos resultados tendrían importancia para resaltar el efecto positivo de la aplicación de fertilizantes fosfatados en suelos cafeteros con presuntos problemas de acidez. Si bien es cierto que poca o ninguna respuesta se ha observado a las aplicaciones de P en café (62), no debe ignorarse que bajo condiciones de acidez el papel del P podría tener importancia no tanto como nutriente para la planta pues se sabe que sus requerimientos son muy bajos, sino como elemento precipitador del Al.

Además del conocido efecto del Al sobre la división celular (8, 15) y del bloqueo de varios procesos metabólicos en raíces tales como respiración (15) y síntesis de DNA (7, 57), se ha asociado en muchos casos la toxicidad de Al con una deficiencia de P (13, 51, 66). La importancia de las adiciones de P al medio de crecimiento contrarrestando la toxicidad de Al, se ha atribuido no sólo a la precipitación del Al soluble sino al aumento de la disponibilidad de P. Considerando el mínimo nivel de P foliar que se presentó en este ensayo a los cuatro meses de edad (tratamiento P|Al₂- simultáneo), se tiene que presumiblemente no hubo deficiencia de este elemento ya que se consideran como niveles normales de P foliar en café niveles comprendidos entre 0,10 y 0,18% en base seca (*), por tanto, el nivel de 0,126% obtenido en tales plántulas no caería en el rango de deficiencia; además, no se observaron síntomas visuales de deficiencia.

De acuerdo con lo anterior, el mínimo nivel de P soluble que se presentó en las soluciones (4,1 ppm) fue suficiente para abastecer los requerimientos de P de las plántulas. No debe descartarse sin embargo la posibilidad de que para plántulas de mayor edad este nivel no sea suficiente en cuyo caso además de los efectos del Al soluble podría presentarse deficiencia de P. De otra parte, teniendo

(*) COLOMBIA. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Presentación de trabajos experimentales de Cenicafe. Chinchiná, 1978. Comunicación inédita.

en cuenta que en el medio de crecimiento el Al y el fosfato tendieron a reaccionar en proporción 1:1, considerando el caso en que las soluciones no se hubieran renovado constantemente, podría preverse una situación en la que se agotara la concentración de P quedando suficiente Al soluble para el caso en que los meq de Al excedieron a los meq de PO_4^{\equiv} aplicados. La importancia de este aspecto es evidenciada por varios trabajos (64) en soluciones y en suelo, los cuales reportan mayores efectos inhibitorios del Al en condiciones de niveles bajos de P.

5.2.2. Efecto de la aplicación de P como NaH_2PO_4 .

Considerando la respuesta al P obtenida en este trabajo se tiene que en los controles sin Al el P aplicado afectó negativamente el crecimiento, presentándose en algunos casos diferencias significativas como en el caso del peso seco de la parte aérea en el S.S. en el cual la diferencia entre el nivel bajo y el nivel alto de P fue significativa. Aunque los coeficientes de correlación entre el P aplicado y los parámetros de crecimiento no fueron significativos, fueron siempre negativos.

Aumentando la dosis de P aplicada, aumentó en las plántulas la concentración de P foliar con cualquiera de los niveles de Al. Dicho P foliar se correlacionó positivamente con los parámetros de crecimiento aunque sólo con el número de hojas el coeficiente alcanzó significancia.

La relación negativa entre el P aplicado y los parámetros de crecimiento y la no significancia de la correlación entre el P foliar y dichos parámetros de crecimiento son factores que pueden relacionarse con los efectos negativos colaterales de la aplicación de P como NaH_2PO_4 , los cuales se discuten a continuación. Dados dichos efectos, en este trabajo, no queda claro si las plántulas responden ó no a los niveles de P ensayados.

Entre los factores que pudieron enmascarar la respuesta al P, el más evidente fue el Na. Se obtuvieron coeficientes de correlación positivos y altamente significativos entre el Na foliar y el P (tanto el foliar como el aplicado). Aunque la correlación observada entre el Na foliar y las medidas de crecimiento no fue significativa, fue negativa. El efecto de los niveles altos de Na soluble se manifestó claramente en la aparición de punturaciones necróticas en las hojas más viejas, las cuales aumentaron al aumentar el Na en las soluciones. Esta sintomatología es la misma que reporta S' Jacob (60), en cuanto al daño provocado por el NaCl en café.

La mayor frecuencia de estas punturaciones en las plántulas del S.S. se atribuye a niveles de Na foliar mayores que los que se presentaron en las plántulas del S.A. en cuyo caso el tiempo de exposición a las soluciones con fosfato de sodio fue la mitad del tiempo del S.S.

Aduayi (2), aplicó 4 me/l de PO_4^{\equiv} como NaH_2PO_4 a la solución de "Long Ashton" en la que crecieron plántulas de C. arabica. El autor no menciona ningún daño al respecto. Esta referencia fue tenida muy en cuenta en la selección de la composición química de la solución a usar en el presente trabajo. La experiencia obtenida al respecto es que 4 y 7 me/l de PO_4^{\equiv} aplicados como NaH_2PO_4 produjeron una sintomatología que se asoció con los niveles altos de Na en las soluciones, los cuales correspondieron a niveles del orden de 40 y 58 ppm de Na respectivamente. Aplicando cantidades cercanas a 1 me/l de PO_4^{\equiv} (nivel bajo de P) se presentó una concentración de Na en solución del orden de 16 ppm de Na en cuyo caso las punturaciones fueron escasas u ocasionales.

Otro de los factores que pudo enmascarar la respuesta al P en este trabajo fue el alto contenido de K foliar. El P aplicado aumentó significativamente el K foliar. Tanto el Na como el P foliares se correlacionaron positiva y significativamente con el K foliar el cual se correlacionó negativa y de manera altamente significativa con la longitud del tallo y el peso seco. No queda claro si los niveles de K foliar se deben al P ó al Na aplicados, aunque se presume sea más un efecto del Na. Se cita como nivel normal de K en hojas de cafeto en producción, valores entre 1,50 y 2,0% en base seca (*). Similares y mayores nive-

(*) COLOMBIA. Centro Nacional de Investigaciones de Café. Presentación de trabajos experimentales de Cenicafé. Chinchiná, 1978. Comunicación inédita.

les se encontraron en este experimento. El exceso de K foliar es evidente si se considera la diferencia de edad entre cafeto en producción y plántulas de 4 meses de edad.

El nivel de K soluble mantenido en las soluciones tuvo un promedio cercano a 4 me/l el cual es el nivel recomendado para el crecimiento de C. arabica en solución nutritiva (2), lo cual descartaría la posibilidad de que los niveles altos de K foliar se debieron a una aplicación alta de K a las soluciones. Como ya se ha anotado, la ocurrencia de altos niveles de K en las plántulas y su efecto negativo sobre el crecimiento, parecen ser consecuencia del ión Na, ésto es, aumentando el Na en las soluciones aumentó el K en las plántulas.

Las punturaciones necróticas aumentaron al aumentar el Na en las soluciones como ya se ha anotado. Si el Na foliar se correlacionó positiva y significativamente con el K foliar, podría pensarse también que dicha sintomatología se debió a niveles altos de K en las plántulas. Sin embargo, esta posibilidad no parece muy factible pues los niveles de K foliar no mostraron asociación con la sintomatología como sí lo hizo el Na foliar, ésto es, aumentando la concentración de Na foliar aumentaron el número de punturaciones y el daño se hizo más severo.

Finalmente, dentro de los efectos del P, vale la pena mencionar el marcado efecto sobre la concentración de Fe foliar. Se presentó un coeficiente de correlación

negativo y altamente significativo entre P y Fe foliares ($r = -0,55$). Con el Na foliar el coeficiente fue menor ($r = -0,30$) y menor su significancia, lo cual indica que la disminución en el Fe foliar fue más cuestión del P que del Na. Esta observación está de acuerdo con lo que reportan Foy y Brown (13) en cuanto que, los rendimientos del algodón aumentaron al adicionar P al suelo (por disminución del Al soluble) pero se produjeron una serie de disturbios nutricionales por la adición de P, tales como reducción de la disponibilidad de micronutrientes entre ellos el Fe.

En la sección de resultados se observó que el efecto del P sobre el Fe foliar dependió del sistema, ésto es, en el S.S. el P no afectó al Fe foliar mientras que en el S.A. se produjo una disminución significativa en el Fe por efecto del P. Esto se asocia con las mayores concentraciones de P a las que estuvieron expuestas las plántulas del S.A., respecto a las del S.S., caso en el cual el P fue precipitado.

5.2.3. Naturaleza y posibles efectos de la interacción P-Al que ocurre en las raíces.

En cuanto a la reacción P-Al en las raíces, solamente en el S.S. en el cual ocurrió precipitación de fosfato de aluminio en las soluciones, se observó reacción positiva para este compuesto en las raíces. Controlando la precipitación

de estos dos iones por medio de la aplicación alterna, poca ó ninguna coloración para fosfato de aluminio se detectó en las raíces. En el primer caso, hubo reducción en el contenido de P foliar por efecto del Al, asimismo, el Al foliar disminuyó por efecto del P. Por el contrario, en el S.A., ni el P ni el Al foliares fueron afectados. Esto querría decir que la reacción entre P y Al que ocurrió en las soluciones y en las raíces tiene efecto en la reducción de la concentración de P foliar.

Clarkson (7) y McCormick y Borden (34) observaron fosfato de aluminio en raíces de plántulas de cebada a las que se les aplicó Al y P en forma alterna. La no acumulación de este compuesto observada en el presente trabajo en raíces de café a las que se aplicó P y Al en forma alterna, puede deberse a diferencias entre géneros de plantas en cuanto a acumulación de Al intercambiable en raíces y tolerancia a Al. La cebada es una planta muy sensible a Al, comparada con el café : 2 ppm de Al soluble inhiben el crecimiento en solución nutritiva (30). Se ha observado en esta planta (7) que cuando las raíces se sumergen en una solución de sulfato de aluminio, 95% del Al total de las raíces se localiza en la pared celular de las células epidermales. Con el Al así localizado, al poner las raíces en contacto con la solución de P ocurre rápida reacción entre el Al y el P. Aunque la precipitación de fosfato de Al es lenta aún en soluciones supersaturadas, si el Al se encuentra adsorbido sobre una superficie, entonces se acelera grandemente dicha precipitación (7).

