

Nota técnica

EL CALCIO ES UN NUTRIENTE LIMITANTE EN CAFETALES BAJO MANEJO INTENSIVO DE FERTILIZANTES EN ULTISOLES

Sebastián Castro-Tanzi*

Palabras clave: Café (*Coffea arabica*); fertilidad de suelos; calcio; magnesio; potasio; nutrición de café; Ultisoles; bases intercambiables del suelo.

Keywords: Coffee (*Coffea arabica*); soil fertility; calcium; magnesium; potassium; coffee nutrient management; Ultisols; soil exchangeable bases.

Recibido: 09/08/16

Aceptado: 13/01/17

RESUMEN

La producción intensiva de café (*Coffea arabica*) demanda cantidades considerables de potasio (K) y nitrógeno (N). En agroecosistemas fertilizados con N, K y P, es razonable prever que el calcio (Ca) ó el magnesio (Mg) resulten limitantes. Se exploró la relación entre la fertilidad de K, Ca y Mg en el suelo y su efecto nutritivo en hojas de café cultivado en Ultisoles; también se analizaron asociaciones entre la variación de estos macronutrientes en el tejido foliar y la productividad del cultivo. Se tomaron 6 muestras de suelo y de tejido foliar durante 2 años en 26 fincas cafetaleras del cantón de Tarrazú, Costa Rica. Para cada nutriente se construyeron modelos de regresión lineal y para desarrollarlos se relacionaron el contenido de los mismos en tejido foliar y en la solución intercambiable del suelo. A partir del modelo se establecieron asociaciones entre Ca, Mg y K en las hojas y

ABSTRACT

Calcium is a limiting nutrient in coffee groves under intensive fertilizer management on Ultisols. Intensively managed coffee (*Coffea arabica*) agroecosystems demand considerable amounts of potassium (K) and nitrogen (N). In groves fertilized with high rates of N, K and P, however, it is reasonable to foresee that calcium (Ca) or magnesium (Mg) availability can limit crop production and development. This study explored whether a link exists between coffee plant leaf tissue Ca, Mg and K contents and the fertility of these exchangeable bases in Ultisols. The study also analyzed whether the availability of one of these nutrients in leaves limits crop productivity. In the span of 2 years, soil and leaf tissue samples were collected in 26 coffee farms in Tarrazú, Costa Rica. Using linear regression analysis models, soil and leaf Ca, Mg and K concentrations were compared; the

* Departamento de Estudios Ambientales, Antioch University New England. EEUU.
Correo electrónico: scastro1@antioch.edu

el suelo. Adicionalmente, se caracterizaron el estatus nutricional del follaje, la estructura y la producción de las plantas de café en 2 parcelas en cada uno de 39 lotes (12 plantas por parcela; 78 parcelas). Mediante indicadores de productividad, se clasificó *post-hoc* cada par de parcelas en una de 2 categorías, definidas entre menor y mayor productividad, lo que generó así, un quasi-experimento de bloques al azar. El contraste entre productividades se utilizó para analizar la variación de los macronutrientes en el tejido foliar. El análisis de variancia reveló que las hojas de las parcelas de alta productividad contenían más Ca que aquellas con menor rendimiento. Igualmente, el contenido de K y las relaciones Ca/K y Ca/N en estas últimas muestras fue relativamente menor (valor- $p < 0,05$). Esto corrobora la importancia del Ca en la productividad de café sobre Ultisoles.

models indicated strong associations between the status of those nutrients in leaf tissue and their availability in the soil exchangeable solution. To assess whether C, Mg or K acted as nutrients limiting yields, crop productivity indicators were recorded and leaf tissue samples collected in 2 plots in each of 39 coffee farms (12 plants per plot; 78 plots total). Within each farm, the crop productivity indicator was used to classify each plot as of higher or lower productivity in relation to its pair. By this *post-hoc* classification, a quasi-experiment with a random block design was generated. This design was used to analyze the variation of N, K, Ca and Mg concentration of the leaf tissue collected in the plots. Ca leaf content tended to be higher in leaf samples from plots with higher productivity; Ca/K and Ca/N ratios tended to be significantly higher as well ($p\text{-value} < 0.05$). These results highlight the importance of soil Ca for coffee productivity in Ultisols of moderate to low fertility.

INTRODUCCIÓN

Actualmente se cultivan 84 mil hectáreas de café en Costa Rica aspecto que señala que la actividad es fundamental para la economía de muchas comunidades rurales del país (ICAFE 2014). La caficultura costarricense utiliza un modelo de producción agrícola enfocado en obtener alta productividad. En este contexto, el desarrollo vegetativo del cultivo y la cosecha de café requieren considerables cantidades de Nitrógeno (N) y Potasio (K) (Bertsch 1988, Ramírez *et al.* 2002, Bertsch 2003). Por ello las recomendaciones de manejo agronómico de este cultivo aún sugieren la utilización de fertilizantes con alto contenido de estos nutrientes y magnesio (Mg) (Chaves 1999). Como consecuencia, es común

observar agroecosistemas de café en este país donde se aplican considerables cantidades de fertilizantes compuestos (Castro-Tanzi *et al.* 2012).

La demanda de calcio (Ca) y Mg no es tan alta en comparación con aquella de N y K (Bertsch 1988, Ramírez *et al.* 2002, Laviola *et al.* 2007, Sadeghian *et al.* 2013). Estas bases intercambiables no obstante, son fundamentales para el desarrollo adecuado del cafeto y el desempeño esperado del cultivo (Ramalho *et al.* 1995, Hepler 2005, Wang *et al.* 2015, Kadri *et al.* 2016).

Es conocido para quienes trabajan en la actividad que el cultivo del café obtiene la mayoría del K, Ca y Mg de la solución intercambiable del suelo. El contenido de estos nutrientes en el suelo está determinado por diferentes factores pedogénéticos y edáficos (Brady y Weil 1996,

Bertsch 1998, Salazar *et al.* 2016). La tasa de meteorización y tipo de material parental, la mineralogía y contenido de arcillas, la presencia de materia orgánica, el pH y la acidez de la solución intercambiable y el contenido de humedad del suelo son propiedades que articulan la disponibilidad de estos elementos.

