

Lixiviación del potasio en suelos de la zona cafetera y su relación con la textura

Leaching of potassium in soils of the coffee zone and its relationship with the texture

Lixiviação de potássio em solos da zona cafeeira e sua relação com a textura

SIAVOSH SADEGHIAN-KHALAJABADI¹, ESNÉIDER ARIAS-SUÁREZ²

RESUMEN

Para mejorar la eficiencia en el uso de los fertilizantes es necesario conocer aquellas características del suelo que la afectan. Con el propósito de evaluar el efecto de la textura del suelo sobre las pérdidas de potasio (K^+) por lixiviación, se colectaron muestras de suelo a 25 cm de profundidad mediante tubos de PVC en cuatro unidades cartográficas de suelo de la zona cafetera de Colombia: San Simón (Eutropept, franco arenosa), Montenegro (Fulvudands, franco arenosa), Chinchiná (Melanudands, franca) y Doscientos (Dystropept, franco arcillosa). La mitad de las muestras de cada unidad de suelo (siete) se fertilizó superficialmente con 4 g de K en forma de KCl (60% de K_2O) y la otra mitad no; posteriormente se suministraron 360 mL de agua destilada cada cuatro días durante 25 oportunidades y se valoró el K^+ lixiviado, además de Ca^{2+} , Mg^{2+} y pH. Las mayores pérdidas por lixiviación de K^+ aplicado se registraron para la unidad Chinchiná, seguido por Montenegro, San Simón y Doscientos, respuesta que se relacionó con la mineralogía de los suelos y la CICE, antes

Recibido para evaluación: 17 de Abril de 2017.

Aprobado para publicación: 2 de Abril de 2018.

- 1 Centro Nacional de Investigaciones de Café (CENICAFÉ), Disciplina de Suelos, Grupo de investigación Agronomía. Ph.D. en Ciencias Agropecuarias. Chinchiná, Colombia.
- 2 Federación Nacional de Colombia, Comité Departamental del Valle del Cauca. Ing. Agrónomo. Sevilla, Colombia.

Correspondencia: siavosh.sadeghian@cafedecolombia.com

que la textura. En consecuencia de la aplicación de K, se incrementaron las pérdidas de Ca^{2+} y Mg^{2+} por lixiviación durante los primeros riegos.

ABSTRACT

To improve the efficiency in the use of fertilizers it is necessary to know those characteristics of the soil which have an effect on it. With the purpose of evaluating the effect of the texture of soil on the losses of potassium (K^+) by leaching, soil samples at 25 cm deep were taken, using PVC tubes in four cartographical units of soil in the Coffee Zone of Colombia: San Simón (Eutropept, sandy loam), Montenegro (Fulvudands, sandy loam), Chinchiná (Melanudands, loam) and Doscientos (Dystropept, clay loam). Half of the samples from each unit of soil (seven) were superficially fertilized with 4 g of K in the form of KCl (60% of K_2O) and the other half weren't; subsequently, 360mL of distilled water was administered every four days for 25 times and the leached K^+ was valued, as well as the Ca^{2+} , Mg^{2+} and pH. The highest losses by leaching of K^+ applied were registered in the Chinchiná unit, followed by Montenegro, San Simón and Doscientos. This response was mainly related to the mineralogy of the soils and the ECEC, before the texture. As a result of the administration of K, losses of Ca^{2+} and Mg^{2+} by leaching were increased during the first irrigations.

RESUMO

Para melhorar a eficiência no uso de fertilizantes é necessário conhecer as características do solo que têm um efeito sobre ela. A fim de avaliar o efeito da textura do solo sobre as perdas de potássio (K^+) por lixiviação, foram feitas amostragens de solo a 25 cm de profundidade, utilizando tubos de PVC em quatro unidades cartográficas de solo na Zona Cafeeira da Colômbia: San Simon (Eutropept, Marga arenosa), Montenegro (Fulvudands, marga arenosa), Chinchiná (Melanudands, Franca) e Doscientos (Dystropept, marga de argila). Metade das amostras de cada unidade de solo (sete) foi fertilizada superficialmente com 4 g de K na forma de KCl (60% de K_2O) e a outra metade não; Subsequentemente, 360 mL de água destilada foi administrada a cada quatro dias durante 25 vezes e o K^+ lixiviado foi avaliado, bem como o Ca^{2+} , Mg^{2+} e pH. As maiores perdas por lixiviação de K^+ aplicado foram registradas para a unidade de Chinchiná, seguidas por Montenegro, San Simón e Doscientos. Esta resposta foi relacionada principalmente à mineralogia dos solos e ao CTCE, antes da textura. Como resultado da aplicação de K, as perdas de Ca^{2+} e Mg^{2+} por lixiviação aumentaram durante as primeiras irrigações.