La no ocurrencia de fosfato de aluminio en el S.A. en el presente ensayo, podría entonces ser explicada por el hecho de que posiblemente en raíces de café el Al no es adsorbido sobre el complejo de intercambio de la superficie radical, ni permanece allí por largo tiempo sino que tiende a entrar al sistema vascular para ser translocado a las partes aéreas como lo mostró un coeficiente de correlación altamente significativo entre el Al aplicado y el Al foliar. En otras plantas tales como algodón (13) y té (59) esta correlación no se presenta ó sea que el Al no entra a la planta sino que se acumula en las raíces.

Efectivamente, en varios trabajos (15, 19, 21) se ha demostrado que las plantas difieren en la capacidad de intercambio catiónico de las raíces siendo ésta menor en las plantas más tolerantes a Al, hecho por el cual acumulan concentraciones menores de Al en las raíces. Se reporta en algunas plantas con relativa tolerancia, translocación y acumulación de Al en la parte aérea (25, 58) como se observó en el presente trabajo en café. Sin embargo en otras plantas tolerantes aunque acumulan menos Al en las raíces que las plantas sensibles no se ha observado dicha translocación (19).

Teniendo en cuenta pues que el Al no se acumuló en las raíces de café observadas, sino que tendió a entrar a la planta, la formación y ubicación del fosfato de Al en las raíces del S.S. indicarían que cuando el Al y el P están presentes en la solución nutritiva, parte del Al en su trayecto de entrada desde la epider-

mis hasta los haces vasculares puede reaccionar con el P y formar fosfato de Al, como una extensión del proceso que ocurre en el medio de crecimiento. Por algún mecanismo no comprendido, cuando la epidermis está entera, esta reacción ocurre solamente en la epidermis y en las dos ó tres capas más externas de la corteza.

Ya se ha discutido la importancia de la reacción Al-P en el medio de crecimiento sobre la disponibilidad de P. Que tanto influye la reacción que ocurre en las raíces sobre dicha disponibilidad es un aspecto sobre el cual existen opiniones diferentes. Algunos autores (51, 67) afirman que la causa de la deficiencia de P debe buscarse en tal reacción, por el contrario, Clarkson (7) mostró en cebada que dicha interacción fue independiente del mecanismo normal de la toma de P y que tampoco tuvo ningún efecto en el transporte de este elemento. En otras plantas como en lupino, planta acidófila, la concentración de P aparece aumentada en las raíces y en la parte aérea por efecto del Al (19). Se ha sugerido entonces que el Al afecta en forma diferente la toma, y el metabolismo del P en las plantas (15, 19).

En el presente estudio, la influencia sobre el transporte ó la toma de P ó sobre ambas funciones de la observada interacción P-Al en las raíces, es un aspecto que no puede ser determinado con la metodología utilizada. Un estudio sobre el efecto del Al en la toma y transporte del P debe incluir mediciones de la can

tividad de P transportado a la parte aérea por unidad de peso de raíz así como el uso de P radiactivo. Utilizando tal metodología se ha demostrado en cebada (7), por ejemplo, que dicha cantidad transportada de P es la misma en plántulas tratadas con Al y en plántulas control y que la diferencia en la concentración de P en la parte aérea se debe a una diferente relación peso seco aérea/peso seco de raíces entre plántulas tratadas y plántulas control, debida a la inhibición de la división celular en raíces por acción del Al. En otras palabras, una raíz pequeña e inhibida absorbe y transloca menos cantidad de P, sin que ésto quiera decir que los procesos de toma y transporte sean bloqueados. Este es un aspecto que debe ser considerado con cautela en futuros estudios sobre el mecanismo de los efectos del Al en café.

5.2.4. Efectos del Al sobre la composición química de las plántulas.

5.2.4.1. Ca y Mn

El Mn y el Ca foliares se correlacionaron negativamente y de manera altamente significativa tanto con el Al aplicado como con el Al foliar. Estos dos elementos, Ca y Mn, se correlacionaron positivamente con el crecimiento.

En muchas de las plantas estudiadas el Al disminuye la concentración de Ca en la parte aérea (13, 15, 20, 58), aunque en otras plantas, por ejemplo en ha-

ba, planta basófila, la concentración de Ca aparece aumentada, en todos los órganos excepto en las raíces (19). Se han postulado varios mecanismos para explicar el efecto del Ca sobre la toma ó transporte de Ca en algunas plantas, los cuales fueron mencionados en la sección 2.4.3.2 de la revisión de literatura.

Según Guerrier y Morard (19), el antagonismo Al-Ca que se presenta en las plantas acidófilas las cuales tienen una alta capacidad de absorción de Ca, protege a dichas plantas de excesos de Ca disminuyendo su absorción sin afectar a la planta.

En el presente trabajo en café, con el nivel de Ca utilizado (8 me/l) parece ser que dicha disminución en el Ca foliar por acción del Al no es benéfica para la planta, dado que el Ca foliar se correlacionó significativa y positivamente con las variables de crecimiento, lo cual, considerando al café como una planta acidófila, no estaría de acuerdo con las mencionadas afirmaciones de Guerrier y Morard.

De acuerdo con los datos de Ca foliar obtenidos en este trabajo, tanto el nivel bajo como el alto de Al disminuyeron significativamente el Ca foliar. Se presentó una interacción $P \times Al$ significativa, la cual fue independiente del sistema de aplicación P-Al. En el S.S. dicha interacción se puede explicar por la precipitación del Al al adicionar P, pudiendo las plántulas absorber más Ca. Esto coin-

cide con las observaciones de Foy y Brown (13) aplicando P y Al a la misma solución. En el S.A. el efecto de dicha interacción P x Al sobre el Ca foliar querría decir que a pesar de que no se observó reacción P-Al en las raíces, ni en el medio de crecimiento, en alguna parte de la planta, esta interacción ocurre afectando el Ca foliar en el mismo sentido que se observó en el S.S., ésto es, a medida que hubo más P, el Al disminuyó su efecto sobre el Ca foliar. Esto podría relacionarse con la reciente teoría de Guerrier y Morard (19) en cuanto que la absorción pasiva del Ca es mayor al aumentar la concentración de ácidos fosfolípidos en las raíces.

El Ca y el Mn foliares se correlacionaron positivamente y de manera altamente significativa. Este es conocido "efecto de Viets" por el cual, las concentraciones absorbidas de un ión aumentan en la medida que la planta absorbe otro ión. Este efecto también se ha observado en arroz (38).

Respecto al Mn, también fue significativamente disminuído por los niveles de Al ensayados. Un efecto similar del Al es reportado en otros cultivos (13, 15, 29, 52), aunque en otras plantas, como en arroz (38) dicho efecto no ocurre.

La disminución del Mn foliar por efecto del Al es un indicio de que en café, estos dos iones compiten por los sitios de absorción en las raíces. Se reporta que en Atriplex (52), planta acidófila, en la cual también ocurre dicho antagonis-

mo, el Al previno la toxicidad de Mn. Este efecto no se produjo en plantas basófilas. Se sugiere que las plantas acidófilas tienen inmunidad fisiológica a niveles altos de Al y Mn cuando estos dos elementos se presentan juntos (52). Este es un aspecto que merece ser investigado en café.

En el S.A., los datos de las medidas de crecimiento mostraron que la interacción P x Al aplicados no alcanzó significancia, sin embargo, se observó una tendencia persistente en las cuatro variables de crecimiento evaluadas a que en el S.A., el Al inhibió el crecimiento en mayor proporción cuando se aplicó con el nivel medio de P que cuando se aplicó con el nivel bajo ó alto. No se encontró explicación a este hecho desde el punto de vista interacción P x Al. Se encontró una posible explicación en función del Mn foliar. Como ya se ha anotado, el Mn en las hojas se correlacionó de manera positiva y altamente significativa con las variables de crecimiento. Aunque en el análisis de varianza para el Mn foliar, la interacción P x Al aplicados no alcanzó significancia, debe considerarse (Anexo 5) que mientras con el nivel bajo y alto de P, el nivel alto de Al disminuyó el Mn en 9 ppm, con el nivel medio de P, esta disminución fue de 18 ppm. Asimismo, para el nivel bajo de Al: mientras que con los niveles bajo y alto de P la disminución fue de 5 ppm, con el nivel medio de P fue de 10 ppm. La razón por la cual en el S.A., el Al con el nivel medio de P, disminuyó el Mn foliar en una cantidad el doble de lo que disminuyó con el nivel bajo ó alto de P no es comprendida.

5.2.4.2. K, Mg, Fe, Zn y Na.

A excepción del Zn, se presentó una tendencia a aumentar la concentración foliar de estos elementos por efecto del Al y fueron elementos negativamente correlacionados con el crecimiento.

En cuanto al K, en el S.S , el nivel alto de Al aumentó significativamente el K foliar, cuando se aplicó con el nivel bajo de P. Aumentando el P aplicado, el efecto del Al fue contrarrestado, lo cual se explica por la disminución del Al soluble.

En el S.A., el efecto del nivel alto de Al alcanzó significancia cuando se aplicó con el nivel alto de P. El hecho de que el Al (tanto el nivel bajo como el alto) aumentó más el K foliar con el nivel alto de P, puede relacionarse con el hecho de que el P (como NaH_2PO_4) aumentó también significativamente el K foliar. Como ya se ha mencionado, no queda claro si dicho efecto se debe al P ó al Na, aunque se presume sea más efecto del Na.

Un efecto similar del Al sobre el contenido de K foliar, es reportado en haba (19), caso en el cual, la concentración de K en las hojas más viejas aparece aumentada por efecto del Al. También se reporta que en algunas variedades de papa (29), el Al, en cierto rango de concentración, estimu-

la la toma de K. En pimienta negra, la toxicidad del Al se asocia con una toma aumentada de K (10). Sin embargo, estos resultados son contrarios a los observados con otras plantas. En algodón, el Al reduce la concentración de K foliar (13); lo mismo en arroz (15), en lechuga (20) y en té (59).

