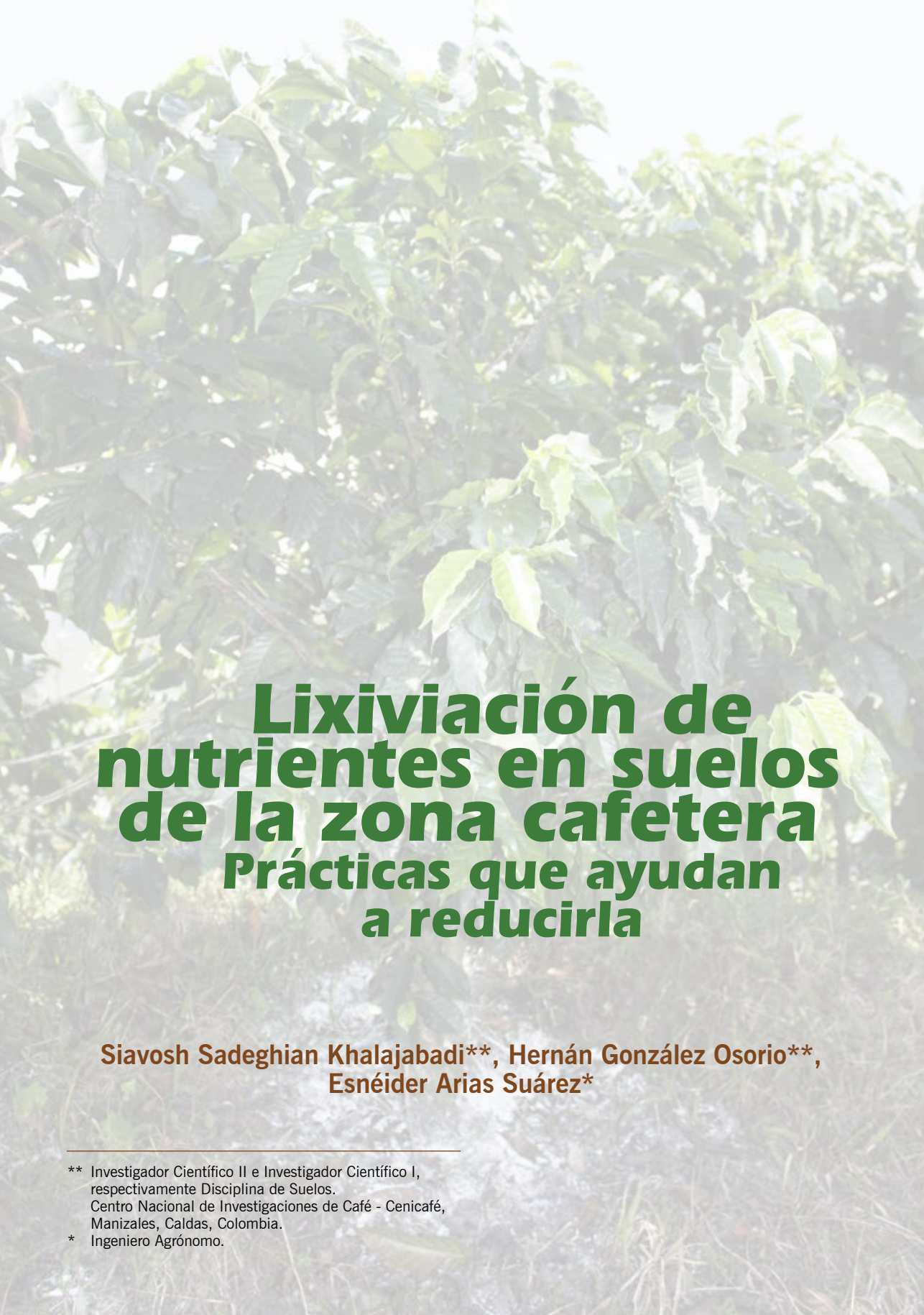


Lixiviación de nutrientes en suelos de la zona cafetera

Prácticas que ayudan a reducirla



Siavosh Sadeghian Khalajabadi
Hernán González Osorio
Esneider Arias Suárez



Lixiviación de nutrientes en suelos de la zona cafetera

Prácticas que ayudan a reducirla

Siavosh Sadeghian Khalajabadi , Hernán González Osorio** ,
Esnéider Arias Suárez***

** Investigador Científico II e Investigador Científico I,
respectivamente Disciplina de Suelos.
Centro Nacional de Investigaciones de Café - Cenicafé,
Manizales, Caldas, Colombia.

* Ingeniero Agrónomo.



Ministro de Hacienda y Crédito Público
Mauricio Cárdenas Santamaría

Ministro de Agricultura y Desarrollo Rural
Aurelio Iragorri Valencia

Ministro de Comercio, Industria y Turismo
Cecilia Álvarez Correa

Director del Departamento Nacional de Planeación
Simón Gaviria Muñoz

COMITÉ NACIONAL

Período 1° enero/2015- diciembre 31/2018

Jose Fernando Montoya Ortega

Jose Alirio Barreto Buitrago

Eugenio Velez Uribe

Danilo Reinaldo Vivas Ramos

Cliford Enrique Bonilla Smith

Javier Bohorquez Bohorquez

Octavio Oliveros Collazos

Edilberto Rafael Alvarez Pineda

Leonardo Javier Pabón Sanchez

Alfredo Yañez Carvajal

Carlos Alberto Cardona Cardona

Alejandro Corrales Escobar

Jorge Julian Santos Orduña

Luis Javier Trujillo Buitrago

Camilo Restrepo Osorio

GERENTE GENERAL

ROBERTO VÉLEZ VALLEJO

GERENTE ADMINISTRATIVO

LUIS FELIPE ACERO LÓPEZ

GERENTE FINANCIERO

JULIÁN MEDINA MORA

GERENTE COMERCIAL

CARLOS ALBERTO GONZÁLEZ

GERENTE COMUNICACIONES Y MERCADEO

LUIS FERNANDO SAMPER GARTNER

GERENTE TÉCNICO

CARLOS ARMANDO URIBE FANDIÑO

**DIRECTOR INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA
Y TECNOLÓGICA**

FERNANDO GAST HARDERS

ISBN

978-958-8490-16-8

Créditos

Edición de textos

Sandra Milena Marín L.

Diseño y diagramación

Óscar Jamie Loaiza E.

Fotografías

Archivo Cenicafé

Impreso por

2015

ISSN

0120-047 X

Los trabajos suscritos por el personal técnico del Centro Nacional de Investigaciones de Café son parte de las investigaciones realizadas por la Federación Nacional de Cafeteros de Colombia. Sin embargo, tanto en este caso como en el de personas no pertenecientes a este Centro, las ideas emitidas por los autores son de su exclusiva responsabilidad y no expresan necesariamente las opiniones de la Entidad.

El uso de nombres comerciales en esta publicación tiene como propósito facilitar su identificación y en ningún momento su promoción.

Tel. (6) 8506550 Fax. (6) 8504723
A.A.2427 Manizales
Manizales, Caldas, Colombia

www.cenicafe.org

Contenido

Introducción _____	7
El proceso de lixiviación de nutrientes _____	8
Evaluación de las pérdidas de nutrientes por lixiviación	11
Prácticas que reducen la pérdida de nutrientes vía lixiviación	12
Lixiviación de nutrientes en la zona cafetera de Colombia _____	13
Pérdidas de nitrógeno	13
Pérdidas de fósforo	17
Pérdidas de potasio	19
Pérdidas de calcio	24
Pérdidas de magnesio	26
Prácticas que ayudan a reducir la pérdida de nutrientes por lixiviación _____	28
Aspectos relacionados con la planta	29
Aspectos relacionados con el clima	29
Aspectos relacionados con el suelo	30
Aspectos relacionados con el manejo	30
Estrategias para reducir la pérdida de nutrientes por lixiviación	31
Literatura citada _____	32

Introducción

Para alcanzar el máximo potencial productivo de un cultivo que se desarrolla bajo una oferta ambiental específica, entre otros aspectos, se requiere de la implementación oportuna de prácticas tendientes a disminuir la incertidumbre generada por los recursos que el ecosistema no alcanza a suplir con suficiencia.

