Fertilidad y extracción de nutrientes en la asociación maíz-pastos en suelos ácidos del piedemonte Llanero de Colombia

Fertility and extraction of nutrients in corn-grass association in acid soils of the Piedemont Plains of Colombia

Álvaro Rincón[1] y Gustavo A. Ligarreto[2]

RESUMEN

En un oxisol del Centro de Investigaciones La Libertad de Corpoica, a 17 km de Villavicencio, se estableció la asociación de maíz con los pastos *B. decumbens*, Mulato 1 y Toledo, como medio para recobrar la productividad de una pradera degradada. Los minerales aplicados 45 días antes de la siembra fueron: Ca, 555 kg·ha^{-1}; Mg, 88 kg·ha^{-1}; P, 35 kg·ha^{-1} y S, 45 kg·ha^{-1}, utilizando como fuente cal dolomítica, roca fosfórica y yeso agrícola; al momento de la siembra se aplicaron: 31 kg·ha^{-1} de P, 27 de N (fuente fosfato diamónico); 37,5 de K (fuente cloruro de potasio); 3 de Zn; 0,1 de Cu; 0,5 de B y 1,2 de S (fuente borozinco). A los 15 después de la siembra (dds) se aplicaron 37,5 kg·ha^{-1} de K. La aplicación de N se fraccionó en dosis de 100 y 200 kg·ha^{-1} a los 15 y 35 dds, respectivamente. Los análisis de suelos realizados después de la cosecha del maíz demostraron un mejoramiento de la fertilidad, ya que la saturación de bases aumentó de 24% inicial a 47%, el P disponible pasó de 2 ppm a 11,8 ppm, el S aumentó de 3 ppm a 6 ppm. En el momento de la cosecha, la mayor extracción de N fue la hicieron el grano de maíz y los pastos (43 y 45 kg·ha^{-1}, respectivamente), mientras que el P se presentó en mayor concentración en el grano de maíz (12,7 kg·ha^{-1}). Los pastos y la soca de maíz (tallos y hojas después de la cosecha) se caracterizaron por un mayor contenido de K (40 y 27 kg·ha^{-1}, respectivamente). El Ca, Mg y S fueron más extraídos por los pastos (9; 8 y 6 kg·ha^{-1}, respectivamente); los minerales extraídos en mayor cantidad por el maíz y los pastos fueron N (91%), P (57%) y K (58%), mientras que los de menor extracción fueron Ca (2,2%) y Mg (16%).

Palabras clave: cultivos asociados, minerales, forraje, producción, pradera degradada.

ABSTRACT

In an oxisol of the Research Center La Libertad of Corpoica located at 17 km of Villavicencio, the corn association with grass *B. decumbens*, 'Mulato 1', and average 'Toledo' was established for recovering the productivity of degraded grassland. The minerals applied in kg·ha^{-1} at 45 day before sowing time by hectare were 55 Ca, 88 Mg, 35 P, and 45 S using as a source dolomite lime, phosphoric rock and agricultural gypsum. At the sowing time, it was applied 31 P, 27 N (source diamonic phosphate), 37.5 K (source potassium chloride), 3 Zn; 0,1 Cu; 0,5 B and 1,2 S (source boronzinc). Up to the 15 day after sowing time (das) it was applied 37,5 K. Nitrogen was applied in dose of 100 and 200 kg·ha^{-1} at 15 and 35 das. The soil analyses realized after the crop of corn demonstrated an improvement of fertility because the saturation of bases increased from 24% initial to 47%, available phosphorus increased from 2 to 11.8 ppm and sulfur increased from 3 to 6 ppm. In the moment of harvest, the highest extraction of N was carried out by corn grain and grass with 43 and 45 kg·ha^{-1} respectively, whereas P appeared in highest concentration in corn grain with 12.7 kg·ha^{-1}. The grass and *soca* of corn (stems and leaves after the harvest) were characterized having the highest content of K with 40 and 27 kg.ha^{-1}, respectively. Ca, Mg and S were more extracted by the grass with 9, 8 and 6 kg·ha^{-1}, respectively. The highest extraction of minerals by the corn and grass were the N, P and K with 91, 57 and 58%, respectively, whereas those of smaller extraction were Ca with 2.2% and Mg with 16%.

Key words: associated cultures, minerals, forage, production, degraded grassland.

Introducción

Los oxisoles ocupan los paisajes fisiográficos de mayor extensión en la región colombiana de Llanos Orientales y tienen gran importancia actual y futura para el desarrollo de su economía. En las últimas décadas estos suelos han sido objeto de estudio, lo que ha contribuido al conocimiento de su génesis y de sus características para dar un mejor manejo y optimizar su productividad (Mejía, 1996; Botero *et al*., 1982)

Las praderas introducidas en los Llanos están constituidas principalmente por la gramínea *Brachiaria decumbens*, que ha contribuido al desarrollo de una ganadería más productiva; no obstante, en la actualidad la producción animal es baja, como consecuencia de la degradación de

Fecha de recepción: febrero 13 de 2008. Aceptado para publicación: julio 10 de 2008

[1] Investigador, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), Centro de Investigaciones La Libertad, Villavicencio (Colombia). aricon@corpoica.com.co

[2] Profesor asociado, Facultad de Agronomía, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. galigarretom@unal.edu.co

AGRONOMIA 26-2 -PROFE194).indd 322 06/10/2008 19:41:26

praderas ocasionada por varios factores, entre los que sobresale la falta de fertilización en el establecimiento y el mantenimiento de las praderas (Rincón, 2006). En los Llanos Orientales colombianos se estima que, de 1'800.000 ha en pastos introducidos, 1'000.000 ha se encuentran en proceso de degradación; en donde se están dejando de producir 154.000 t de carne al año, que equivalen a 342.000 novillos con un peso promedio de 450 kg por animal (Rincón, 2006).