También el manejo agronómico, puede influenciar la dinámica de las bases intercambiables en el suelo. Por ejemplo, la extracción histórica de Ca y Mg en la biomasa del cultivo y la excesiva aplicación de algunos fertilizantes sintéticos tienden a acidificar la solución intercambiable y a limitar la disponibilidad de estos elementos (Guo *et al.* 2010, Méndez y Bertsch 2012). Según el tipo de arcillas, el K en la solución intercambiable del suelo, puede enriquecerlo como consecuencia de la aplicación ubicua de fórmulas fertilizantes ricas en este elemento (Durán 2001). El nivel de erosión o degradación de los perfiles superficiales del suelo también explican la disponibilidad de estos nutrientes. Asimismo la demanda y absorción de Ca y Mg de la solución del suelo y la translocación y fijación de estos nutrientes en la biomasa del cultivo se reflejan en la edad y etapa fenológica del cultivo de café (Ramírez *et al.* 2002, Sadeghian *et al.* 2013).

Una vez que los requerimientos de N, P y K fueron abastecidos al suplirlos en cantidades suficientes, se esperaba que la disponibilidad de Ca y/o Mg actuaran como factores determinantes del desarrollo vegetativo y la producción en agroecosistemas de café. Algunos autores citaron indicios de la importancia de la fertilidad de Ca para la producción de café en suelos de moderada fertilidad (Castro-Tanzi *et al.* 2012).

A partir de la investigación se determinó identificar si existe una asociación entre el contenido edáfico de K, Mg y Ca y la existencia de estos elementos en las hojas de café y a su vez valorar si el Ca, Mg y K eran elementos limitantes para mejorar la productividad y el desarrollo del cultivo en sistemas agroforestales simplificados de café bajo manejo intensivo de fertilizantes cultivados en Ultisoles. En este estudio se presentan los resultados observados y quasi-experimentos de campo desarrollados en agroecosistemas de café ubicados en el cantón de Tarrazú, Costa Rica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Zona de estudio

Para esta investigación se contemplaron sistemas agroforestales simplificados de *C. arabica* localizados en el cantón de Tarrazú. La zona de estudio se ubica entre los 1200 a 1800 msnm, en la parte alta y media de la subcuenca del río Pirrís, donde se localizan fincas de café analizadas en las cuales predominan los suelos del orden Ultisol (Chinchilla *et al.* 2011, Sandoval y Mata 2014). Los suelos de la zona cultivados de café, tienden a tener pH ácidos, alta saturación de acidez y bajo contenido de bases intercambiables (Méndez y Bertsch 2012, Chaves 2014).

Selección de fincas

En el 2007 se muestrearon 26 fincas de café, y para el 2008 se visitaron nuevamente y se muestrearon 13 adicionales (n=39, Figura 1), con cafetales cultivados en suelos Ultisoles del suborden Humults.

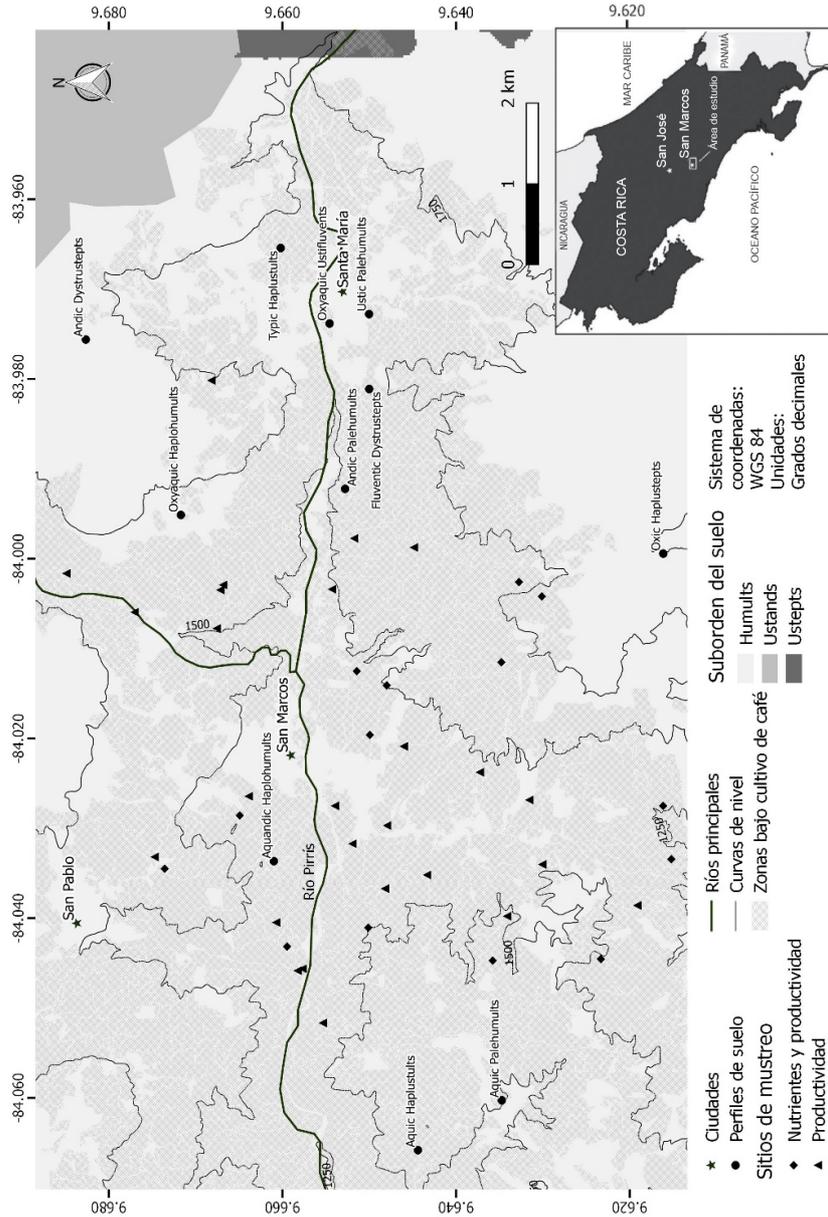


Fig. 1. Ubicación de las fincas de café muestreadas durante el 2007 y 2008 en el área de estudio. Tarrazú, Costa Rica.