El suelo es un componente esencial en los sistemas de producción, por ser éste el medio donde se desarrollan las raíces para cumplir funciones de anclaje y absorción de agua, nutrientes y otras sustancias. Este recurso natural es sensible al uso y manejo; característica que afecta sus atributos a corto, mediano o largo plazo, con consecuencias sobre el ecosistema y la productividad de los cultivos.

Cuando de elementos nutritivos se trata, los fertilizantes y enmiendas suelen ser útiles para cubrir los requerimientos del cultivo y propiciar un ambiente en el que su disolución, transformación y posterior aprovechamiento se expresan satisfactoriamente. Sin embargo, la eficiencia de éstos queda sujeta al conocimiento y control de las demás variables que, en su conjunto, conducen a una adecuada y oportuna nutrición.

Con relación a lo expuesto, la lixiviación de nutrientes, entendida



como el desplazamiento de iones en solución por debajo de la zona de raíces del cultivo y su movimiento hacia los cuerpos de agua, constituye uno de los aspectos de especial atención en el ámbito mundial, dado su reconocido impacto en la contaminación de las aguas para el consumo, en el incremento de los costos de producción y en el ambiente, de manera general.

Si bien la lixiviación es un fenómeno natural, de ocurrencia en cualquier ecosistema, su magnitud cambia de acuerdo a la cantidad de lluvia, las propiedades del suelo y el manejo del cultivo. Por ello, y conscientes de sus implicaciones económicas y ambientales, se proponen estrategias de mitigación a través de prácticas agronómicas tales como: el uso de enmiendas, fertilizantes específicos, épocas y sistemas de abonamiento, entre otros. Cualquiera que sea la alternativa seleccionada, las probabilidades de éxito derivadas de su utilización serán limitadas, como consecuencia de las variaciones intrínsecas que presentan los sistemas de producción en interacción con el ambiente.

El proceso de lixiviación de nutrientes

La productividad de las especies cultivadas depende básicamente de cuatro factores: **la planta, el suelo, el clima y el manejo**. En lo que al suelo se refiere, un aspecto fundamental lo constituye la disponibilidad de los nutrientes durante las diferentes etapas del desarrollo del cultivo, la cual resulta del balance entre sus pérdidas y ganancias en el sistema (Figura 1). Para producir de manera sostenible cosechas abundantes, acordes con las condiciones locales, y mantener la fertilidad del suelo, es necesario procurar que este balance sea positivo, objetivo que se logra mediante una adecuada aplicación de abonos y enmiendas.

Para lo anterior es necesario tener en cuenta que cuando los nutrientes contenidos en los fertilizantes (orgánicos e inorgánicos), en las enmiendas y en la atmósfera, llegan al suelo pueden tomar diferentes rutas:

- Permanecer durante un tiempo en el suelo sin alterar su composición química.
- Ingresar a la solución del suelo y, desde allí, ser absorbidos por las raíces de las plantas. Posteriormente, puede transportarse a otros órganos o retornar a la solución del suelo.
- Adsorberse (adherirse) a las cargas negativas o positivas de los coloides del suelo (principalmente arcillas y materia orgánica), y así constituir parte de la fase lábil (rápidamente disponible).
- Fijarse a la fracción sólida del suelo de manera más permanente (caso de fósforo, potasio y nitrógeno en su fracción amoniacal- NH_4^+).
- Unirse a otros elementos de la solución del suelo y así formar nuevos compuestos. Parte de éstos pueden precipitarse.
- Pasar de la forma inorgánica a la orgánica y, por consiguiente, constituir parte integral de los tejidos de

los microorganismos y las plantas. Así no estarán fácilmente disponibles para otros organismos, incluyendo las plantas.

- Perderse por erosión.
- Volatilizarse (perderse en forma de gas hacia la atmósfera). Sólo ocurre para algunos elementos como el nitrógeno y azufre.
- Lixiviarse a través de las aguas de precolación hasta alcanzar profundidades mayores a las que se encuentran las raíces de las plantas.

En la Figura 1 se representan de manera general los procesos mencionados.

En cuanto a las pérdidas de los elementos por la lixiviación se refiere, sus consecuencias trascienden de lo económico a lo ambiental (23, 24), pues además de disminuirse la eficiencia en el aprovechamiento por los cultivos, aumenta el riesgo de la contaminación, especialmente de las fuentes de agua. Uno de los elementos de mayor impacto es el nitrógeno, debido a la facilidad que presenta su forma nítrica (NO_3^-) para lavarse del perfil del suelo (31) y alcanzar las fuentes de agua; situación

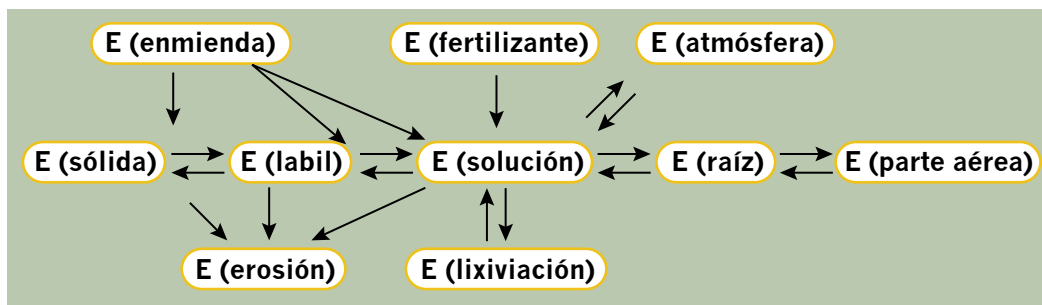


Figura 1. Representación gráfica de lo que puede ocurrir a un elemento (E) cuando llega al suelo. Tomado de Malavolta (20).

que en muchos lugares del mundo se ha convertido en un problema de salud pública (29) y que sugiere una constante búsqueda de opciones conducentes a mitigar dicha problemática en función del clima, el sistema de cultivo, el manejo del suelo y programas de fertilización (11, 33).

A pesar de que la lixiviación ocurre de manera natural en cualquier sistema, su magnitud aumenta cuando se llevan a cabo prácticas de fertilización, de allí la importancia de implementar estrategias de manejo que la disminuyan. Para lo anterior, el primer paso consiste en conocer los factores que condicionan este proceso, que en últimas son los mismos que determinan la productividad de los cultivos: la planta, el clima, el suelo y el manejo.

A. La planta. Cuando el sistema radical está bien desarrollado y es funcional, se favorece la absorción de los nutrientes, reduciendo así la posibilidad de que se pierdan. A su vez, la parte aérea de la planta regula la cantidad y la velocidad de la lluvia que llega al suelo, y ayuda a reducir el exceso de la humedad en el suelo cuando transpira. Mediante

la corriente transpiratoria a la planta ingresan nutrientes como el nitrógeno y el calcio, haciendo que disminuyan sus pérdidas por lixiviación. Cabe resaltar que las especies vegetales, aun las variedades, difieren en su arquitectura y volumen de raíces.

B. El clima. El principal componente del clima que

El suelo posee poros de diferentes tamaños, los más grandes –macroporos– favorecen la aireación y el drenaje del agua, los medianos –mesoporos– contribuyen a retener el agua que requieren las plantas y, los más pequeños –microporos–, retienen con tal fuerza el agua que es poco aprovechable por las plantas.

El término capacidad de campo se refiere al porcentaje de humedad que queda en el suelo después de que éste ha sido mojado abundantemente y se ha dejado drenar por 48 horas. Una porción importante del agua retenida a capacidad de campo es almacenada en los mesoporos, y es la que aprovechan las plantas.

