

# EVALUACION Y DISCRIMINACION TEMPRANA DE GENOTIPOS DE MAIZ PARA TOLERANCIA A SUELOS ACIDOS

Sildana Jaramillo T.<sup>1</sup> - Hernán Ceballos L.<sup>2</sup>

## COMPENDIO

Este estudio se realizó para determinar si existe acumulación diferencial de elementos minerales en tejido radical y aéreo (tallos y hojas) en genotipos de maíz tolerantes y susceptibles a suelos ácidos. La evaluación se realizó en Santander de Quilichao (Cauca) y Villavicencio (Meta). En cada localidad se encaló el suelo para obtener parcelas con 35, 50 y 65% de saturación de Al. Cada parcela se dividió en dos (Quilichao) y tres repeticiones (Villavicencio). Cada repetición, a su vez, se dividió en ocho subparcelas (4 surcos de 5m), las que fueron asignadas aleatoriamente a cuatro niveles de disponibilidad de P y a uno de dos genotipos de maíz tolerante o susceptible a suelos ácidos (SA3 y Tuxpeño respectivamente), en un arreglo factorial. La concentración de K fue diferente para ambos genotipos en las dos localidades. La concentración de P también mostró diferencias significativas en todos los casos, excepto en tejido aéreo en Quilichao. Se detectaron diferencias estadísticas para otros elementos (Mg, Mn, Fe, Ca y Al), pero no en la forma generalizada observada para K y P. No se observaron diferencias significativas para la acumulación de Si.

**Palabras Claves:** Selección, Acumulación diferencial, Elementos minerales, Saturación de Al, Tratamientos con P, Estrés edáfico.

## ABSTRACT

### EARLY EVALUATION AND DISCRIMINATION OF MAIZE GENOTYPES FOR THEIR TOLERANCE TO ACID SOILS

This study was carried out to determine if there is differential accumulation of mineral elements in root (RT) and shoot and stalk (ST) tissue in two maize genotypes tolerant and susceptible to acid soils. The field evaluation was carried out at Santander de Quilichao (SDQ) and Villavicencio (VVO) in Cauca and Meta departments, respectively. At each location three levels of aluminum saturation (35, 50 and 65%) were obtained through liming with the dolomitic lime. Plots were divided in 2 (SDQ) or 3 (VVO) replications. Each replication, in turn, was divided in 8 sub-plots (4 rows 5m long each) which were randomly assigned to one of four levels of P availability, and one of the two genotypes used: SA3 or Tuxpeño (TXP) tolerant and susceptible to acid soils, respectively. A factorial arrangement was used for this 8 experimental units. [K] in both genotypes was different for RT and St and at SDQ and VVO. [P] for the two genotypes were significantly different, in very case (Except for St at SDQ) as well. Statistical differences were also detected for [Mg], [Mn], [Fe], [Ca], and [Al] but not as consistently as for P and K. No differences were observed for Si. In general there was a tendency in both genotypes to reduce the concentration of elements (particular P, K, Ca, and Mg) as the % of aluminum saturation increased. This reduction was more pronounced at 65% Al saturation. There was no clear or consistent response of genotypes to P availability in the soil. In general the tolerant genotype (SA3) tended to accumulate more P, K, Ca and Mg and less Si, Fe, Mn and Al as P-availability in the soil increased.

**Keywords:** Selection, Differential accumulation, Mineral elements, Al saturation, P availability, Edaphic stress

<sup>1</sup> Ing. Agr. Estudiante Maestría en Ciencias Agrarias con énfasis en Fitomejoramiento. A.A. 479. Palmira; <sup>2</sup> Ing. Agr. Ph.D. Profesor Asociado. Universidad Nacional de Colombia. Sede Palmira. A.A. 237.

## INTRODUCCION

El maíz es el tercer cultivo más importante del mundo después del arroz y el trigo. Se cultiva en aproximadamente 130 millones de hectáreas, más del 60% de las cuales se encuentran en países en desarrollo. El maíz provee el 10% de la proteína y el 8% de las calorías para la alimentación humana, y es un cultivo básico para millones de habitantes en América Latina, Asia y África. El incremento anual de la producción de maíz es menor que el incremento de la demanda mundial, creándose un déficit del 1% anual, el cual es mayor en los países en desarrollo. Esto determina que las importaciones se incrementen a razón de 1.5 millones de toneladas por año en estos países. Una forma de aumentar la producción de maíz en países en desarrollo es mediante el incremento de las áreas de cultivo, pero ello implica, generalmente, utilizar suelos marginales caracterizados por baja fertilidad y otros estreses abióticos. La baja fertilidad de muchos de estos suelos se debe principalmente a la acidez, relacionada con pH bajo, alta saturación de aluminio y baja absorción de fósforo (Narro et al., 1995).