En el 2007, se extrajeron muestras de suelo y tejido foliar en una área delimitada por parcelas de 400 m² en cada finca. Para el 2008, los muestreos y recolección de datos se hicieron en 3 parcelas, cada una de 100 m². Se utilizó un GPS Trimble GEOXM™ con una antena Hurricane™ para geolocalizar los sitios. Castro-Tanzi *et al.* (2012) ofrece una descripción detallada del manejo agronómico en estas fincas.

Determinación del contenido de nutrientes en el suelo y las hojas

Durante el 2007, la parcela de muestreo se dividió en 3 zonas. En cada zona se recolectaron 12 submuestras de suelo a 15 cm de profundidad con un barreno holandés. Estas fueron mezcladas y homogenizadas independientemente.

Asimismo en cada zona se recolectaron muestras de tejido foliar de 12 cafetos. Se recolectó una hoja sana del tercer entrenudo a partir del ápice en 3 bandolas (ejes plagiotrópicos) encontradas a media altura del tallo principal o eje ortotrópico. De esta manera se obtuvieron 3 muestras compuestas de suelo y biomasa foliar para cada lote. Durante el 2008, se utilizó el mismo procedimiento para la colecta de muestras de suelo y tejido foliar, con la distinción de que estas metodologías se aplicaron dentro de cada 3 parcelas de 100 m². Igualmente se obtuvieron 3 juegos de muestras por lote.

Se utilizó la metodología descrita por Díaz-Romeau y Hunter (1978) y Henríquez *et al.* (1998) para la determinación del contenido de bases intercambiables en la solución del suelo y el tejido foliar de los cafetos. Estos análisis se realizaron en los laboratorios del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.

Caracterización de las plantas de café y la plantación

Durante el 2008, de las 12 plantas de café (36 por lote) donde se tomaron las muestras de

tejido foliar se procedió a estimar su productividad a partir de un indicador de cosecha y conteo de frutos por bandola (Upreti *et al.* 1991, Castro-Tanzi *et al.* 2014). En cada planta se escogieron 12 bandolas, 4 en la parte alta, media y baja del tallo principal respectivamente. Con estos recuentos se calculó el número promedio de frutos por bandola por planta. También se midió la altura del tallo principal y se contó el número de ejes ortotrópicos más altos a un metro y signos de podas pasadas para cada planta.

Con las 12 plantas muestreadas, se calculó un promedio global de número de frutos por bandola por planta y de todas las demás variables de la plantación para cada una de las 120 parcelas incluidas en este análisis. Finalmente registró para cada caso, la elevación y pendiente del terreno, densidad de siembra del cultivo y el número de árboles y plantas que conformaban el dosel de sombra en las parcelas.

Análisis de la asociación entre el contenido de bases intercambiables en el suelo y el tejido foliar

Para este primer análisis se utilizó la información recolectada en los 26 lotes visitados durante ambos años (Figura 1). Con los resultados del análisis químico de las muestras de tejido foliar y suelos, se calculó un valor promedio y error estándar (n=6) del contenido de K, Ca y Mg en la solución del suelo (en cmol(+).l⁻¹) y el tejido foliar (en %) para cada lote.

Luego de observar gráficas bivariadas construidas con estos parámetros, se formularon modelos lineales de primer, segundo y tercer grado. En ellos, el contenido de cada nutriente en el tejido foliar se modeló en función de la concentración del mismo elemento en la solución del suelo. Se empleó el criterio de información de Akaike (CIA) (Akaike 1974) con el fin de seleccionar el modelo lineal de mejor ajuste para cada elemento.

Identificación del elemento limitante en la productividad y desarrollo vegetativo del 2008

Para el 2008 se utilizaron los datos obtenidos en los muestreos de las 39 fincas de café analizadas. Para el análisis se diseñó un quasi-experimento *post-hoc* para contrastar entre parcelas con alta y baja productividad y alto y bajo desarrollo vegetativo del cultivo. Para cada lote se identificó la parcela con mayor y menor productividad de café según el promedio global del número de frutos por bandola por planta. Un contraste experimental similar fue desarrollado pero con el valor promedio de altura del eje principal por planta por lote. En casos donde 2 parcelas dieron como resultado el mismo valor de alguna de las variables, el programa seleccionó una parcela al azar.

Se utilizó un análisis de multivariancia para comparar el contenido foliar de N, K, Ca y Mg entre los 2 niveles de los quasi-experimentos. En el caso donde se observaron diferencias significativas en el análisis multivariante, se procedió a utilizar un análisis de variancia (ANDEVA) para un experimento en bloques al azar para cada nutriente por separado. La forma del ANDEVA fue:

$$y = x + lote \quad (1)$$

Donde y es el contenido de N, K, Ca, o Mg, x es el quasi -tratamiento (por ejemplo, alta o baja

productividad) y *lote* es el código de la finca. Esta última fue tratada como variable de bloque. Para el análisis estadístico se utilizó R (R Development Core Team, 2010).

RESULTADOS

Asociación entre el contenido de bases intercambiables en el suelo y tejido foliar de café

Los suelos muestreados mostraron una considerable variación en su contenido de bases intercambiables. El Ca, Mg y K en la solución del suelo mostraron concentraciones promedio y errores estándar de $5,5 \pm 0,6$; $1,7 \pm 0,2$ y $0,6 \pm 0,04$ $\text{cmol}(+).\text{l}^{-1}$ respectivamente ($n=26$). El contenido de Ca en el tejido foliar fue de $1,14 \pm 0,04\%$, mientras que el de Mg fue $0,3 \pm 0,01\%$ y el de K $1,9 \pm 0,04$ ($n=26$). El Ca representó un $51,9 \pm 3,4\%$ de la capacidad de intercambio catiónico de la solución en estas muestras de suelo.

En la solución del suelo, el Ca y Mg variaron positiva y significativamente con el K intercambiable y el pH (Cuadro 1). No obstante, estos 2 elementos variaron negativamente con la acidez intercambiable. El K intercambiable por su parte no mostró relación alguna con la variación en el pH y la acidez (Cuadro 1).