Cuando hay un exceso de humedad en el suelo, es decir, que el contenido del agua es mayor que la capacidad de campo, el agua que no es retenida percola a través del perfil, transportando los nutrientes y las sustancias contenidas en ella más allá de la zona de raíces. Este fenómeno se conoce como lixiviación y tiene lugar en ambientes húmedos, antes que climas secos.

afecta la lixiviación es la lluvia, pues el agua además de disolver los fertilizantes y favorecer las reacciones químicas y bioquímicas que tienen lugar en el suelo, es el vehículo que arrastra los nutrientes del perfil. Entre mayor sea la cantidad de la lluvia, más intensa y menos distribuida, mayores serán las pérdidas.

La temperatura puede jugar un papel secundario y de menor magnitud al afectar la velocidad de las reacciones; por ejemplo, se espera que en sitios cálidos las reacciones que conllevan a la descomposición de los residuos orgánicos, secundadas por los microorganismos, ocurran más rápidamente, dando menos tiempo para que las raíces tomen los nutrientes liberados en el proceso, aumentando así el riesgo de perderse. La temperatura también afecta el crecimiento de la planta y, por ende, la absorción de nutrientes; así mismo, ejerce influencia en la evapotranspiración, la cual determina el contenido del agua en el suelo.

C. El suelo. Las propiedades físicas, químicas, biológicas y mineralógicas del suelo son factores determinantes en este proceso. La porosidad, en particular la distribución del tamaño

de los poros, condiciona tanto la retención de la humedad como el volumen y la velocidad de la precolación del agua. Dicha característica a su vez está en función de los contenidos de la materia orgánica, la proporción relativa de arenas, limos y arcillas (textura), y la estructura del suelo, entre otras. En general, los suelos arenosos y con poca materia orgánica, en donde predominan los macroporos, son más permeables y permiten un mayor arrastre de los nutrientes que se encuentran en la solución del suelo; lo contrario ocurre en suelos con más arcilla y materia orgánica.

En cuanto a las propiedades químicas se refiere, reviste especial importancia la capacidad que tiene el suelo para retener o adsorber cationes (aluminio- Al^{3+} , calcio- Ca^{2+} , magnesio- Mg^{2+} , potasio- K^+ , amonio- NH_4^+ y sodio- Na^+) y aniones (nitrato- NO_3^- , sulfato- SO_4^{2-} , cloruro- Cl^- y fosfatos, en sus formas H_2PO_4^- , HPO_4^{2-} , PO_4^{3-}), a lo que se conoce como la capacidad de intercambio catiónico-CIC y la capacidad de intercambio aniónico-CIA, respectivamente. Debido a que en la mayoría de los

suelos la CIC prevalece sobre la CIA, se espera que sean más altas las pérdidas por la lixiviación de los elementos de naturaleza aniónica que catiónica. La CIC guarda una relación directa con los contenidos de las arcillas y de la materia orgánica, en tanto que sus valores tienden a reducirse con el aumento de la fracción arena y la acidez.

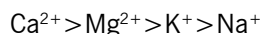
Otro aspecto a tener en cuenta se relaciona con la competencia que ejercen algunos elementos sobre otros, bien sea de manera natural o debido a las prácticas de fertilización y el encalado. Por ejemplo, en los suelos ácidos el predominio de Al^{3+} en el complejo de cambio dificulta la adsorción de las bases intercambiables (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+), favoreciendo su lavado. La situación descrita se vuelve más crítica en suelos con baja CIC. Cuando se suministran altas dosis de fertilizantes potásicos y/o amoniacales, o cuando se aplican cales pobres en magnesio, se reduce la retención de Mg^{2+} por los coloides, favoreciendo su pérdida.

La actividad microbiana puede ejercer cierta influencia sobre algunos procesos que en últimas afectan la lixiviación. Por

ejemplo, en la mineralización de la materia orgánica del suelo, la oxidación del azufre elemental, la amonificación y la nitrificación del amonio, los microorganismos contribuyen a la producción de formas elementales o iónicas que son más susceptibles a perderse por lavado. Lo contrario puede ocurrir en el proceso de la inmovilización, por ejemplo, cuando los microorganismos toman el nitrógeno disponible en el suelo para descomponer los materiales orgánicos con alta relación C:N.

La mineralogía del suelo, en particular de las arcillas, puede jugar un papel fundamental en la retención de elementos nutritivos. Un ejemplo de ello es la fijación del fósforo por la alófana y los materiales no cristalinos presentes en suelos derivados de cenizas volcánicas o por los óxidos e hidróxido de hierro y aluminio en suelos con alto grado de evolución. Otro caso es el del K^+ , NH_4^+ y Mg^{2+} cuando quedan “atrapados” entre las capas laminares de algunas arcillas tipo 2:1. El tema también puede tratarse desde la selectividad del mineral que contiene el suelo por un elemento en particular. Los suelos de la zona cafetera de Colombia presentan

el siguiente orden natural para adsorber los cationes intercambiables:



En el anterior esquema no se incluye el aluminio intercambiable (Al^{3+}), dado que sus contenidos dependen de la acidez del suelo. Por lo general, los suelos agrícolas que presentan valores de pH por debajo de 5,0, el Al^{3+} es mayor a 1,0, en tanto que para valores de pH por encima de 5,5, este elemento es prácticamente inexistente.

D. El manejo. Muchas de las prácticas culturales inciden de manera directa o indirecta sobre la lixiviación, ya que regulan el contenido del agua en el suelo y afectan la disponibilidad de los nutrientes a través de tiempo, y la capacidad de la planta para tomarlos. En el ámbito general, las labores que conllevan a desarrollar plantas sanas, tanto en su sistema radical como en la parte aérea, favorecen la absorción eficiente de los nutrientes y minimizan las pérdidas. Consecuentemente, con la realización de una adecuada fertilización, en cuanto a la dosis, fuente, sitio, forma y época

de aplicación, se logra optimizar la toma de los elementos suministrados. Por otro lado, cuando se controla la erosión, y por lo tanto, se protege la materia orgánica del suelo, se está conservando también la capacidad del suelo para retener nutrientes y agua. Ejercen un efecto similar prácticas que regulan el ingreso y el paso del agua en el perfil, tales como los sistemas multi-estratos, el empleo de mulch o aquellas que ayudan a retener la humedad.

Evaluación de las pérdidas de nutrientes por lixiviación

La pérdida de nutrientes por lixiviación puede evaluarse tanto en el campo como en el laboratorio. En el primero, se instalan dispositivos como: i) Copas de succión para extraer la solución del suelo, que puede estar sujeto a pérdidas por lavado en una o más profundidades durante cierto período de tiempo; ii) Lisímetros, en los cuales se colecta la solución percolada en un área determinada; y iii) Núcleos o cilindros dispuestos con una resina de intercambio iónico capaz de retener los cationes o aniones presentes en la solución del suelo (Figura 2). En el laboratorio la metodología más común consiste en utilizar tubos

o columnas de PVC con muestras de suelo sin disturbar o disturbadas, a las que se le suministra riego en forma periódica, luego de haber aplicado fertilizante (Figura 3). En otro tipo de estudios, mediante isotermas de adsorción se valora la capacidad que tienen los diferentes suelos para retener los elementos en forma selectiva, y no permitir que se pierdan.

Cabe resaltar que los resultados obtenidos a través de los estudios en mención, antes de indicar una cantidad exacta del elemento que puede perderse por precolación, ayudan a entender las variables que afectan dicho fenómeno, tales como el tipo de suelo, la fuente fertilizante y la cantidad de la lluvia incidente. Lo anterior se debe a las imprecisiones

de los métodos para simular las condiciones reales; por ejemplo, en las evaluaciones realizadas en el laboratorio se disturba parcial o totalmente el suelo, además que no está presente la planta, y que la cantidad, forma, frecuencia y composición del agua aplicada para inducir la lixiviación difiere a la de la lluvia.

De acuerdo al interés que se tenga, los estudios de lixiviación pueden incluir uno o más elementos. Cuando se evalúa un sólo, es posible determinar el efecto de éste sobre los demás nutrientes, en tanto que al aplicar dos o más elementos simultáneamente no lo es, a menos que el diseño experimental así lo permita (por ejemplo, un análisis factorial).