INTRODUCCIÓN

El potasio (K) es considerado el catión más importante en la fisiología de las plantas, no solo por su contenido en los tejidos vegetales, sino por las funciones que desempeña. Éste es esencial en la translocación de azúcares y la formación de almidón, se requiere para la apertura y cierre de estomas, mejora la resistencia de los cultivos a enfermedades y contribuye a la calidad de las cosechas [1,2,3]. El efecto favorable del suministro de K,

PALABRAS CLAVE:

Lixiviación de cationes,
Mineralogía de arcillas,
Capacidad de Intercambio
Catiónico Efectiva-CICE.

KEYWORDS:

Cations leaching,
Clay mineralogy, Effective Cation
Exchange Capacity.

PALAVRAS-CHAVE:

Lixiviação de cátions,
Mineralogia de argila,
Capacidade de Troca Cátions
efectiva.

en particular cuando sus tenores en el suelo son bajos, está bien documentado [4,5].

El K, junto con el nitrógeno, son los dos nutrientes de mayor demanda por la planta de café en todas las etapas del cultivo y los que más se remueven por la cosecha [6]; además, el suministro de K vía fertilización puede afectar la calidad de la bebida de café [7].

Entre los factores que determinan la disponibilidad de K⁺ en el suelo se encuentran: la cantidad y el tipo del mineral arcilloso, CIC, el contenido del K⁺ intercambiable, la capacidad del suelo para fijar el K⁺, la humedad, la temperatura, la aireación, el pH y la textura del suelo [5]. En cuanto a la textura se refiere, entre mayor sea la proporción de la fracción arena, el suelo tendrá una menor superficie reactiva y menor capacidad para retener los cationes intercambiables (entre ellos el K⁺); además, los suelos arenosos facilitan el drenaje, condición que favorece las pérdidas por lixiviación de los elementos [8,9,10]. Lo anterior ha sido identificado como un problema potencial en la nutrición de las plantas –incluyendo el café–, tanto en sus componentes económicos como ambientales [11]; aspecto cuyo manejo contempla estrategias como: la selección de fuentes de abonos [12,13,14,15], empleo de residuos de cosecha provenientes de cultivos asociados [16,17], fraccionamiento, época y forma de la fertilización, la siembra de variedades más eficientes en la toma y uso de K⁺ [18] y el manejo de riego [19], entre otras. Pese a lo anterior, el impacto que causa la lixiviación de K⁺ al aplicarlo en la fertilización se considera de mediana magnitud, cuando se compara frente a otros elementos como el nitrógeno [3], para cuya reducción del impacto se propone racionalizar el uso de los fertilizantes [20].

Para la zona cafetera de Colombia, Henao y Delvaux [21] demostraron que la lixiviación de K⁺ puede depender de la mineralogía y el poder tampón del suelo, antes que la textura.

En un estudio desarrollado por Suárez y Carrillo [22] en suelos de la unidad Chinchiná, se mostró que la lixiviación de K⁺ varía según la fuente del fertilizante suministrado; además, se encontró que en los primeros 9 lavados (riegos), se pierde más del 94% del K aplicado.

Debido a que existe cierta relación entre el contenido de arenas y la percolación, algunos autores relacionan de manera generalizada la textura del suelo con las pérdidas de nutrientes por lavado, sin que

existan evidencias claras de este fenómeno para los suelos de la zona cafetera de Colombia. Por lo anterior, mediante el desarrollo de este trabajo, se buscó generar mayor información acerca del efecto de la textura del suelo en las pérdidas del K⁺ por lixiviación, como parte integral en la búsqueda de alternativas para mejorar la eficiencia en el uso del elemento. Se espera que los resultados de esta investigación contribuyan a una fertilización potásica más eficiente en las regiones objeto de estudio.

MÉTODO

La fase experimental de la investigación se realizó en el Centro Nacional de Investigaciones de Café-CENICAFÉ, ubicado en el municipio de Chinchiná, departamento de Caldas, a 5° 1' latitud norte y 75° 35' longitud oeste, con 1.310 m de altitud, temperatura promedio de 21,7°C y precipitación anual aproximado a 3.000 mm. De acuerdo con la clasificación de Holdridge, la zona de vida para el sitio del estudio corresponde a Bosque húmedo premontano.

Se seleccionaron las siguientes cuatro unidades cartográficas de suelo de la zona cafetera de Colombia, contrastantes en su textura y de más propiedades físicas, químicas y mineralógicas (Cuadro 1): San Simón (Ibagué, Tolima), Chinchiná (Chinchiná, Caldas), Montenegro (Buenavista, Quindío) y Doscientos (Sevilla, Valle del Cauca).

En cada unidad de suelo se seleccionó un lote de café (*Coffea arabica* L.), con edades entre 2 y 5 años, establecido a plena exposición solar y con altas densidades de siembra (entre 5.000 y 10.000 plantas/ha). Mediante el uso de cilindros de PVC de 30 cm de largo por 10,2 cm de diámetro, se tomaron 14 muestras de suelo sin disturbar a 25 cm de profundidad en el centro de cada lote y en el área correspondiente a la gotera del árbol. Así mismo, se recolectaron muestras de suelos para el análisis de la textura (método de pipeta) y demás propiedades físicas y químicas, de acuerdo a las metodologías descritas por Rowell [23]; adicionalmente, se determinó el contenido mineralógico por difracción de rayos X de la fracción arcillosa (<2 µm), polvo y material en partículas.