La integración de la agricultura y la ganadería trae beneficios económicos al productor con el aumento de la productividad de los cultivos y el establecimiento de praderas en óptimas condiciones para la producción de carne y/o leche (Corpoica, 2005; Pereira *et al.*, 2003). El pasto se beneficia de la utilización de fertilizantes y correctivos en las actividades agrícolas; los residuos de los nutrientes utilizados podrán permanecer en el suelo, contribuyendo al mejoramiento de su fertilidad, cuyos efectos en el aumento de la producción de forraje se aprecian sólo en los primeros años de pastoreo. Por tal razón, es necesario determinar la capacidad de extracción de minerales por parte del cultivo de maíz y de los pastos y el flujo de nutrientes entre suelo y planta, para determinar la residualidad de los minerales que beneficiará la productividad de las pasturas después de cosechado el maíz, tema del que trata el presente trabajo.

TABLA 1. Características químicas del suelo en el sitio experimental en el piedemonte Llanero. Centro de Investigaciones La Libertad, Corpoica, Villavicencio (Colombia).

Parámetro	Valor
pH	4,4
MO (%)	2,2
P (ppm)	1,0
Ca (meq·100 g^{-1})	0,37
Mg (meq·100 g^{-1})	0,11
K (meq·100 g^{-1})	0,10
Na (meq·100 g^{-1})	0,26
Al (meq·100 g^{-1})	2,1
Fe (ppm)	126
B (ppm)	0,15
Cu (ppm)	0,8
Zn (ppm)	0,5
CIC efectiva (meq·100 g^{-1})	3,44
Saturación de bases	24,7
Saturación de Al	71,7
Saturación de Ca	12,5
Saturación de Mg	3,7
Saturación de K	3,36

MO, materia orgánica; CIC, capacidad de intercambio catiónico

Materiales y métodos

El experimento se desarrolló entre agosto y diciembre de 2004 en un Oxisol de terraza media del Centro de Investigaciones La Libertad, de la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Corpoica), ubicado en el municipio de Villavicencio (Meta, Colombia) y localizado a 9° 6' de latitud norte y 73° 34' de longitud oeste y a 330 msnm; la precipitación anual promedia ha sido de 2.900 mm, el promedio de temperatura es de 26 °C y la humedad relativa de 85% en la época lluviosa y de 65% en la época seca. Los suelos son muy fuertemente ácidos (pH 4,4), como lo evidenció el sitio donde se estableció el experimento con una saturación de aluminio (Al) de 71,7%, mientras que la saturación de bases fue 24,7% (tabla 1). Los nutrientes más deficientes fueron el fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y azufre (S). La materia orgánica de 2,2%, teóricamente aportaría 57 kg·ha^{-1}· $año^{-1}$ de nitrógeno (N) para la nutrición de las plantas, teniendo en cuenta una densidad aparente del suelo de 1,3 g·mL^{-1}.

En una pradera degradada se estableció en forma simultánea el cultivo de maíz híbrido 'Master' en asociación con los pastos híbrido de *Brachiaria* cv. 'Mulato 1', *B. brizantha* cv. 'Toledo' y *B. decumbens*. Los tratamientos que se evaluaron fueron: maíz en asocio con el híbrido de *Brachiaria* cv. 'Mulato 1' + 100 kg de N; maíz en asocio con el híbrido de *Brachiaria* cv. 'Mulato 1' + 200 kg de N; maíz en asocio con el híbrido de *B. brizantha* cv. 'Toledo' + 100 kg de N; maíz en asocio con el híbrido de *B. brizantha* cv. 'Toledo' + 200 kg de N; maíz en asocio con *B. decumbens* + 100 kg de N; maíz en asocio con *B. decumbens* + 200 kg de N. Estos tratamientos se distribuyeron en bloques completos al azar en arreglo de parcelas divididas con tres repeticiones, donde la parcela principal fue la gramínea forrajera (área de 3 ha) y la subparcela, los niveles de N (1 ha).

La labranza se inició con cincel rígido y posteriormente se aplicó una mezcla de cal dolomítica, roca fosfórica (30% Ca y 10% Mg) y yeso agrícola (25% Ca y 15% S) por medio de una encaladora y luego se incorporó con un pase de rastra (45 días antes de la siembra), para reducir la saturación de Al y corregir las deficiencias de estos suelos en Ca, P, Mg y S. Las cantidades de enmiendas y fertilizantes utilizados estuvieron de acuerdo con el análisis de suelos y los requerimientos de bases intercambiables del maíz (50%) para obtener un buen desarrollo y producción de grano.

AGRONOMIA 26-2 -PROFE194).indd 323 06/10/2008 19:41:26

Se aplicaron 1.500 kg·ha^{-1} de cal dolomítica, 400 kg·ha^{-1} de roca fosfórica, 300 kg·ha^{-1} de yeso agrícola, 150 kg·ha^{-1} de fosfato diamónico (DAP), 150 kg·ha^{-1} de cloruro de potasio y 20 kg·ha^{-1} de borozinco, como fuente de zinc, cobre y boro. La única fuente de variación en fertilidad fue el nivel de N aplicado (100 y 200 kg·ha^{-1}). La fertilización nitrogenada se aplicó en forma fraccionada a los 15 y 35 dds, en partes iguales. En el momento de la siembra se les aplicó a todos los tratamientos 27 kg·ha^{-1} de N contenidos en los 150 kg·ha^{-1} de DAP.

El maíz se estableció con una densidad de siembra de 22 kg·ha^{-1}, en surcos separados 80 cm, con 5-6 plantas por metro lineal, con ayuda de una máquina sembradora-abonadora que depositó la semilla a una profundidad promedia de 3 cm y el fertilizante de establecimiento (N + P + K + Zn + Cu + B) en el mismo surco del maíz, a una profundidad promedia de 5 cm. Las gramíneas forrajeras se sembraron inmediatamente después de realizada la siembra del maíz, con otra sembradora, en surcos separados a 50 cm con una densidad de siembra de 4 kg·ha^{-1}, en sentido perpendicular a la siembra del maíz.

Se realizaron evaluaciones de características químicas de los suelos antes de iniciar los tratamientos y al momento de la cosecha del maíz, evaluándose además por espectrofotometría el contenido de minerales en el grano, en la soca del maíz y en el forraje de los pastos. La determinación de la acidez intercambiable se realizó por extracción con KCl 1 N, titulación con HCl y NaOH 0,01N por el método de Yuan; la materia orgánica por el método de Walkley-Black; el P en el suelo por Bray II; el Ca, Mg y K por extracción con acetato de amonio y determinación por absorción atómica; el Fe, Mn, Zn, Cu y B por extracción con doble ácido (H_2S0_4, HCl) y determinación por el método de Carolina del Norte y el P, K, Ca, Mg y S en forraje por espectrofotometría.