Prácticas que reducen la pérdida de nutrientes vía lixiviación

Son muchas las labores agrícolas que contribuyen a lograr este objetivo. Éstas se relacionan por una parte con la sincronía entre la absorción de los nutrientes por las raíces de las plantas y su suministro por el suelo, por los fertilizantes orgánicos e inorgánicos y por las enmiendas; así mismo, es importante la concordancia entre localización de los nutrientes y los sitios activos de la planta para su toma. Con respecto a estas prácticas, Lehmann y Schroth (17) recomiendan tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Realizar la siembra de los cultivos al inicio de la temporada de lluvias con el fin de aprovechar el nitrógeno que resulta de la mineralización de la materia orgánica cuando el suelo se rehumedece.
- Evitar que el suelo permanezca sin una vegetación que absorba los nutrientes. Para ello es necesario el rápido establecimiento de una nueva cobertura vegetal después de que un cultivo haya cumplido su ciclo.
- Fraccionar en varias oportunidades los fertilizantes durante el ciclo del cultivo.

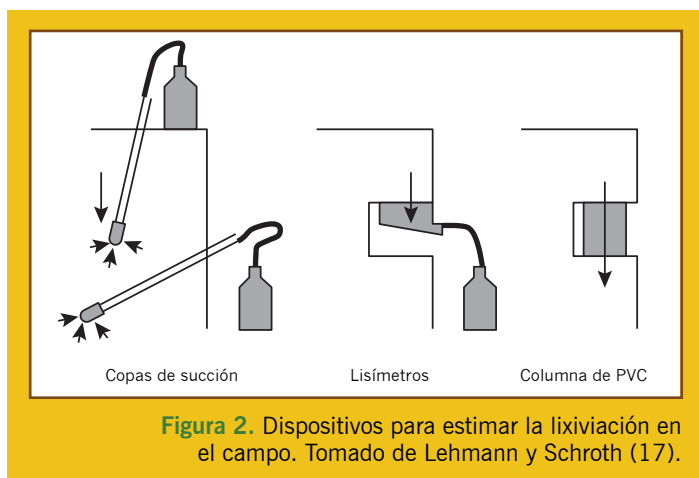


Figura 2. Dispositivos para estimar la lixiviación en el campo. Tomado de Lehmann y Schroth (17).

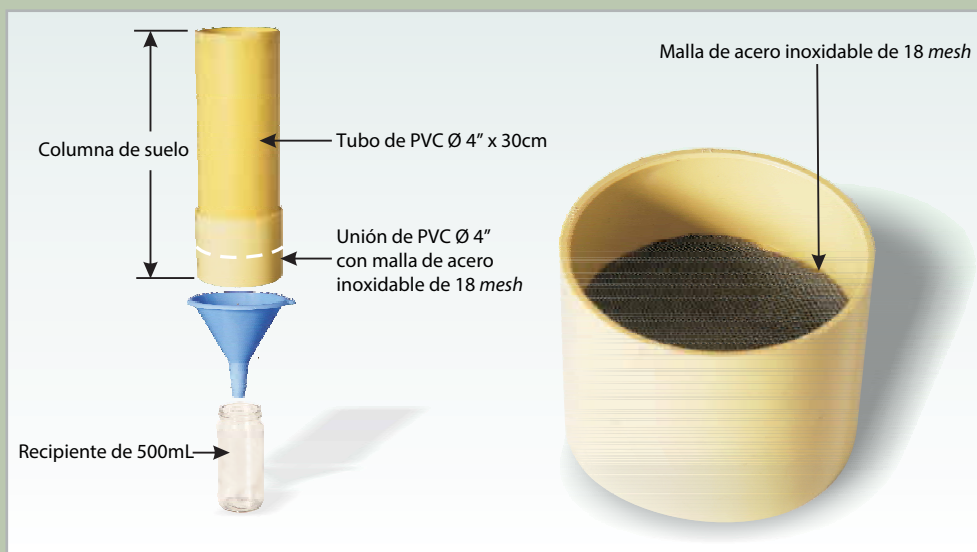


Figura 3. Columna de lixiviación para estudios en el laboratorio (3).

- Localizar el fertilizante en la zona donde las raíces presentan la máxima actividad.

Lixiviación de nutrientes en la zona cafetera de Colombia

A continuación se presentan los resultados de algunos estudios realizados sobre el tema en la zona cafetera de Colombia.

Pérdidas de nitrógeno

Mediante el empleo de tubos de PVC, enterrados en dos lotes cafeteros, Leal (16) midió la lixiviación de nitrógeno-N aplicado

vía urea. Se registraron pérdidas entre 1,1% y 14,0% en la Estación Central Naranjal, y entre 1,0% y 24,7% en la Estación Paraguaicito. Las diferencias registradas dentro de cada localidad se asociaron con la variabilidad espacial de las propiedades del suelo y la distribución desuniforme de la lluvia, en tanto que las diferencias entre las localidades se atribuyeron a la textura del suelo, siendo la segunda Estación más arenosa.

En el laboratorio, Arias *et al.* (3) evaluaron la lixiviación de nitrógeno, aplicado en forma de urea, en cuatro unidades

cartográficas de suelos de la zona cafetera del país, diferentes en su textura (Figura 4). Las pérdidas totales de N (amoniacal y nítrica) fueron equivalentes al 42% de la cantidad aplicada en la unidad Montenegro (textura franco-arenosa), 36% en Chinchiná (textura franca), 33% en San Simón (textura franco-arenosa) y 23% en Doscientos (textura franco-arcillosa). Estas diferencias, antes que a la textura, se asociaron con otras características del suelo como la mineralogía, el contenido de la materia orgánica, el pH y la actividad microbológica.

En los primeros riegos o lavados, el pH de la solución

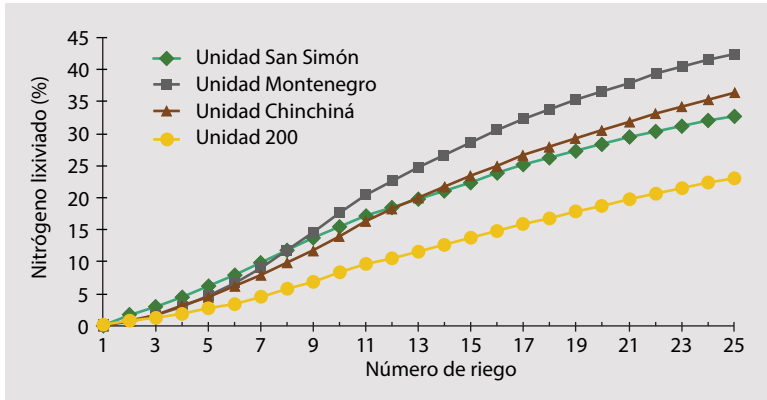


Figura 4. Pérdidas acumuladas de nitrógeno por lixiviación en cuatro unidades de suelos después de la fertilización con urea. Adaptado de Arias *et al.* (3). Riegos realizados cada 4 días.

lixiviada se incrementa debido a la reacción alcalina inicial de la urea, y posteriormente tiende a reducirse en razón a la acidez generada por la nitrificación del amonio (Figura 5). El aumento inicial del pH puede generar pérdidas por lixiviación de sustancias orgánicas en diferente grado de humificación o compuestos orgánicos de bajo peso molecular similares al humus, debido a que estas sustancias se solubilizan en medios alcalinos (30). En consecuencia, se observan coloraciones oscuras en el lixiviado, en los primeros 48 días después de la fertilización con urea (Figura 6). Lo anterior sugiere que una alta dosis de urea, aplicada de manera localizada, contribuye a las pérdidas de las sustancias en mención por lixiviación, principalmente en suelos con altos contenidos de materia

orgánica como los de la unidad Chinchiná.