En los trópicos las áreas en suelos ácidos podrían ser importantes para satisfacer la creciente demanda de alimentos en el próximo siglo (Narro et al., 1995). A pesar de que estos ambientes marginales se presentan como alternativa para la producción de alimentos, su uso requiere del desarrollo de tecnología apropiada. Es posible modificar las condiciones químicas del suelo mediante la aplicación de correctivos o enmiendas, lo que en general resulta costoso, por lo cual muchos agricultores de países en desarrollo no tienen acceso a este tipo de tecnología (Uexkull y Mutert, 1995).

Otra alternativa para este problema, es la evaluación del germoplasma y la manipulación genética del mismo, para lograr la identificación y/o desarrollo de materiales que crezcan y produzcan favorablemente en condiciones de suelos ácidos (Uexkull y Mutert, 1995). Es decir, implementar programas de mejoramiento para adaptación específica, donde se explote la eficiencia de los genotipos en la utilización de bajos niveles de nutrientes y/o tolerancia a excesos de aluminio.

En suelos con pH bajo (menor a 5.6), el rendimiento del maíz se reduce debido a que estos niveles están frecuentemente asociados con toxicidad por Al o Mn y a deficiencias de Ca, Mg, P y Mo (Duque-Vargas et al., 1994). En estos suelos el desarrollo de las raíces de maíz se inhibe y se reduce la disponibilidad de agua y nutrientes. El desarrollo de cultivares de maíz con tolerancia a suelos ácidos se ha sugerido como una solución ambientalmente compatible, relativamente barata para el agricultor, y con permanente incremento de los

promedios de rendimiento (Pandey y Gardner, 1992 y Duque-Vargas et al., 1994).

Las evaluaciones de maíz en el campo para tolerancia a suelos ácidos, aunque necesarias, son costosas y proveen resultados muy variables ya que son afectados por altos coeficientes de variación debido a la variabilidad espacial típica de estos suelos (Urrea et al., 1996). Una de las ventajas de los ensayos en campo, es la utilización del medio natural de crecimiento de las plantas, con todas las características químicas, físicas y biológicas que interactúan dentro de un suelo ácido, permitiendo una expresión y evaluación más real de la tolerancia o susceptibilidad de las plantas.

Se han desarrollado varias técnicas para lograr la rápida y/o eficiente evaluación de la tolerancia a suelos ácidos. Estas técnicas incluyen el uso de soluciones nutritivas, ensayos en potes con suelos ácidos, técnicas de tinción, evaluaciones en medios de cultivo modificados y adicionados con aluminio y marcadores moleculares (citados por Urrea et al., 1996). Sin embargo, los resultados de estos ensayos no se correlacionaron con los resultados de campo, o las correlaciones obtenidas fueron poco satisfactorias (Taylor, 1995 y Urrea et al., 1996).

Dadas las dificultades que generan las evaluaciones en campo, en cuanto al área, tiempo, dinero y recurso humano requeridos, se hace necesario el desarrollo de técnicas que permitan reducir el número de evaluaciones en campo y al tiempo hacer una selección efectiva y confiable.

Los mecanismos por los cuales unos genotipos son capaces de crecer y reproducirse en condiciones de estrés mineral, o por los cuales es capaz de acumular o concentrar altas cantidades de un elemento, difieren con el elemento mineral, la especie y el genotipo (Clark, 1983). Respecto a este tema, es poco lo que se conoce sobre los aspectos fisiológicos de la tolerancia a suelos ácidos en maíz. Un conocimiento más profundo sobre estos aspectos podría facilitar y hacer más eficiente el proceso de selección de materiales tolerantes a los problemas asociados con este tipo de suelos. Este estudio se realizó para determinar si existe acumulación diferencial de P, K, Ca, Mg, Si, Fe, Mn y Al en tejido radical y tejido aéreo (hojas y tallos) en genotipos de maíz tolerante y susceptible a suelos ácidos y dilucidar los posibles efectos de este tipo de estrés sobre los procesos de absorción, translocación y acumulación.