La información obtenida fse analizó con el paquete estadístico SAS. Los resultados se sometieron a análisis de varianza para determinar la significancia, y la comparación de medias se determinó mediante la prueba de Tukey.

Resultados y discusión

Características químicas de los suelos después de la cosecha del maíz

Las características químicas de los suelos (tabla 2) incluyen los contenidos de elementos mayores y menores en el suelo inmediatamente después de cosechado el maíz (5 meses después de la siembra), bajo los diferentes tratamientos en la asociación de maíz con los pastos *B. decumbens*, 'Mulato 1' y 'Toledo' y con 100 y 200 kg·ha^{-1} de N. Los datos obtenidos revelan que al momento de la cosecha del maíz no se presentaron diferencias significativas (P>0,05) en los contenidos de minerales de los suelos en los que se establecieron las asociaciones con los tres pastos ni en los niveles de N aplicados. En 100 g de suelo, el contenido de Al fluctuó entre 1,10 y 1,40 meq, el de Ca estuvo en un promedio de 1,14 meq, el de Mg en 0,22 meq y el de K en 0,08 meq. El contenido de Na fue superior al de K en todos los tratamientos, en tanto que la materia orgánica presentó un incremento al pasar de 2,2% a 2,6%.

Al hacer un análisis comparativo del contenido de cationes del suelo sin intervenir (antes de la siembra de las asociaciones del maíz con los pastos) con el contenido al momento de la cosecha del maíz, se pueden ver los cambios sucedidos durante este tiempo con el establecimiento de la asociación maíz-pastos. El contenido de Al en el suelo presentó una reducción importante por efecto de las enmiendas aplicadas antes de la siembra, al pasar de 2,13 meq a 1,25 meq en el momento de la cosecha del maíz (figura 1); esta reducción del Al en el suelo se debió posiblemente a la acción del Ca de la roca fosfórica y del yeso agrícola que desplazó al Al de los sitios de intercambio catiónico de las arcillas, para luego formar compuestos con el fosfato y el sulfato que se movilizan a capas profundas del suelo (Plaster, 2005; Potash and Phosphate Institute, 1997; Guerrero, 1993).

El Ca, que antes de aplicar las enmiendas presentó un contenido de 0,37 meq·100 g^{-1} de suelo, aumentó a 1,14 meq después de la cosecha del maíz. En las enmiendas aplicadas antes de la siembra, se suministro al suelo 555 kg·ha^{-1} de Ca, entrando una porción a formar parte de los cationes en el complejo de cambio de las arcillas y otra a formar tal vez compuestos con aniones que van a las capas más profundas del suelo. De acuerdo a los análisis, después de la cosecha del maíz en el suelo se encontraron 0,77 meq·100 g^{-1} de Ca

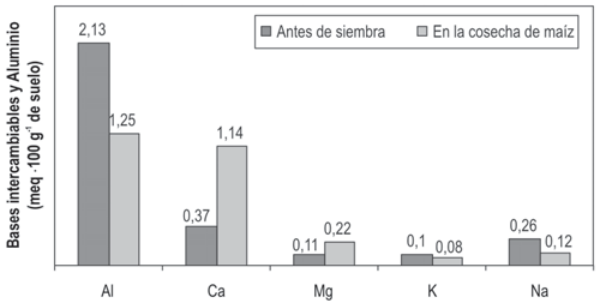

FIGURA 1. Contenido de bases intercambiables y aluminio antes de la siembra y al momento de la cosecha del maíz en suelos establecidos con la asociación maíz-pastos. Centro de Investigaciones La Libertad, Corpoica, Villavicencio (Colombia).

AGRONOMIA 26-2 -PROFE194).indd 324 06/10/2008 19:41:27

TABLA 2. Características químicas de los suelos establecidos con la asociación maíz-pastos al momento de la cosecha del maíz. Centro de Investigaciones La Libertad, Corpoica, Villavicencio (Colombia).

Pasto asociado	pH	MO	C	P	Acl	Al	Ca	Mg	K	Na	CIC	S	Fe	B	Cu	Mn	Zn
		%		ppm	meq·100 g^{-1} de suelo							ppm					
B. decumbens	4,7	2,60	1,53	8,60	1,88	1,40	1,05	0,25	0,07	0,14	3,40	6,00	70,80	0,29	0,58	6,10	1,00
'Mulato 1'	4,8	2,70	1,55	12,50	1,80	1,26	1,15	0,19	0,10	0,11	3,30	6,50	65,10	0,35	0,53	6,00	1,28
'Toledo'	4,8	2,50	1,46	14,50	1,50	1,10	1,21	0,22	0,07	0,12	3,10	5,60	70,80	0,31	0,63	7,30	1,60
Promedio	4,77	2,60	1,51	11,87	1,73	1,25	1,14	0,22	0,08	0,12	3,27	6,03	68,90	0,32	0,58	6,47	1,29
Nitrógeno adicionado																	
100 kg·ha^{-1}	4,7	2,60	1,52	11,5	1,75	1,26	1,12	0,22	0,08	0,13	3,3	6	71,2	0,31	0,6	7	1,38
200 kg·ha^{-1}	4,8	2,58	1,51	12,2	1,7	1,24	1,15	0,22	0,08	0,13	3,3	6,1	66,6	0,32	0,56	6	1,23
Significancia	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Promedio	4,75	2,59	1,51	11,85	1,73	1,25	1,14	0,22	0,08	0,13	3,3	6,05	68,9	0,315	0,58	6,5	1,30
CV (%)	1,9	14,6	13,6	23,7	17,5	17,3	22,8	26,7	17,0	25,1	5,3	18,2	18,3	39,0	22,1	25,1	34,0

MO, materia orgánica; Acl, acidez intercambiable; CIC, capacidad de intercambio catiónico, CV, coeficiente de variación; ns, diferencias no significativas, según la prueba de Tukey ($P > 0,05$).

en el suelo, más de lo que originalmente se encontró antes de aplicar las enmiendas 308 kg·ha^{-1}).