En el campo, Hincapié y Henao (15) observaron que en el suelo de la unidad Chinchiná, ubicado en el departamento de Caldas, las mayores pérdidas de nitrógeno, suministrado vía urea, se presentan en las siguientes tres semanas después de la fertilización, y disminuyen a través del tiempo, sin dejarse de manifestar durante 3,5 meses (Figura 7). Al aumentar la dosis de nitrógeno, también se incrementó la percolación, siendo similares los promedios de las cantidades recolectadas a partir de 150 y 300 kg.ha-año⁻¹ del elemento. En este estudio también se demostró que las pérdidas de nitrógeno amoniacal (NH₄⁺) son diez veces menores (0,038 mmol_c.L⁻¹) que la forma

nítrica (0,38 mmol_c.L⁻¹). Los autores consideran que estas cantidades son muy bajas.

Los resultados obtenidos por Suárez y Carrillo (33) en el laboratorio, indican que al aplicar nitrato de potasio en la unidad Chinchiná–Caldas, la cantidad lixiviada de nitrógeno puede ser relativamente alta, pues en los primeros nueve lavados se perdió cerca del 70% de la cantidad aplicada (Figura 8). Las diferencias entre los anteriores estudios pueden deberse a las condiciones de la investigación (campo y laboratorio), la fuente y la dosis empleadas, entre otros.

Un aspecto a considerar en este proceso es la fuente que se emplea; en este sentido, es importante tener en cuenta la solubilidad del fertilizante, la forma del nutriente, la presencia de otros elementos, el ion acompañante y el pH residual.

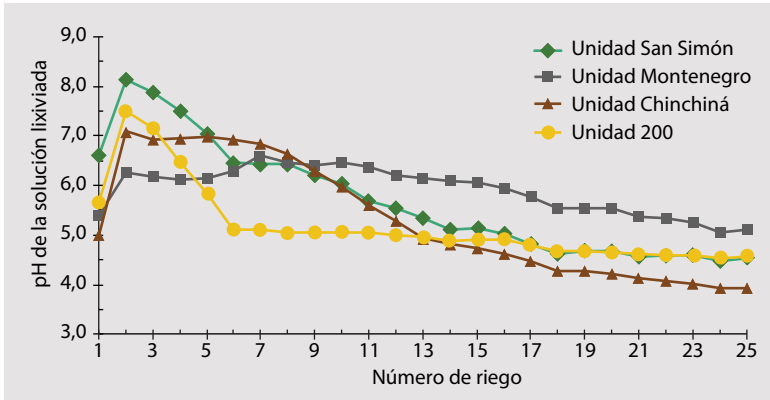


Figura 5. Cambios en el pH de la solución lixiviada en respuesta a la fertilización nitrogenada en cuatro unidades de suelos. Tomado de Arias *et al.* (3). Riegos realizados cada 4 días.



Figura 6. Coloración oscura en el agua lixiviada por efecto de la fertilización con urea. Tomado de Arias *et al.* (3).

González y Sadeghian (10) estudiaron el lavado de nitrógeno, suministrado como sulfato de amonio (SAM) y nitrato de amonio (NA), mediante la técnica de columnas de lixiviación en suelos de las Unidades 200, Chinchiná y Quindío. Las pérdidas (nitrato y amonio)

variaron según el suelo y la fuente fertilizante (Figura 9). La unidad Chinchiná presentó los valores más altos, seguida por las unidades Quindío y 200; para los tres casos las mayores cantidades de N lixiviado se registraron con SAM. En el suelo de la unidad

Quindío las pérdidas empezaron a manifestarse más rápidamente, comportamiento que se relacionó con su mayor conductividad hidráulica. Para el suelo de la Unidad 200 el alto contenido de arcilla pudo incidir en la baja manifestación del fenómeno, como

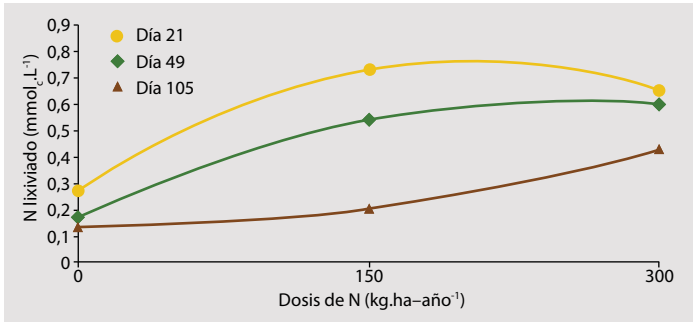


Figura 7. Concentración de nitrógeno (N) en las aguas de precolación, colectadas a los 21, 49 y 105 días después de la fertilización con tres de dosis de nitrógeno (valores promedio de la suma de nitrato y amonio). Tomado de Hincapié y Henao (15).

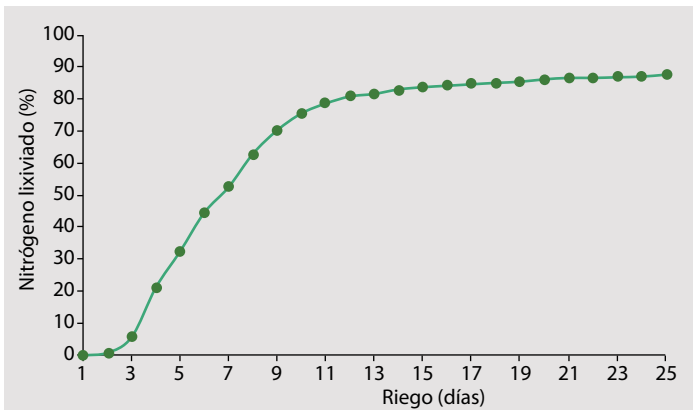


Figura 8. Lixiviación de nitrógeno nítrico a partir de nitrato de potasio en suelos de la unidad Chinchiná (Caldas). Adaptado de Suárez y Carrillo (32) (valores promedio de nitrato de potasio prilado y nitrato de potasio estándar).

los fertilizantes es el uso de fuentes especializadas, por ejemplo cuando se recubre el gránulo del fertilizante con formaldehído o polímeros de distinta naturaleza, con el fin de retardar la hidrólisis y/o la conversión de amonio a nitratos (nitrificación). Muestras de lo anterior son los polímeros Entec® y la dyciandiamida, empleados en los fertilizantes nitrogenados para inhibir la nitrificación. Cabe resaltar que no siempre estas tecnologías cumplen con las expectativas del caso (6).

Sobre el tema González (9), encontró que en dos suelos de la zona cafetera colombiana, contrastantes en su génesis y mineralogía, al utilizar urea recubierta con un polímero ofrecido comercialmente para inhibir la nitrificación, la concentraciones de NO_3^- en los lixiviados era similar que cuando se empleó urea convencional (Figura 10). Lo anterior reafirma que para la zona cafetera, ampliamente variable en condiciones de suelos y características climáticas, las estrategias conducentes a reducir la lixiviación de N, deben ser abordadas de manera integral, involucrando variables físicas, químicas y biológicas, adicionales a las relacionadas con la fuente fertilizante.

consecuencia de su mayor capacidad de retener iones.

Finalmente, resaltan que si bien las aplicaciones de las fuentes fertilizantes suscitaron diferente concentración de N en solución, pudo constatar que no todo el N aplicado

se lixivió; lo cual ratifica que la misma naturaleza física y química del suelo, pese a los excesos hídricos, constituye un medio para albergar temporalmente los nutrimentos del suelo.

