

DISPONIBILIDAD DE POTASIO EN SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCÁNICAS Y SU RELACIÓN CON LA NUTRICIÓN DEL CAFÉ EN LA ETAPA VEGETATIVA

Martha Cecilia Henao-Toro* ; Eduardo Hernández-Guzmán**

RESUMEN

HENAO T., M.C.; HERNÁNDEZ G., E. Disponibilidad de potasio en suelos derivados de cenizas volcánicas y su relación con la nutrición del café en la etapa vegetativa. *Cenicafé* 53(4):293-305. 2002

En tres unidades de suelos de la zona cafetera colombiana (Chinchiná, Líbano y Timbío) se evaluó la relación entre la concentración de K foliar en café y los niveles de K intercambiable y K^+ en la solución del suelo, con el fin de conocer la disponibilidad del elemento para el cultivo en la fase vegetativa. También se estimó la capacidad de restitución de potasio del suelo. Se tomaron muestras de suelo a 20cm y de hojas del tercio inferior, en 50 parcelas de café de seis meses de edad. Se encontraron los niveles más bajos de K^+ en solución en la unidad Chinchiná en la localidad de Chinchiná ($<10\text{mg L}^{-1}$) y los más altos en las unidades Líbano y Timbío ($>25\text{mg L}^{-1}$). El K foliar correlacionó positivamente con el K^+ en solución y con el K intercambiable. El modelo de variación del K foliar presentó el mejor ajuste bajo una ecuación polinomial de segundo grado, siendo más alto el coeficiente de determinación obtenido con el K intercambiable ($R^2=0,83$) que con el K^+ en la solución ($R^2=0,73$). El rango máximo crítico fue de $0,88\text{cmol kg}^{-1}$ para K intercambiable y 73 mg L^{-1} para K^+ en la solución, por encima del cual no se acumula K en las hojas (2,6% en base seca). La unidad Chinchiná mostró la más baja capacidad de restitución concordando con síntomas de deficiencia en cultivos entre 12 y 18 meses o más jóvenes. Se sugiere replantar la fertilización en cuanto a la aplicación de potasio antes de los 24 meses de establecido el cultivo, en la unidad Chinchiná de la localidad de Chinchiná.

Palabras claves: Suelos, cenizas volcánicas, fertilidad, potasio, solución del suelo, poder tampón, café.

ABSTRACT

The relationship between potassium concentration in coffee leaves as well as levels of exchangeable potassium and K^+ in soil solution were evaluated to establish the availability of this element during the coffee crop vegetative phase. The soil potassium buffer capacity was also estimated through the linear equation slope that describes the relation between the exchangeable K and soil solution K^+ . Three soil units of the Colombian coffee zone were considered. In each locality, composite samples of the first 20 cm soil layer and samples of the fourth pair of leaves of the lower third in each of the 50 six-month-old coffee experimental plots were taken. The lowest levels of potassium in soil solution were found in Chinchiná ($<10\text{mg L}^{-1}$), and the highest in Líbano and Timbío ($>25\text{mg L}^{-1}$). The leaf potassium content was correlated with K^+ in soil solution and exchangeable K. The K variation model exhibited the best adjustment under a second-degree polynomial equation, with higher determination coefficients for the exchangeable K ($R_s=0.83$) than the soil solution K ($R_s=0.73$). There was a maximum level of the element in the soil (0.88cmolc kg^{-1} for exchangeable K and 73 mg L^{-1} for soil solution K^+), which corresponded to maximum accumulation in the leaves (2.6% of dry matter). Chinchiná soils showed the lowest potassium buffer capacity and leaf K contents. These results agree with the manifestation of potassium deficiency symptoms in some 12 to 18-month-old or younger coffee crops of this locality. Thus, it is necessary to reevaluate the recommendation of coffee fertilization in Chinchiná since currently potassium application is recommended 24 months after sowing.

Keywords: Soils, volcanic ashes, fertility, potassium, soil solution, buffer power, coffee.

* Asistente de Investigación. Química Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

** Investigador Científico II. Química Agrícola. Centro Nacional de Investigaciones de Café, Cenicafé. Chinchiná, Caldas, Colombia.

En la zona cafetera colombiana se recomienda la fertilización potásica al cultivo del café únicamente en la etapa productiva. La recomendación se basa en los niveles de K intercambiable determinados mediante extracción con acetato de amonio 1N a pH 7. Los cultivos establecidos en suelos con menos de 0,4; entre 0,4 y 0,6; entre 0,6 y 0,85 o con más de 0,85 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ de K intercambiable deben recibir respectivamente 320, 160, 60 ó 0kg de K_2O anuales por hectárea. Un nivel de 0,35 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ es considerado como deficiente para la adecuada nutrición potásica del cultivo (21). Además, se considera baja una concentración menor de 1,5% de K en el cuarto par de hojas de ramas productivas del tercio medio de la planta de café (20).

Para evaluar la necesidad de aplicar fertilizantes a los cultivos es importante conocer el estado nutritivo de la planta y la capacidad del suelo para suministrar los elementos que ella requiere. Los análisis de tejido vegetal y los análisis de suelos permiten diagnosticar ambos aspectos, resultando útiles para determinar la probabilidad de respuesta del cultivo a la aplicación de los nutrimentos. La validez de los análisis depende de un correcto muestreo, y de la calibración y correlación con la respuesta en producción de la planta (11).

En el caso del potasio, los factores más importantes que determinan la capacidad de suministro de potasio en el suelo son: la concentración del elemento en la solución del suelo (I, por intensidad), el nivel de potasio intercambiable (Q, por cantidad), la capacidad de restitución de potasio (Q/I o poder tampón) y el contenido de agua en el suelo (10).