El Mg en el suelo era de 0,11 meq·100 g^{-1} de suelo y se duplicó con las enmiendas aplicadas antes de la siembra, pues se aumentó a 0,22 meq al momento de la cosecha del maíz. El Mg aplicado como cal dolomítica fue de 88 kg·ha^{-1}; sin embargo, por la menor fuerza relativa de enlace y menor número de iones de Mg en el suelo con respecto al Ca (Plaster, 2005), la disponibilidad de Mg en el suelo después de la cosecha de maíz fue de 53 kg·ha^{-1}.

El K fue el mineral que más disminuyó en el suelo, ya que antes de iniciarse el establecimiento del experimento se encontraba en 0,10 meq y al momento de la cosecha del maíz se redujo a 0,08 meq. En la fertilización se aplicaron 75 kg·ha^{-1} de K, con cloruro de K como fuente.

El Na, mineral considerado como no esencial en el desarrollo de las plantas, también presentó una reducción alta en el suelo, ya que de 0,26 meq pasó a 0,12 meq. El K y Na son cationes que se retienen en las arcillas con menos fuerza que el Ca y el Mg, y, debido a la cantidad de cal aplicada, estos últimos pudieron desplazar a los primeros (Mendes *et al*., 2004).

De acuerdo con estos cambios en la concentración de cationes en el suelo, la saturación de bases se aumentó de 24,7% antes de aplicar las enmiendas a 55,5% al momento de la cosecha del maíz, mientras que la saturación de Al se redujo de 71,7% a 44,5%, la de Ca se aumentó en más de tres veces y la de Mg se duplicó (tabla 3), brindando las condiciones de saturación de bases adecuadas para el desarrollo de pastos exigentes como el 'Mulato 1' y el 'Toledo', con excepción del K, nutriente que es necesario suministrar con la fertilización de mantenimiento. El K fue el único nutriente que no aumentó su contenido en el suelo con el establecimiento de la asociación maíz-pastos, sin embargo es conocida la buena capacidad de restitución de K en los suelos de los Llanos Orientales por su presencia en las arcillas vermiculita e illita, que lo liberan en forma aprovechable por las plantas (Dávila *et al*., 1998). Esto hace que aun las pequeñas cantidades presentes en estas arcillas tengan un efecto relevante en la dinámica del elemento y que en muchos casos las respuestas erráticas a la fertilización potásica de varias especies agrícolas de los Llanos Orientales y del piedemonte Llanero tengan tal vez respuestas de este tipo de mecanismo, lo que obliga a redefinir cuáles son las mejores temporadas estacionales de aplicación de este nutriente, su dosis y forma de aplicación, de modo que la fijación no sea tan alta (Dávila *et al*., 1998). La capacidad de restitución de K por estos suelos también fue comprobada por Salamanca *et al.* (1999) al no obtener respuesta a la aplicación de K en el cultivo de soya, a pesar de su bajo contenido en el suelo (0,10 meq): la producción de grano de soya no se incrementó, aunque el contenido de

AGRONOMIA 26-2 -PROFE194).indd 325 06/10/2008 19:41:28

este elemento en el grano aumentó entre 1,9% y 3,4% con la aplicación de 25 y 50 kg·ha^{-1}, respectivamente.

El P fue uno de los minerales con mayor incremento, al pasar de 1 ppm antes de la siembra a 11,9 ppm después de la cosecha del maíz. Los fertilizantes fosfatados que se utilizaron en el cultivo fueron DAP y roca fosfórica, más efectiva cuando los suelos presentan alta acidez y bajos contenidos de P y Ca. Sin embargo, se ha comprobado la mayor efectividad de fertilizantes solubles fosfatados, como el DAP y el superfosfato triple, en el cultivo de maíz (Hammond, 1982). A diferencia de los nutrimentos móviles, el P permanece disponible por largos periodos de tiempo cerca del sitio donde se aplicó, de modo que los pastos establecidos en asociación con maíz tendrán el P requerido después de su establecimiento (CIAT, 1986).

Como ocurre en la mayoría de oxisoles, el hierro (Fe) fue el micronutriente que presentó mayor contenido a los 5 meses (68,9 ppm), sin embargo, el contenido se redujo con respecto al contenido inicial, que fue de 126 ppm. El B, Cu y Zn continuaron siendo deficientes después de la cosecha del maíz, con 0,32; 0,58 y 1,29 ppm, respectivamente (figura 2), considerando que los contenidos adecuados en estos suelos debe ser, respectivamente, de 0,6; 3,0 y 4,0 ppm. El manganeso (Mn), con un promedio de 6,5 ppm a los 5 meses, se encontró en un nivel cercano al normal, que es de 10 ppm, y el S, que es un nutriente importante para la síntesis de algunas proteínas, se encontró en un nivel de 6,0 ppm antes del pastoreo, valor inferior al requerimiento de las plantas, que es de 15 ppm (Salinas, 1989).

Contenido de minerales en el grano de maíz

TABLA 3. Saturación de bases intercambiables en el suelo antes de la labranza y al momento de la cosecha del maíz. Centro de Investigaciones La Libertad, Corpoica, Villavicencio (Colombia).

Característica	Saturación de bases intercambiables (%)	
	Antes de labranza	Después de cosecha de maíz
CIC	3,44	3,27
Saturación de bases	24,7	55,5
Saturación de Al	71,7	44,5
Saturación de Ca	12,5	40,6
Saturación de Mg	3,7	7,8
Saturación de K	3,36	2,8

CIC, capacidad de intercambio catiónico

En los análisis realizados no se presentaron diferencias significativas en el contenido de minerales en el grano de maíz, cuando este cultivo estuvo asociado con los tres tipos de pastos ni entre los dos niveles de N evaluados (tabla 4). El grano de maíz presentó mayor contenido de N (1,1%) con respecto a los otros minerales analizados, seguido por el K (0,54%) y el P (0,31%). El Ca fue el elemento de menor contenido en el grano, con sólo 0,021% seguido por el Mg y S, con 0,11% y 0,12%, respectivamente.