Una alternativa para reducir la lixiviación en

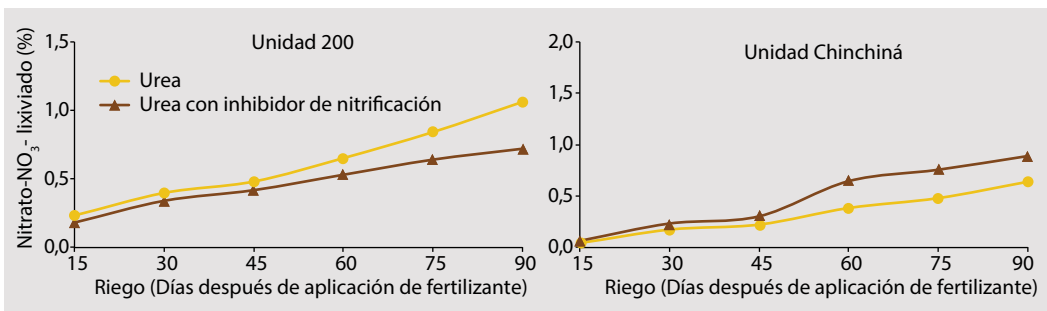
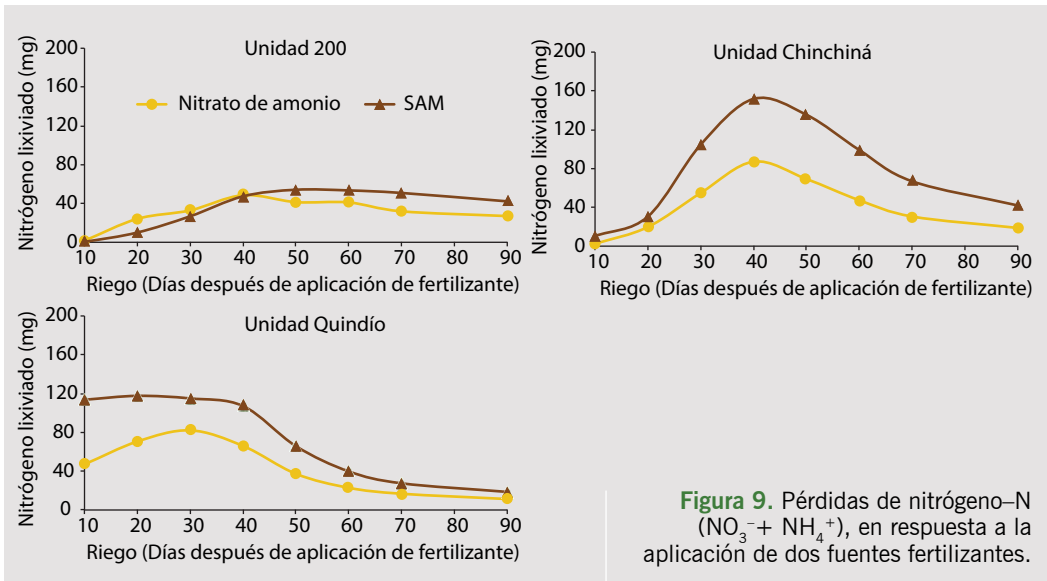


Figura 10. Lixiviación de nitratos en dos suelos de la zona cafetera de Colombia, para dos fuentes de fertilizantes.

Henao y Delvaux (13,14) hallaron que las pérdidas por percolación de elementos fertilizantes varían según la unidad de suelo y la cantidad de la lluvia. En la unidad Fresno (Marquetalia–Caldas), con un promedio de lluvia de 4.000 mm anuales se presentan más pérdidas que las unidades Chinchiná, Líbano y Montenegro. Con

respecto al nitrógeno, las cantidades totales se estimaron en 32%.

Pérdidas de fósforo

Este elemento se caracteriza por presentar bajas pérdidas por lavado en condiciones naturales (21, 23). En la mayoría de los suelos de la zona

cafetera ocurre una alta fijación de fósforo-P por los complejos arcillo-minerales presentes (hasta el 90%) (9); siendo ésta la principal causa para que su lixiviación sea baja.

En investigaciones adelantadas en Cenicafé por López (18), se halló un alto poder de fijación de

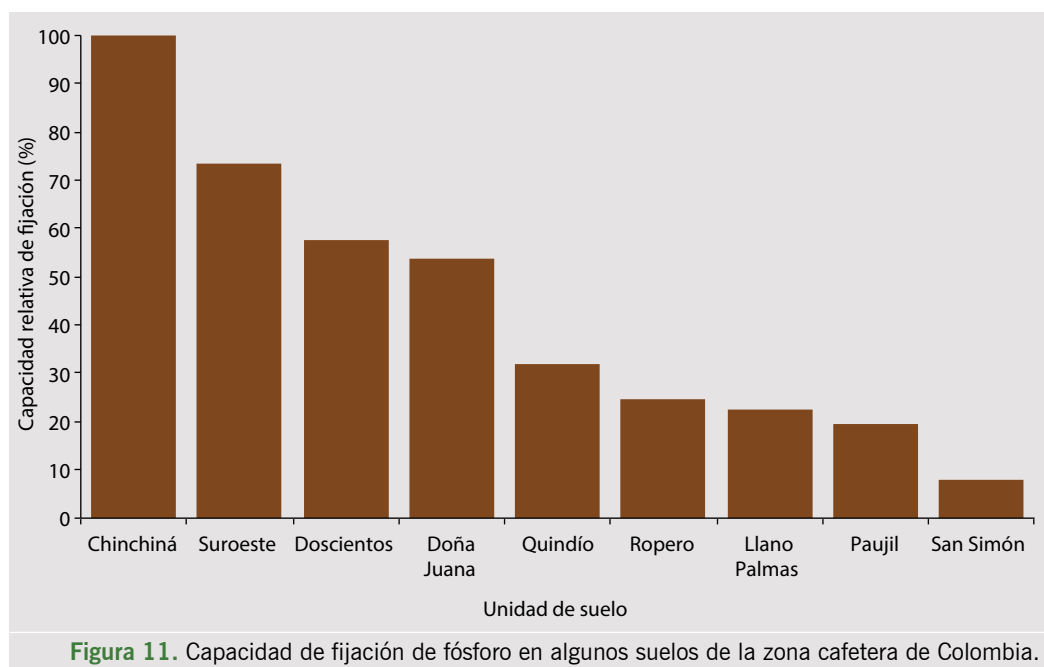
P por la fracción orgánica en suelos de la unidad Chinchiná (entre 1.500 y 3.000 mg.kg⁻¹). Bravo y Gómez (5) obtuvieron resultados similares en suelos de génesis volcánica, pertenecientes a las unidades de suelos Fresno, Chinchiná, Montenegro, Fondesa, Quindío y Malabar (1.900, 1.800, 1.300, 1.200, 1.100 y 600 mg.kg⁻¹ de P, respectivamente). Estos resultados concuerdan con lo expresado por Fox (7), quien encontró que el poder de fijación por las cenizas aumenta en la medida en que éstas se alejan la fuente de emisión y se incrementa la superficie específica de estos materiales, aspecto

que puede relacionarse con el grado de evolución de las mismas. Estas consideraciones indican cómo el alto poder de fijación de P en el suelo puede traducirse en la disminución del potencial para que este elemento llegue a la solución y migre con el agua de percolación. En términos prácticos, un análisis bajo este punto de vista puede dar cuenta de la vulnerabilidad de pérdidas de P para diferentes suelos de la zona cafetera.

González (9) analizó la fijación de P en nueve suelos de la zona cafetera de Colombia (Figura 11).

En general, los suelos derivados de cenizas volcánicas (Unidades Chinchiná, Doña Juana y Quindío) fueron más fijadores; hecho que sugiere una menor lixiviación de este elemento. Pese a lo anterior, se destacan diferencias entre unidades. Los suelos que presentan un origen diferente exhibieron una menor retención, y por ende, más vulnerabilidad a la lixiviación. Dentro de este último grupo, aquellos con mayor contenido de arenas, tales como San Simón, eventualmente pueden ser más susceptibles.

Lo anterior fue corroborado por Arias y Sadeghian (2),



quienes demostraron que en suelos derivados de cenizas volcánicas, como las unidades Chinchiná y Montenegro, las pérdidas de fósforo por lavado son insignificantes (menos de 1%) (Figura 12). Estos autores también demostraron que en otros tipos de suelos, la textura puede jugar un papel relativamente importante en este proceso, por ejemplo, en los suelos arenosos de la unidad San Simón ocurren mayores pérdidas que en los suelos más arcillosos de la unidad 200 (9% y 3%, respectivamente). La mayor parte del nutriente aplicado se queda en los primeros 5 cm, sin alcanzar profundidades mayores a 15 cm (Figura 13).