Después de recolectar las muestras, se instaló una malla de acero inoxidable en la parte inferior de los cilindros para evitar la pérdida de suelo; posteriormente,

estos se ubicaron verticalmente sobre un soporte de madera y recibieron riego hasta alcanzar la capacidad de campo. La mitad de las muestras recolectadas de cada unidad de suelo, es decir siete, se fertilizó superficialmente con 4,0 g de K por cilindro en forma de KCl (60% de K_2O), mientras que la otra mitad no recibió aportes de este elemento. En total se contó con 56 unidades experimentales, resultados de 4 unidades de suelo x 2 tratamientos de K (con y sin aplicación) y 7 repeticiones, las cuales fueron dispuestas bajo el diseño experimental completamente aleatorio.

Para medir la lixiviación de K^+ se aplicaron 360 mL de agua destilada a cada cilindro, distribuidos en seis aplicaciones de 60 mL cada 30 minutos; procedimiento que se repitió cada cuatro días, durante 25 ocasiones (riegos).

Con la ayuda de un embudo, ubicado en la parte inferior de los cilindros, se colectó la solución lixiviada en frascos de vidrio. Una vez que se midió el volumen de la solución, se determinó el pH y las concentraciones de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} mediante espectrofotometría de absorción atómica.

Se realizó un análisis de varianza ($p < 5\%$), bajo el modelo del diseño experimental aplicado (completamente aleatorio). Las pérdidas totales por lixiviación de K^+ entre unidades de suelo se compararon con la prueba Tukey ($p < 5\%$) y las de K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} entre tratamientos de K con la prueba t ($p < 5\%$).

RESULTADOS

Pérdida de K^+ por lixiviación

En el tratamiento sin fertilización, las pérdidas de K^+ por lixiviación fueron relativamente bajas y presentaron pocas variaciones a través de tiempo dentro de cada unidad de suelo (Figura 1). En promedio, los mayores registros se obtuvieron en la unidad Montenegro; comportamiento que estaría relacionado con el efecto conjugado de los altos contenidos iniciales de K^+ y su textura arenosa; además, el porcentaje de saturación de K^+ , calculado a partir de la suma de cationes-CICE (8,42%), era más alto que en las unidades San Simón (2,78%) y Chinchiná (3,32%), y comparable con la Doscientos (8,54%), siendo esta última de textura franco arcillosa.

Cuando se adicionó K, la lixiviación fue alta durante los primeros riegos y varió entre los suelos hasta la evaluación 21 (prueba Tukey al 5%), tiempo después del cual no se detectaron diferencias entre los valores promedio (Figura 2). Durante los dos primeros riegos, las mayores pérdidas se registraron en la unidad San Simón, debido posiblemente al flujo preferencial del elemento a través de los macroporos, mientras que en las unidades Montenegro y Chinchiná este comportamiento fue parcialmente diferente, pues las pérdidas se incrementaron progresivamente hasta alcanzar sus máximos valores en los riegos tres y seis, respectivamente; después de los cuales comenzaron a descender. En general, para la unidad Doscientos el K^+ lixiviado fue menor y no presentó cambios significativos con los sucesivos riegos, respuesta que obedece a su mayor contenido de arcilla y capacidad para retener cationes en términos de CICE (Cuadro 1).

Cuadro 1. Propiedades de las unidades cartográficas del suelo evaluadas.

Propiedad del suelo	----- Unidad cartográfica -----			
	SS	MON	CHIN	DOS
Arena (%)	59	55	40	22
Limo (%)	26	29	43	48
Arcilla (%)	15	16	16	30
Textura	FA	F	F	FAr
Porosidad total (%)	55,35	65,41	74,31	65,20
DR (g cm ⁻³)	2,71	2,66	2,53	2,73
DA (g cm ⁻³)	1,21	0,92	0,65	0,95
CH (cm min ⁻¹)	0,13	0,28	0,05	0,08
Humedad a 33 kPa	0,30	0,33	0,38	0,37
Humedad a 1500 kPa	0,15	0,19	0,21	0,25
pH	5,10	4,80	4,60	5,30
Materia orgánica (%)	5,10	5,20	13,4	5,50
K^+ (cmol _c kg ⁻¹)	0,16	0,34	0,11	1,28
Ca^{2+} (cmol _c kg ⁻¹)	3,80	1,70	0,60	7,30
Mg^{2+} (cmol _c kg ⁻¹)	1,40	0,30	0,20	6,00
Al^{3+} (cmol _c kg ⁻¹)	0,40	1,70	2,40	0,40
CICE (cmol _c kg ⁻¹)	5,76	4,04	3,31	14,98
Material amorfo (%)	5-15	30-50	>50	5-15
Clorita (%)	-	-	-	15-30
Metahalosita (%)	30-50	-	-	5-15
Vermiculita (%)	15-30	-	-	-
Micas (%)	-	-	-	<5
Feldspatos (%)	<5	<5	-	-

SS=San Simón, MON=Montenegro, CHIN=Chinchiná, DOS=Doscientos. DR=Densidad Real, DA=Densidad Aparente, CH=Conductividad Hidráulica. Información correspondiente a los primeros 12,5 cm de profundidad.