Contenido de minerales en la soca de maíz

En la soca del maíz (tallos y hojas de la planta después de cosechado el grano), el contenido de K fue de 0,81% en el tratamiento en el que este cultivo estuvo asociado con *B. decumbens*, seguido por la asociación con pasto 'Toledo' y pasto 'Mulato 1', con 0,73% y 0,66%, respectivamente. De todos los minerales evaluados, el K fue el de mayor contenido en las socas del maíz, con un promedio de 0,73%, en tanto que el P se presentó en cantidades muy bajas, con sólo 0,017%. El Ca, Mg y S tampoco presentaron diferencias significativas, lo que los promedios obtenidos fueron de 0,14%, 0,15% y 0,097%, respectivamente. El N presente en estas socas fue el 50%, con relación al encontrado en el grano de maíz (tabla 5). Con respecto a los tratamientos con 100 y 200 kg·ha^{-1} de N, no se presentaron diferencias significativas (P>0,05), con excepción del contenido de K a favor obtenido con el tratamiento en el que se aplicaron 200 kg·ha^{-1} de N, que fue de 0,79%.

Contenido de minerales en los pastos

En el pasto 'Mulato 1' el contenido foliar de Ca y S fue superior significativamente (P<0,05), con 0,29% y 0,16%, respectivamente. Respecto a los otros minerales, el contenido fue similar en los tres pastos, con promedios de 1,08%, 0,13%, 0,95% y 0,19% para N, P, K y Mg, respectivamente. En las dosis de 100 y 200 kg·ha^{-1} de N aplicadas al maíz no se presentaron diferencias significativas (P>0,05) en el contenido de este elemento en las hojas del pasto, lo mismo que en los demás minerales, con excepción del Ca y S que, a la dosis de 200 kg·ha^{-1} de N, se presentaron en una proporción superior significativamente (P<0,05), con 0,24% y 0,15%, respectivamente (tabla 6).

En la figura 3 se presenta en forma comparativa la proporción de cada mineral en los componentes de la asociación maíz-pastos en el momento de la cosecha del maíz. El contenido de N en el grano de maíz y en las hojas del pasto fue de 1,10% y 1,08%, respectivamente; este valor, expresado en proteína cruda tanto en el grano como en el forraje, equivale a un 6,9%, aunque en la soca del maíz este nutrimento se presentó en concentraciones más bajas, de 0,49%. En cuanto al P, su contenido en la soca del maíz fue

AGRONOMIA 26-2 -PROFE194).indd 326 06/10/2008 19:41:28

de sólo 0,02%, en cambio en el grano del maíz fue de 0,36% y en el pasto de 0,14%. El mayor contenido de K se presentó en las hojas del pasto, con un promedio de 0,95%, seguido por la soca del maíz (0,73%) y por el grano de maíz (0,54%). En el mismo orden, el Ca fue mayor en el pasto (0,21%), seguido por la soca del maíz (0,14%) y el grano (0,021%). En las hojas de pasto también se presentó un mayor contenido de Mg, seguido por la soca y por el grano del maíz, cuyos valores fueron de 0,19%, 0,15% y 0,11%, respectivamente. El contenido de S fue mayor en el pasto y en el grano de maíz, con 0,14% y 0,12%, respectivamente, mientras que en la soca del maíz fue de 0,097%.

Extracción de minerales por el maíz y los pastos

La extracción de nutrientes del suelo por los pastos presentó algunas diferencias condicionadas a la especie y a la producción de biomasa. En el momento de la cosecha del maíz, la acumulación de masa seca de los pastos fue 4.463, 4.431 y 3.762 kg·ha^{-1} en pasto 'Toledo', pasto 'Mulato 1' y *B. decumbens*, respectivamente. De acuerdo con esta producción de forraje y el contenido de minerales en las hojas, en la tabla 7 se presenta la cantidad de nutrientes extraídos por cada especie de pasto. Los pastos 'Mulato 1' y 'Toledo', considerados como de mejor calidad y producción de forraje, fueron los de mayor extracción de nutrientes del suelo, especialmente el 'Mulato 1' que acumuló en sus hojas más Ca, Mg y S, con 12,8; 10,6 y 7 kg·ha^{-1}, respectivamente. Este pasto extrajo 50% más de Ca, 40% más de Mg y 25% más de S, con relación a lo extraído por el *B. decumbens*, especie bien adaptada a los suelos ácidos, que se caracterizó por la menor extracción de todos los nutrientes evaluados. Por su parte, el pasto 'Toledo' extrajo mayor cantidad de K y N, con 45 y 48 kg·ha^{-1}, respectivamente. En general, los nutrientes extraídos en mayor cantidad por los pastos fueron N y K, mientras los de menor extracción fueron P y S.

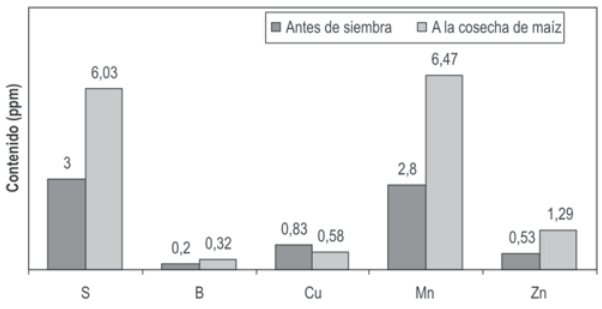

FIGURA 2. Contenido de microelementos antes de la siembra y al momento de la cosecha del maíz en suelos establecidos con la asociación maíz-pastos. Centro de Investigaciones La Libertad, Corpoica, Villavicencio (Colombia).