Normalmente la concentración de fósforo en la solución del suelo varía entre 0,1 y 1,0 mg.L⁻¹ (22). Los datos obtenidos por Sadeghian (26) indican que la concentración de fosfatos, detectada en la solución de tres unidades de suelos representativas de la zona cafetera (Chinchiná, Timbío y 200), es menor a la de cloruros, nitratos, nitritos y sulfatos, aun después de haber aplicado este nutriente. Lo anterior explica la aparición de los síntomas de deficiencias de fósforo durante los años de

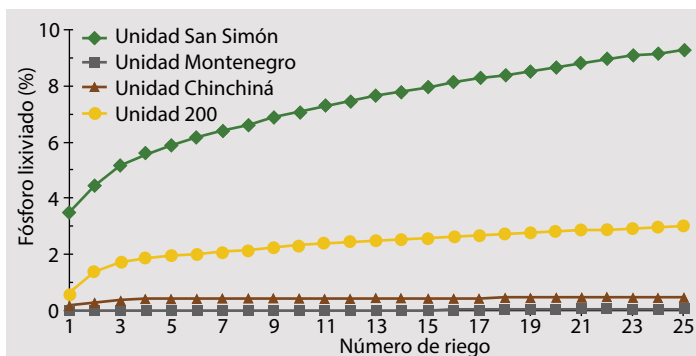


Figura 12. Pérdidas acumuladas de fósforo por lixiviación, en cuatro suelos de la zona cafetera de Colombia. Tomado de Arias y Sadeghian (2). Riegos realizados cada 4 días.

evento La Niña, a pesar de haberlo incluido en los planes de fertilización. Aunque las pérdidas de fósforo por lixiviación son bajas, la solución del suelo puede quedarse desprovista a consecuencia de las constantes lluvias.

Pérdidas de potasio

Dada las altas cantidades de potasio-K que se aplica en el cultivo de café, en especial durante la etapa de producción, también pueden llegar a ser elevadas las pérdidas por lixiviación; sin embargo, éstas varían de acuerdo al tipo de suelo (Figura 14). En la unidad Chinchiná (municipio de Chinchiná-Caldas), caracterizada por su baja selectividad por el potasio, el nutriente aplicado no se retiene y tiende a perderse más

rápidamente que en otros suelos, aún con mayor contenido de arenas, donde es más alta la percolación. Este fenómeno, también detectado por Henao y Delvaux (12), Hincapié y Henao (15) y Suárez y Carrillo (32), se ha relacionado con el alto contenido de alúmina rica en aluminio y el bajo poder tampón (12).

Gómez *et al.* (8) demostraron que pese a lo anterior, una cantidad importante de potasio aplicado en andisoles de Colombia, incluyendo la unidad Chinchiná, es retenido en el subsuelo y, por lo tanto, no se pierde totalmente para el cultivo de café. Este comportamiento fue corroborado por Hincapié y Henao (15), quienes detectaron pérdidas muy bajas de potasio en el campo (Figura 15).

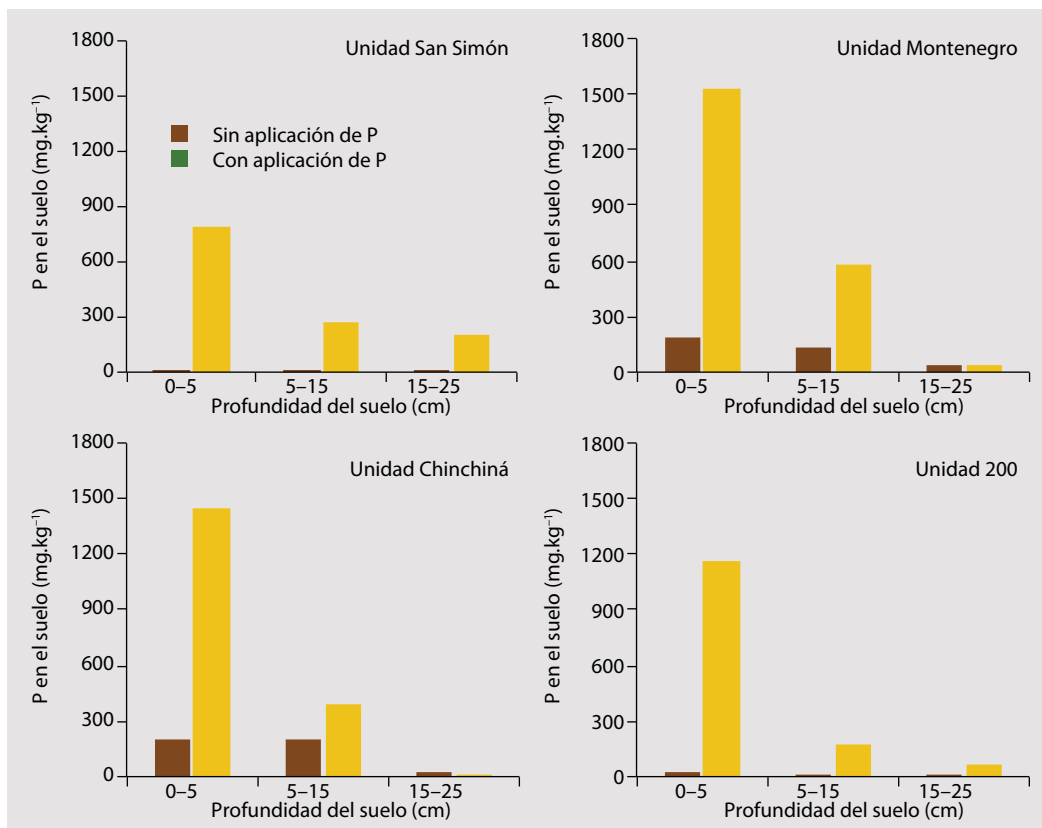


Figura 13. Contenido de fósforo (P) disponible en cuatro unidades de suelo de la zona cafetera, después de 25 lavados. Arias y Sadeghian (2).

Con el propósito de hallar estrategias que permitan reducir la lixiviación de potasio, Suárez y Carrillo (33) midieron sus pérdidas en la unidad Chinchiná, empleando cuatro fuentes. Se demostró que el K suministrado vía fertilización puede percolarse rápidamente en los suelos poco selectivos (más de 90% en los primeros nueve lavados). Las mayores pérdidas se registraron al emplear KCl,

nitrate de potasio “prilled” o estándar. Cuando se utilizó sulfato de potasio, las cantidades lixiviadas se redujeron, en respuesta a la menor solubilidad de esta fuente (Figura 16), razón por la cual los autores recomiendan utilizarla con el fin de disminuir las pérdidas. A través de un experimento conducido por Sadeghian *et al.* (28), se demostró que pese a la anterior ventaja comparativa de

sulfato de potasio, sus cantidades requeridas para alcanzar la producción máxima de café no son más bajas que las del cloruro de potasio.