La capacidad del suelo para retener los cationes de cambio-CICE, en particular el K^+ , depende principalmente de los contenidos y las propiedades de la materia orgánica y las arcillas [8], y ha sido identificado como una de las propiedades del suelo que determina el movimiento de K^+ en el perfil del suelo [10,24].

Henao y Delvaux [21] indican que el K^+ en la unidad Doscientos puede permanecer más tiempo en el suelo debido a que posee una capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE) que le permite contar con un número de sitios específicos más alto que otros suelos

con similar proporción de dichos sitios; además tiene un mayor poder tampón que ayuda a restituir adecuadamente el K^+ que se pierde en la solución del suelo.

La cantidad total de K^+ perdido en el tratamiento que no recibió aportes de este elemento fue más alta en la unidad Montenegro, y similar en las demás unidades de suelos (Cuadro 2). Al aplicar potasio, las mayores pérdidas fueron registradas para la unidad Chinchiná, seguida por Montenegro, San Simón y Doscientos, siendo estadísticamente iguales los promedios obtenidos en estas dos últimas.

Figura 1. Pérdidas del K^+ por lixiviación en función del riego, registradas en el tratamiento sin aplicación de K.

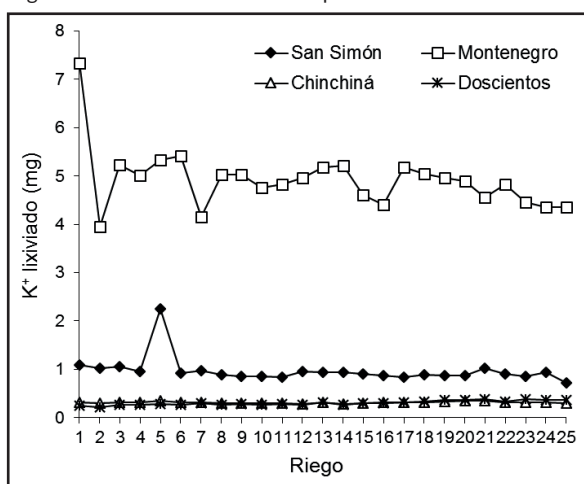
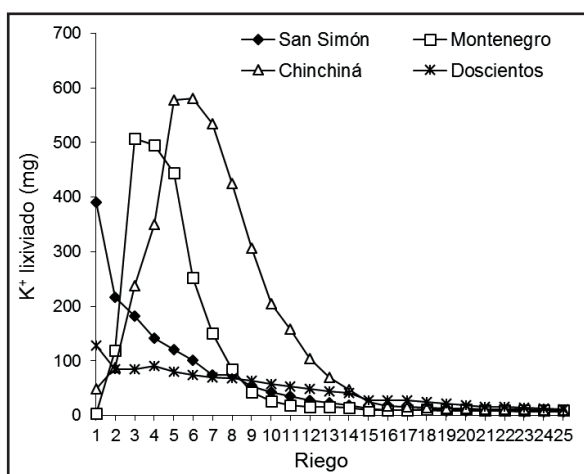


Figura 2. Pérdidas de K^+ por lixiviación en función de riego, registradas en el tratamiento con aplicación de K.



Los valores corresponden a promedios corregidos a partir del tratamiento sin aplicación de K.

Los resultados obtenidos, antes que la textura del suelo, se asocian con las diferencias que las unidades de suelos evaluados exhiben en su selectividad por el K^+ . Lo expuesto difiere de los resultados obtenidos por Andersson *et al.* [25], quienes reportan menores pérdidas por lixiviación del K^+ aplicado en suelos con más altos contenidos de arcilla. La baja capacidad para retener el K aplicado en las unidades Chinchiná y Montenegro, también reportada por Gómez *et al.* [26], puede atribuirse a su composición mineralógica, puesto que la capacidad de adsorción del K^+ disminuye en suelos con altos contenidos de alófana y la materia orgánica; comportamiento que dista de las arcillas cristalinas. Henao y Delvaux [21] señalan que los horizontes A y B de la unidad Chinchiná en el departamento de Caldas son muy poco selectivos por K^+ y presentan un bajo poder tampón, lo que implica que este suelo sea potencialmente vulnerable a pérdidas considerables de este elemento aplicado como fertilizante.

En las unidades San Simón y Doscientos las bajas pérdidas, comparadas con la unidad Chinchiná, podrían atribuirse a la mineralogía de sus suelos, en las cuales sobresalen arcillas laminares tipo 2:1 como las

Cuadro 2. Cantidad total de K^+ lixiviado (mg) según unidad de suelo y tratamiento de potasio.