## MATERIALES Y METODOS

Se evaluaron dos variedades de polinización abierta, tolerante y susceptible a estrés por suelos ácidos (SA3

y Tuxpeño, respectivamente) en dos localidades en Colombia (Quilichao y Villavicencio). Se aplicó cal dolomítica para obtener parcelas con saturación de aluminio de 35, 50 y 65%, las que a su vez se dividieron en dos (Quilichao) o tres (Villavicencio) repeticiones. Cada repetición se dividió en ocho subparcelas, las que se asignaron aleatoriamente dentro de un arreglo factorial a uno de dos genotipos y a uno de cuatro niveles de fertilización con Fósforo (como superfósforo triple). En Quilichao estos cuatro niveles correspondieron a 0, 20, 40 y 60 kg/ha de  $P_2O_5$  y en Villavicencio a 0, 40, 80 120 kg/ha de  $P_2O_5$ .

Cada unidad experimental estuvo constituida por cuatro surcos de 5m de longitud. Al momento del raleo (4-5 hoja) se extrajeron las plantas del suelo, con cuidado, tratando de extraer todo el tejido radical posible. Las plantas se secaron a 70°C por tres días; se fraccionaron en parte aérea (hojas y tallos) y raíces, y molieron para proceder al análisis químico, realizado siguiendo los procedimientos convencionales para P, K, Ca, Mg, Si, Fe, Mn y Al.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Fósforo

La comparación entre localidades y tipos de tejido mostró tendencia a mayor acumulación de P en tejido radical que en tejido aéreo en Villavicencio, mientras en Quilichao este patrón no fue consistente (Cuadros 1-4). Estos resultados podrían sugerir mayor eficiencia en la absorción y posterior translocación del elemento desde la raíz a la parte superior de la planta en las condiciones ambientales de Villavicencio.

SA3 tendió a acumular mayor cantidad de P que Tuxpeño en ambos tipos de tejido, con diferencias estadísticamente significativas en todos los casos a excepción del tejido aéreo en Quilichao, reafirmando estos resultados la condición tolerante descrita para SA3 (Granados et al., 1995). Estos resultados sugieren que esta variedad está capacitada para soportar bajos niveles de P en presencia de Al, manteniendo los procesos de absorción, translocación y acumulación menos limitados que en genotipos susceptibles como Tuxpeño.

En ambos tipos de tejido se observó relación inversa entre acumulación de P y saturación de aluminio en el suelo especialmente cuando se pasó al 65% de saturación. A este nivel, el Al aumenta su capacidad de competir y desplazar a otros minerales de los sitios de absorción de la raíz. En el caso del P, este pudo ser acomplejado en formas insolubles por el Al. El aumento de la saturación de Al a este nivel puede ocasionar pér-

didada de efectividad de los mecanismos de tolerancia (si la planta los posee), lo que explica los marcados descensos en el contenido de ciertos elementos minerales como el P, al tiempo que pueden observarse mayores niveles de acumulación de Al en los tejidos.

Existió respuesta de tipo lineal similar para ambos genotipos, entre el P y los niveles de saturación de Al en el suelo, (a excepción del tejido radical en Villavicencio), donde también se observó una relación cuadrática diferencial en ambos genotipos.

Respecto a los niveles de fertilización con P, se observó alta significancia para este factor, con una respuesta de tipo lineal, igualmente significativa, y común para ambos genotipos en todos los casos, con una relación directa entre la acumulación de P en tejidos y la disponibilidad del elemento en el suelo.

### Potasio

Para este elemento, se presentó mayor acumulación de K en tejido radical que en tejido aéreo en Villavicencio, mientras en Quilichao se observó lo contrario. En todos los casos, los contenidos de K en los tejidos fueron de adecuados a altos (Cuadros 1-4).

SA3 acumuló mayor cantidad de K que Tuxpeño en sus tejidos, con diferencias estadísticamente significativas en todos los casos, sugiriendo mayor eficiencia de esta variedad para absorber K a pesar de la baja capacidad de competencia que presenta este elemento frente a otros como el Al, P, Ca y Mg, y a la acción del Al, concentrada sobre la absorción y especialmente el transporte de P y K en maíz, en condiciones de suelos ácidos (Foy et al., 1978).

No se encontró relación consistente entre la acumulación de K en los tejidos y la saturación de Al en el suelo, aunque siempre que esta última pasó del 50 al 65%, la acumulación de K se redujo al tiempo que se incrementaron los contenidos de Al en los tejidos, lo que evidencia la relativa facilidad con que el Al puede desplazar al K, gracias a su carácter polivalente o a su gran afinidad con varios de los transportadores de elementos (Clark, 1983).

Se observó respuesta significativa de tipo lineal a los niveles de saturación de Al, común para ambos genotipos y tipos de tejido sólo en Quilichao, una respuesta cuadrática diferencial en tejido aéreo. En Villavicencio se presentaron respuestas lineales diferenciales entre genotipos en los dos tipos de tejido.