Respecto al Mg, se tiene que, a excepción del tratamiento en el que se aplicó el nivel alto de Al con el nivel bajo de P en el S.S., en ninguno de los tratamientos el Mg fue afectado por el Al. En dicho tratamiento, el cual fue el único en el que las plántulas fueron severamente afectadas en su crecimiento, el contenido de Mg apareció significativamente aumentado por efecto del Al. Este efecto no coincide con ninguna referencia, en las cuales siempre se reporta que el Al disminuye el contenido de Mg en la parte aérea (10, 15, 20, 29). El efecto observado en este ensayo puede deberse a una reducción grande en el tamaño de las plántulas, lo que en muchos casos conlleva a concentraciones aumentadas de algunos elementos. Es el caso que reportan Randall y Vosé (51) en el que 50 ppm de Al aumentaron la concentración de P en las hojas. Este efecto aparentemente fue confuso, pero cuando se analizó P total en la planta, esta concentración se encontró significativamente disminuída. Por tanto, el aumento en la concentración de P foliar fue debido a un menor crecimiento. Este pudo ser el caso del Mg en este experimento. En ausencia de datos sobre el contenido total de Mg en la planta, estos datos no se consideran muy confiables del efecto del Al sobre el Mg en la planta.

A excepción del tratamiento mencionado, en ningún otro caso hubo aumento en la concentración de Mg, sin embargo, este elemento se correlacionó negativamente y de manera altamente significativa con las variables de crecimiento evaluadas. El nivel de Mg adicionado a las soluciones fue de 4 meq/l. La solución original de "Long Ashton" recomienda 3 meq/l. En este trabajo se decidió aumentar esta concentración siguiendo las sugerencias de Aduayi (2) quien recomienda aumentar el Mg de 3 a 6 meq/l en café.

No queda claro si el alto contenido de Mg en las plántulas y su consecuente efecto negativo sobre el crecimiento, se debe a que se aplicó un nivel muy alto de este elemento a las soluciones ó a un efecto indirecto del Na a través del K. Se habla de efecto indirecto porque la correlación entre Na y Mg foliares no fue significativa, sin embargo, entre Na y K la correlación fue significativa y positiva. En la medida que las plantas tuvieron más K en las hojas, aumentó también su concentración foliar de Mg, como lo mostró un coeficiente de correlación positivo y altamente significativo entre estos dos elementos (Anexo 6).

El Fe foliar fue aumentado significativamente por efecto del Al, por lo cual podría eliminarse la posibilidad de que en café, el Al induzca deficiencia de Fe, como se reporta en cereales (15).

El Zn foliar no fue afectado por el Al.

El nivel alto de Al aumentó de manera altamente significativa la concentración de Na foliar, independientemente del P aplicado y del sistema de aplicación P-Al. Dicho efecto es contrario al que se reporta en algodón (13), caso en el cual el Al disminuye la toma de Na.

5.2.5. Efectos del Al en relación a la concentración soluble y tiempo de exposición a las soluciones con Al.

Cuando se aplicó el nivel alto de Al con el nivel bajo de P (tratamiento P₁Al₂), el Al produjo mayor efecto inhibitorio en las plántulas del S.S. que en las plántulas del S.A. por el contrario, cuando se aplicó el mismo nivel de Al con el nivel medio ó con el nivel alto de P (tratamientos P₂Al₂ y P₃Al₂ respectivamente), el efecto inhibitorio del Al fue mayor en las plántulas del S.A. Aunque dichas diferencias en el efecto del Al en los dos sistemas no alcanzaron significancia estadística con ninguno de los parámetros de crecimiento evaluados, las diferencias cualitativas en el crecimiento, especialmente de las raíces, fueron evidentes. Estas diferencias en la magnitud del daño por Al en los dos sistemas, se asociaron con la concentración de Al soluble y el tiempo de exposición a las soluciones con Al.

Así, en el tratamiento P_1Al_2 -simultáneo, en el cual se produjeron los más severos daños, las plántulas estuvieron expuestas durante cuatro meses a un nivel promedio de 31 ppm de Al soluble. En este mismo tratamiento en el S.A. (P_1Al_2 -alterno) el nivel promedio de Al fue de 36 ppm, pero el tiempo de exposición a dicha solución con Al fue la mitad del S.S., razón por la cual el daño por Al, no alcanzó la severidad del S.S.

Contrariamente en los tratamientos P_2Al_2 y P_3Al_2 , a pesar de que las plántulas del S.A. estuvieron expuestas la mitad del tiempo a las soluciones con Al, los niveles solubles de este elemento (promedio cercano a 36 ppm) fueron mucho mayores a aquellos que se presentaron en el S.S. (12,85 y 7,13 ppm para los niveles medio y alto de P respectivamente), razón por la cual con dichos niveles de P, el daño por Al fue mayor en el S.A.

Teniendo en cuenta que niveles de Al de 12,85 y 7,13 ppm (obtenidos en las soluciones P_2Al_2 y P_3Al_2 , del S.S.) no produjeron efectos significativos sobre el crecimiento y desarrollo de las plántulas, mientras que con 31 ppm de Al (solución P_1Al_2 del S.S.) se presentaron efectos drásticos, se puede concluir que en soluciones nutritivas, las plántulas de café muestran una tolerancia a Al mayor a la observada en plántulas de cacao, las cuales a partir de 16 ppm de Al soluble empiezan a reducir su crecimiento (58).

Manetti y Santos (40), aplicando 12 ppm de Al a solución nutritiva (no reportan el nivel de P) en forma simultánea con el P, no observaron ningún efecto en varias variedades de C. arabica (no incluyeron caturra) de seis meses de edad que permanecieron en las soluciones durante 4 meses. Estos resultados guardan relación con la respuesta observada en este trabajo.

Respecto a la respuesta a 6 ppm de Al aplicado, en el presente ensayo en ninguno de los dos sistemas se observó efecto significativo sobre el crecimiento. En el S.S., dicho nivel de Al aplicado correspondió a 4,17, 2,6 y 2,24 ppm de Al soluble (niveles correspondientes a los niveles bajo, medio y alto de P respectivamente) en promedio en los primeros cuatro meses de permanencia en las soluciones. Varios trabajos (29, 40, 64) reportan un efecto estimulante de bajos niveles de Al sobre el crecimiento de algunas plantas. También se reporta una toma aumentada de ciertos elementos, especialmente micronutrientes, cuando el Al se encuentra en el medio en concentraciones bajas (64). Este efecto no fue observado en este ensayo. Esto querría decir que el posible efecto estimulante del Al sobre las plántulas de café, debe buscarse en niveles menores a 2,2 ppm de Al soluble, nivel mínimo que se presentó en este trabajo, aunque no se descarta la posibilidad de que este efecto se manifieste en edades más avanzadas.

En el ensayo de Manetti y Santos (40) en café, se reporta que cuando se

aplicó a las soluciones 6 ppm de Al, todas las variedades de café ensayadas tuvieron mayor desarrollo del sistema radical. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que los controles fueron afectados por un factor no identificado (posiblemente por el HCl en los ajustes de pH). Por tanto, de la experiencia de estos autores no puede concluirse que 6 ppm de Al estimulen el crecimiento.

Valencia et al. (63) describen un experimento en el que la adición de sulfato de amonio a un suelo ácido, arcilloso y con alto contenido de materia orgánica produjo en un término de tres años un aumento del Al intercambiable de 5,2 a 13,2 meq. Después de dos años de aplicación de los tratamientos, se sembraron plántulas de caturra. Cuando las plantas tuvieron un año de edad, el contenido de Al foliar fue de 125 ppm, nivel que según los autores, no representaría problemas de toxicidad ya que es inferior a 397 ppm, nivel reportado por Catani, citado por Valencia et al. (63), para café sin problemas de toxicidad de este elemento. De acuerdo con lo anterior, 13,2 meq de Al en el suelo, no produjeron ningún efecto nocivo a las plántulas de café.

En el sistema suelo existen varios factores que pueden controlar la toxicidad de Al, entre ellos, el contenido de materia orgánica y la concentración de los iones presentes en la solución edáfica, son de especial importancia. La influencia de estos factores fue tratada en la revisión de literatura. Se debe pues, tener en cuenta que de acuerdo a las evidencias obtenidas en varios

trabajos (1, 5, 11, 54), el Al intercambiable no es un indicador adecuado de la concentración efectiva del Al en la solución del suelo y por tanto de la toxicidad de Al. Por el contrario, se han encontrado relaciones claras entre la toxicidad de Al y la actividad molar de este elemento en la solución edáfica. Dicha actividad se calcula multiplicando la concentración determinada analíticamente en la solución del suelo (c) por un factor de corrección: el coeficiente de actividad iónica (f), así, $a = f.c.$ (12).

El coeficiente de actividad iónica disminuye al concentrarse la solución. Se calcula este coeficiente por medio de la ecuación de Debye-Huckel, la cual considera entre otros factores, la semisuma de las concentraciones de todos los iones presentes en la solución del suelo en una concentración mayor de 10^{-5} M/l (12).

Hasta el presente no se han hecho análisis del Al en la solución de suelos ca feteros, por lo tanto no es posible determinar la actividad molar de dicho ele mento en la solución en tales suelos. En el presente ensayo, se produjo tox icidad de Al en las plántulas que crecieron durante cuatro meses en una solu ción nutritiva cuyo nivel promedio de Al soluble fue de 31,22 ppm. La acti vidad molar de dicho ión tuvo un valor promedio de $0,20 \times 10^{-3}$ M/l. En algodón, se ha establecido como nivel crítico $0,15 \times 10^{-5}$ M/l (1) y en sorgo $0,11 \times 10^{-3}$ M/l (5). En términos de actividad molar es posible es-

establecer un valor crítico de Al común a soluciones desplazadas de diferentes suelos y a soluciones nutritivas (1).

El comportamiento del Al en los diferentes suelos cafeteros colombianos es una cuestión que requiere investigación, así como la determinación de niveles críticos en términos de actividad molar.

5.2.6. Efectos morfológicos del Al en las raíces y localización del fosfato de Al. Observaciones al microscópio.

El Al inhibió el crecimiento tanto de la raíz primaria como de las laterales como se vió en la sección 4.2.3. Las observaciones al microscópio se relacionaron con las mediciones de los parámetros de crecimiento en cuanto que el daño producido por el Al en la morfología de las raíces dependió de la cantidad de Al soluble y del tiempo de exposición a las soluciones con Al. Los efectos más drásticos sobre las raíces se presentaron en el tratamiento P1Al2-simultáneo, lo cual se reflejó en una notoria inhibición del crecimiento y desarrollo de la parte aérea.