Según Havlin *et al.* (11), las formas de potasio se encuentran en el suelo en las siguientes cantidades: potasio en la solución del suelo entre 1 y 10ppm; potasio intercambiable entre 40 y 600ppm; potasio fijado en las arcillas entre 50 y 750ppm, y potasio en la estructura de los

minerales entre 5.000 y 25.000ppm. Tanto el potasio en la solución del suelo como el intercambiable se consideran como las formas de “K disponible”, y es esta última la determinada corrientemente para evaluar la fertilidad potásica del suelo. Las formas disponibles representan por tanto, menos del 10% del potasio total del suelo.

La solución del suelo consiste en la fase líquida acuosa del suelo y sus solutos (12, 17). Los solutos provienen de las reacciones de intercambio entre las fases sólida y líquida del suelo, de la disolución o alteración química de los minerales, de la mineralización de los residuos orgánicos o de la aplicación de fertilizantes (8).

El K^+ presente en la solución del suelo puede ser absorbido por las plantas en forma inmediata. A medida que el potasio es absorbido a través de las raíces, su concentración en la solución se restituye a partir de la desorción del potasio unido electrostáticamente a los coloides orgánicos y minerales (potasio intercambiable). Así mismo, si se aumenta la concentración del potasio en solución por la aplicación de fertilizantes, parte de este puede ser adsorbido a los coloides. El proceso de adsorción-desorción regula la concentración de potasio en la solución del suelo, manteniendo el equilibrio suelo-solución (10).

Teniendo en cuenta que el principal papel de los cationes en el complejo de intercambio del suelo es el de reabastecer la solución del suelo, es muy importante definir la relación entre el K intercambiable (Q) y la actividad de K en la solución del suelo (I) (11). La relación Q/I, definida inicialmente por Beckett (2), se emplea para evaluar la capacidad del suelo de mantener un determinado nivel de potasio en la solución del suelo. Un valor alto de Q/I indica que una disminución en el contenido de potasio en la solución del suelo por efecto de la absorción del nutrimento por la planta, o por efecto de pérdidas por lixiviación, es ampliamente

compensada por el K intercambiable. Un valor bajo de Q/I indica una menor capacidad de restitución, reflejando por tanto la necesidad de efectuar fertilización potásica con el fin de garantizar una adecuada nutrición de los cultivos.

En condiciones naturales los suelos son sistemas multicatiónicos. Por esto no sólo el nivel de K^+ sino el de los otros cationes, en particular de Ca^{2+} y Mg^{2+} , afecta la toma de potasio por la plantas. La relación de actividad PAR (Potassium Activity Ratio), definida por la expresión $(aK)/(aCa+aMg)^{1/2}$, siendo a la actividad iónica en la solución del suelo, permite efectuar una estimación satisfactoria de la disponibilidad de potasio para la planta (7).

Se deben también considerar todos los cationes presentes en la fase de intercambio y en la fase soluble, con el fin de predecir la selectividad o preferencia de los sitios de intercambio del suelo por un determinado catión. El coeficiente de selectividad de Gapon (K_G) es un buen estimador de la preferencia del suelo por el ión K^+ , lo cual permite explicar los diferentes niveles (altos o bajos) del elemento en el complejo de intercambio y en la solución del suelo.

El objetivo del presente estudio fue evaluar la capacidad de algunas unidades de suelo derivados de cenizas volcánicas para suministrar potasio a la planta de café en la etapa de crecimiento vegetativo. Se seleccionaron

algunas de las unidades de suelos más representativas de la zona cafetera colombiana. La evaluación se realizó mediante la comparación de los contenidos de K en el tejido foliar, en el complejo de intercambio catiónico y en la solución del suelo. Adicionalmente se estimó el poder tampón de K y el coeficiente de selectividad de Gapon con el fin de explicar mejor la diferencia en la disponibilidad de potasio de los suelos considerados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Localización. Los suelos estudiados corresponden a tres unidades de suelos derivados de cenizas volcánicas de la zona cafetera colombiana clasificados como Andisoles en los trabajos de cartografía efectuados por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia, según el sistema taxonómico del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (Soil Taxonomy) (16). Las unidades consideradas y las localidades en las cuales se establecieron las plantaciones se presentan en la Tabla 1.

Toma de muestras de suelo y foliares. En cada localidad se tomaron 50 muestras de suelo y de hojas, en cafetales de la variedad Colombia de seis meses de edad, sembrados a plena exposición solar, con una densidad de 10.000 plantas por hectárea (1x1m). Cada unidad de muestreo era una parcela conformada por 60 plantas (32 efectivas y 28 bordes). Las 50 parcelas

Tabla 1. Localización de los sitios experimentales

Unidad cartográfica ¹	Municipio	Departamento	Altitud(m)	Temperatura media anual (°C)	Precipitación media anual (mm)
Chinchiná	Chinchiná	Caldas	1400	20.8	2665
	Sasaima	Cundinamarca	1450	20.1	2610
Líbano	Líbano	Tolima	1430	20.3	2684
Timbó	El Tambo	Cauca	1700	18.6	1976

¹ Según los estudios de zonificación y uso del suelo efectuados por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia

cubrieron un área total de 3.000m² por sitio. Las muestras de suelo se obtuvieron de la zona de la gotera del árbol de cuatro de las plantas efectivas escogidas de manera aleatoria, a unos 30cm del tallo y a 20cm de profundidad. Las muestras para el análisis foliar se tomaron del cuarto par de hojas en las ramas del tercio medio de varias plantas efectivas escogidas al azar, conformándose una muestra compuesta de 40 hojas por parcela.

Análisis de laboratorio. Las muestras de suelo se analizaron según la siguiente relación de técnicas: El pH se determinó por el método potenciométrico, luego de una hora de agitación de una suspensión suelo:agua desionizada de 1:1 (relación peso a volumen). El contenido de materia orgánica se analizó por el método de Walkley-Black, mediante oxidación con dicromato de potasio en medio ácido y valoración colorimétrica en espectrofotómetro de luz ultravioleta a 585nm. Los cationes intercambiables se determinaron por agitación durante 1 hora y reposo durante la noche, de 5g de suelo con 50ml de acetato de amonio 1N pH=7 y lectura en el extracto en Espectrofotómetro de Absorción Atómica. El aluminio intercambiable se determinó mediante extracción durante 5 minutos con 50ml de KCl, 1M, sobre 5g de suelo, y valoración en Espectrofotómetro de Absorción Atómica. Los métodos corresponden a los procedimientos de rutina empleados en el laboratorio de Química Agrícola de Cenicafé, los cuales son descritos detalladamente por Carrillo (3).