En la tabla 8 se hace un balance de los minerales en el sistema, teniendo en cuenta su contenido en el suelo y la extracción realizada por el maíz y los pastos. La disponibilidad total de N en el suelo para el desarrollo de la asociación maíz-pastos fue de 117 kg·ha^{-1} provenientes de la mineralización del 2,2% de la materia orgánica, que aportó 57 kg·ha^{-1} de N, y de la fertilización nitrogenada, que aportó 60 kg·ha^{-1}, considerando que con la dosis de 100 kg·ha^{-1} de N el 60% es aprovechado por la planta y otro 40% se pierde por volatilización o lixiviación (Salisbury y Ross, 1992; Orozco, 1999); con la dosis de 200 kg·ha^{-1} de N, la disponibilidad de este elemento fue de 120 kg·ha^{-1}. Con una producción promedia de 4.000 kg·ha^{-1} de grano de maíz, la extracción de N en el grano cosechado fue de 43,6 kg·ha^{-1}, y en los 3.782 kg·ha^{-1} de la soca del maíz fue de 17,5 kg·ha^{-1}, mientras que los pastos, con una producción promedia de 4.218 kg·ha^{-1} de forraje seco, obtuvieron del suelo 45,5 kg·ha^{-1} de N; de este modo, la extracción total de N por el maíz y por los pastos fue de 106 kg·ha^{-1}, cantidad que estaba disponible en el suelo y que fue aprovechada en su totalidad por los cultivos cuando fueron fertilizados con 100 kg·ha^{-1} de N. Con la dosis de 200 kg·ha^{-1}, las plantas dispusieron de más cantidad de N (164 kg·ha^{-1}), pero no fue aprovechado por ellas, como se pudo constatar al no existir diferencias significativas entre los contenidos de N en el grano y la soca de maíz y en los pastos. Las pérdidas de N son mayores cuando los niveles de fertilización son más altos, como lo pudieron comprobar Barbieri y Echeverría (2003), quienes determinaron las pérdidas de N-NH_3 al fertilizar una pastura de *Thinopirum ponticum* con 0; 90 y 180 kg·ha^{-1} de N utilizando como fuente la urea. Las pérdidas de N-NH_3 por volatilización fueron de 3; 14 y 63 kg·ha^{-1}, respectivamente, y ocurrieron en mayor proporción durante los primeros 7 días después de la fertilización. Un factor que favoreció la volatilización del N-NH_3 fue la alta humedad del suelo en el momento de la fertilización y la temperatura superior a 22 °C. La diferencia entre el N disponible en el suelo y el N extraído por el maíz y el pasto fue de 10 kg·ha^{-1}; sin embargo, en el análisis de suelos hecho después de cosechado el maíz se encontró un contenido de materia orgánica de 2,6%, la que permitiría una disponibilidad anual de N de 67,6 kg·ha^{-1} para la nutrición de los pastos bajo pastoreo.

La extracción total de P por el maíz y el pasto fue de 18,4 kg·ha^{-1}, de los cuales 70% fue tomado por el cultivo del maíz. El P disponible en el suelo para ser aprovechado por las plantas fue suministrado en la fertilización hecha al momento de la siembra con 150 kg de fosfato diamónico (DAP), que aportó 30 kg·ha^{-1} de P; además, el suelo en su fertilidad natural disponía de 2 kg·ha^{-1} de este nutriente. Antes de la siembra, también se aplicaron 50 kg·ha^{-1} de P,

AGRONOMIA 26-2 -PROFE194).indd 327 06/10/2008 19:41:29

TABLA 4. Contenido de minerales en el grano de maíz cultivado en asociación con tres pastos y dos niveles de nitrógeno. Centro de Investigaciones La Libertad, Corpoica, Villavicencio (Colombia).

Pasto asociado	N	P	K	Ca	Mg	S
			%			
B. decumbens	1,11	0,32	0,55	0,02	0,12	0,14
'Mulato 1'	1,04	0,27	0,54	0,021	0,11	0,11
'Toledo'	1,12	0,33	0,52	0,023	0,1	0,12
Significancia	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Promedio	1,09	0,31	0,54	0,021	0,11	0,12
Nitrógeno adicionado						
100 kg·ha^{-1}	1,07	0,29	0,52	0,021	0,11	0,12
200 kg·ha^{-1}	1,1	0,32	0,56	0,022	0,12	0,13
Significancia	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Promedio	1,08	0,30	0,54	0,021	0,115	0,12
CV (%)	6,2	15,4	5,2	26,6	21,2	8,4

CV, coeficiente de variación; ns, diferencias no significativas, según la prueba de Tukey ($P>0,05$).

TABLA 5. Contenido de minerales en la soca del maíz establecido en asociación con tres pastos y dos niveles de nitrógeno. Centro de Investigaciones La Libertad, Corpoica, Villavicencio (Colombia).

Pasto asociado	N	P	K	Ca	Mg	S
			%			
B. decumbens	0,43b*	0,020a	0,81a	0,14a	0,15a	0,096a
'Mulato 1'	0,43b	0,018a	0,66b	0,16a	0,15a	0,100a
'Toledo'	0,53a	0,015a	0,73ab	0,13a	0,15a	0,095a
Nitrógeno adicionado						
100 kg·ha^{-1}	0,46a	0,017a	0,67b	0,14a	0,15a	0,09a
200 kg·ha^{-1}	0,47a	0,017a	0,79a	0,14a	0,15a	0,10a
CV (%)	5,08	35,9	3,4	4,3	3,4	12,2

CV, coeficiente de variación
*Promedios con letras diferentes en la misma columna, difieren significativamente ($P<0,05$) según la prueba de Tukey.

TABLA 6. Contenido de minerales en las hojas de pastos establecidos en asociación con maíz, en el momento de la cosecha de éste. Centro de Investigaciones La Libertad, Corpoica, Villavicencio (Colombia).

Pasto asociado	N	P	K	Ca	Mg	S
			%			
B. decumbens	1,07a*	0,12a	0,96a	0,17b	0,17a	0,14ab
'Mulato 1'	1,08a	0,14a	0,87a	0,29a	0,24a	0,16a
'Toledo'	1,09a	0,13a	1,02a	0,19b	0,18a	0,13b
Nitrógeno adicionado						
100 kg·ha^{-1}	1,08a	0,13a	1,02a	0,20b	0,18a	0,14b
200 kg·ha^{-1}	1,08a	0,13a	0,87a	0,24a	0,22a	0,15a
CV (%)	9,5	24,2	21,0	15,0	29,8	5,3

CV, coeficiente de variación
*Promedios con letras diferentes en la misma columna, difieren significativamente ($P<0,05$) según la prueba de Tukey.