El análisis a través de niveles de P no mostró respuesta significativa de los genotipos en tejido radical. Sin embargo, se observó relación directa entre acumu-

**CUADRO 1. Concentración media de elementos minerales en tejido radical de dos genotipos de maíz sometidos a tratamientos de aluminio y fósforo en suelos de Villavicencio Colombia**

TRATAMIENTOS	CONCENTRACION DE ELEMENTOS MINERALES (µg/g)							
	P	K	Ca	Mg	Si	Fe	Mn	Al
TUXPEÑO	4010	60820	2560	3650	32700	2615	50.5	5091
SA3	4740	69720	2660	4230	36210	2412	44.5	4555
DMS (0.05)	290	9230	208	360	14752	414	3.6	703
0 kg/ha P	3430	63960	2580	4090	44510	2507	50.9	4641
40 kg/ha P	4340	64660	2600	3790	30840	2476	47	4981
80 kg/ha P	4670	65430	2540	3830	33550	2634	47.2	4885
120 kg/ha P	5050	67030	2720	4060	28910	2437	44.9	4785
Respuesta/DMS	2/410	1/13085	1/294	3/509	1/20863	1/586	3/5.1	1/995
65% Sat. Al	3840	63360	2520	3090	34980	2769	57.3	5472
50% Sat. Al	4620	72910	2630	4710	26430	2342	42.8	4469
35% Sat. Al	4680	59550	2690	4020	41950	2431	42.5	4527
Respuesta/DMS	5/355	3/15765	1/254	5/436	1/17432	1/477	4/5.4	2/672

Respuestas: 1. Ausencia de respuesta; 2. Respuesta lineal común para Tuxpeño y SA3; 3. Respuesta lineal diferencial para Tuxpeño y SA3; 4. Respuesta lineal diferencial y cuadrática común para Tuxpeño y SA3; 5. Respuestas lineal y cuadrática común

lación de K y niveles de disponibilidad de P en el suelo, en tejido aéreo para ambas localidades.

### Calcio

En las dos localidades se observó mayor acumulación de Ca en tejidos aéreos, concordando con lo descrito por Roy et al. (1988) para maíz, respecto a la retención del Ca en el follaje, especialmente en hojas viejas en presencia de Al (Cuadros 1-4).

SA3 acumuló mayor cantidad de Ca, con significancia estadística sólo en tejido aéreo en Villavicencio. A pesar de la escasa significancia, la condición tolerante de esta variedad le permite absorber mayores cantidades del elemento en presencia de Al o tener bajos requerimientos de Ca en estas condiciones sin afectar drásticamente el desarrollo de la planta.

La relación entre la acumulación de Ca en los tejidos radicales y la saturación de Al fue inversa. Esta respuesta fue significativa sólo en Quilichao, donde se observó marcada tendencia lineal en ambos genotipos. Igual situación se presentó en tejido aéreo en esta localidad, pero se observó relación cuadrática entre acumulación de Ca y saturación de Al.

Para el factor nivel de P se detectó respuesta significativa común para ambos genotipos, sólo en tejido

radical en Quilichao. No se pudo establecer relación consistente entre acumulación de Ca y niveles de P en el suelo para los otros casos.

### Magnesio

Al igual que para K, para esta variable se presentaron mayores registros en tejido radical en Villavicencio, la situación opuesta se presentó en Quilichao (Cuadros 1-4).

SA3 acumuló mayor cantidad de Mg en Villavicencio, mientras en Quilichao ocurrió lo contrario, pero sin ser estas diferencias estadísticamente significativas, con excepción de tejido radical en Villavicencio. La tendencia a acumular mayor cantidad de Mg se traduce en menor bloqueo de procesos enzimáticos y de liberación de energía a partir del ATP para el metabolismo de la planta en aquellos materiales con algún tipo de tolerancia, siendo estos los principales efectos adversos del desplazamiento del Mg por el Al en genotipos susceptibles. Por estas razones, la tolerancia al Al en ciertas líneas mejoradas de maíz coincide con alta eficiencia en Mg, en su habilidad para absorber Mg a niveles restringidos del elemento, dada la capacidad del Mg para contrarrestar los efectos nocivos del Al en las plantas (Foy et al., 1978).