La solución del suelo se extrajo por el método de centrifugación (6), aplicado en las muestras con la humedad de campo. Para obtener aproximadamente 15ml de solución del suelo para los análisis se hizo una extracción por duplicado en 100g de muestra fresca, con una humedad gravimétrica (Θ_g) comprendida entre 0,4 y 0,5. La muestra de suelo se colocó en un frasco plástico de 100ml de capacidad, perforado en la base. Luego se introdujo en un tubo de

acero inoxidable de mayor capacidad y se centrifugó durante 20 minutos a 620g. Se analizaron los cationes en la solución obtenida por la técnica de cromatografía iónica, empleando un equipo Waters 2690 con detector de conductividad modelo 430 y columna de sílice amorfa recubierta con un polímero, que permite analizar cationes mono y divalentes simultáneamente.

Los análisis foliares se efectuaron por vía seca después de incinerar la muestra molida en una mufla a 475°C, según el método empleado por Carrillo *et al.* (4). Las cenizas se disolvieron en una solución ácida (HCl 6N) y luego se llevaron a un volumen conocido agregando agua desmineralizada. El potasio se determinó en el extracto obtenido por Espectrofotometría de Absorción Atómica.

Estimación de PAR y de K_G . El PAR se estimó asumiendo una muy pequeña diferencia entre la actividad y la concentración de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en la solución del suelo, debido a la baja fuerza iónica de las soluciones extraídas. Por consiguiente, se calculó la relación $K/(Ca+Mg)^{1/2}$, empleando las concentraciones de los cationes en lugar de las actividades iónicas, como sugieren Dufey y Marot (5).

El coeficiente de selectividad de Gapon (K_G) se estimó calculando la pendiente de la recta que describe la relación de potasio intercambiable (EPR por Exchange Potassium Ratio) en función de la relación de potasio en solución (PAR), en donde:

$$EPR = K_{int} / (Mg_{int} + Ca_{int} + Al_{int})$$

Siendo K_{int} , Mg_{int} , Ca_{int} y Al_{int} los cationes intercambiables expresados en mol_c kg⁻¹.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Evaluación de los índices de disponibilidad. La Tabla 2 muestra las características químicas de

los suelos estudiados. Si se considera que las 50 muestras analizadas por localidad se tomaron en parcelas pequeñas (60m²), adyacentes entre sí, los coeficientes de variación pueden parecer altos; sin embargo, estos representan la típica variabilidad espacial de las propiedades químicas, inherente a la naturaleza del suelo, la cual ha sido ampliamente registrada en la literatura (14). El pH y la materia orgánica presentaron una menor variabilidad en comparación con las demás propiedades químicas del suelo. La alta variabilidad en los contenidos de cationes intercambiables puede estar reflejando el continuo uso agrícola dado a los suelos, que han recibido fertilización frecuente.

Los suelos son ácidos, con pH generalmente inferior a 5,0. Los niveles de materia orgánica son de altos a muy altos (>10%), propios de los Andisoles.

El grado de saturación de bases es variable, siendo la unidad Chinchiná en el municipio de Chinchiná el suelo más desaturado (suma de bases intercambiables igual a 0,67cmol_c kg⁻¹), con respecto a las unidades Líbano y Timbío, que presentan contenidos más altos de bases intercambiables (5,5 y 6,5cmol_c kg⁻¹,

respectivamente). La capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE) varía desde 2,22cmol_c kg⁻¹ en la localidad de Chinchiná hasta 7,22cmol_c kg⁻¹ en Líbano. En todos los suelos el calcio fue el catión dominante del complejo de intercambio, seguido por el magnesio. Con excepción de la unidad Líbano, el aluminio intercambiable se encuentra en un nivel relativamente alto para el cultivo del café (21).

Con respecto al potasio intercambiable, de acuerdo a las condiciones químicas de suelos aptos para café (21), este se considera con valores bajos o deficientes en la unidad Chinchiná evaluada en el municipio de Chinchiná, medios en Sasaima, y altos en Líbano y El Tambo.

En la Figura 1 se presenta la distribución de frecuencia de los niveles de potasio encontrados en la solución del suelo en las cuatro localidades consideradas. Tomando todas las localidades en conjunto, los análisis mostraron que el 80% de las muestras presentan contenidos de K⁺ en solución, inferiores a 50mg L⁻¹. Los niveles más bajos se presentaron en la localidad de Chinchiná, con el 90% de los valores de concentración por debajo de 10 mg L⁻¹, mientras que en la localidad Sasaima

Tabla 2. Propiedades químicas de los suelos considerados (promedio de 50 muestras).