Los efectos a nivel microscópico descritos en la sección 4.4 coinciden con los reportados en varias plantas (8, 15, 26, 27), en cuanto a la inhibición de

la división celular asociada con la ocurrencia de macrocélulas en la corteza y una gran variabilidad en el tamaño de las células en esta zona, además, ausencia de la cápsula radical y tendencia de la raíz primaria a curvarse. Se reporta en algodón (15) severos daños como los observados en este trabajo, relacionados con rompimiento y desintegración de células especialmente en el periciclo.

En remolacha, Keser et al. (26), observaron mayor acumulación de fosfato de aluminio en la región meristemática y cortical. En el presente trabajo, se observó que cuando hubo Al y P en la misma solución (S.S.), la localización del fosfato de aluminio se limitó a la coña y región cortical, solamente cuando la epidermis no tuvo rupturas. En los casos en los que hubo severos daños como rompimiento de la coña y de la epidermis, se observó fosfato de aluminio sobre la superficie de la endodermis y dentro de ésta. No se comprende el mecanismo por el cual cuando la epidermis está intacta no se encuentra fosfato de aluminio más allá de la corteza. Esto mismo se reporta en remolacha (27), cuyas raíces acumulan tal compuesto sobre la endodermis e incluso en la estela.

Respecto a lo anterior, Rasmussen, citado por Foy (15), hace referencia al hecho de que el fosfato de aluminio no se encuentra más allá de las capas epidermales a menos que éstas hayan sido rotas por el mismo efecto del Al ó

por la ruptura física que se produce cuando emergen las raíces laterales.

La posible causa por la cual en el S.A., las plántulas no acumularon fosfato de aluminio en sus raíces ha sido ya discutida en la sección 5.2.3.

Las observaciones histoquímicas de este trabajo indican que las plántulas de café acumulan fosfato de Al en las raíces cuando crecen en un medio en el cual estos dos iones están presentes. La influencia de esta interacción sobre la absorción o toma del P ó sobre ambas funciones, es un aspecto que no puede ser determinado con la metodología usada. Sería necesario el uso de P marcado. Según algunos autores (34, 67), dicha interacción puede efectivamente reducir la cantidad de P disponible para el transporte a las partes aéreas y la entrada a los "pools" metabólicos de la raíz. Según los trabajos de Clarkson (7) y Sampson et al. (57), algún Al entra a las células de las raíces y produce disturbios en la síntesis de DNA y otros procesos metabólicos. Independientemente de la interpretación del mecanismo por el cual el Al causa desórdenes en el crecimiento de las raíces de café, en este trabajo su efecto fue evidente.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En las soluciones del sistema simultáneo (S.S.) que contuvieron P y Al, hubo formación evidente de fosfato de Aluminio. Menores cantidades de estos dos iones pudieron ser mantenidos en solución a medida que las plántulas tuvieron más edad, a pesar del permanente control de pH. Esto se debe al aumento en las variaciones del pH al aumentar la edad de las plántulas.

Las concentraciones de PO_4^{\equiv} y Al^{+3} precipitadas dependieron de las concentraciones aplicadas. Para cada nivel de P, aumentando el Al aplicado, aumentó la concentración de PO_4^{\equiv} y el Al^{+3} precipitados. Este incremento fue mayor al aumentar el P aplicado. La reacción entre estos dos iones ocurrió en una proporción 1:1 (en me/l).

De esta manera, la solución del S.S. que tuvo en promedio los mayores niveles de Al (31,22 ppm) y los menores de P (4,1 ppm) solubles fue aquella en la que los me/l de Al^{+3} (4,2) excedieron a los me/l de PO_4^{\equiv} (0,34) aplicados. La actividad molar del Al^{+3} en esta solución tuvo un valor promedio de $0,20 \times 10^{-3}$ M/l.

Bajo las anteriores circunstancias, se produjo una definida toxicidad de Al ca

racterizada por un crecimiento pobre de la parte aérea y un patrón anormal de crecimiento de las raíces. Se asoció dicha toxicidad con concentraciones foliares de P, Ca y Mn significativamente disminuídas.

Los efectos deletéreos del mencionado nivel de Al soluble fueron contrarrestados aumentando el P aplicado a 39,6 ppm (3,8 me/l) ó a 71,5 ppm (6,8 me/l). Este efecto es explicado por la acción precipitante del P sobre el Al en cuyo caso el Al soluble se redujo a 12,85 y 7,13 ppm respectivamente. Bajo estas condiciones, las plántulas tuvieron menores contenidos de Al foliar y mayores de P con diferencias significativas respecto a las plántulas en las que se produjo toxicidad.

En el sistema alterno (S.A.) en el cual se controló la formación de fosfato de aluminio en el medio de crecimiento mediante la aplicación alterna del P y del Al, no se observó efecto de la interacción P x Al, ésto es, el P no contrarrestó el efecto negativo del Al. Se concluye que el P controla la toxicidad de Al solamente cuando la adición de este produce precipitación del Al en el medio de crecimiento.

Las diferencias en el efecto del nivel alto de Al en los dos sistemas de aplicación P-Al, no alcanzaron significancia estadística para ninguno de los parámetros de crecimiento evaluados. Sin embargo, se observaron diferencias cua

litativas en el crecimiento, especialmente de las raíces. Cuando se aplicó el nivel alto de Al con el nivel bajo de P, se observaron mayores efectos nocivos en las plántulas del S.S. Por el contrario, con el nivel medio ó alto de P, los efectos fueron mayores en el S.A. Estas diferencias se explican por las cantidades de Al que quedaron en solución en cada caso y por el tiempo de exposición a las soluciones con Al.

Por efecto del crecimiento de las plántulas en las soluciones, el pH de estas tendió a aumentar rápidamente. Este aumento fue mayor al aumentar la edad de las plántulas. De otra parte, fue menor si la solución tuvo Al. De esta manera, a partir de los cuatro meses de edad, las plántulas control (sin Al) fueron afectadas en su crecimiento por las mayores adiciones de HCl que fue necesario hacer para tratar de mantener el pH a 3,5.

Con base en lo anterior, se establece la necesidad de tamponizar el pH en futuros trabajos con Al en solución nutritiva en los que se quieran evaluar efectos en edades mayores a los 4 meses. Para ésto, es conveniente estudiar diferentes métodos de tamponizar las soluciones y su relación con la toxicidad de Al pues se tienen referencias que indican que usando sustancias del tipo Amberlita IRC-50, no es posible producir toxicidad.

El nivel bajo de Al ensayado en este trabajo (6 ppm de Al aplicado) no pro

dujo ningún efecto sobre el crecimiento de las plántulas. El posible efecto estimulante de bajos niveles de Al sobre el crecimiento de algunas plantas reportado en varios trabajos, debería buscarse en el caso de café, en niveles menores a 2,2 ppm de Al soluble, nivel mínimo que se presentó en este ensayo. No se descarta, sin embargo, la posibilidad de que dicho efecto pudiera manifestarse en una edad más avanzada a la evaluada en el presente trabajo.

Con la metodología utilizada en este trabajo, se considera que de las variables de crecimiento usadas para medir el efecto de tratamientos, la longitud del tallo fue la más adecuada porque detectó pequeñas diferencias entre tratamientos y además presentó bajo coeficiente de variación. Por el contrario, el peso seco de las raíces fue el parámetro en el que se observaron las mayores variaciones entre repeticiones lo cual se reflejó en un cuadrado medio del error alto. Entre las causas de esta variación se pueden considerar : tipo de recipiente utilizado, número de plántulas por recipiente y el manejo de las soluciones. En el caso de quererse medir efectos en el peso de las raíces, se recomienda entonces, utilizar recipientes de boca ancha y no disponer de más de una planta por recipiente en caso de que una unidad experimental sea una planta.

En el S.S., el contenido de P foliar fue afectado por el Al aplicado. Además de la formación de fosfato de aluminio que se observó en estas soluciones,

hubo formación de este compuesto en raíces. Controlando la precipitación de fosfato de aluminio en el medio de crecimiento mediante la aplicación alterna de estos iones, no ocurrió formación de precipitados en las raíces y de otra parte, el contenido de P foliar no fue afectado por el Al aplicado. De esto se concluye que la reacción entre el P y el Al que ocurre en las soluciones y en las raíces tiene efecto en la reducción del contenido de P foliar. Que tanto influye la reacción que ocurre en las raíces, es un aspecto que no pudo ser determinado con la metodología usada.

La no ocurrencia de fosfato de aluminio en las raíces de las plántulas del S.A., indica que el Al en raíces de café no permanece adsorbido por largo tiempo sobre el complejo de intercambio de la superficie de la raíz, como si permanece en raíces de plantas más sensibles a Al, sino que tiende a entrar al sistema vascular para ser translocado a las partes aéreas como lo mostró un coeficiente de correlación positivo y altamente significativo entre Al aplicado y Al foliar.

Aparentemente, el mínimo nivel de P soluble que se presentó (4,1 ppm) fue suficiente para abastecer los requerimientos de P de las plántulas. No se reporta por tanto en este ensayo niveles deficientes de P en las plántulas que presentaron toxicidad de Al. No debe descartarse sin embargo la posibilidad de que para plántulas de mayor edad, dicho nivel de P soluble no fuese sufi-

ciente en cuyo caso, además de los efectos del Al podría presentarse deficiencia de P.

Observaciones al microscopio de cortes de raíces mostraron alteraciones morfológicas por efecto del Al. Dichas alteraciones se hicieron más severas al aumentar el Al soluble y el tiempo de exposición a las soluciones con Al.

Mayores coeficientes de correlación se observaron entre el Al aplicado y las variables de crecimiento que entre el Al foliar y las mismas variables. De otra parte, el análisis de regresión mostró que mayor porcentaje de la variación en el peso seco de la parte aérea pudo ser explicado en función del Al aplicado que del Al foliar. Las anteriores evidencias indican que la toxicidad de Al en café, es un fenómeno relacionado más con efectos del Al sobre la raíz (alteraciones en la morfología y absorción de nutrientes) que con efectos del Al dentro de la planta. O sea que en la parte aérea, el efecto es indirecto a través del daño en la raíz.