Cuadro 1. Correlación entre algunos cationes intercambiables de la solución del suelo ($n=26$).

	K	Mg	Ca	Acidez intercambiable
K				
Mg	0,61***			
Ca	0,40*	0,71***		
Acidez intercambiable	-0,19	-0,52**	-0,78***	
pH	0,26	0,74***	0,90**	-0,81***

Valor-p: * $<0,05$; ** $0,01$; *** $0,001$.

En las muestras de tejido foliar de café, se observó una significativa asociación entre el Ca y el Mg (Cuadro 2). Estos 2 nutrientes

mostraron una variación negativa en relación con el K. Por otro lado, el contenido de K y N mostraron una asociación positiva en estas muestras de tejido foliar.

Cuadro 2. Correlación entre macronutrientes del tejido foliar del café (n=26).

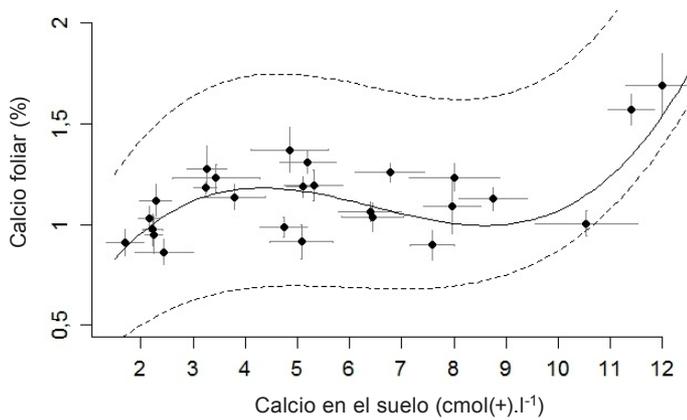
	K	Mg	Ca
K			
Mg	-0,46*		
Ca	-0,54**	0,73***	
N	0,40*	-0,08	-0,05

Valor-p: *<0,05; **0,01; ***0,001

El análisis apunta a que la concentración de Ca, Mg y K en el tejido foliar de café estaba asociado con la disponibilidad de estos nutrientes en el suelo. El Cuadro 3 presenta los parámetros de los modelos lineales en función del contenido de Ca, Mg y K en la hoja con su contraparte en el suelo. De este conjunto de modelos, el polinomial de tercer grado es el más explicativo sobre el contenido de Ca foliar como función de la disponibilidad de esta base intercambiable en la solución del suelo (Cuadro 3, Figura 2).

Cuadro 3. Modelos lineales relacionando la disponibilidad de Ca, Mg y K en el suelo y el contenido de estos nutrientes en las hojas de café (*C. arabica*) en plantaciones localizadas en el cantón de Tarrazú, Costa Rica.

Modelo	R ²	Valor-P	CIA
Relación Ca foliar y Ca edáfico			
1. $Ca_{\text{foliar}} = 0,22 + 0,53 Ca_{\text{suelo}} - 0,09 (Ca_{\text{suelo}})^2 + 0,005 Ca_{\text{suelo}}^3$	0,53	<0,001	-23,98
2. $Ca_{\text{foliar}} = 1,09 - 0,02 Ca_{\text{suelo}} - 0,004 Ca_{\text{suelo}}^2$	0,25	<0,01	-12,5
3. $Ca_{\text{foliar}} = 0,94 + 0,04 Ca_{\text{suelo}}$	0,24	<0,006	-12,9
Relación Mg foliar y Mg edáfico			
4. $Mg_{\text{foliar}} = 0,24 + 0,04 Mg_{\text{suelo}}$	0,49	<0,001	-83,1
5. $Mg_{\text{foliar}} = 0,24 - 0,04 Mg_{\text{suelo}} - 0,0001 Mg_{\text{suelo}}^2$	0,47	<0,001	-81,3
6. $Mg_{\text{foliar}} = 0,28 - 0,02 Mg_{\text{suelo}} - 0,02 Mg_{\text{suelo}}^2 + 0,002 Mg_{\text{suelo}}^3$	0,45	<0,001	-79,5
Relación K foliar y K edáfico			
7. $K_{\text{foliar}} = 1,08 + 3,10 K_{\text{suelo}} - 2,53 K_{\text{suelo}}^2$	0,30	0,005	-6,8
8. $K_{\text{foliar}} = 1,93 - 0,02 K_{\text{suelo}}$	0,01	0,93	-2,8

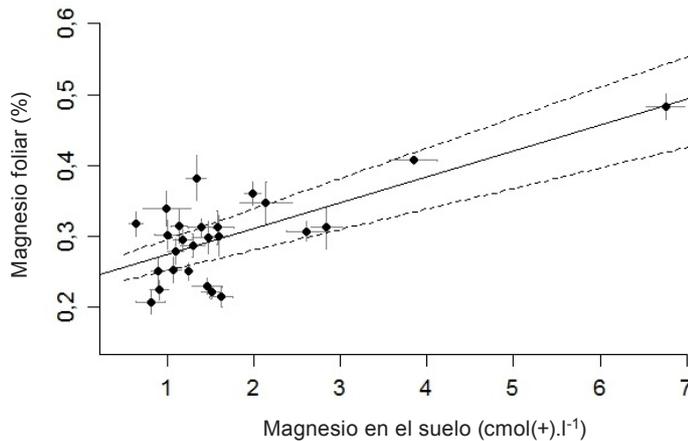


La curva sólida es la línea de mejor ajuste calculada con la ecuación 1 del Cuadro 3. Las curvas punteadas delimitan los intervalos de confianza del modelo (95%).

Fig. 2. Relación entre la concentración de calcio en la solución del suelo y el tejido foliar del café.