Unidad	Localidad	pH	%MO	cmol _c kg ⁻¹			
				K	Mg	Ca	Al
Chinchiná	Chinchiná	4,7 (4)	12,4 (7)	0,12 (15)	0,1 (46)	0,4 (59)	1,6 (30)
	Sasaima	5,0 (3)	20,3 (6)	0,40 (21)	1,1 (36)	2,5 (37)	1,2 (31)
Líbano	Líbano	4,9 (3)	19,8 (4)	0,62 (29)	1,5 (18)	4,4 (21)	0,7 (35)
Timbío	El Tambo	4,9 (1)	22,7 (7)	0,68 (25)	1,5 (30)	3,3 (26)	1,3 (28)

*Los valores entre paréntesis representan el coeficiente de variación (%)

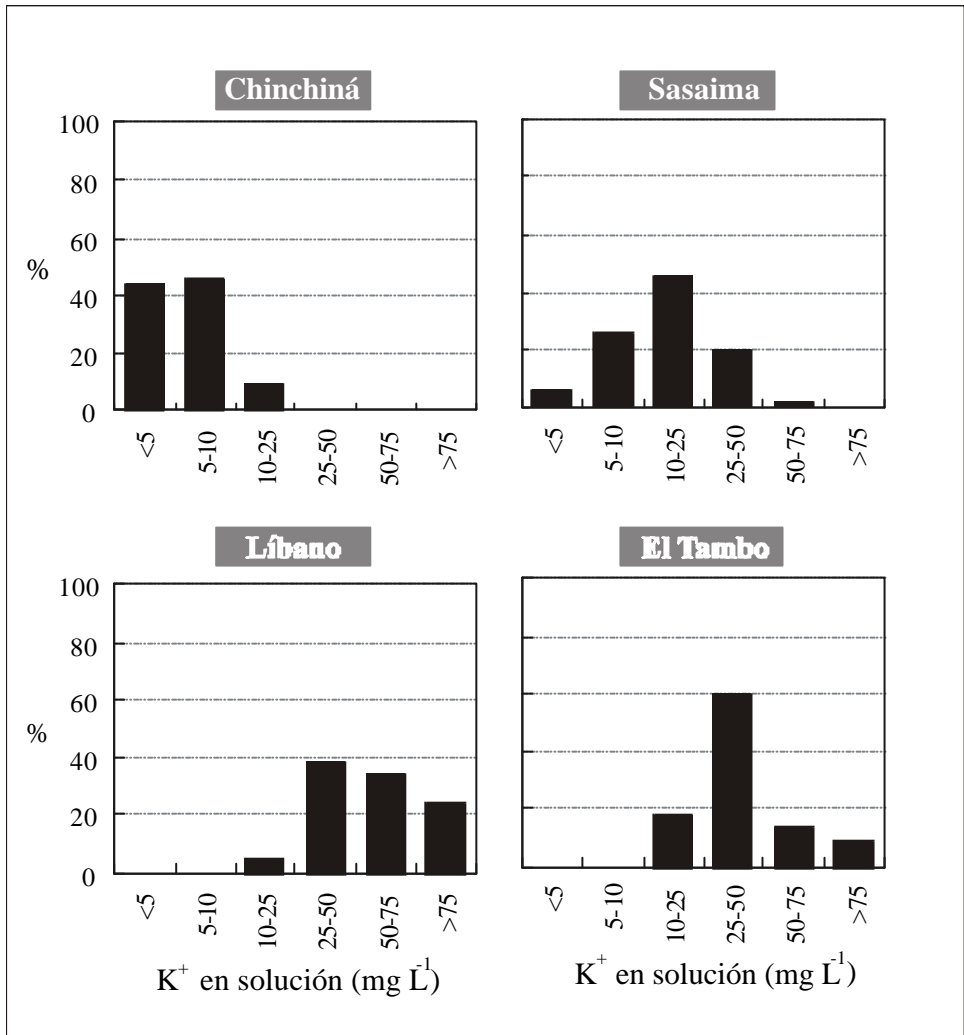


Figura 1. Distribución de frecuencias de la concentración de potasio en la solución del suelo (50 muestreos por localidad).

los valores más frecuentes estuvieron entre 10 y 25 mg L⁻¹. Las unidades Líbano y Timbío siempre presentaron niveles mayores de 10 mg L⁻¹, encontrándose los más frecuentes entre 25 y 50 mg L⁻¹.

Las diferencias entre localidades en los niveles de K intercambiable y de K en la solución del suelo reflejan una mayor disponibilidad del

elemento en la unidad Timbío, seguida por la unidad Líbano. La unidad Chinchiná muestra una fertilidad potásica más baja, principalmente en la localidad Chinchiná. Estos resultados contribuyen a explicar lo hallado por Uribe y Mestre (19), quienes encontraron una respuesta positiva en producción del cultivo del café a la aplicación de potasio en la Estación Central Naranjal (Chinchiná, Caldas), mientras que no

obtuvieron diferencias significativas en el rendimiento del cultivo por efecto de la adición de tres dosis de K_2O (0, 120 240kg anuales por hectárea) en la Subestación La Trinidad (Líbano, Tolima), en ninguna de las cuatro cosechas evaluadas.

La Tabla 3 presenta los niveles de potasio foliar de las plantas de café cultivadas en las cuatro localidades consideradas. Los contenidos más bajos se presentan en la unidad Chinchiná y los más altos en la unidad Timbío. En Colombia se han establecido las siguientes categorías del contenido de potasio en plantas de café en la etapa reproductiva: nivel alto, cuando supera el 1,8% en base seca, nivel medio entre 1,5 y 1,8%, bajo entre 1,1 y 1,5%, y deficiente cuando es inferior a 1,1% (13). Considerando este rango, el 72% de las muestras tomadas en los suelos de la unidad Chinchiná en la localidad de Chinchiná es deficiente, mientras que en las unidades Líbano y Timbío más del 95% de las hojas presentaron niveles altos de K, lo que indica que la nutrición potásica se encuentra en un estado adecuado. Comparando únicamente las dos localidades de la unidad Chinchiná, y de acuerdo al rango considerado como normal por Valencia y Arcila (20), es decir, entre 1,5 y 2,0%, en base seca en el cuarto par de hojas de ramas productivas, el 100% de las parcelas de la localidad Chinchiná están por debajo, mientras que en la localidad Sasaima el 45% se encuentra dentro del rango adecuado.