Unidad de suelo	Sin aplicación de potasio		Con aplicación de potasio	
	Promedio	EE	Promedio	EE
San Simón	24,3b	5,3	1616,0c	83,7
Montenegro	123,2a	16,7	2427,9b	127,2
Chinchiná	7,9b	0,8	3888,0a	18,6
Doscientos	7,6b	2,8	1212,5c	241,0

Letras no comunes indican diferencias significativas entre unidades de suelo de un mismo tratamiento de potasio, según prueba Tukey al 5%. EE=Error de Estimación.

cloritas y las micas en la unidad Doscientos, y las vermiculitas en la unidad San Simón (Cuadro 1). Algunas evidencias experimentales han mostrado que la retención del K^+ aplicado es proporcional al contenido de arcillas tipo 2:1 en el suelo [5,27], condición que favorece el almacenamiento del K^+ en este tipo de arcillas y, a la vez, suplir en cortos períodos el K^+ que la planta necesita y preservar por mayor tiempo la productividad del ecosistema al reducir las pérdidas por lixiviación de este elemento [27]. Sumado a lo anterior, la capacidad de retención de K^+ en estas últimas dos unidades de suelo puede estar relacionada con los contenidos en la fracción arcilla de metahalosita, una halosita hidratada.

Las pérdidas totales de K^+ alcanzaron valores equivalentes al 40% de la cantidad aplicada en la unidad San Simón, 58% en Montenegro, 97% en Chinchiná y 30% en Doscientos (Figura 3). Las mayores pérdidas tuvieron lugar durante los primeros 10 riegos.

Para el suelo de la unidad Chinchiná se registraron pérdidas similares a las reportadas por Suárez y Carrillo [22] en esta misma unidad; aunque en general estos porcentajes fueron mayores a los registrados en otros estudios con suelos arenosos; al respecto, Phillips y Burton [28] reportan pérdidas de K^+ del 21, 11 y 31% de la cantidad aplicada para dosis de KCl de 50, 100 y

300 $kg\ ha^{-1}$, respectivamente, en suelos arenosos de Australia. Parte de las diferencias en mención puede relacionarse con las metodologías empleadas, en especial en lo que a las condiciones de laboratorio y campo se refiere; además de la cantidad aplicada por área.

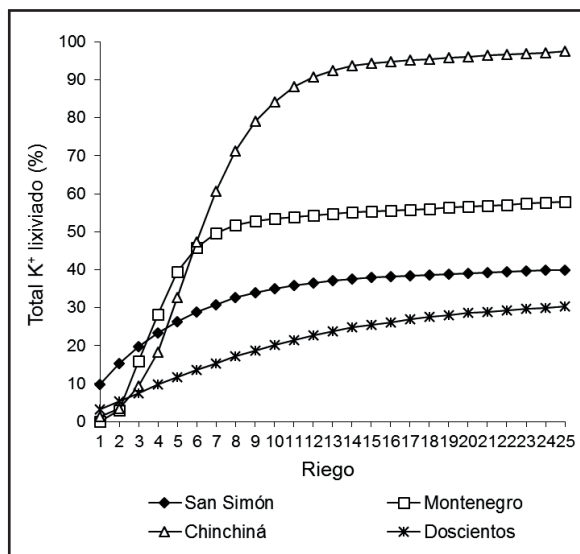
Durante los primeros tres riegos, las pérdidas totales fueron mayores en la unidad San Simón (prueba Tukey 5%), en tanto que entre el tercero y sexto riego los valores más altos se obtuvieron en la unidad Montenegro y, después del sexto riego, fue la unidad Chinchiná la que mayores pérdidas acumuladas presentó. El comportamiento inicial, detectado en la unidad San Simón, puede obedecer a que en ésta el K aplicado se desplazó a una mayor velocidad a través de los macroporos, favorecido por su alto contenido de arena (61%) y su menor capacidad de retención de humedad (Cuadro 1). En Chinchiná y Montenegro, el menor lavado del K aplicado en los primeros riegos probablemente se debe a la presencia de trazas del fertilizante que no se diluyeron y a la retención inicial del elemento en los primeros centímetros del suelo.

Lo anterior refleja que, sin presentar una relación con la textura, la unidad Chinchiná exhibe una baja afinidad por el K^+ , pues más del 90% del elemento suministrado se perdió por lixiviación durante los primeros 12 riegos, cantidad que es alta si se compara con la presentada en los demás suelos (entre 23 y 54%). Estos resultados son similares a los obtenidos por Suárez y Carrillo [22] para la unidad Chinchiná (94%).

En general, se deduce que las pérdidas de K^+ por lixiviación no sólo son afectadas por la textura del suelo, sino también por la mineralogía de la fracción arcillosa y la selectividad por el elemento, unidas al material parental y fertilidad natural del suelo.