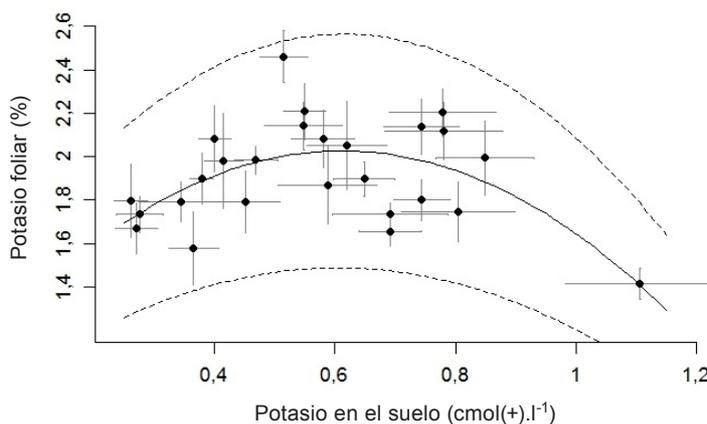
El modelo lineal con un término es el que mejor explica el contenido foliar de Mg como función de la disponibilidad de este elemento en la solución del suelo (Cuadro 3, Figura 3). El

modelo polinomial de segundo grado fue el que mejor explicó la variación del K en el tejido foliar (Cuadro 3, Figura 4).



La curva sólida es la línea de mejor ajuste calculada con la ecuación 4 del Cuadro 3. Las curvas punteadas delimitan los intervalos de confianza del modelo (95%).

Fig. 3. Relación entre la concentración de magnesio en la solución del suelo y el tejido foliar del café.



La curva sólida es la línea de mejor ajuste calculada con la ecuación 5 del Cuadro 3. Las curvas punteadas delimitan los intervalos de confianza del modelo (95%).

Fig. 4. Relación entre la concentración de potasio en la solución del suelo y el tejido foliar del café.

La Figura 5 presenta la variación de las razones Ca/K, Mg/K y Ca/Mg en el tejido foliar en relación con el gradiente del pH del suelo observado en estos agroecosistemas de café. Se observó una asociación significativa y positiva entre Ca/K foliar y el pH del suelo (coeficiente de Pearson=0,62, valor-p<0,001).

La relación Mg/K mostró una dinámica similar con el pH (coeficiente de Pearson=0,62, valor-p<0,001). No obstante, la relación Ca/Mg en el tejido foliar obtenido en estas fincas pareció no variar en relación con el pH de la solución intercambiable del suelo (coeficiente de Pearson=-0,14, valor-p=0,47).

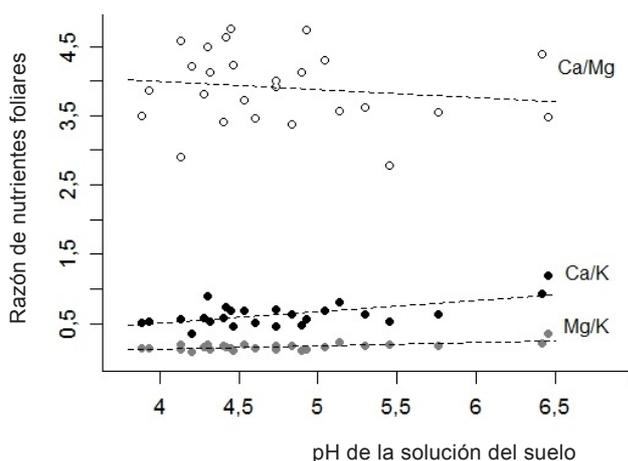


Fig. 5. Expresión de las razones calculadas entre los nutrientes foliares Ca, Mg y K a través de un gradiente de pH edáfico en plantaciones de café en Ultisoles.

Variación del K, Ca y Mg foliar en los quasi-experimentos de cargas de fruto y desarrollo vegetativo

Al comparar los quasi-tratamientos con el análisis multivariante, se encontró que el contenido de alguno de los elementos bajo análisis (N, K, Ca y Mg) varió significativamente entre las parcelas de alta y baja productividad (F de Pillais=0,245, valor-p=0,035). No obstante este mismo análisis indicó que no existieron diferencias significativas de estos nutrientes foliares entre el contraste *post-hoc* comparado en parcelas con café en distintos niveles de desarrollo

vegetativo (F de Pillais=0,15, valor-p=0,2). Por ello se desistió de una comparación.

La comparación individual de la variación de cada nutriente entre los 2 niveles del quasi-experimento de productividad nos indicó que en aquellas parcelas donde la carga de fruto fue mayor, también la concentración de Ca fue significativamente superior en comparación con el contraste con menor cosecha (Cuadro 4). Específicamente, la concentración de Ca fue $\approx 6,7\%$ mayor en las parcelas con plantas que mostraron altas cargas de frutos en relación con las parcelas de menor productividad localizadas en el mismo lote. En el caso del Mg, el ANDEVA no encontró diferencias significativas.

Cuadro 4. Comparación de la variación de 4 nutrientes foliares y variables no controladas entre los tratamientos del quasi-experimento con 2 niveles de cosecha y desarrollo vegetativo.

	Carga de frutos ^a		Altura del eje ortotrópico principal	
	Alta	Baja	Alta	Baja
Variables utilizadas en la determinación de los tratamientos <i>post-hoc</i>				
Carga de frutos (no bandola ⁻¹ ·planta ⁻¹)	33 (1,8)***	21,4 (1,5)***	28,6 (1,7)**	24,4 (2)**
Altura del eje ortotrópico principal (cm)	200 (3)*	191 (3)*	207 (4)***	184 (3)***
Variables de confusión				
Elevación del terreno (m)	1519 (19)	1519 (19)	1518 (17)	1519 (21)
Pendiente del terreno (%)	32 (4)	36 (3)	30 (3)	37 (4)
Densidad de siembra del cultivo (plantas m ⁻²)	0,79 (0,03)	0,76 (0,02)	0,81 (0,03)	0,77 (0,03)
Número de ejes ortotrópicos (no. planta ⁻¹)	3,9 (0,2)	4,1 (0,2)	4,1 (0,2)	4,2 (0,2)
Signos de poda (no. planta ⁻¹)	3,4 (0,2)	3,4 (0,2)	3,5 (0,2)	3,5 (0,3)
Arboles de sombra (no. parcela ⁻¹)	7,6 (0,6)	7,6 (0,6)	6,7 (0,6)	7,5 (0,7)
Macronutrientes foliares (%)				
Nitrogeno (N)	2,99 (0,04)	3,03 (0,03)	3 (0,04)	3,01 (0,03)
Potasio (K)	1,66 (0,04)*	1,76 (0,05)*	1,69 (0,05)	1,75 (0,05)
Magnesio (Mg)	0,31 (0,01)	0,3 (0,01)	0,31 (0,01)	0,3 (0,01)
Calcio (P)	1,19 (0,03)*	1,11 (0,04)*	1,19 (0,03)	1,11 (0,04)
Relaciones de nutrientes foliares				
Ca/N	0,4 (0,01)**	0,37 (0,01)**	0,4 (0,01)	0,37 (0,01)
Ca/P	8,76 (0,39)*	7,94 (0,37)*	8,97 (0,4)	8,06 (0,34)
Ca/K	0,74 (0,03)**	0,65 (0,03)**	0,73 (0,03)	0,66 (0,03)
Ca/Mg	4,06 (0,16)	3,8 (0,12)	3,94 (0,14)	3,81 (0,14)
Mg/N	0,1 (0)	0,1 (0)	0,11 (0)	0,1 (0)
Mg/P	2,25 (0,11)	2,13 (0,09)	2,33 (0,1)	2,19 (0,1)
Mg/K	0,19 (0,01)	0,18 (0,01)	0,19 (0,01)	0,18 (0,01)