Tanto el nivel bajo como el nivel alto de Al disminuyeron significativamente el contenido de Ca foliar. En los dos sistemas de aplicación P-Al este efecto dependió del P.

El Mn foliar también fue significativamente disminuído por los niveles de Al

ensayados. Este efecto fue independiente del P y del sistema de aplicación P-Al. La disminución del Mn foliar es un indicio de que en café el Al y el Mn compiten por los sitios de absorción en las raíces como ocurre en ciertas plantas. Reporta la literatura que en *Atriplex* una planta en la que también ocurre dicho antagonismo, el Al previene la toxicidad de Mn y que existe inmunidad fisiológica en esta planta a niveles altos de Mn y Al solamente cuando estos iones se presentan al tiempo en solución. Este es un aspecto que debe ser investigado en café.

En cuanto al K, en el S.S., el mayor nivel de Al aplicado aumentó significativamente la concentración foliar de este elemento. Este efecto fue contrarrestado adicionando P al medio. En el S.A., el mayor nivel de Al solamente produjo aumento significativo del K foliar cuando se aplicó con el mayor nivel de P. Esto puede estar relacionado con el hecho de que en este sistema, además del Al, el P aplicado también aumentó el K foliar siendo mayor este aumento a medida que aumentó el Al aplicado.

El Zn foliar no fue afectado por el Al. El Fe foliar fue aumentado de manera altamente significativa por el nivel alto de Al respecto al nivel bajo. Respecto al control, el aumento fue significativo. Dicho efecto del Al sobre el Fe fue independiente del nivel de P y del sistema de aplicación Al-P. De acuerdo a lo observado, queda claro que en café, no existe la posibilidad de

que el Al induzca deficiencia de Fe, como se reporta en cereales.

En ninguno de los tratamientos se observó efecto del Al sobre el Mg foliar excepto en el tratamiento en el que el Al produjo efectos severos sobre el crecimiento. En este caso, el Mg foliar apareció significativamente aumentado por efecto del Al. En ausencia de datos del contenido de Mg total en la planta, no es posible determinar si realmente el Al aumenta el contenido de Mg en la planta ó si dicho efecto es el resultado de una reducción en el crecimiento lo que conlleva en muchos casos a concentraciones aumentadas de algunos elementos en la planta. Se sugiere pues para futuros trabajos sobre nutrición, incluir análisis de elementos no solo en la parte aérea sino también en raíces. Con estos datos, se puede además, hacer inferencias sobre el transporte y absorción de nutrientes.

En general se concluye que aquellos elementos cuya concentración foliar apareció disminuida por efecto del Al (P, Ca y Mn) se correlacionaron en forma positiva y significativa con el crecimiento. Por el contrario, los elementos que fueron aumentados en su concentración foliar por el Al (Al, Fe, K y Mg) se correlacionaron en forma negativa y significativa con el crecimiento.

Entre los efectos más notorios del P aplicado se observaron : disminución del Fe y aumento del K en las hojas. Los efectos del P sobre la composición quí-

mica y crecimiento de las plántulas observados en este ensayo no se consideran confiables debido a que los efectos colaterales del Na que se presentaron por la adición de P como NaH_2PO_4 , pudieron enmascarar el efecto del P. Entre los efectos del Na se destaca la aparición de punturaciones necróticas en las hojas más viejas. De otra parte, tanto el Na como el P foliares se correlacionaron de manera positiva y significativa con el K foliar el cual a su vez se correlacionó de manera negativa y altamente significativa con todas las variables de crecimiento. No queda claro si los niveles altos de K foliar se deben al Na ó al P aunque se presume sea más un efecto del Na. Se recomienda pues, para futuros trabajos en solución nutritiva a la que se apliquen concentraciones de P mayores a 10 ppm utilizar otra fuente de P. Es necesario estudiar en café, el efecto de diferentes fuentes entre ellas K_2HPO_4 y K_2SO_4 .

No queda claro si 4 me/l de Mg aplicado a las soluciones es un nivel muy alto para el crecimiento de las plántulas ó si los niveles altos de Mg foliar y su efecto negativo sobre el crecimiento son debidos a un efecto indirecto del Na a través del K, ya que el Na foliar se correlacionó positiva y significativamente con el K foliar, el cual a su vez se correlacionó positivamente y de manera altamente significativa con el Mg foliar.

Es conveniente iniciar estudios tendientes a buscar entre las variedades comerciales de C. arabica, fuentes de tolerancia a condiciones de acidez tales co-

mo exceso de Al.

Es necesario iniciar análisis en los suelos de la zona cafetera colombiana con presuntos problemas de acidez tendientes a determinar la concentración de Al en la solución del suelo y a establecer niveles críticos para el café y cultivos de diversificación. Varios estudios muestran que el pH del suelo, el Al intercambiable y el grado de saturación de Al no son indicadores en ciertos suelos de la concentración efectiva del Al en la solución del suelo y por tanto de la toxicidad de Al. No se puede aplicar a todos los suelos una concentración única crítica de Al intercambiable. Por el contrario, se han encontrado relaciones claras entre la toxicidad de Al y la concentración efectiva del Al en la solución del suelo, expresada en términos de actividad molar. Con esta medida es posible establecer niveles críticos de Al aplicables a soluciones nutritivas y a las soluciones de diferentes tipos de suelos. El Al en la solución del suelo también cobra especial importancia en programas de encalamiento ya que se han encontrado casos en los que no hay relación entre el Al intercambiable y la respuesta a encalamiento. La medida más consistente en términos de respuesta a encalamiento ha sido el Al en la solución del suelo.

7. RESUMEN

Se estudió el efecto de tres niveles de Al (0, 6, 36 ppm) aplicados a soluciones nutritivas en forma simultánea y en forma alterna con tres niveles de P (10, 41, 71 ppm) sobre el crecimiento, desarrollo y composición química de plántulas de café de la variedad caturra. Las variables medidas fueron : número de hojas, longitud del tallo y peso seco de la parte aérea y de la raíz.

En las hojas se determinaron las concentraciones de P, Al, Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn y Zn.

El pH de las soluciones se ajustó cada dos días a 3,5. En las soluciones control, para mantener el pH, se requirieron ajustes mayores que los necesarios en las soluciones que contenían Al. Estas mayores adiciones de HCl afectaron a las plántulas control después de los cuatro meses de edad. Se realizaron muestras a los 2, 4 y 5 meses de edad pero el efecto de tratamiento fue evaluado con base en los datos obtenidos a los cuatro meses de edad.

En las soluciones del sistema simultáneo (S.S.), en el cual se suministró el P y el Al en la misma solución, el PO_4^{\equiv} y Al^{+3} reaccionaron en proporción 1:1 (en me/l) obteniéndose evidencias de que la composición del precipitado formado fue : $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$. De esta manera, el P contrarrestó la toxicidad de Al cuando los meq de PO_4^{\equiv} excedieron ó fueron iguales a los meq de Al^{+3}

aplicados. En la solución en que se produjo toxicidad de Al, los meq de PO_4^{\equiv} fueron menores a los meq de Al aplicados, caso en el cual los niveles promedio mantenidos en solución fueron : 31 ppm de Al y 4 ppm de P. En términos de actividad molar del Al se calculó un valor de $0,20 \times 10^{-3} \text{ M/l}$.

En el sistema alterno (S.A.) se suministró el P por tres días en una solución libre de Al y luego el Al durante los siguientes tres días en una solución libre de P, previniéndose así la formación de fosfato de Al. Bajo estas condiciones el P no contrarrestó el efecto negativo del Al. Se concluyó que el P controla la toxicidad de Al solamente cuando la adición de aquel produce precipitación del Al en el medio de crecimiento. El P dentro de la planta no controla dicha toxicidad.

El nivel bajo de Al (6 ppm) no produjo ningún efecto significativo sobre el crecimiento y desarrollo de las plántulas.

La longitud del tallo fue la variable que midió mejor el efecto del Al.

Los síntomas de la toxicidad de Al fueron crecimiento limitado de la parte aérea y ocurrencia de raíces gruesas, cortas y carentes de raicillas. A nivel microscópico se observaron los daños en los tejidos radicales, entre los cuales los más notorios fueron : alteraciones en la morfología e indicios de alteración

ó inhibición de la división celular. En las raíces de las plántulas que crecieron en las soluciones del S.S. se observó que mientras la epidermis estuviera intacta, el fosfato de Al no se encontraba más allá de las 2 ó 3 capas externas de la corteza.

En cuanto a los elementos foliares se anota en forma general que aquellos elementos cuya concentración foliar apareció disminuída por efecto del Al (P, Ca y Mn) se correlacionaron en forma positiva y significativa con el crecimiento. Por el contrario, los elementos que aparecieron aumentados en su concentración foliar por el Al (Al, Fe, K y Mg) se correlacionaron en forma negativa y significativa con el crecimiento. El Zn no fue afectado por el Al.

En algunos de los casos el efecto del Al sobre los elementos foliares dependió del P aplicado y del sistema de aplicación P-Al. Se destaca el caso de P foliar cuya concentración en el S.S. fue disminuída por efecto del Al. Dicho efecto fue contrarrestado aplicando P al medio. En otros casos como por ejemplo con el Mn, el efecto del Al fue independiente del P y del sistema.

Los efectos del P observados en este ensayo no se consideran confiables debido a los efectos colaterales del Na que se presentaron por la adición de P como NaH_2PO_4 .

El conjunto de resultados obtenidos en este ensayo indican que el Al es un elemento potencialmente nocivo para el café. Este problema debe ser investigado en suelos ácidos especialmente aquellos tratados en forma reiterada ó en alta dosis con fertilizantes de reacción ácida en el suelo.

8. SUMMARY

The effect of three levels of Al (0, 6, 36 ppm) applied to nutritive solutions in simultaneous form and in alternate form with three levels of P (10, 41, 71 ppm) on the growth, development and chemical composition of caturra coffee seedlings was studied. The measured variables were : number of leaves, length of stem and dry weight of the tops and roots. Concentrations of P, Al, Ca, Mg, K, Na, Fe, Mn y Zn were determined in the leaves.

The pH of the solutions was adjusted every other day to 3,5. Larger adjustments were required to keep the pH in the control solutions than the ones required in the Al containing solutions. These major additions of HCl affected the control seedlings after four months of age. Samples were taken at 2, 4 and 5 months of age, but the effect of treatments was evaluated in base of the results obtained when the seedlings were four months of age.