Los resultados obtenidos sugieren que el suelo de la unidad Chinchiná en el departamento de Caldas es susceptible a mayores pérdidas por lixiviación de K^+ debido a su baja capacidad para retener cationes de cambio, evaluado mediante CICE, en especial el K^+ . La unidad Montenegro corresponde a un Andisol que favorece más la permanencia del K^+ en el suelo si se compara con la unidad Chinchiná; sin embargo, en esta unidad la lixiviación de este elemento es relativamente rápida debido a su baja CICE ligada a reducido poder tampón [21]. Estas pérdidas fueron menos críticas en la unidad San Simón, relacionada principalmente con la mineralogía de la fracción ar-

Figura 3. El porcentaje de K^+ lixiviado, en función de riego, registradas en el tratamiento con aplicación de K.



Los valores corresponden a promedios corregidos a partir del tratamiento sin aplicación de K.

cillosa que favorece la retención y fijación del K^+ . Por último, la unidad Doscientos por su textura y mayor contenido de arcillas tipo 2:1 en el suelo, posee una mayor capacidad para retener el K aplicado.

Pérdida de Ca^{2+} y Mg^{2+} por lixiviación y pH de la solución

Como consecuencia de la aplicación de K se incrementaron las pérdidas por lixiviación de Ca^{2+} y Mg^{2+} durante los primeros riegos, pero luego disminuyeron hasta niveles significativamente inferiores a los del testigo sin fertilización después de 9, 15 y 17 riegos para las unidades Montenegro, Chinchiná y San Simón, respectivamente (Figuras 4 y 5). De conformidad con lo expuestos por Essinton [8] y Havlin *et al.* [5], la presencia de estos dos cationes en el agua percolada es una consecuencia del reemplazo de Ca^{2+} y Mg^{2+} desde la fase intercambiable del suelo por el K^+ proveniente del fertilizante aplicado (KCl).

En el proceso de la lixiviación, el movimiento de los cationes está acompañado de un anión, a fin de que la electro-neutralidad del sistema se mantenga, circunstancia que depende de la solubilidad de la fuente fertilizante utilizada y de la naturaleza del anión acompañante [8]. Debido a la alta solubilidad de KCl [5] y la facilidad del ion cloruro para formar sales solubles, se espera que el Ca^{2+} y el Mg^{2+} hayan sido lixiviados como $CaCl_2$ y $MgCl_2$, respectivamente.

Las pérdidas totales de Ca^{2+} fueron mayores a las de Mg^{2+} (Cuadro 3). La mayor pérdida de Ca^{2+} frente al Mg^{2+} estaría relacionada con sus contenidos en el suelo, aunque se hubiera esperado una mayor pérdida de Mg^{2+} por su más baja fuerza de retención en consecuencia de un menor radio iónico hidratado [8].

Las pérdidas de Ca^{2+} fueron significativamente mayores en las unidades Doscientos, San Simón y Montenegro con respecto a Chinchiná (Tukey $p < 0,05$); en tanto que la cantidad total de Mg^{2+} lixiviado en Chinchiná y Montenegro fue menor que los otros dos suelos. El resultado descrito tiene su origen en aspectos como: los contenidos iniciales de estos elementos en la fase de cambio, la selectividad de los suelos y la CICE, entre otros.

En las unidades Montenegro y San Simón el pH de la solución lixiviada tendió a incrementarse con los riegos, y aunque se registró algo similar para Dos-

Figura 4. Pérdidas de Ca^{2+} por lixiviación en función de riego, registradas en el tratamiento con la aplicación de K.

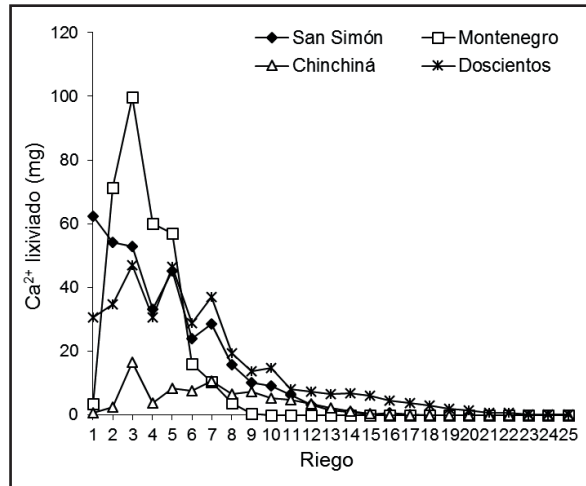
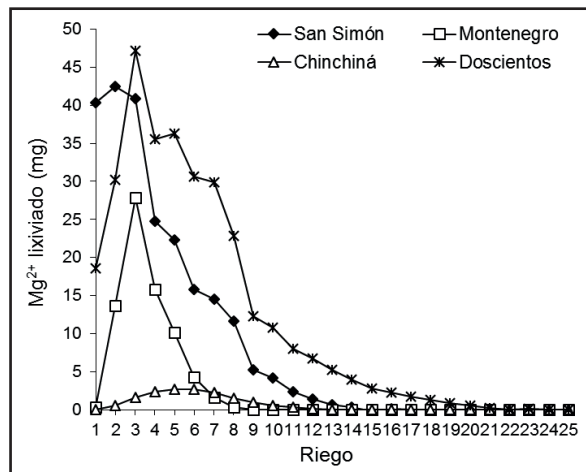


Figura 5. Pérdidas de Mg^{2+} por lixiviación en función de riego, registradas en el tratamiento con la aplicación de K.