AGRONOMIA 26-2 -PROFE194).indd 328 06/10/2008 19:41:30

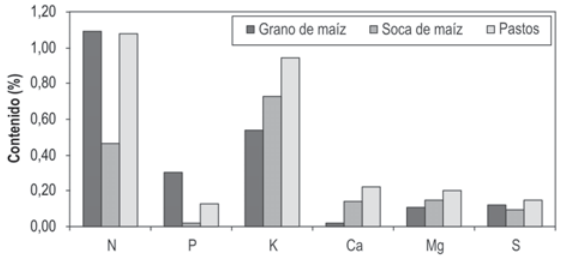

FIGURA 3. Contenido de minerales en el momento de la cosecha del maíz, en los componentes de la asociación maíz-pastos. Centro de Investigaciones La Libertad, Corpoica, Villavicencio (Colombia).

utilizando como fuente la roca fosfórica, que por su lenta liberación del P no pudo ser aprovechada por el maíz, pero es una fuente importante para la nutrición del pasto. De esta manera, en el suelo se tenía una disponibilidad de P de 32 kg·ha^{-1}, de los cuales el maíz y el pasto absorbieron el 57%. La diferencia entre el P disponible en el suelo y el P extraído por el maíz y el pasto fue de 14 kg·ha^{-1} y, según el análisis de suelos hecho después de cosechado el maíz, se encontraron 23,8 kg·ha^{-1} de P disponibles para el buen desarrollo de los pastos después de cosechado el maíz.

La disponibilidad natural de K en el suelo de 78 kg·ha^{-1} se aumentó con otros 75 kg·ha^{-1} aplicados al maíz en la fertilización con 150 kg·ha^{-1} de KCl; de este modo, la disponibilidad total de K para las plantas fue de 153 kg·ha^{-1}. El K extraído fue de 89,3 kg·ha^{-1}, de los cuales un 45% fue absorbido por el pasto. El K que quedó después de descontada la extracción hecha por los cultivos fue de 63,7 kg·ha^{-1}, cantidad similar a la encontrada en el análisis de suelos (62,4 kg·ha^{-1}). Considerando que este elemento es uno de los que más extraen los pastos, hay que considerar una fertilización de mantenimiento para evitar deficiencias que pueden afectar la producción de forraje.

El Ca fue el elemento de mayor contenido en el suelo, con 703 kg·ha^{-1}; gran parte de este mineral fue suministrado por la fertilización con cal dolomítica, roca fosfórica y yeso agrícola (555 kg·ha^{-1}), mientras que el suelo aportó otros 148 kg·ha^{-1}. Sin embargo, el Ca extraído por las plantas fue de sólo 15,5 kg·ha^{-1}, quedando una buena disponibilidad en el suelo para asegurar la producción de forraje. El Mg presentó una disponibilidad en el suelo de 114 kg·ha^{-1}, de los cuales 76% fue suministrado por la cal dolomítica. Las plantas de maíz absorbieron 10 kg·ha^{-1} y el pasto, 8,3 kg·ha^{-1}, para una extracción total de Mg de 18,4 kg·ha^{-1}. La diferencia entre el Mg inicialmente disponible en el suelo y el Mg extraído por los cultivos fue de 96 kg·ha^{-1}, que difiere bastante del valor encontrado en el análisis de suelos realizado después de cosechado en maíz (52,8 kg·ha^{-1}). El S aplicado con el yeso agrícola permitió una disponibilidad de 43 kg·ha^{-1} y el suelo aportó 6 kg·ha^{-1}; de este S disponible, las plantas extrajeron 14,7 kg·ha^{-1}, de modo que la diferencia entre el S disponible al inicio y el extraído por los cultivos fue de 34,3 kg·ha^{-1}, mientras que el S encontrado en el análisis de suelos fue de 12 kg·ha^{-1}.

Las diferencias encontradas con Ca, Mg y S entre lo que debería existir teóricamente en el suelo (diferencia entre disponibilidad y extracción) y lo que se encontró realmente según el análisis de suelos, puede ser explicado por la formación de compuestos de sulfato de Ca y Mg que tienen mayor movilidad en el perfil del suelo, llegando a capas más profundas, así como también por el anión sulfato del yeso agrícola que pudo movilizarse en el perfil del suelo (Gomes *et al*., 2001, Monteiro *et al*., 2004; Kaiser e Isselstein, 2005).

Conclusiones

Con el establecimiento de la asociación maíz-pastos para la renovación de praderas se mejoró la fertilidad de los suelos, brindándoles buenas condiciones de fertilidad para una buena producción de biomasa de pastos.

En el momento de la cosecha, la mayor extracción de N fue realizada por el grano de maíz y los pastos, mientras que el P se presentó en mayor concentración en el grano de maíz. Los pastos y la soca de maíz se caracterizaron por un mayor contenido de K, en tanto que el Ca, Mg y S fueron más extraídos por los pastos.

De los tres pastos evaluados, el 'Mulato 1' fue el que presentó un mayor contenido de minerales en las hojas,

TABLA 7. Extracción de minerales en los pastos establecidos en asociación con maíz. Centro de Investigaciones La Libertad, Corpoica, Villavicencio (Colombia).

Pasto asociado	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg·ha^{-1}					
B. decumbens	40,3	4,5	36,1	6,4	6,4	5,3
'Mulato 1'	47,9	6,2	38,5	12,8	10,6	7,1
'Toledo'	48,6	5,8	45,5	8,5	8,0	5,8

AGRONOMIA 26-2 -PROFE194).indd 329 06/10/2008 19:41:31

TABLA 8. Extracción de minerales del suelo por parte de la planta de maíz y de pasto establecidos en asociación, y cantidad disponible en el suelo hasta el momento de la cosecha del maíz. Centro de Investigaciones La Libertad, Corpoica, Villavicencio (Colombia).