El análisis de variancia detectó alta significancia para la saturación de Al del suelo en ambos tipos de tejido y localidades, con tendencias lineales significativas en Quilichao, y respuesta cuadrática adicional, igualmente significativa, en Villavicencio. Se observó relación inversa en acumulación de Mg y saturación de Al del suelo en todas las localidades y tipos de tejido, a excepción del tejido aéreo en Villavicencio, pero en todos los casos tendió a menor acumulación del elemento a medida que aumenta el nivel de Al en el suelo, particularmente cuando se incrementó del 50 al 65%. Esta relación inversa es descrita por Foy et al. (1978) quienes indican, que el Al reduce la absorción de Mg y su contenido, tanto en raíces como en parte aérea en plantas de maíz, desplazándolo fácilmente de los sitios de intercambio, debido a que el Mg es un competidor débil frente al Al y a otros cationes como Ca y K.

En ninguna de las localidades o tipos de tejidos, se detectó significancia a los niveles de disponibilidad de P en el suelo, indicando ausencia de respuesta en la acumulación de Mg a los tratamientos con este elemento.

#### Silicio

La acumulación de Si fue mayor en tejido radical en Quilichao, en Villavicencio se observó lo contrario (Cuadros 1-4).

SA3 tendió a acumular menor cantidad de Si con excepción del tejido radical en Villavicencio, pero en ningún caso esta diferencia fue estadísticamente significativa. Barcelo et al. (1993) encontraron en maíz, que a igual saturación de Al en el medio, y diferentes concentraciones de Si, se presentaron diferencias en el desarrollo y concentración de Al en los tejidos, como en la producción de ácidos orgánicos. Estos investigadores agregan además, que el Si previene la inhibición del desarrollo a altas concentraciones de Al, además, las plantas tratadas con Si presentaron mejor desarrollo, acumularon menor cantidad del metal y produjeron mayor cantidad de ácido cítrico.

En tejido radical no se detectó significancia del factor saturación de Al, por lo tanto, los genotipos no respondieron en su acumulación de Si a los diferentes niveles de saturación de Al en el suelo. La relación entre la acumulación de Si y la saturación de Al del suelo no fue consistente. En tejido aéreo, por el contrario, se detectó significancia para este factor, con marcada tendencia lineal en Villavicencio, y cuadrática en Quilichao.

Para esta variable no se encontró respuesta a los niveles de disponibilidad de P en el suelo, en ningún tipo de tejido y localidad. Benton Jones et al (1991) indican que el contenido de Si en la planta se podría

**CUADRO 2. Concentración media de elementos minerales en tejido radical de dos genotipos de maíz sometidos a tratamientos de aluminio y fósforo en suelos de S. de Quilichao, Colombia**

TRATAMIENTOS	CONCENTRACION DE ELEMENTOS MINERALES ( $\mu\text{g/g}$ )							
	P	K	Ca	Mg	Si	Fe	Mn	Al
TUXPEÑO	2730	30540	1860	2510	119000	14226	209	33850
SA3	3180	35580	1960	2360	108000	13454	194	29391
DMS (0.05)	306	5193	225	394	23724	2951	22	6873
0 kg P/ha	1980	30320	1490	2310	112000	13874	200	31157
20 kg P/ha	2940	33010	2030	2520	104000	13007	195	29297
40 kg P/ha	3180	33650	1920	2270	120000	15200	197	32914
60 kg P/ha	3730	35260	2210	2630	119000	13379	213	33113
Respuesta/DMS	2/433	1/7344	2/318	1/557	1/20115	1/4173	1/32	1/9720
65% Sat. Al	2730	25220	1660	1780	120000	14647	191	34002
50% Sat. Al	2990	33570	1900	2420	105000	12177	171	30099
35% Sat. Al	3150	40400	2190	3120	115000	14696	242	30760
Respuesta/DMS	2/383	2/6360	2/274	2/482	1/17420	1/3614	1/112	1/8418

Respuestas: 1. Ausencia de respuesta; 2. Respuesta lineal común para Tuxpeño y SA3; 3. Respuesta lineal diferencial para Tuxpeño y SA3; 4. Respuesta lineal diferencial y cuadrática común para Tuxpeño y SA3; 5. Respuestas lineal y cuadrática común

incrementar mediante la aplicación de Superfosfato, lo que contrasta con los resultados observados en este estudio, donde se tendió a acumular mayor cantidad de Si a menor disponibilidad de P en el suelo.