In the solutions of the simultaneous system (S.S.) in which the P and Al were provided in the same solution, the PO_4^{\equiv} and Al^{+3} reacted in 1:1 proportion (in me/l) obtaining evidences that the composition of the formed precipitated was $\text{Al}(\text{OH})_2\text{H}_2\text{PO}_4$. In this way, the P counteracted the Al toxicity when the meq of PO_4^{\equiv} exceeded or were equal to the meq of Al^{+3} applied. In the solution in which Al toxicity was produced, the meq of PO_4^{\equiv} were minor to the meq of

Al applied, case in which the average levels maintained in solution were 31 ppm of Al and 4 ppm of P. In terms of molar activity of Al a value of $0,20 \times 10^{-3}$ M/l was calculated.

In the alternate system (A. S.), the P was provided in a Al-free solution for three days and then the Al during the following three days in a P free-solution, therefore preventing the formation of aluminum phosphate. Under these conditions, the P did not counteract the negative effect of Al. It was concluded that the P controls Al toxicity only when the addition of P produces Al precipitation in the growth medium. The P within the plant does not control the Al toxicity.

The low level of Al (6 ppm) did not produce any significant effect in the growth and development of the seedlings.

The length of the stem was the most accurate variable to measure the effect of Al.

The symptoms of Al toxicity were limited growth of the tops; the roots were thick, short and without ramifications. The damages in the radical tissues at microscopic level were observed, between which the most notorious were: alterations in the morphology and indications of alteration or inhibition of the cellular division. In the roots of the seedlings that grew in the solutions of the simultaneous system were observed that while the epidermis was intact, the aluminum phosphate was

not found further than the two or three external layers of the cortex.

Regarding the foliar elements it is noted in general form that those elements whose foliar concentration appeared decreased by Al effect (P, Ca and Mn) were positive and significantly correlated with growth. On the contrary, the elements that appeared increased in its foliar concentration by Al (Al, Fe, K and Mg) were negative and significantly correlated with growth. Zn wasn't affected by Al.

In some of the cases the effect of Al in the foliar elements depended on the applied P and of the system of application of P-Al. It is noticeable the case of P foliar which concentration in the simultaneous system was decreased by Al effect. This effect was counteracted applying P to the medium. In other cases, for instance with the Mn, the Al effect was independent of the P and of the system.

The P effects observed in this experiment are not dependable due to the Na colateral effect that occurred by addition of P as NaH_2PO_4 .

The results indicate that Al is a potentially dangerous element for coffee. This problem should be investigated in acid soils especially in those treated in frequently or in high dosis with fertilizers of acid reaction in the soil.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. ADAMS, F. and LUND, Z. F. Effect of chemical activity of soil solution aluminum on cotton root penetration of acid subsoils. *Soil Science* 101(3): 193-198. 1966.
2. ADUAYI, E. A. Observations on the water culture techniques for studying the effects of copper concentrations on arabica coffee seedlings. *East African Agricultural and Forestry Journal*. 38(1):62-69. 1972.
3. ANDERSON, I. and EVANS, H. J. Effect of manganese and certain other metal cations on isocitric dehydrogenase and malic enzyme activities in Phaseolus vulgaris. *Plant Physiology* 31(1):22-28. 1956.
4. BARLETT, R. J. and RIEGO, D.C. Toxicity of hidroxy aluminum in relation to pH and phosphorus. *Soil Science* 114(3):194-200. 1972.
5. BRENES, E. and PEARSON, R. W. Root responses of three gramineae species to soil acidity in an oxisol and an ultisol. *Soil Science* 116(4):295-300. 1973.
6. CATE, R. B. and SUKHAL, A.P. A study of aluminum in rice soils. *Soil Science* 98(2):85-93. 1964.
7. CLARKSON D.T. Effect of aluminum on the uptake and metabolism of phosphorus by barley seedlings. *Plant Physiology* 41:165-172. 1966.
8. _____. The effect of aluminum and some other trivalent metal cations on cell division in the root apices of Allium cepa. *Annals of Botany* 29: 309-315. 1965.
9. CHIASSON, T. C. Effect of N, P, Ca, and Mg treatments on yield of barley varieties grown on acid soils. *Canadian Journal of Plant Science* 44(6):525-530. 1964.
10. DeWARD, P. W. F. and SUTTON, C. D. Toxicity of aluminum to black pepper (Piper nigrum L.) in Sarawak. *Nature* 188(4751):1129-1130. 1960.
11. EVANS, C. E. and KAMPRATH, E. J. Lime response as related to percent Al saturation, solution Al, and organic matter content. *Soil Science Society of America Proceedings* 34(6):893-896. 1970.

12. FASSBENDER, H. W. Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. Turrialba, Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, 1975. 398 p.
13. FOY, C. D. and BROWN, J. C. Toxic factors in acid soils: I. Characterization of aluminum toxicity in cotton. Soil Science Society of America Proceedings 27(4): 403-407. 1963.
14. _____. ARMIGER, W. H. ; BRIGGLE, L. W. and REID, D. A. Differential aluminum tolerance of wheat and barley varieties in acid soils. Agronomy Journal 57:413-417. 1965.
15. _____. Effect of aluminum on plant growth. In Carson, E. W., ed. The plant root and its environment. Charlottesville, University Press of Virginia, 1974. p. 601-642.
16. _____. GERLOFF, G. C. and GABELMAN, W. H. Differential effects of aluminum on the vegetative growth of tomato cultivars in acid soil and nutrient solution. Journal of the American Society for Horticultural Science 98:427-432. 1973.
17. FRANCO, H. F. y GOMEZ A., A. Método de análisis de aluminio de cambio en suelos andosólicos colombianos. Cenicafé (Colombia) 26(3):109-122. 1975.
18. GARCIA, A. y LEON, A. Respuesta de cinco híbridos de cacao (Theobroma cacao L.) a toxicidad causada por aluminio en solución nutritiva y en un oxisol de los Llanos Orientales. Revista ICA (Colombia)13(2):219-227. 1978.
19. GUERRIER, G. et MORARD, P. Influence de l'aluminum sur la nutrition minerale de la feverole (calcicole) et du lupin (calcifuge). Soil Science and Plant Nutrition 24(3):441-448. 1978.
20. HARWARD, M. E.; JACKSON, U. A.; LOTT, W. L. and MASON, D.D. Effects of Al, Fe and Mn upon the growth and composition of Lettuce. Society for Horticultural Science Proceedings of America 66:261-266. 1955.
21. HEWITT, E. J. Sand and water culture methods used in the study of plant nutrition. London, Commonwealth Agriculture Bureau, 1966. 547 p.
22. HIATT, A. J.; AMOS, D. F. and MASSEY, H. F. Effect of aluminum of copper sorption by wheat. Agronomy Journal 55 (3):284-287. 1963.

23. JENSEN, W. A. Botanical histochemistry. San Francisco, Freeman and Company, 1962. 408 p.
24. JOHNSON, R. E. and JACKSON, W. A. Calcium uptake and transport by wheat seedlings as affected by aluminum. Soil Science Society of America Proceedings 28(3): 381-386. 1964.
25. JONES, L. H. Aluminum uptake and toxicity in plants. Plant and Soil 13(4): 297-310. 1961.
26. KESER, M.; NEUBAUER, B. F. and HUTCHINSON, F. E. Influence of aluminum ions on developmental morphology of sugarbeet roots. Agronomy Journal 67:84-88. 1975.
27. _____ . VERILL, D. B. Differential aluminum tolerance of sugarbeet cultivars as evidenced by anatomical structure. Agronomy Journal 69(3): 347-351. 1977.
28. LANCE, J. C. and PEARSON, R. W. Effect of low concentrations of aluminum on growth and water and nutrient uptake by cotton roots. Soil Science Society of America Proceedings 33(1): 95-98. 1969.
29. LEE, C. R. Influence of Al on plant growth and mineral nutrition of potatoes. Agronomy Journal 63(3): 363-364. 1971.
30. LIGON, W. S. and PIERRE, W. H. Soluble aluminum studies; II. Minimum concentration of aluminum found to be toxic to corn, sorghum, and barley in culture solutions. Soil Science 34(4): 307-317. 1932.
31. LORA S, R. y RIVEROS, G. Problemas fisiológicos en suelos ácidos. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 3(1):24-42. 1971.
32. LOTERO, J. y MONSALVE, S.A. Efecto de fuentes y dosis de aplicación de nitrógeno en las propiedades químicas de un suelo. Revista ICA (Colombia) 5(3):199-220. 1970.
33. LOTT, W. L.; NERY, J. P. ; GALLO, J. R. and MED CALF, J. C. Leaf analysis technique in coffee research. New York. IBEC Research Institute. Boletín 9. 1956. 26 p.
34. McCORMICK, L. and BORDEN, Y. F. Phosphate fixation by aluminum in plant roots. Soil Science Society of America Proceedings 36: 799-802. 1972.

35. McLEAN, F. T. and GILBERT, B. E. The relative aluminum tolerance of crop plants. *Soil Science* 24(3):163-175. 1927.
36. _____ . Aluminum toxicity. *Plant Physiology* 3(3):293-301. 1928.
37. Mac LEOD, I. B. and JACKSON, L. P. Effect of concentration of Al ion on root development and establishment of legume seedlings. *Canadian Journal of Soil Science* 45(2):221-234. 1965.
38. MACHADO, S. M. e BRAGA, J. M. Interacao aluminio-fósforo em um solo ácido do sul do Bahia. *Revista Ceres (Brasil)* 24(132):200-211. 1977.
39. MAGISTAD, O. C. The aluminum content of the soil solution and its relation to soil reaction and plant growth. *Soil Science* 20: 181-225. 1925.
40. MANETTI, F. e SANTOS, D. Tolerancia ao aluminio com 4 cultivares de café (*Coffea arabica*) e um cultivar de cruzamento interespecifico de *Coffea arabica* com *C. canephora*. In *Congresso Brasileiro de Pesquisas Cafeeiras, 5o., Guarapari, 1977. Resumos. Rio de Janeiro, Instituto Brasileiro do Café, 1977. p. 21.*
41. MATAMALA, M. y GONZALEZ, T. P. Equilibrios iónicos. In _____ . *Química general*. Bogotá, Cultural Colombiana, 1970. p. 269-280.
42. MEDAPPA, K. C. and DANA, M. N. Influence of pH, calcium, iron and aluminum on the uptake of radiophosphorus by cranberry plants. *Soil Science Society America Proceedings* 32(3): 381-383. 1968.
43. MEREDITH, C. P. Response of cultured tomato cells to aluminum. *Plant Science Letters* 12:17-24. 1978.
44. MIRANDA, E. R. de e DIAS, A. C. Efeito da saturacao de aluminio no crescimento de plântulas de cacau. *Revista Theobroma (Brasil)* 1(3):33-41. 1971.
45. MUNNS, D. N. Soil acidity and the growth of a legume. II. Reactions of aluminum and phosphate in solution and effects of Al, phosphate, Ca and pH on *Medicago sativa* L. and *Trifolium subterraneum* L. in solution culture. *Australian Journal of Agricultural Research* 16:743-755. 1965.