Con el objeto de evaluar el K intercambiable, el K^+ en la solución del suelo y el PAR como índices de disponibilidad, se compararon los niveles de estas tres variables con la concentración de potasio en las hojas de café. Esta comparación se basa en los siguientes principios: a) que la cantidad de un elemento en el tejido vegetal está directamente relacionada con la cantidad de dicho elemento en el suelo que es susceptible de ser tomada por la planta; y b) que si un nutriente tal como el potasio es deficiente en la planta, la tasa de crecimiento y el rendimiento de dicha planta sufren una notable disminución (12, 18).

En la Figura 2, se puede constatar que hay una relación altamente significativa entre el K foliar del café a los seis meses de edad y los niveles de potasio en el suelo. La ecuación que representa esta relación tiene un mejor ajuste bajo un modelo polinomial de segundo grado. Con el aumento del K intercambiable (Figura 2a) y del potasio en solución (Figura 2b) se presenta un incremento de los niveles de K foliar hasta alcanzar un rango determinado, a partir del cual no hay más acumulación de potasio en las hojas a pesar de que los contenidos del elemento en el suelo continúen aumentando. Los niveles más altos de potasio en el suelo que superan dicho rango crítico, corresponden a una disminución en los niveles de K translocados a las hojas.

Tabla 3. Niveles de potasio foliar (% en base seca) en el cuarto par de hojas de plantas de café de seis meses de edad.

Nivel de K	Chinchiná	Sasaima	Líbano	El Tambo
Mínimo	0,41	1,00	1,67	2,15
Máximo	1,43	2,11	2,85	2,68
Promedio (n=50)	0,91	1,53	2,31	2,38
Coefficiente de variación (%)	27	20	11	5

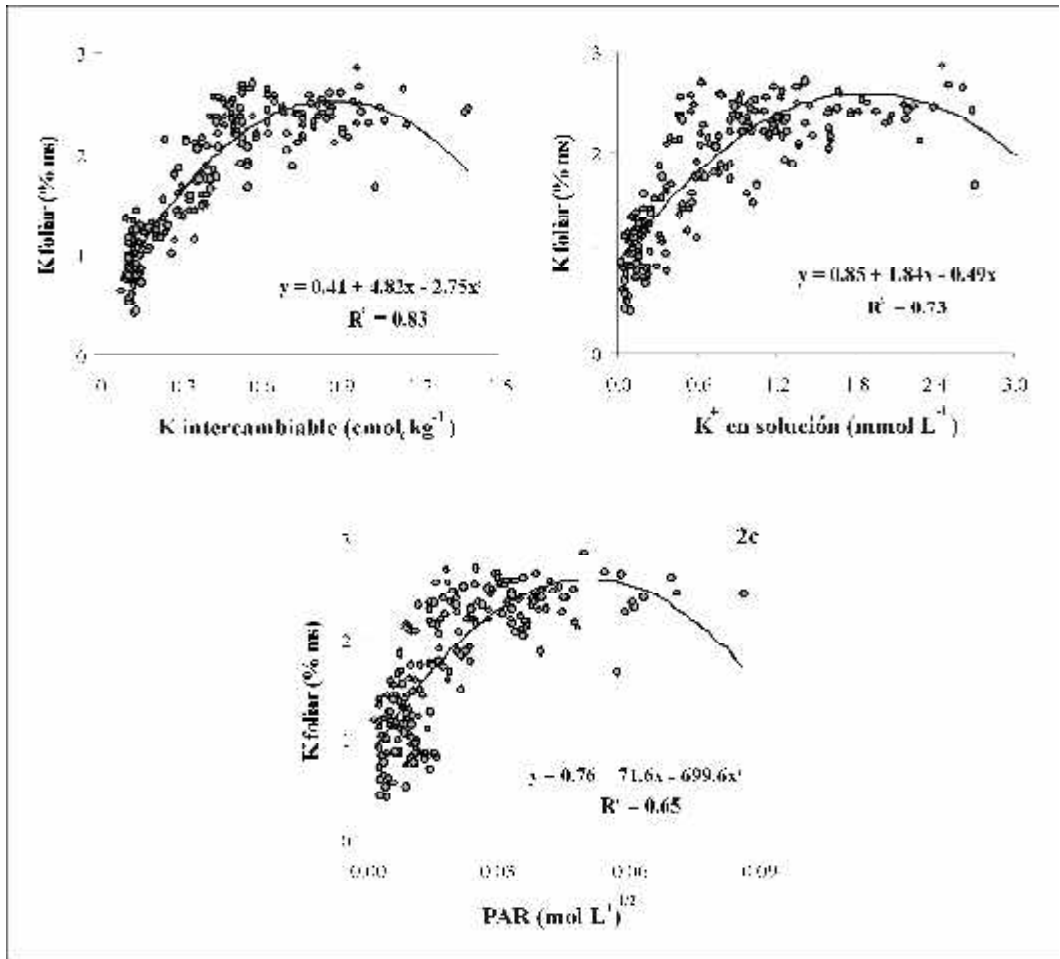


Figura 2. Variación del contenido de K foliar en función de tres índices de disponibilidad: (a) K intercambiable, (b) K en la solución del suelo, y (c) PAR. (N=200).

De acuerdo con los modelos obtenidos, al calcular la primera derivada de las ecuaciones de segundo grado e igualar a cero se puede estimar el valor del potasio intercambiable y de potasio en la solución del suelo con el cual se presenta el contenido más alto de potasio en las hojas. En el primer caso, el valor máximo de K foliar (2,52% en base seca) se presentó con un nivel de potasio intercambiable igual a $0,88\text{cmol kg}^{-1}$. En el segundo caso, se estimó que el valor máximo de 2,58% de K en las hojas

se presenta con un nivel de $1,88\text{mmol L}^{-1}$ de K^+ en la solución del suelo (73mg L^{-1}).