La presencia de Si en el suelo puede incrementar la disponibilidad del P por combinación de los silicatos con excesos de Al o Mn, o bien en la competencia de los silicatos con el P por los sitios de intercambio en las arcillas. Benton Jones et al (1991), trabajando en arroz, indican que dentro de la planta el Si está asociado con un uso más eficiente del P, en plantas creciendo a bajos niveles de P, pero no a niveles adecuados del elemento, donde la adición de silicatos puede reducir la acumulación de P en los tejidos aéreos, al tiempo que la incrementa en el grano. La investigación muestra la existencia de relación entre P y Si, que aún no está aclarada, y que se ha estudiado en el sentido efecto de los silicatos sobre el P, pero no en sentido inverso, en el que la relación es aún menos conocida.

### Hierro

Se presentó mayor acumulación de Fe en tejido radical en Quilichao; en Villavicencio ocurrió lo contrario (Cuadros 1-4).

SA3 acumuló menor cantidad de Fe en todos los casos, pero con significancia estadística sólo en tejido

aéreo en Quilichao, coincidiendo con lo indicado por Foy et al (1978) quienes indican que los genotipos tolerantes a la acidez del suelo acumulan menores cantidades de hierro.

No se observó relación consistente entre la acumulación de Fe y la saturación de Al, con excepción de tejido aéreo en Villavicencio, aunque siempre al incrementar la saturación de Al del 50 al 65%, la acumulación de Fe también aumentó. Estos resultados concuerdan con lo descrito por Clark (1977), para maíz, quien observó que a bajos niveles de concentración de Al, la concentración de Fe en las hojas decreció, mientras que a altas concentraciones de Al, los niveles de Fe aumentaron principalmente en genotipos susceptibles, al tiempo que la concentración en genotipos tolerantes puede no variar. Esto se explica debido a que al aumentar la saturación de Al, se incrementa directamente la acidez intercambiable del suelo, favoreciendo la actividad del hierro en su forma libre  $Fe^{+3}$  que fácilmente se reduce a la forma aprovechable  $Fe^{+2}$ , lo que genera la absorción y acumulación por las plantas.

El análisis de variancia no detectó significancia estadística para la saturación de Al del suelo, indicando que los genotipos exhibieron respuesta de tipo lineal, no significativa a estos tratamientos, con excepción del tejido aéreo en Villavicencio donde presentó alta significancia.

**CUADRO 3. Concentración media de elementos minerales en tejido aéreo (hojas y tallos) de dos genotipos de maíz sometidos a tratamientos de aluminio y fósforo en suelos de Villavicencio, Colombia**

TRATAMIENTOS	CONCENTRACION DE ELEMENTOS MINERALES (µg/g)							
	P	K	Ca	Mg	Si	Fe	Mn	Al
TUXPEÑO	2860	54300	3830	2700	92920	2748	94	5044
SA3	3060	60470	4170	2860	90630	2529	95	4378
DMS (C.05)	174	2960	241	178	15633	401	6	716
0 kg/ha P	2180	51680	3850	2820	101000	3012	99	5507
40 kg/ha P	2850	56490	3900	2760	96090	2732	95	4601
80 kg/ha P	3230	60880	4050	2630	90160	2569	89	4672
120 kg/ha P	3590	60500	4220	2930	79870	2242	95	4065
Respuesta/DMS	2/245	3/4160	2/301	3/251	2/21990	2/565	1/8	2/1007
65% Sat. Al	2700	51110	4080	2240	112700	3280	117	5944
50% Sat. Al	3080	60020	3960	3060	93940	2626	86	4715
35% Sat. Al	3110	61040	4000	3060	68720	2011	80	3476
Respuesta/DMS	2/583	3/9491	1/331	4/298	2/21632	2/589	2/17	2/1300

Respuestas: 1. Ausencia de respuesta; 2. Respuesta lineal común para Tuxpeño y SA3; 3. Respuesta lineal diferencial para Tuxpeño y SA3; 4. Respuesta lineal diferencial y cuadrática común para Tuxpeño y SA3; 5. Respuestas lineal y cuadrática común

**CUADRO 4. Concentración media de elementos minerales en tejido aéreo (hojas y tallos) de dos genotipos de maíz sometidos a tratamientos de aluminio y fósforo en suelos de S. de Quilichao, Colombia**