Minerales en el suelo	N	P	K	Ca	Mg	S
	kg·ha^{-1}					
Aplicado en fertilización	100[1]	30[2]	75	555[3]	88[4]	43[5]
Fertilidad natural	57	2	78	148	26,4	6
Total	157[6]	32	153	703	114,4	49
Minerales extraídos						
Grano de maíz	43,60	12,27	21,47	0,85	4,40	4,93
Soca de maíz	17,52	0,67	27,73	5,42	5,67	3,67
Pasto	45,58	5,51	40,06	9,24	8,35	6,05
Total	106,7	18,4	89,3	15,5	18,4	14,7
Diferencia entre disponibilidad en el suelo y extracción	10,3	14,0	63,7	687,5	96,0	34,3
Minerales en el suelo después de cosecha de maíz (análisis de suelos)	67,6	23,8	62,4	456,0	52,8	12,0

[1] Los cálculos se realizaron con el tratamiento en el que se aplicaron 100 kg·ha^{-1} de N.
[2] Se tuvo en cuenta el P de rápida disponibilidad contenido en el fosfato diamónico; no se tuvo en cuenta el P aportado por la roca fosfórica, de lenta solubilidad y que sólo estaría disponible para los pastos.
[3] El Ca correspondió a: 399 kg·ha^{-1} provenientes de la cal dolomítica, 99,6 kg·ha^{-1} de la roca fosfórica y 55,5 kg·ha^{-1} del yeso agrícola. Este Ca, además de nutrir a la planta, tiene como función principal neutralizar al Al y mejorar la saturación de bases del suelo.
[4] El Mg es aportado por la cal dolomítica aplicada.
[5] El S es aportado por el yeso agrícola aplicado.
[6] De los 100 kg·ha^{-1} de N aplicados, se estima que 60% queda disponible para la planta.

siendo por consiguiente el que extrajo las cantidades más altas de P, Ca, Mg, K y S al momento de la cosecha del maíz.

Agradecimientos

Un agradecimiento especial al Instituto Colombiano para el Desarrollo de la Ciencia y la Tecnología Francisco José de Caldas (Colciencias) por la financiación de este trabajo de investigación, en el marco del proyecto "Potencial productivo y aspectos fisiológicos de los pastos tropicales bajo condiciones de manejo intensivo, como alternativa para recuperar praderas en suelos ácidos del piedemonte Llanero".

Literatura citada

Barbieri, P.A. y H.E. Echeverría. 2003. Evolución de las pérdidas de amoniaco desde la urea aplicada en otoño y primavera a una pastura de Agropiro alargado (*Thinopyrum ponticum*). RIA 32(1), 17-29.

Botero, P.J. y D. López. 1982. Los suelos de los Llanos Orientales. (Una visión general sintetizada). Suelos Ecuatoriales 12(2), 18-29.

CIAT [Centro Internacional de Agricultura Tropical]. 1986. Manejo de la fertilización fosfatada de pastos tropicales en suelos ácidos de América Latina. Guía de estudio para ser usada como complemento de la unidad audiotutorial sobre el mismo tema. Salinas J.G. y León L.A. (eds.). Cali (Colombia). 60 p.

Corpoica [Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria]. 2005. Recomendaciones básicas para cultivar maíz en sistemas de rotación en la altillanura plana colombiana. Pulido, S.X. y C.A. Jaramillo (eds.). Boletín divulgativo N° 14. Corpoica, Ministerio de Agicultura y Desarrollo Rural, Villavicencio (Colombia). 18 p.

Dávila, G., R. Guerrero y E. Rojas. 1998. Disponibilidad de K en algunos suelos palmeros de los Llanos Orientales de Colombia. Suelos Ecuatoriales 28, 71-80.

Gomes, D.M., L. Vilela, E. Lobato y W. Vieira. 2001. Uso de gesso, calcario e adobos para pastagens no Cerrado. Embrapa, Cerrados, Planaltina (Brasil). 22 p.

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

Hammond, L.L., L.A. León y G. Montes. 1982. Efecto inicial y residual de dos fuentes de P en los rendimientos de maíz (*Zea mays*) y caupí (*Vigna unguiculata*) en un suelo del Ciat Quilichao, deficiente en P. Suelos Ecuatoriales 12(1), 5-13.

Kayser, M. y J. Isselstein. 2005. Potassium cycling and losses in grassland system: a review. Grass Forage Sci. 60, 237-240.

Mejía, L. 1996. Génesis y características de los oxisoles y suelos óxicos de los Llanos Orientales de Colombia y su relación con la fertilidad. Suelos Ecuatoriales 26(1), 7-34.

AGRONOMIA 26-2 -PROFE194).indd 330 06/10/2008 19:41:31

Mendes, E.L., A.R. da Silva, F.A. Monteiro y L.R. de Andrade. 2004. Adubaçao potássica em forrajes. pp. 219-278. En: Silveira, C.G., J.C. de Moura y V.P. de Faria (eds.). Fertilidade do solo para pastagens productivas. Anais do 21° Simposio sobre manejo da pastagens. Fundación de Estudios Agrarios Luiz de Queiroz-FEALQ, Piracicaba (Brasil).

Monteiro, F.A., M.T. Colozza y J.C. Werner. 204. Enxofre e micronutrientes em pastagens. pp. 279-302. En: Silveira, C.G., J.C. de Moura y V.P. de Faria (eds.). Fertilidade do solo para pastagens productivas. Anais do 21° Simposio sobre manejo da pastagens. Fundación de Estudios Agrarios Luiz de Queiroz-FEALQ, Piracicaba (Brasil).

Orozco, F.H. 1999. Biología del nitrógeno, conceptos básicos sobre sus transformaciones biológicas. Universidad Nacional de Colombia, Medellín. 231 p.

Pereira de Oliveira, I. e Y.L. Pacheco. 2003. Implantaçao e conducto do Sistema Barreirao. pp. 267-302. En: Kluthcouski, J., L.F. Stone y H. Aidar (eds.). Integraçao lavoura-pecuaria. Embrapa, Arroz e feijao. San Antonio de Goias, Brasil.

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

Potash and Phosphate Institute. 1997. Manual internacional de fertilidad de suelos. Norcross, GA. 146 p.

Rincón, A. 2006. Factores de degradación y tecnología de recuperación de praderas en los Llanos Orientales de Colombia. Boletín técnico Nº 49. Corpoica, Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y Gobernación del Meta, Villavicencio (Colombia). 77 p.

Salamanca, C.R., J. Bernal, J.O. Argüello y E.F. Almansa. 1999. Dinámica del potasio en el cultivo de soya en oxisoles de la Orinoquia. Boletín técnico N° 14. Corpoica, Sena, Villavicencio (Colombia). 36 p.

Salinas, J.G. 1989. Fertilización de pastos en suelos ácidos de los trópicos. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali (Colombia). 215 p.

Salisbury, F.B. y C.W. Ross. 1992. Fisiología vegetal. Ed. Iberoamérica S.A., México. pp. 319-338.

AGRONOMIA 26-2 -PROFE194).indd 331 06/10/2008 19:41:32