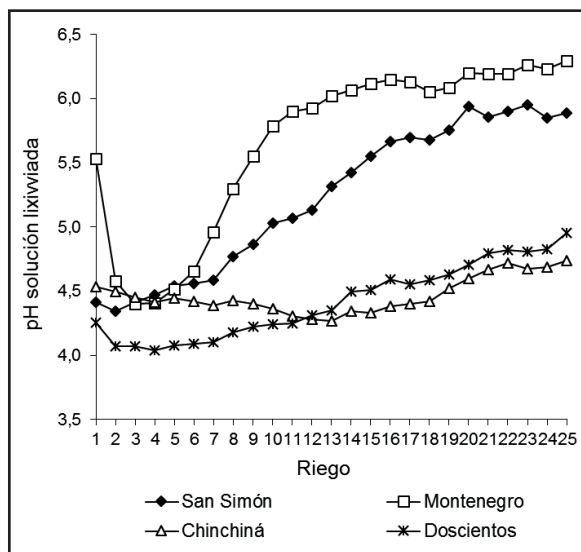


Cuadro 3. Cantidad total de Ca^{2+} y Mg^{2+} lixiviado (mg) en suelos con y sin fertilización potásica.

Unidad de suelo	Tratamiento	Ca^{2+}	Mg^{2+}
San Simón	Sin K	60,3b	23,9b
	Con K	395,1a	245,6a
Montenegro	Sin K	73,3b	12,6b
	Con K	358,2a	79,5a
Chinchiná	Sin K	59,8b	13,5b
	Con K	114,2a	21,0a
Doscientos	Sin K	48,3b	27,2b
	Con K	400,0a	333,7a

Letras no comunes indican diferencias significativas entre tratamientos de potasio para una misma unidad de suelo, según prueba t al 5%.

Figura 6. Cambios en el pH de la solución lixiviada, registrados en el tratamiento con la aplicación de K.



cientos, su magnitud fue menor (Figura 6). La corrección de la acidez estaría relacionada con el desplazamiento del Al^{3+} por el K^+ desde la fase de cambio y su posterior neutralización o lavado. Las diferencias entre los suelos se deben al mayor poder tampón de las unidades Chinchiná y Doscientos, en consecuencia de sus más altos contenidos de materia orgánica y arcillas, respectivamente.

CONCLUSIONES

Para los suelos objeto de estudio, las pérdidas por lixiviación de K^+ aplicado vía fertilización, se relacionan con la mineralogía de los suelos y la CICE, antes que la textura.

Las mayores pérdidas de K^+ tuvieron lugar durante los primeros diez riegos.

La aplicación de K favorece las pérdidas de Ca^{2+} y Mg^{2+} intercambiables por lixiviación.

REFERENCIAS

[1] NAVARRO, G. y NAVARRO, S. Química agrícola, química del suelo y de nutrientes esencial. 3 ed. Madrid (España): Mundi-Prensa, 2013, 492 p.

[2] TAIZ, L., ZEIGER, I., MØLLER, M. and MURPHY, A. Plant Physiology and Development. 6 ed. Sunderland (USA): Sinauer Associates Inc., 2015, 761 p.

[3] WILLEY, N. Environmental plant physiology. 1 ed. New York (USA): Garland Science, 2016, 320 p.

[4] FAGERIA, N.K. Potassium. En: Handbook of Plant Nutrition. 2 ed. Boca Raton (USA): CRC Press, 2015, p. 165-198.

[5] HAVLIN, J.L., TISDALE, S.L., NELSON, W.L. and BEATON, J.D. Soil fertility and fertilizers: An introduction to nutrient management. 8 ed. New Jersey (USA): Pearson, 2014. 516 p.

[6] SADEGHIAN, K.S. Nutrición de cafetales. Más agronomía más productividad. 1 ed. Manizales (Colombia), 2016, p. 51-55.

[7] LAMBOT, C., HERRERA, J.C., SADEGHIAN, S., BENAVIDES, P. and GAITÁN, A. Cultivating quality-terroir and agro-ecosystem. En: The craft and science of coffee. 1 ed. London (UK): Academic Press, 2017, p. 17-49.

[8] ESSINGTON, M.E. Soil and water chemistry: an integrative approach. 2 ed. Boca Raton (USA): CRC Press, 2015, 656 p.

[9] NAVARRO, S. y NAVARRO, G. Fertilizantes: química y acción. 1 ed. Madrid (España): Mundi-Prensa, 2014, 241 p.

[10] PINTO, R.P.H., LELIS, N.J.A., BATISTA, T.M., CARVALLO, G.H.O., FURTADO, S.N. and NOBRE, C.F. Distribuição de potássio aplicado via vinhaça em latossolo vermelho amarelo e nitossolo vermelho. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, 8(5), 2014, p.403-410.