a: Números entre paréntesis corresponden al error estándar.

Valor-p: *≤0,05; **≤0,01

En las parcelas con alta carga de frutos, la concentración de K en el tejido foliar fue 5,7% menor a la observada en las hojas de plantas en las parcelas de baja carga de frutos (Cuadro 4). Al analizar las relaciones foliares computables entre Ca, Mg, K y N, observamos que las razones Ca/K y Ca/N fueron significativamente mayores en las parcelas con alta productividad (Cuadro 4).

Es importante señalar que no se observó una variación significativa en algunas de las posibles variables no controladas que modificaran el efecto conocido como variables de confusión que pudieran haber influenciado a la carga de frutos o el desarrollo vegetativo de las plantas de café muestreadas quasi-experimento (Cuadro 4).

DISCUSIÓN

Este análisis demuestra que en estos Ultisoles el contenido foliar de Ca, Mg y K depende en gran medida de su concentración en el suelo. En otros estudios se ha descrito detalladamente la respuesta del Ca y Mg en la biomasa de plántulas de café en condiciones de almácigo como consecuencia de la disponibilidad de estos nutrientes (Sadeghian Khalajabadi 2012). Igualmente, la asociación entre el contenido de estos nutrientes en la biomasa y el suelo a través de diferentes escalas espaciales ha sido descrita para distintos grupos de plantas (Metali *et al.* 2015, Sun *et al.* 2015). En este ensayo se identificó que es la primera vez que se reporta la asociación entre las variaciones del contenido de Ca, Mg y K en el tejido foliar de plantaciones de café en relación con el gradiente de fertilidad de los suelos para un paisaje cafetalero.

Si se considera la homogeneidad genética del cultivo de café en la zona de Los Santos y el empleo de prácticas culturales y paquetes tecnológicos similares, es fácil observar como el estatus nutricional del cultivo responde uniformemente a la variación de la fertilidad de los suelos. Este análisis además parece corroborar la compleja dinámica entre la fertilidad de Ca y K del suelo y su asimilación y expresión en las hojas del café (Bertsch 1988). De acuerdo con Brady

and Weil 1996 y como lo señalan los resultados expuestos en este trabajo, un aumento moderado de la concentración de Ca y el pH en la solución del suelo también favorece la disponibilidad de K. Al aumentar el contenido de K en la hoja es posible que la tasa de asimilación del Ca disminuya, igual que su concentración en la hoja. No obstante, en suelos con mayor fertilidad de Ca, la tasa de asimilación de K disminuye, mientras que la de Ca no se vería afectada. Es por ello que, a través del gradiente de pH y contenido de Ca observados en estos suelos, se identificó un cambio significativo en la relación de Ca/K.

El análisis presente, orienta sobre la importancia de la fertilidad de Ca de los Ultisoles de Tarrazú para la producción de café (Castro-Tanzi *et al.* 2012). El Ca es un elemento fundamental en distintas etapas de desarrollo del cultivo y para diferentes procesos metabólicos y fisiológicos. Con estos datos es difícil definir cuáles procesos de desarrollo o mantenimiento fisiológico del cultivo son influenciados por la variación de este nutriente en la planta. No obstante, los resultados expuestos, se identificó que la variación en el contenido de Ca y K poco tienen que ver con el desarrollo vegetativo del cultivo; más bien las evidencias expuestas señalan a que la influencia de esos elementos impactan en la carga de frutos.

Es imposible entender la importancia del Ca para la productividad del café sin incluir la dinámica del K. Es ampliamente aceptado que el cultivo de café responde positivamente a la fertilización con K. No obstante, estos resultados señalan que en los agroecosistemas de Los Santos, Tarrazú, podrían presentarse excesos de fertilización de potasio en aquellas fincas donde se demuestra un desbalance entre el K y el Ca en la biomasa foliar. Como consecuencia, la excesiva asimilación de K en relación con el Ca, ejercería una reducción en el potencial productivo de estas plantaciones.

La fertilidad de Ca, Mg y K de estos Ultisoles es determinada por la pedología de los mismos. Chinchilla *et al.* (2011) indican que la capacidad de intercambio catiónico en Ultisoles desarrollados a partir de material parental

coluvial o sedimentario en la cuenca del Pirrís es explicada en gran medida por el contenido de arcillas. El porcentaje de saturación de acidez demuestra una correlación negativa con el pH, mientras que la concentración de bases intercambiables expresa una positiva (Castro-Tanzi *et al.* 2012). Desde la perspectiva de los requerimientos del cultivo del café, los niveles de bases intercambiables en los suelos de Tarrazú se pueden considerar bajos (Méndez y Bertsch 2012, Chaves 2014).

No obstante, existen evidencias de que la dinámica de las bases intercambiables en estos Ultisoles es fuertemente influenciada por el manejo agronómico. Los suelos agrícolas en el cantón de Tarrazú han sufrido una paulatina acidificación perceptible en las 2 últimas décadas (Méndez y Bertsch 2012). El uso excesivo de fertilizantes nitrogenados con alta capacidad acidificante presumiblemente han contribuido al deterioro de la fertilidad de estos Ultisoles (Cabalceta y Bornemisza 1996, Castro-Tanzi *et al.* 2012). Seguramente la extracción histórica de Ca y Mg sumado a las pocas entradas de estos nutrientes a los agroecosistemas de café también han contribuido a la paulatina pérdida de la fertilidad.