46. OWEN, B. E.; SUAREZ, J. y SANCHEZ S, L. F. Efecto del aluminio en el desarrollo del algodón (*Gossypium hirsutum* L.) en el departamento del Meta. Revista ICA (Colombia) 13(2):229-237. 1978.
47. PEARSON, R. W. Problemas de acidez en el subsuelo. Suelos Ecuatoriales (Colombia) 3(1):294-306. 1971.
48. PERKIN, ELMER. Analytical methods for atomic absorption spectrophotometry. Connecticut, Perkin Elmer, 1971. 108 p.
49. PONTE, A. M. da. A adubacao foliar com fósforo e o fenómeno da morte prematura dos frutos nos cafézais dos planaltos de Angola. Gazeta Agrícola de Angola 1(5):18-20. 1960. (Tomado de : Fisiología del café; Resúmenes (5):51. 1977).
50. RAGLAND, J. L. and COLEMAN, N. T. Influence of aluminum on phosphorus uptake by snapbean roots. Soil Science Society America Proceedings 26(1):88-90. 1962.
51. RANDALL, P. J. and VOSE, P. B. Effect of aluminum on the uptake and translocation of phosphorus by perennial ryegrass. Plant physiology 38(4):403-409. 1963.
52. REES, W. J. and SIDRAK, G. H. Inter-relationship of aluminum and manganese toxicities towards plants. Plant and Soil 14(2):101-117. 1961.
53. REID, D. A. ; FLEMING, A. L. and FOY, C. D. A method for determining Al response of barley in nutrient solution in comparison to response in Al toxic soil. Agronomy Journal 63(4):600-603. 1971.
54. RICHBURG, J. S. and ADAMS, F. Solubility and hidrolisis of aluminum in soil solutions and saturated past extracts. Soil Science Society of America Proceedings 34(5):728-734. 1970.
55. RIDGMAN, W. J. Experimentation in biology. London, Thompson Ltd., 1975. 233 p.
56. RIOS, M. A. and PEARSON, R. W. The effect of some chemical environmental factors on cotton roots behavior. Soil Science Society of America Proceedings 28 (2):232-235. 1964.
57. SAMPSON, M.; CLARKSON, D. T. and DAVIES, D.D. DNA synthesis in aluminum treated roots of barley. Science 148(3676):1476-1477. 1965.

58. SANTANA, M. B. M.; CABALLA, F. P. e MIRANDA, E. R. de. Toxidez do aluminio em plantas de cacau. *Revista Theobroma (Brasil)* 3(4):11-21. 1973.
59. SIVASUBRAMANIAM, S. and TALIBUDEEN, O. Effect of aluminum on growth of tea (*Camellia sinensis*) and its uptake de potassium and phosphorus. *Journal of the Science of food and Agriculture* 22:325-329. 1971.
60. S'JACOB, J. C. Physiological experiments of the nutrition of *Coffea arabica* . Summary of the foregoing paper. Abstract in Greene, L. 1953. p.14-15. 1938. (Tomado de : Fisiología del café; Resúmenes (5):90. 1977).
61. SONDAHL, M. R. and SHARP, W. R. High frequency induction of somatic embryos in cultured leaf explants of *Coffea arabica* L. *Zeitschrift Fuer Pflanzenphysiologie* 81:395-408. 1977.
62. URIBE H, A. y MESTRE M. A. Efecto del nitrógeno, fósforo y potasio sobre la producción de café. *Cenicafé (Colombia)* 27 (4):158-173. 1976.
63. VALENCIA A., G.; GOMEZ A., A. y BRAVO G., E. Efecto de diferentes portadores de nitrógeno en el desarrollo del cafeto y en la fertilidad de los suelos. *Cenicafé (Colombia)* 26(3):131-142. 1975.
64. VICKERS, J. C. and ZAK, J. M. Effect of pH, P and Al on the growth and chemical composition of crownvetch. *Agronomy Journal* 70(5):748-750. 1978.
65. WAISEL, Y.; HOFFEN, A. and ESHEL, A. The localization of aluminum in the cortex cells of bean and barley roots by X-ray microanalysis. *Physiology Plantarum* 23(1):75-79. 1970.
66. WRIGHT, K. E. The internal precipitation of phosphorus in relation to aluminum toxicity. *Plant physiology* 18(4):708-712. 1948.
67. _____ and DONAHUE, B. A. Aluminum toxicity studies with radioactive phosphorus. *Plant physiology* 28(4):674-680. 1953.

ANEXO 1. Composición de la solución nutritiva completa de "Long Ashton" y detalles de las soluciones stock usadas para la preparación de 50 litros (21).

Sal	meq/L	ppm	Concentración de la solución stock (gr/L).	Volumen de solución stock usado para preparar 50 L de solución nutritiva.
KNO ₃	K ⁺ 4 NO ₃ ⁻ 4	K 156 N 57	202	100 ml
Ca (NO ₃) ₂ 4H ₂ O	Ca ⁺⁺ 8 NO ₃ ⁻ 8	Ca 160 N 113	472	100 ml
Mg SO ₄ 7H ₂ O	Mg ⁺⁺ 4 SO ₄ ⁼⁼ 4	Mg 48 S 64	240	100 ml
Na H ₂ PO ₄ H ₂ O	Na ⁺ 1,33 PO ₄ ⁼⁼ 4	Na 31 P 41	184	50
Fe EDTA*	Fe ⁺³ 0,3	Fe 5,6		50 ml
H ₃ BO ₃	B ⁺³ 0,15	B 0,54	31	5
Mn SO ₄ H ₂ O	Mn ⁺⁺ 0,02	Mn 0,55	16,90	5
Zn SO ₄ 7H ₂ O	Zn ⁺⁺ 0,002	Zn 0,065	2,9	5
Cu SO ₄ 5H ₂ O	Cu ⁺⁺ 0,002	Cu 0,064	2,5	5
(NH ₄) ₆ MO ₇ O ₂₄ 4H ₂ O	MO ⁺⁶ 0,003	Mo 0,048	0,88	5

* Preparado a partir de Fe SO₄ 7H₂O y EDTA-Na.

A N E X O S

ANEXO 2. Promedios¹ de tres repeticiones de la longitud del tallo, número de hojas, peso seco de raíces y peso seco de la parte aérea, a los cuatro meses de edad.

Trata- miento	Long.tallo (cm)	No.de hojas	P.S.raíces (gr)	P.S.aéreo (gr)
Sistema Simultáneo ²				
P ₁ Al ₀	21,6 a	16,00 a	0,49 a	3,3 a
P ₁ Al ₁	20,5 a	16,33 a	0,47 a	3,2 a
P ₁ Al ₂	14,4 e	14,00 b	0,25 cd	1,2 d
P ₂ Al ₀	18,2 bcde	15,33 ab	0,41 abc	2,5 abc
P ₂ Al ₁	19,1 abc	15,33 ab	0,43 ab	2,8 abc
P ₂ Al ₂	16,8 bcde	14,66 ab	0,42 ab	2,1 bcd
P ₃ Al ₀	17,8 bcde	16,00 a	0,36 abcd	2,2 bcd
P ₃ Al ₁	17,7 bcde	14,66 ab	0,35 abcd	2,3 abc
P ₃ Al ₂	17,3 bcde	14,66 ab	0,44 ab	2,2 bcd
Sistema Alternó ³				
P ₁ Al ₀	16,6 bcde	14,66 ab	0,39 abc	2,0 bcd
P ₁ Al ₁	16,2 cde	14,00 b	0,38 abcd	2,1 bcd
P ₁ Al ₂	15,4 de	14,66 ab	0,30 bcd	1,7 cd
P ₂ Al ₀	19,4 ab	15,33 ab	0,46 ab	3,0 ab
P ₂ Al ₁	19,0 abc	15,33 ab	0,46 ab	2,6 abc
P ₂ Al ₂	16,0 de	14,00 b	0,35 abcd	2,0 bcd
P ₃ Al ₀	16,7 bcde	14,66 ab	0,34 abcd	2,2 bcd
P ₃ Al ₁	16,6 bcde	15,33 ab	0,38 abcd	2,3 abc
P ₃ Al ₂	15,4 de	13,66 b	0,29 bcd	1,8 bcd
C.V. (%)	9,00	6,25	24,49	23,72

1. Dentro de una misma columna, promedios seguidos por la misma letra no difieren estadísticamente al nivel 5% por la prueba de Duncan.
2. P y Al en la misma solución.
3. P por tres días en solución libre de Al y luego Al durante los tres días siguientes en solución libre de P.

ANEXO 3. Análisis de varianza de la regresión para la variable dependiente peso seco de la parte aérea en función de las variables P aplicado (X 1), Al aplicado (X 2), P aplicado x Al aplicado (X1 X2) y Al aplicado cuadrático. Sistema simultáneo (P y Al en la misma solución).

Fuente de variación	G.L.	S.C.	C.M.	F
Regresión	4	6,49	1,62	4,26**
Error	22	8,38	0,38	
total	26	14,88		

C.V. (%) 26,25 ; $r^2 = 0,43$

** significativo al 1%

ANEXO 4. Análisis de varianza de la regresión para la variable dependiente peso seco de la parte aérea en función de las variables P aplicado (X 1), Al aplicado (X 2), P aplicado x Al aplicado (X1 X2) y Al aplicado cuadrático. Sistema alterno (P en solución libre de Al tres días y Al en solución libre de P tres días).