TRATAMIENTOS	CONCENTRACION DE ELEMENTOS MINERALES ( $\mu\text{g/g}$ )							
	P	K	Ca	Mg	Si	Fe	Mn	Al
TUXPEÑO	2930	54030	4590	3490	59940	3066	226	7195
SA3	3000	60310	4660	3390	48730	1911	194	4418
DMS (0.05)	310	3062	312	300	13074	880	23	2093
0 kg/ha P	2130	52840	4630	3680	61930	2661	221	6448
20 kg/ha P	2770	56470	4530	3320	50170	2060	203	4659
40 kg/ha P	3380	60380	4440	3330	50020	2664	194	6108
60 kg/ha P	3550	59000	4900	3440	55230	2568	222	6011
Respuesta/DMS	2/439	2/4330	3/441	1/425	1/18489	1/1244	1/32	1/2960
65% Sat. Al	2710	50360	4740	2780	63230	2664	266	6462
50% Sat. Al	2880	61650	4210	3390	43730	2041	171	4745
35% Sat. Al	3290	59510	4930	4160	56060	2769	193	6213
Respuesta/DMS	2/372	6/3809	1/379	2/381	1/15429	1/2074	5/28	1/2563

Respuestas: 1. Ausencia de respuesta; 2. Respuesta lineal común para Tuxpeño y SA3; 3. Respuesta lineal diferencial para Tuxpeño y SA3; 4. Respuesta lineal diferencial y cuadrática común para Tuxpeño y SA3; 5. Respuestas lineal y cuadrática común

Para el factor Nivel de P en el suelo, no se detectó significancia estadística para ningún tipo de tejido y localidad. Solamente en tejido aéreo en Villavicencio se observó relación consistente entre acumulación de Fe y nivel de disponibilidad de P en el suelo, lo que sugiere que la adición de P no fue lo suficientemente alta para afectar la absorción de Fe, ya que a altos niveles de P en el suelo, se reduce la acumulación de micronutrientes en los tejidos. Los efectos antagónicos del P sobre el Fe son más pronunciados a pH alto, debido al efecto marcado del pH sobre la concentración, y especialmente sobre la disponibilidad de este elemento y otros micronutrientes (Benton Jones et al, 1991).

### Manganeso

Se observó mayor acumulación de Mn en tejido aéreo en Villavicencio, en Quilichao ocurrió lo contrario (Cuadros 1-4). En presencia de Al, la concentración de Mn puede decrecer en la parte superior de la planta y aumentar en las raíces, o decrecer tanto en follaje como en raíces y concentrarse en el tallo, dependiendo de la especie (Foy et al., 1978).

La Variedad SA3 tendió a acumular menor cantidad de Mn que Tuxpeño con significancia estadística en tejido radical en Villavicencio y tejido aéreo en Quilichao.

El factor saturación de Al, presentó significancia estadística en todos los casos, con excepción de tejido

radical en Quilichao. En los demás casos, se presentaron respuestas lineales y cuadráticas comunes para ambos genotipos.

Existió relación directa entre acumulación de Mn y saturación de Al, dependiente del pH del suelo y otros factores (tipo de suelo, relación Mn/Al, nivel de Si, K, N, entre otros), en todos los casos, con excepción del tejido radical en Quilichao. En general, la acumulación de Mn se incrementó cuando la saturación de Al se incrementó del 50 al 65%. Esta situación se puede explicar de igual forma que para el hierro. Por estas razones, los altos niveles de Al generalmente se asocian con altos niveles de Fe y Mn tanto en el suelo, como en la parte superior de la planta.

En todos los casos, el factor nivel de P no alcanzó significancia estadística, pero se detectó respuesta lineal importante en tejido radical en Villavicencio y de tipo cuadrático en tejido aéreo en Quilichao. En general, no se observó relación clara entre acumulación de Mn y disponibilidad de P en el suelo; aunque los genotipos tendieron a acumular mayor cantidad del elemento a menor nivel de P. Estos resultados concuerdan con lo descrito por Benton Jones et al. (1991), respecto a la relación entre P y Mn en suelos ácidos con pH menor de 5.0, donde al adicionar P al suelo disminuye la disponibilidad de Mn.

## Aluminio

Se presentó mayor acumulación de Al en tejido radical en ambas localidades, concordando con lo descrito en la literatura. Las raíces son el primer y principal sitio de acción del metal (Cuadros 1-4). La acumulación de Al en la parte aérea de la planta refleja un daño previo en las raíces, resultando en limitación y diferencias en la absorción y transporte de otros nutrientes como P, Ca, K, Mg, etc.

SA3 acumuló menor cantidad de Al en todos los casos, pero con significancia estadística sólo en tejido aéreo en Quilichao, lo que indica mayor translocación del aluminio acumulado en las raíces a la parte superior de la planta. De acuerdo con Foy et al. (1978), es menor la acumulación de Al en genotipos tolerantes a la acidez del suelo, asociada también con mayor acumulación de Mg, para maíz. La menor acumulación de Al por SA3 sugiere la presencia de mecanismos externos de tolerancia que limitaron la entrada a la planta; además, el mayor desarrollo observado en esta variedad puede ser indicativo de la acción de mecanismos internos de tolerancia, que actuaron reduciendo los efectos adversos del Al dentro de la planta, posiblemente, cuando los mecanismos externos dejaron de ser efectivos

ante las altas saturaciones de Al en el suelo permitiéndole mayor crecimiento.