En la literatura se registra que la toma de potasio depende también de la concentración de magnesio y/o calcio en el suelo o en la solución nutritiva en la cual crece la planta (7). Según los datos analizados en el presente trabajo existe una buena asociación entre los niveles de K foliar y las relaciones $\text{K/Mg}^{1/2}$, $\text{K/Ca}^{1/2}$ y $\text{K}/(\text{Ca}+\text{Mg})^{1/2}$ en la solución del suelo, en las

cuales el coeficiente de correlación (r) es igual a 0,70; 0,71 y 0,71, respectivamente. Esta asociación no es significativa con las mismas relaciones establecidas para los tres cationes presentes en el complejo de intercambio ($r=-0,44$, $-0,31$ y $-0,34$ para K/Mg , K/Ca y $K/Ca+Mg$, respectivamente). Lo anterior sugiere que bajo las condiciones experimentales del presente trabajo, el balance entre los contenidos de K^+ con respecto al Mg^{2+} y Ca^{2+} en la solución del suelo tiene una mayor importancia en la predicción de los niveles de potasio presentes en las hojas de la planta de café, que el balance de cationes intercambiables.

La Figura 2c muestra la relación entre los niveles de K en las hojas y la variable PAR. La función de respuesta del K foliar a los valores de PAR indica que, un incremento inicial de la proporción de K con respecto al Ca^{2+} y el Mg^{2+} en la solución del suelo induce a un aumento en los niveles de K foliar, hasta alcanzar un rango de PAR correspondiente al balance adecuado entre el K^+ y el Ca^{2+} más Mg^{2+} . Una vez sobrepasado dicho rango, es decir, que el K^+ continúa aumentando y/o el Ca^{2+} y Mg^{2+} disminuyendo, se reduce la absorción de potasio. Según el modelo obtenido, el balance más adecuado corresponde a un PAR cercano a $0,051 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}/(\text{mol L}^{-1})^{1/2}$, valor con el cual se presenta el nivel máximo de potasio en las hojas (2,59%, en base seca).

La Figura 2 muestra que cualquiera de los tres índices evaluados sirve para predecir los niveles de K en las hojas de las plantas de café en su fase vegetativa, y que a su vez, el análisis de K foliar da buen indicio de la disponibilidad del elemento en el suelo.

Capacidad de restitución de potasio del suelo.

La Figura 3 presenta la variación del potasio intercambiable en función del potasio en la solución del suelo. La pendiente de la ecuación que describe dicha variación es una estimación de la capacidad de restitución de potasio del

suelo ó poder tampón. El poder tampón es una propiedad característica de cada suelo, e indica la cantidad de potasio intercambiable que puede pasar a la solución del suelo para equilibrarla, en respuesta a los cambios de concentración en dicha solución.

Los resultados de la Figura 3 muestran que existe una relación lineal entre el potasio intercambiable y el potasio en la solución del suelo. Al considerar los suelos de las cuatro localidades en conjunto, ambas fracciones de potasio presentan una correlación altamente significativa y positiva ($r=0,91^{**}$). Sin embargo, considerando individualmente cada sitio, se aprecia que cada suelo presenta diferente poder tampón.

La pendiente de la ecuación obtenida en cada localidad se presenta en la Tabla 4. La ecuación de regresión de la unidad Chinchiná correspondiente a la localidad Chinchiná tiene un coeficiente de determinación relativamente bajo, presentando por tanto el valor estimado de la pendiente poca confiabilidad. Sin embargo, los contenidos de potasio intercambiable y de potasio en solución fluctuaron dentro de rangos estrechos, cubriendo los niveles más bajos observados, tal como se ha venido indicando en esta presentación de resultados.

A pesar de la alta dispersión de los datos en Chinchiná, el valor de la pendiente estimado para esta localidad ($115 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1} / \text{mol L}^1$), muestra el bajo poder tampón de potasio del suelo, en comparación con las otras tres localidades consideradas. Estos resultados sugieren que la extracción de potasio por la planta producirá una disminución en la concentración del potasio en la solución del suelo que será débilmente compensada por el potasio intercambiable. Se plantea entonces la necesidad de suministrar potasio a los cultivos de café que allí se establezcan, con el fin de garantizar una adecuada nutrición de la planta con este elemento.

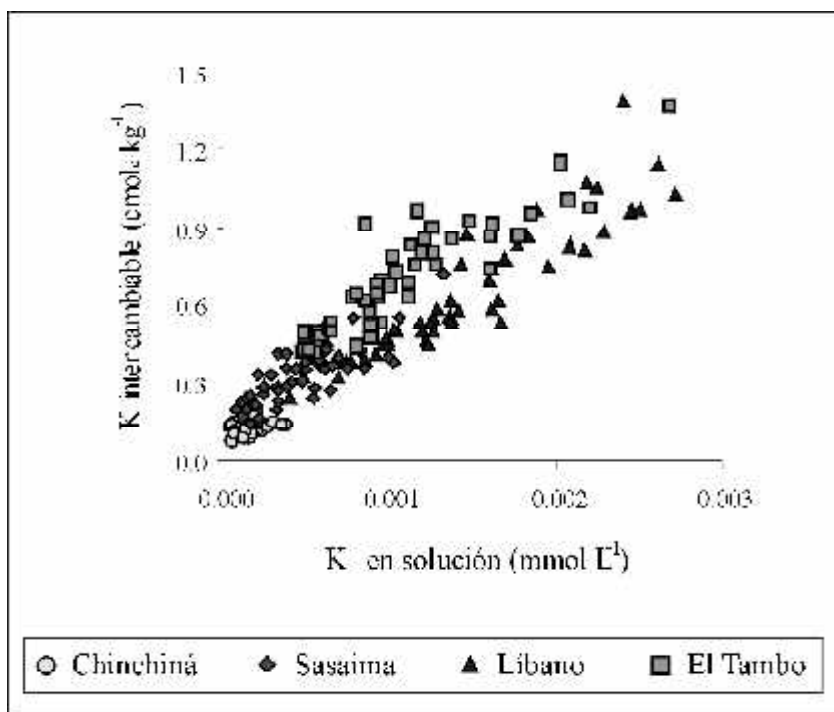


Figura 3. Relación entre el potasio intercambiable y el K^+ en la solución del suelo (N=200).