Los resultados expuestos en este trabajo indican que un manejo más adecuado de la nutrición de Ca y K puede ser una estrategia para incrementar la productividad del café en Tarrazú. El encalado de los suelos es una práctica que permite reducir la acidez e incrementar la disponibilidad de Ca y Mg en la solución del suelo (Chaves Arias *et al.* 2012). En Ultisoles, los rendimientos de café se pueden maximizar al combinar el uso de fórmulas completas con enmiendas calcáreas (Rodríguez 1990). En la caficultura sobre Ultisoles recomendamos incorporar el encalado como una práctica periódica. No obstante, es importante entender que la acidificación del suelo y la consecuente pérdida de su fertilidad es exacerbada por el uso excesivo de fertilizantes sintéticos. Los resultados expuestos en este análisis señalan que un excedente de N y K en relación con el Ca en la biomasa de las plantas de café acentúan

las deficiencias del último en la planta. Este fenómeno a su vez podría ser incrementado por la excesiva aplicación de N y K, sobre los requerimientos de la cosecha (Castro-Tanzi *et al.* 2012, Capa *et al.* 2015). Por ende, ajustar las dosis de N y K según los requerimientos del cultivo también podría mitigar el deterioro de los suelos bajo cultivo intensivo de café y aumentar la cosecha.

A la luz de este y otros estudios, se puede dilucidar que la baja fertilidad de Ca y Mg actúa como un factor limitante en sistemas cafetaleros bajo manejo intensivo de fertilizantes. En sistemas de *C. arabica* donde la poca o nula utilización de insumos fertilizantes, la disponibilidad de K en los suelos explica en gran medida la variación productividad del cultivo (Wang *et al.* 2015). No obstante, según los resultados de este y otros estudios (Arboleda *et al.* 1988, Castro-Tanzi *et al.* 2012) en sistemas caracterizados por el uso intensivo de fertilizantes, donde las demandas de N y K seguramente son abastecidos, la concentración de Ca en el suelo asume mayor importancia.

CONCLUSIÓN

El Ca y Mg son macroelementos particularmente importantes en agroecosistemas de café bajo manejo intensivo de fertilizantes y cultivados en suelos rojos. En plantaciones de café, con agroecosistemas similares, la existencia de Ca y Mg en la hoja va a depender de la disponibilidad de este nutriente en la solución intercambiable del suelo. Se identificó que en una parcela de café, aquellas plantas con mayor contenido de Ca y mayores valores en la relación Ca/K en las hojas, presentaron mayores cargas de frutos. Estas observaciones permitieron vincular al Ca como nutriente limitante de la cosecha en Ultisoles con baja fertilidad de este elemento.

En sistemas con aplicaciones donde siempre estén presentes fertilizantes, con N, P y K, es asegurar la disponibilidad adecuada de dosis de Ca y Mg debido al posible potencial acidificante de los fertilizantes sintéticos nitrogenados considerar el encalado como una práctica periódica.

AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue posible gracias al apoyo proporcionado por Earthwatch Institute, Starbucks Coffee Company y CoopeTarrazú R.L. Se agradece también al Dr. Arthur Riggs el apoyo financiero, también Mark Chandler, Natalia Ureña, Carlos Mario Rodríguez, Orlando Mora y Ricardo Zúñiga colaboraron ampliamente en distintas etapas de la investigación. Igualmente, este trabajo no se hubiese podido llevar a cabo sin el apoyo de 300 voluntarios que participaron en los programas de Earthwatch así como cientos de productores de café asociados a CoopeTarrazú R.L. Finalmente se le agradece a Marianela González Coghi y Floria Bertsch las observaciones con propósito de mejorar el documento.