El análisis de variancia para este factor, detectó significancia estadística solamente en Villavicencio, en ambos tipos de tejido, con tendencia lineal significativa.

Se observó relación relativamente consistente entre acumulación de Al y saturación del mismo elemento en el suelo en todos los casos, con tendencia a acumular mayor cantidad a mayor disponibilidad del elemento, especialmente cuando se incrementó la saturación de Al del 50 al 65%. El Al en el suelo ejerce efecto significativo sobre la cantidad del elemento que se acumula en la planta.

El análisis de variancia no detectó significancia estadística para el factor Nivel de P y su respuesta lineal, con excepción de tejido aéreo en Villavicencio. No se encontró relación consistente entre la acumulación de Al y la disponibilidad de P en el suelo, aunque se tendió a mayores niveles de acumulación del metal a menor nivel de P en el suelo, lo que es normal, debido a la relación antagónica entre estos dos elementos; uno de los efectos positivos de la aplicación de P a suelos ácidos es la reducción de los niveles de toxicidad por Al.

## BIBLIOGRAFIA

- BARCELO, J.; GUEVARA, P.; POSCHENRIEDER Ch. 1993. Silicon amelioration of aluminum toxicity in teosinte (*Zea mays* L. spp mexicana). *Plant and Soil*. 154: 249 - 255.
- BENTON JONES J, WOLF W, MILLES H.A. 1991. *Plant analysis Handbook*. Micro-Macro Publishing, Inc. U.S.A.
- CLARK R.B. 1977. Effect of aluminum on growth and mineral elements of Al-tolerant and Al-intolerant corn. *Plant and Soil*. 47: 653 - 662.
- 1983. Plant genotype differences in uptake, translocation, accumulation, and use of mineral elements required for plant growth. *Plant and Soil*. 72: 175 - 196.
- DUQUE-VARGAS J, PANDEY S, GRANADOS G, CEBALLOS H and KNAPP E. Inheritance of tolerance to soil acidity in tropical maize. *Crop Sci*. 34:50-54.
- FOY C.D, CHANEY R.L, WHITE M.C. 1978. The physiology of metal toxicity in plants. *Ann. Rev. Plant Physiol*. 29: 511- 566.
- GRANADOS G, PANDEY S, CEBALLOS H, DUQUE J, LEON L.A, VARGAS J.E TORRES G, and NAVAS A. 1995. ICA Sikuaní V110. Primera variedad de maíz en Colombia tolerante a suelos ácidos. Memorias de la III Reunión Latinoamericana y XVI Reunión de la zona andina de investigadores en maíz. Cochabamba-Santa Cruz. Bolivia. 1995. T. I p. 195-217.
- NARRO L, PANDEY S, PEREZ J.C and SALAZAR F. 1995. Investigación de Maíz para suelos ácidos realizada por el Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y trigo. IV Taller Agropastoral para suelos ácidos de las sabanas. Bolivia. Septiembre 25-29. p. 47-64.
- PANDEY, S and GARDNER C.O. 1992. Recurrent selection for population variety and hybrid improvement in tropical maize. *Advances in agronomy*. Vol. 48. 87p.
- ROY A.K, SHARMA A, TALUKDER G. 1988. Some aspects of aluminum toxicity in plants. *Bot. Rev*. Vol. 54: 145 - 178. April - June.
- TAYLOR, G.J. 1995. Overcoming barriers to understanding the cellular basis of aluminum toxicity in roots. In: WRIGHT, R.J., BALIGAR, V.C.; MURRMAN, R.P. (eds). *Plant soil Interactions at low pH*. Dodrecht : Kluwer. p. 255-269.
- URREA, R.; CEBALLOS H, PANDEY S, BAHIA F AFC and LEON L.A. 1996. A greenhouse Screening for acid soil tolerance in maize. *Agron JI*. Vol. 88 July-August.
- UEXKULL, H.R. VON y MUTERT, E. 1995. Global extent, development and economic impact of acid soil. In: WRIGHT, R.J.; BALIGAR, V.C.; MURRMAN, R.P. (eds). *Plant soil Interactions at low pH*. Dodrecht: Kluwer. p. 5-19.