Considerando solamente el poder tampón en las localidades en las cuales se obtuvo un modelo con alto coeficiente de determinación, es decir, en la unidad Chinchiná tomada en la localidad Sasaima y en las unidades Líbano y Timbío, se puede observar que la capacidad de restitución de los suelos aumenta en el mismo orden mencionado. Las unidades Líbano y Timbío corresponden a los suelos con mayor disponibilidad de potasio, ya que presentan una mayor habilidad para mantener una concentración más alta de potasio en la solución del suelo. En estos suelos la fertilización del café con potasio en la etapa vegetativa no parece necesaria.

Los valores de poder tampón observados son del mismo orden que los reportados por Graham y Fox (9) en Andisoles de clima tropical en Hawaii, formados a partir de lavas y cenizas

basálticas. Estos autores reportan valores que varían desde 104 hasta $673 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1} / \text{mol L}^{-1}$, que fueron determinados a partir del establecimiento de modelos binarios de equilibrio de intercambio $K^+ - Ca^{2+}$.

Coefficiente de selectividad de Gapon (K_G).

Teniendo en cuenta la proporción de potasio con respecto al nivel de los otros cationes presentes en cantidades importantes, tanto en la fase solución como en la fase intercambiable de los suelos estudiados, se estimaron el EPR y el PAR.

En la fase intercambiable el potasio, el calcio y el magnesio fueron los cationes predominantes, junto con el aluminio. En la solución del suelo, el K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} prevalecieron ampliamente sobre el Na^+ , el NH_4^+ y el Al^{3+} , presentándose estos tres últimos en cantidades despreciables.

La variación de EPR en función de PAR se representa en la Figura 4. Ésta, corresponde a la representación gráfica del coeficiente de Gapon ($K_G = \text{EPR}/\text{PAR}$), y muestra que para proporciones similares de potasio en solución existe una proporción más elevada de potasio adsorbido en los suelos de la localidad Sasaima con relación a El Tambo, y en esta última a su vez con relación a Líbano.

Los valores estimados de K_G se presentan en la Tabla 5. Los coeficientes de determinación son más altos con respecto a aquellos obtenidos para el poder tampón (Tabla 4), lo cual indica que al considerar los demás cationes se disminuye la dispersión de los datos observados. Los suelos de la localidad Chinchiná no presentaron una relación estadísticamente significativa entre EPR y PAR; por tanto, el valor estimado de K_G carece de validez. En los casos donde se halló relación significativa, los valores de la pendiente indicaron que la selectividad por potasio es mayor en los suelos

de la unidad Chinchiná en Sasaima, con respecto a las unidades Timbío y Líbano.

Es bien sabido que la selectividad disminuye a medida que aumenta la saturación de K en el suelo (1). La adsorción selectiva de potasio favorece la retención del elemento en el suelo siempre y cuando la cantidad de sitios selectivos sea suficiente. Los suelos de las localidades Sasaima, El Tambo y Líbano difieren en su capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE), es decir, en la cantidad de cargas coloidales. Aunque la unidad Líbano posee una menor selectividad, la CICE relativamente alta puede incidir en aumentar la capacidad de saturación de K, favoreciendo el poder tampón del suelo.

Los valores de K_G obtenidos resultan bajos si se comparan con otros estimados para suelos diferentes a los derivados de cenizas volcánicas, los cuales poseen otra composición mineralógica en la fracción arcilla. Por ejemplo, bajo clima

Tabla 4. Capacidad de restitución de potasio de los suelos considerados

Unidad de suelo	Localidad $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1} / \text{mol L}^{-1}$	Poder tampón	R ²	Pr>F	CV
Chinchiná	Chinchiná, Caldas	115	0,17	0,0032	17,7
	Sasaima, Cundinamarca	317	0,65	0,0001	20,3
Líbano	Líbano, Tolima	350	0,78	0,0001	18,2
Timbío	El Tambo, Cauca	384	0,81	0,0001	13,0

Tabla 5. Coeficiente de selectividad de Gapon de los suelos considerados

Unidad de suelo	Localidad	$K_G (\text{mol L}^{-1})^{1/2}$	R ²	Pr>F	CV (%)
Chinchiná	Chinchiná, Caldas	1,23	0,22	0,0006	16,9
	Sasaima, Cundinamarca	3,38	0,80	0,0001	13,6
Líbano	Líbano, Tolima	1,43	0,77	0,0001	13,8
Timbío	El Tambo, Cauca	2,45	0,84	0,0001	10,7

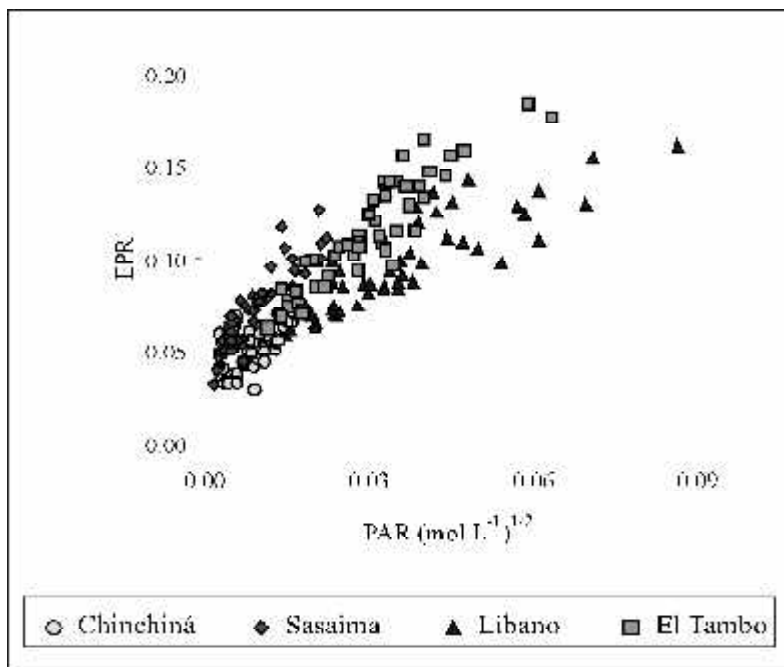


Figura 4. Variación de la relación de potasio intercambiable (EPR) en función de la relación de actividad de potasio en solución (PAR).

templado, Rasnake y Thomas (15) reportan valores de K_G entre 5,5 y 10,0 (mol L⁻¹)^{1/2} en suelos aluviales de Kentucky (Estados Unidos), y Dufey y Marot (5) reportan un K_G de 6,88 (mol L⁻¹)^{1/2} en suelos del sur de Bélgica.