Fuente de variación	G.L.	S.C.	C.M.	F
Regresión	4	1,73	0,43	1,27 n.s
Error	22	7,49	0,34	
Total	26	9,22		

C.V. (%) 26,25 ; $r^2 = 0,18$

n.s. = no significativo.

ANEXO 5. Promedios¹ de tres repeticiones de los diferentes elementos foliares analizados a los cuatro meses de edad.

Tratam.	P (%)	Al (ppm)	Ca (%)	Mg (%)	K (%)
Sistema Simultáneo ²					
P ₁ Al ₀	0,164 cde	101,66	0,80	0,19 bcd	2,10
P ₁ Al ₁	0,162 cde	85,66	0,69	0,21 abc	2,30
P ₁ Al ₂	0,126 g	230,0	0,54	0,24 a	2,45
P ₂ Al ₀	0,206 b	98,33	0,79	0,20 bcd	2,15
P ₂ Al ₁	0,175 cd	123,0	0,61	0,19 bcd	2,12
P ₂ Al ₂	0,173 cd	139,0	0,52	0,20 bcd	2,32
P ₃ Al ₀	0,246 a	117,0	0,77	0,19 bcd	2,40
P ₃ Al ₁	0,246 a	110,0	0,58	0,17 d	2,17
P ₃ Al ₂	0,229 a	118,33	0,63	0,21 abc	2,32
Sistema Alternó ³					
P ₁ Al ₀	0,117 g	125,0	0,88	0,22 ab	2,08
P ₁ Al ₁	0,129 fg	187,0	0,72	0,21 abc	2,08
P ₁ Al ₂	0,121 g	350,0	0,56	0,20 bcd	2,25
P ₂ Al ₀	0,154 de	221,66	0,75	0,18 cd	1,98
P ₂ Al ₁	0,154 de	204,66	0,63	0,18 cd	2,00
P ₂ Al ₂	0,148 ef	288,0	0,55	0,19 bcd	2,12
P ₃ Al ₀	0,164 cde	197,0	0,72	0,19 bcd	2,03
P ₃ Al ₁	0,162 cde	190,0	0,67	0,21 abc	2,22
P ₃ Al ₂	0,179 c	231,0	0,62	0,22 ab	2,47
C.V. %	7,54	22,94	7,39	8,72	6,84

continúa

Viene ANEXO 5.

Tratamiento	Mn (ppm)	Zn (ppm)	Fe (ppm)	Na (ppm)
Sistema Simultáneo ²				
P ₁ Al ₀	58,7	18,0	134,7	403,7
P ₁ Al ₁	42,7	19,3	124,3	433,7
P ₁ Al ₂	38,3	19,7	164,7	628,7
P ₂ Al ₀	49,3	20,0	141,7	1149,7
P ₂ Al ₁	41,0	21,7	144,3	1115,0
P ₂ Al ₂	31,3	20,3	146,0	1467,7
P ₃ Al ₀	51,0	20,3	143,3	1787,7
P ₃ Al ₁	40,0	18,3	136,3	1907,0
P ₃ Al ₂	40,7	19,0	143,7	2246,0
Sistema Alternó ³				
P ₁ Al ₀	49,3	17,7	201,0	527,0
P ₁ Al ₁	44,0	16,3	182,7	575,3
P ₁ Al ₂	39,3	18,7	202,0	631,0
P ₂ Al ₀	53,0	16,0	175,0	789,3
P ₂ Al ₁	42,7	13,7	168,3	687,0
P ₂ Al ₂	35,0	16,0	177,7	852,0
P ₃ Al ₀	46,0	16,3	160,3	1225,0
P ₃ Al ₁	41,0	16,3	165,3	1191,7
P ₃ Al ₂	37,0	16,7	180,3	1350,0
C.V. %	10,41	12,44	8,85	15,25

1. Para las columnas del P y del Mg, promedios seguidos por la misma letra no difieren estadísticamente al nivel 5% por la prueba de Duncan.

2. P y Al con la misma solución.

3. P por tres días en solución libre de Al y luego Al durante los tres días siguientes en solución libre de P.

ANEXO 6. Coeficientes de correlación entre los elementos foliares analizados. Edad de las plántulas: 4 meses.

<u>P</u>	<u>Al</u>	<u>Ca</u>	<u>Mg</u>	<u>K</u>	<u>Mn</u>	<u>Zn</u>	<u>Fe</u>	<u>Na</u>
P	-0,46**	0,15	-0,09	0,30*	0,14	0,31*	-0,55**	0,74**
Al	-0,46**	-0,35**	0,05	-0,10	-0,27*	-0,23	0,72**	-0,23
Ca	0,15	-0,35**	0,24*	-0,15	0,79**	0,04	0,07	-0,18
Mg	-0,09	0,05	0,24	0,56**	-0,01	0,18	0,26*	-0,35
K	0,30*	-0,10	0,55**	-0,16	-0,16	0,26*	-0,12	0,29*
Mn	0,16	-0,27*	-0,012	-0,03	-0,03	-0,03	-0,07	-0,23
Zn	0,31*	-0,24	0,18	0,26*	-0,03	0,22	0,22	0,19
Fe	-0,55**	0,72**	0,26*	-0,12	-0,07	-0,22	-0,30*	-0,30*
Na	0,74**	-0,23	-0,05	0,29*	-0,24	0,19	-0,30*	-0,30*

* Significativo al 5%

** Significativo al 1%

ANEXO 7. Coeficientes de correlación entre los diferentes parámetros evaluados y entre el Al aplicado y dichos parámetros
 Edad de las plántulas: 4 meses.

	LT1	H2	PSA3	PSR4	P	Al	Ca	Mg	K	Mn	Zn	Fe	Na
Alc5	-0,48**	-0,43**	-0,45**	-0,23	-0,09	0,48**	-0,71**	0,23	0,45**	-0,66**	0,07	0,21	0,18
L.T.1	0,60**	0,60**	0,94**	0,66**	0,20	-0,33*	0,26*	-0,51**	-0,45**	0,55**	0,06	-0,31*	-0,16
H2	0,60**		0,60**	0,31*	0,25*	-0,31*	0,28*	-0,22	-0,04	0,42**	0,15	-0,29*	-0,12
PSA3	0,94**	0,60**		0,69**	0,13	-0,26*	0,19	-0,57**	-0,49**	0,48**	0,004	-0,26*	-0,16
PSR4	0,66**	0,31*	0,69**		0,14	-0,16	0,28*	-0,25*	-0,37**	0,36**	0,15	-0,05	-0,16

1. Longitud del tallo 5. Al aplicado

2. Número de hojas 3. Peso seco parte aérea

4. Peso seco de raíces

Los elementos químicos en la fila superior se refieren a elementos foliares.

* Significativo al 5%

** Significativo al 1%

ANEXO 8. Concentraciones de Al foliar (ppm) en cada una de las repeticiones.
Edad de las plántulas : 4 meses (2o. muestreo).

Tratamientos	REPETICIONES		
	I	II	III
Sistema Simultáneo ¹			
P ₁ Al ₀	107	94	104
P ₁ Al ₁	89	68	100
P ₁ Al ₂	262	198	230
P ₂ Al ₀	90	97	108
P ₂ Al ₁	128	103	138
P ₂ Al ₂	162	143	112
P ₃ Al ₀	106	150	95
P ₃ Al ₁	120	108	102
P ₃ Al ₂	113	109	133
Sistema Alterno ²			
P ₁ Al ₀	150	105	120
P ₁ Al ₁	143	138	280
P ₁ Al ₂	395	350	306
P ₂ Al ₀	210	300	155
P ₂ Al ₁	203	161	250
P ₂ Al ₂	340	310	215
P ₃ Al ₀	220	188	184
P ₃ Al ₁	176	165	230
P ₃ Al ₂	230	185	280

1. P y Al en la misma solución.

2. P por tres días en solución libre de Al y luego Al durante los tres días siguientes por solución libre de P.

ANEXO 9. Promedios de tres repeticiones de la concentración de Al foliar (ppm) a los dos y cinco meses de edad. (Primer y tercer muestreo respectivamente).

Tratamientos	Al foliar (ppm)	
	2 meses	5 meses
Sistema Simultáneo ¹		
P ₁ Al ₀	59	145.0
P ₁ Al ₁	89	207.0
P ₁ Al ₂	202	366.7
P ₂ Al ₀	80	133.3
P ₂ Al ₁	72	184.3
P ₂ Al ₂	71	195.7
P ₃ Al ₀	77	136.7
P ₃ Al ₁	71	201.0
P ₃ Al ₂	87	199.0
Sistema Alternó ²		
P ₁ Al ₀	86	188.7
P ₁ Al ₁	72	203.0
P ₁ Al ₂	123	317.7
P ₂ Al ₀	55	201.3
P ₂ Al ₁	68	223.3
P ₂ Al ₂	153	342.7
P ₃ Al ₀	72	180.3
P ₃ Al ₁	74	228.0
P ₃ Al ₂	126	289.3

1. P y Al en la misma solución.

2. P por tres días en solución libre de Al y luego Al durante los tres días siguientes en solución libre de P.

ANEXO 10. Análisis de varianza de la regresión para la variable dependiente peso seco de la parte aérea en función de las variables P aplicado (X1), Al foliar (X2), P aplicado x Al foliar (X1 X2) y Al foliar cuadrático (X2²). Sistema simultáneo (P y Al en la misma solución).

Fuente de variación	G.L.	S.C.	C.M.	F
Regresión	4	5,89	1,47	3,60*
Error	22	8,99	0,40	
Total	26	14,88		

C.V. (%) 27,19 ; $r^2 = 0,39$

* Significativo al 5%

ANEXO 11. Análisis de varianza de la regresión para la variable dependiente Al foliar en función de las variables P aplicado; Al aplicado; P aplicado x Al aplicado y Al aplicado cuadrático. Sistema simultáneo (P y Al en la misma solución).

Fuente de variación	G.L.	S.C.	C.M.	F
Regresión	4	38307,28	9576,82	17,97**
Error	22	11725,38	532,97	
Total	26	50032,66		

C.V. (%) 18,50 ; $r^2 = 0,76$

** Significativo al 1%.