[11] BHATTARAI, S., ALVAREZ, S., GARY, C., ROSSING, W., TITTONELL, P. and RAPIDEL, B. Combining farm typology and yield gap analysis to identify major variables limiting yields in the highland coffee systems of Llano Bonito, Costa Rica. Agriculture, Ecosystems and Environment, 243, 2017, p. 132-142.

[12] BLEY, H., GIANELLO, C., SANTOS, L.D.S. and SELAU, L.P.R. Nutrient Release, Plant Nutrition, and Potassium Leaching from Polymer-Coated Fertilizer. Revista Brasileira de Ciência do Solo, 41, 2017, p. 1-11.

[13] BASAK, B.B., SARKAR, B., BISWAS, D.R., SARKAR, S., SANDERSON, P. and NAIDU, R. Chapter Three-Bio-Intervention of Naturally Occurring Silicate Minerals for Alternative Source of Potassium: Challenges and Opportunities. Advances in agronomy, 141, 2017, p. 115-145.

- [14] MANNING, D.A.C., BAPTISTA, J., LIMON, M.S. and BRANDT, K. Testing the ability of plants to access potassium from framework silicate minerals. *Science of the total environment*, 574, 2017, p. 476-481.
- [15] CICERI, D., MANNING, D.A.C. and ALLANORE, A. Historical and technical developments of potassium resources. *Science of the total environment*, 502, 2015, p. 590-601.
- [16] CRUZ, C.S., MACHADO, C.G., JÚNIOR, S. and CRUZ, S.J.S. Potassium fertilization for corn grown under bread grass straw. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 18(6), 2014, p. 603-606.
- [17] NZEYIMANA, I., HARTEMINK, A.E., RITSEMA, C., STROOSNIJDER, L., LWANGA, E.H. and GEISSEN, V. Mulching as a strategy to improve soil properties and reduce soil erodibility in coffee farming systems of Rwanda. *Catena*, 149, 2017, p. 43-51.
- [18] SADEGHIAN, K.S., GONZÁLEZ, O.H. y ARIAS, S.E. Lixiviación de nutrientes en suelos de la zona cafetera: Prácticas que ayudan a reducirla. Chinchiná (Colombia): CENICAFE, Boletín Técnico No. 40, 2015, 36 p.
- [19] MENDES, W.D.C., ALVES JÚNIOR, J., DA CUNHA, P.C., SILVA, A.R.D., EVANGELISTA, A.W. and CASAROLI, D. Potassium leaching in different soils as a function of irrigation depths. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 20(11), 2016, p. 972-977.
- [20] BRUNO, I.P., REICHARDT, K., BORTOLOTTI, R.P., PINTO, V.M., BACCHI, O.O.S., DOURADO-NETO, D. and UNKOVICH, M.J. Nitrogen balance and fertigation use efficiency in a field coffee crop. *Journal of Plant Nutrition*, 38(13), 2015, p. 2055-2076.
- [21] HENAO, T.M.C. y DELVAUX, B. Propiedades de intercambio K-Mg en suelos derivados de materiales volcánicos de la zona cafetera central de Colombia. *Cenicafé*, 49(2), 1998, p.136-150.
- [22] SUAREZ, V.S. y CARRILLO, P.I.F. Comportamiento de tres fertilizantes potásicos en un Typic Dystrandept. *Cenicafé*, 35(2), 1984, p. 31-39.
- [23] ROWELL D.L. *Soil Science: Methods and application*. 1 ed. New York (USA): Routledge, 2014, 368 p.
- [24] UCKER, F.E., DE-CAMPOS, A.B., HERNANI, L.C., DE MACEDO, J.R. and DA SILVA MELO, A. Movimentação vertical do íon potássio em Neossolos Quartzarênicos sob cultivo com cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 51(9), 2016, p. 1548-1556.
- [25] ANDERSSON, S. SIMONSSON, M., MATTSSON, L., EDWARDS, A.C. and ÖBORN, I. Response of soil exchangeable and crop potassium concentrations to variable fertilizer and cropping regimes in long-term field experiments on different soil types. *Soil use and management*, 23(1), 2007, p. 10-19.
- [26] GÓMEZ, C., CARRILLO, P.I.F. y ESTRADA, E., G. Adsorción de potasio en Andosoles de la zona cafetera. *Cenicafé*, 33(4), 1982, p. 104-123.
- [27] BARRÉ, P. MONTAGNIER, C. CHENU, C., AB-BADIE, L. and VELDE, B. Clay minerals as a soil potassium reservoir: observation and quantification through X-ray diffraction. *Plant and Soil*, 302(1-2), 2008, p. 213-220.
- [28] PHILLIPS, I.R. and BURTON, E. Nutrient leaching in undisturbed cores of an acidic sandy Podsol following simultaneous potassium chloride and di-ammonium phosphate application. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 73(1), 2005, p. 1-14.