Las estimaciones hechas tanto del poder tampón como del coeficiente de selectividad permitieron comparar los suelos de las cuatro localidades estudiadas, lo cual contribuyó a explicar las diferencias encontradas en la disponibilidad del elemento para la planta de café. Los resultados indicaron una mayor capacidad de regulación del K en el suelo en las localidades de Sasaima, Líbano y El Tambo con respecto a la localidad Chinchiná.

La importancia de las estimaciones obtenidas en este estudio del poder tampón y del coeficiente de selectividad radica en que éstas se obtuvieron

bajo condiciones muy próximas al ambiente natural del suelo, sin necesidad de recurrir a técnicas tradicionales de laboratorio para simular el equilibrio entre la fase sólida y la fase solución.

AGRADECIMIENTOS

A Celso Arboleda, Piedad D. Henao, Jorge C. Torres y Carlos R. Solarte por la supervisión de los ensayos de campo. A Carlos Gil, Ariel Osorio y Nelson Cardona, de la cooperativa Cootraserva, por la extracción de la solución del suelo. A Beatriz Mejía y Albeiro Salazar por el análisis del material vegetal. A los analistas que actualmente conforman el equipo técnico del Laboratorio Multilab por la caracterización de los suelos. A Diana Marcela Valencia por la compilación de la base de datos y a Siavosh Sadeghian por la revisión del artículo.

LITERATURA CITADA

1. BAR, A.; BANIN, A.; CHEN, Y. Adsorption and exchange of K in multi-ionic soils systems as affected by mineralogy. *In: Methodology in soil-K research*. Badenbei. Wien, International Potash Institute, 1987. p. 155-170.
2. BECKETT, P. H. T. The "immediate" Q/I relations of labile potassium in the soils. *Journal of Soil Science* 15:9-23. 1964
3. CARRILLO, I. F. Manual del laboratorio de suelos. Chinchiná, Cenicafé, 1985. 111 p.
4. CARRILLO, I. F.; MEJÍA, B.; FRANCO, H. F. Manual de laboratorio para análisis foliares. Chinchiná, Cenicafé, 1994. 52 p.
5. DUFEY, J.; MAROT, J. M. Single empirical relationship for potassium exchange equilibria in various soils. *Soil Science Society of America Journal* 51:918-920. 1987.
6. ELKHATIB, E. A.; HERN, J. L.; STALEY, T. E. A rapid centrifugation method for obtaining soil solution. *Soil Science Society of America Journal* 51:578-583. 1987.
7. EVANGELOU, V. P.; WANG, J.; PHILLIPS, R. E. New developments and perspectives on soil potassium quantity/intensity relationships. *Advances in Agronomy* 52:173-227. 1994.
8. FOTH, H.; ELLIS, B. Soil fertility. 2. ed. Boca Raton, Lewis Publishers, 1994. 290 p.
9. GRAHAM, E. R.; FOX, R. L. Tropical soil potassium as related to labile pool and calcium exchange equilibria. *Soil Science* 111:318-322. 1971.
10. GRIMME, H. The dynamics of potassium in the soil-plant system. *In: Potassium in the agricultural systems of the humid tropics*. Bangkok, International Potash Institute, 1985. p. 127-154
11. HAVLIN, J. L.; BEATON, J. D.; TISDALE, S. L.; NELSON, W. L. Soil fertility and fertilizers; an introduction to nutrient management. 6. ed. Upper Saddle River, Prentice Hall, 1999. 499 p.
12. LITAOR, M. I. Review of soil solution samplers. *Water Resources Research* 24:727-733. 1988
13. MACHADO, A. Los fertilizantes para el cafeto y el diagnóstico foliar. *Boletín Informativo Cenicafé* 7(26):123-136. 1966.
14. MULLA, D. J.; MCBRATNEY, A. B. Soil spatial variability. *In: SUMMER, M.E. (Ed). Handbook of soil science*. Boca Raton, CRC Press, 2002. p. A321-A352.
15. RASNAKE, M.; THOMAS, G. W. Potassium status of some alluvial soils in Kentucky. *Soil Science Society of America Journal* 40:883-886. 1976.
16. SOIL SURVEY STAFF. Soil taxonomy; a basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. 2 ed. Washington, USDA, 1999. 869 p. (Agriculture Handbook No. 436).
17. SPARKS, D. L. Environmental soil chemistry. San Diego, Academic Press, 1995. 267 p.
18. SPARKS, D. L. Bioavailability of soil potassium. *In: SUMMER, M.E. (Ed.). Handbook of soil Science*. Boca Raton, CRC Press, 2002. p. D38-D53.
19. URIBE, A.; MESTRE, A. Efecto del nitrógeno, el fósforo y el potasio sobre la producción de café. *Cenicafé* 27(4):158-173. 1976.
20. VALENCIA, G.; ARCILA, J. Efecto de la fertilización con N, P, K a tres niveles en la composición mineral de las hojas del cafeto. *Cenicafé* 28(4):119-138. 1977.
21. VALENCIA, G.; CARRILLO, I. F. Interpretación de análisis de suelos para café. *Avances Técnicos Cenicafé* No 115:1-4. 1983.