LITERATURA CITADA

- Akaike, H. 1974. A new look at the statistical model identification. *Automatic Control, IEEE Transactions on* 19:716-723.
- Arboleda, C; Arcila, J; Martínez, R. 1988. Sistema integrado de recomendación y diagnosis: una alternativa para la interpretación de resultados del análisis foliar en café. *Agronomía Colombiana* 5:17-30.
- Bertsch, F. 1988. Potasio, calcio y magnesio en el sistema suelo-café. *Curso Regional Sobre Nutrición Mineral Del Café*. IICA, San José, Costa Rica. 83 p.
- Bertsch, F. 1998. La Fertilidad de los Suelos y su Manejo. *Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo*, San José, Costa Rica. 157 p.
- Bertsch, F. 2003. Absorción de nutrimentos por los cultivos. *ACCS*, San José, Costa Rica. 307 p.
- Brady, NC; Weil, RR. 1996. *The nature and properties of soils*. Prentice-Hall Inc. 974 p.
- Cabalceta, G; Bornemisza, E. 1996. Acidificación de suelos cafetaleros del Valle Central. *X Congreso Nacional Agronómico / II Congreso Nacional de Suelos*, 8-12 Jul 1996. Ministerio de Agricultura, San José, Costa Rica, 2 p.
- Capa, D; Pérez-Esteban, J; Masaguer, A. 2015. Unsustainability of recommended fertilization rates for coffee monoculture due to high N₂O emissions. *Agronomy for Sustainable Development* 35:1551-1559.
- Castro-Tanzi, S; Dietsch, T; Ureña, N; Vindas, L; Chandler, M. 2012. Analysis of management and site factors to improve the sustainability of smallholder coffee production in Tarrazu, Costa Rica. *Agric. Ecosyst. Environ.* 155:172-181.
- Castro-Tanzi, S; Flores, M; Wanner, N; Dietsch, T.V; Banks, J; Ureña-Retana, N; Chandler, M. 2014. Evaluation of a non-destructive sampling method and a statistical model for predicting fruit load on individual coffee (*Coffea arabica*) trees. *Scientia Horticulturae* 167:117-126.
- Chaves Arias, VM; Castillo, A; RafaelMarín Méndez, W; Avellán Zumbado, MJ; Ramírez, J; Barquero, M.C; Howeler, R; Díaz-Romeu, R.H; Marroquín Flores, H; Murillo, J. 2012. Fertilización y enclado del cultivo de café, con base al análisis químico de suelos. *Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE)*, San José, Costa Rica. 19 p.
- Chaves, V. 1999. Manejo de la Fertilización en Café. *XI Congreso Nacional Agronómico / III Congreso Nacional de Suelos*. MAG, San José, Costa Rica. 11 p.
- Chaves, VM. 2014. Caracterización de la fertilidad de los suelos dedicados al cultivo del café en Costa Rica. In: *CICAFFE (ed.), IV Simposio Nacional de Caficultura*. CICAFFE, Heredia. 3 p.
- Chinchilla, M; Mata, R; Alvarado, A. 2011. Caracterización y Clasificación de algunos Ultisoles de la Región de los Santos, Talamanca, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 35:51-81.
- Díaz-Romeau, R; Hunter, A. 1978. Metodología de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal e investigación en invernadero. *CATIE*, Turrialba, Costa Rica. 19 p.
- Durán, N. 2001. Manejo de suelos y fertilización de palma aceitera. In: *Meléndez, G., Molina, E. (eds.), Fertilidad de los suelos y manejo de la nutrición de los cultivos de Costa Rica*. Centro de Investigaciones Agronómicas, Montes de Oca, Costa Rica. 12 p.
- Guo, JH; Liu, XJ; Zhang, Y; Shen, JL; Han, WX; Zhang, WF; Christie, P; Goulding, KWT; Vitousek, P.M; Zhang, F.S. 2010. Significant Acidification in Major Chinese Croplands. *Science* 327:1008-1010.
- Henríquez, C; Bertsch, F; Salas, R. 1998. Fertilidad de los Suelos: *Manual de Laboratorio*. ACCS, San José, Costa Rica. 64 p.
- Hepler, PK. 2005. Calcium: a central regulator of plant growth and development. *The Plant Cell* 17:2142-2155.
- ICAFFE (Instituto del Café de Costa Rica). 2014. Informe sobre la actividad cafetalera de Costa Rica. Heredia, Costa Rica. 109 p.
- Kadri, SM; Zaluski, R; Lima, GPP; Mazzafera, P; Orsi, RD; 2016. Characterization of *Coffea arabica* monofloral honey from Espirito Santo, Brazil. *Food Chemistry* 203:252-257.
- Laviola, BG; Martinez, HEP; de Souza, RB; Alvarez, VH. 2007. Dynamics of calcium and magnesium in leaves and fruits of Arabica coffee. *Revista Brasileira De Ciencia Do Solo* 31:319-329.

- Méndez, JC; Bertsch, F. 2012. El uso de bases de datos en el estudio de la fertilidad de los suelos agrícolas de Costa Rica: Estado actual y principales cambios en el tiempo. *Informaciones Agronómicas de Hispanoamérica* 7 p.
- Metali, F; Abu Salim, K; Tennakoon, K; Burslem, D. 2015. Controls on foliar nutrient and aluminium concentrations in a tropical tree flora: phylogeny, soil chemistry and interactions among elements. *New Phytologist* 205:280-292.
- R Development Core Team, 2010. R: A language and environment for statistical computing. In: R Foundation for Statistical Computing (Ed.), Vienna, Austria.
- Ramalho, JC; Rebelo, M; Santos, ME; Antunes, ML; Nunes, MA. 1995. Effects of calcium deficiency on *Coffea arabica*. Nutrient changes and correlation of calcium levels with some photosynthetic parameters. *Plant and Soil* 172:87-96.
- Ramírez, F; Boniche, J; Bertsch, F; Mora, L. 2002. Consumo de nutrimentos por los frutos y bandolas de café caturra durante un ciclo de desarrollo y maduración en Aquiares, Turrialba, Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 26:33-42.
- Rodríguez, OM. 1990. Respuesta del café (*Coffea arabica*) a la aplicación de carbonato de calcio en diferentes dosis y épocas. *Xiii Simposio Sobre Caficultura Latinoamericana*. Bib. Orton IICA/CATIE. 35 p.
- Sadeghian Khalajabadi, S. 2012. Efecto de los cambios en las relaciones de calcio, magnesio y potasio intercambiables en suelos de la zona cafetera colombiana sobre la nutrición de café (*Coffea arabica* L.) en la etapa de almacigo. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia. 181 p.
- Sadeghian, S; Mejía, B; González, H. 2013. Acumulación de calcio magnesio y azufre en los frutos de café. *CENICAFE* 64:7-18.
- Salazar, LAL; Valencia, NR; Khalajabadi, SS. 2016. Disponibilidad de Ca²⁺, Mg²⁺ y K⁺ en función de las propiedades del suelo, zona cafetera central de Colombia. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental (RIAA)* 6:29-42.
- Sandoval, D; Mata, R. 2014. Base de perfiles de suelos de Costa Rica (en línea): Versión 1. 2. In: (ACCS), A.C.d.I.C.d.S. (ed.). Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo (ACCS), San José, Costa Rica.
- Sun, X; Kang, HZ; Kattge, J; Gao, Y; Liu, CJ; 2015. Biogeographic patterns of multi-element stoichiometry of *Quercus variabilis* leaves across China. *Canadian Journal of Forest Research* 45:1827-1834.
- Upreti, G; Bittenbender, HC; Ingamells, JL. 1991. Rapid Estimation of Coffee Yield. 14th International Scientific Colloquim on Coffee. Association Scientifique Internationale du Café (ASIC), San Francisco, California. 7 p .
- Wang, N; Jassogne, L; van Asten, PJA; Mukasa, D; Wanyama, I; Kagezi, G; Giller, KE; 2015. Evaluating coffee yield gaps and important biotic, abiotic, and management factors limiting coffee production in Uganda. *European Journal of Agronomy* 63:1-11.



Todos los derechos reservados. Universidad de Costa Rica. Este artículo se encuentra licenciado con Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-SinObraDerivada 3.0 Costa Rica. Para mayor información escribir a rac.cia@ucr.ac.cr