Mediante la técnica de isotermas de adsorción, Sadeghian (28) determinó la selectividad catiónica en 14 unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Esta técnica ayuda a conocer la capacidad que tienen los suelos para

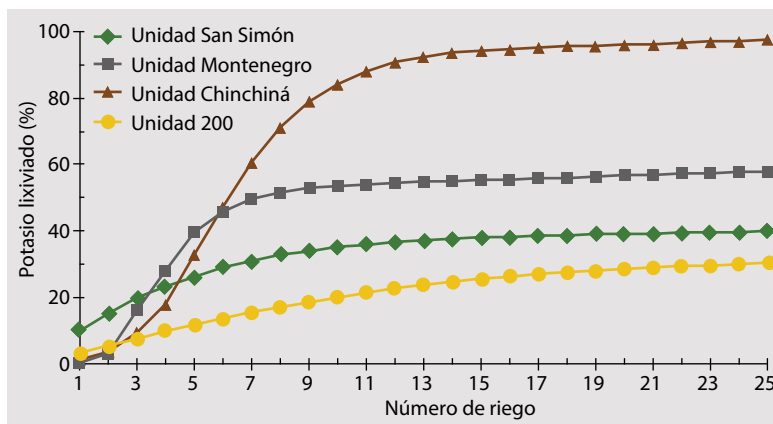


Figura 14. Pérdidas acumuladas de potasio por lixiviación, en cuatro suelos de la zona cafetera de Colombia. Tomado de Arias (1). Riegos realizados cada 4 días.

retener los elementos y no dejar que se pierdan en procesos como la lixiviación. Con base en la cantidad de potasio retenido en la fase de cambio (Figura 17), pueden separarse los suelos evaluados en los siguientes grupos:

- **Retención relativa baja:** unidades Fresno (Tolima), Chinchiná en Chinchiná (Caldas), 200 en Jamundí (Valle del Cauca) y Líbano (Tolima).

- **Retención relativa intermedia:** unidades Guadalupe en Gigante (Huila), Chinchiná en Venecia (Antioquia), Timbío (Cauca), Chinchiná en Pereira (Risaralda), Quindío y Paujil (Santander) y Salgar (Antioquia).

- **Retención relativa alta:** unidades San Simón en Ibagué (Tolima), Suroeste

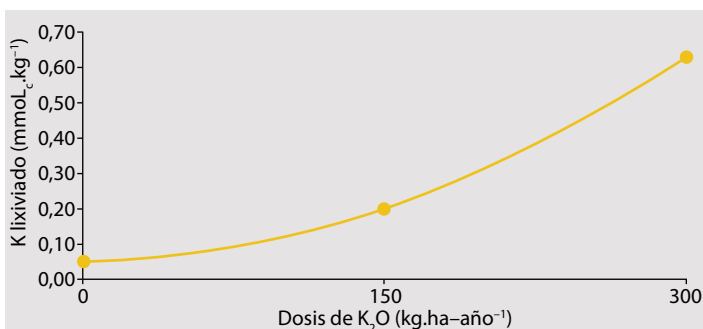


Figura 15. Concentración de potasio (K) en las aguas de precolación en respuesta a la fertilización con dosis crecientes de KCl (promedio de tres muestreos, realizados a los 21, 49 y 105 días después de la fertilización). Adaptado de Hincapié y Henao (15).

(Antioquia) y 200 en Sevilla (Valle del Cauca).

En el anterior estudio, el comportamiento de la respuesta se relacionó con la capacidad de intercambio catiónico efectiva-CICE de los suelos ($Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Al^{3+}$), pues conforme al aumento de esta propiedad, se incrementó la adsorción de potasio. La capacidad en referencia, entre otras

variables, depende del pH; así lo corroboran Luna y Suárez (19) al analizar 75 perfiles de suelos derivados de cenizas volcánicas, ubicados entre 1.250 y 1.850 m de altitud (Tabla 1). En suelos con valores de pH entre 4,80 y 5,50 (37 perfiles), el potasio intercambiable (K^{+}), varió entre 0,02 a 0,29 $cmol_c.kg^{-1}$, en tanto que para valores de pH de 5,60 a 6,00 (38 perfiles) el rango fluctuó entre 0,07 y 2,20 $cmol_c.kg^{-1}$.

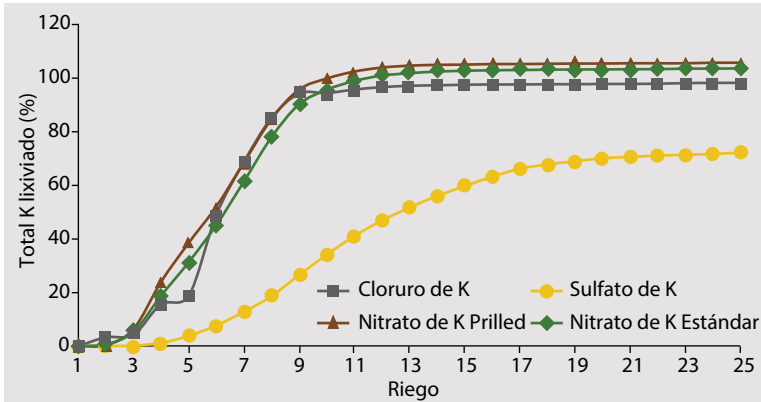


Figura 16. Pérdidas de potasio (K) por lixiviación a partir de cuatro fuentes. Tomado de Suárez y Carrillo (32).

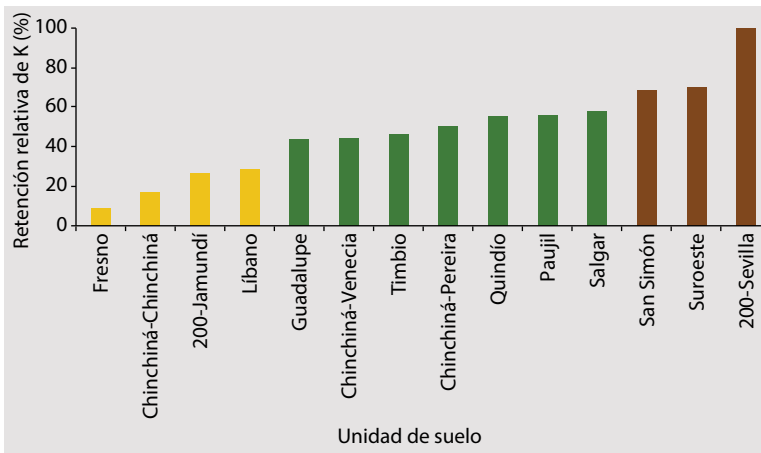


Figura 17. Retención relativa de potasio (K) en 14 unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Sadeghian (26). Se toma como referente (100%), la unidad 200 en Sevilla (Valle del Cauca).

Sadeghian (25) se basó en los resultados obtenidos en siete Estaciones Experimentales de Cenicafé para agruparlos de acuerdo su retención de potasio (Figura 18). Se demostró que los suelos de las Estaciones Naranjal, Santander, Libano y Pueblo Bello retenían menos el potasio, pues al aplicar dosis crecientes de este elemento su contenido en la fase intercambiable no se incrementaba en la

misma magnitud que las demás localidades. En contraste, los aumentos experimentados en El Rosario fueron mayores y los de La Catalina y Paraguaicito intermedios. Estos resultados coinciden con los presentados en la Figura 18 y corroboran las diferencias que exhiben los suelos de la zona cafetera del país en cuanto a su capacidad para adsorber el potasio y evitar que se pierda por lixiviación.

Un factor determinante en la pérdida del potasio desde la fase intercambiable y su posterior lavado es la presencia de otros cationes (principalmente Al^{3+} , Ca^{2+} , Mg^{2+} y NH_4^+). Por ejemplo, cuando se aplica urea, el amonio- NH_4^+ que resulta de la hidrólisis de este fertilizante puede desplazar al K^+ (4); de modo similar, la acidez generada en la nitrificación del amonio (H^+ y Al^{3+}) conlleva a un efecto similar (34). En una

Tabla 1. Rangos de K intercambiable, según valores de pH, en los primeros 30 cm de profundidad en suelos derivados de cenizas volcánicas de la zona cafetera de Colombia. Tomado de Luna y Suárez (19).

Departamento	K intercambiable ($\text{cmol}_c \cdot \text{kg}^{-1}$)	
	pH 4,80 a 5,50	pH 5,60 a 6,00
Antioquia	0,09–0,25	0,19–0,40
Caldas	0,02–0,2	–
Cundinamarca	0,09–0,14	0,18–2,20
Nariño	0,06–0,18	0,09–0,78
Quindío	0,09–0,29	0,07–1,20
Risaralda	0,02–0,20	–
Tolima	0,15–0,24	–
Valle del Cauca	0,05–0,20	0,11–0,90

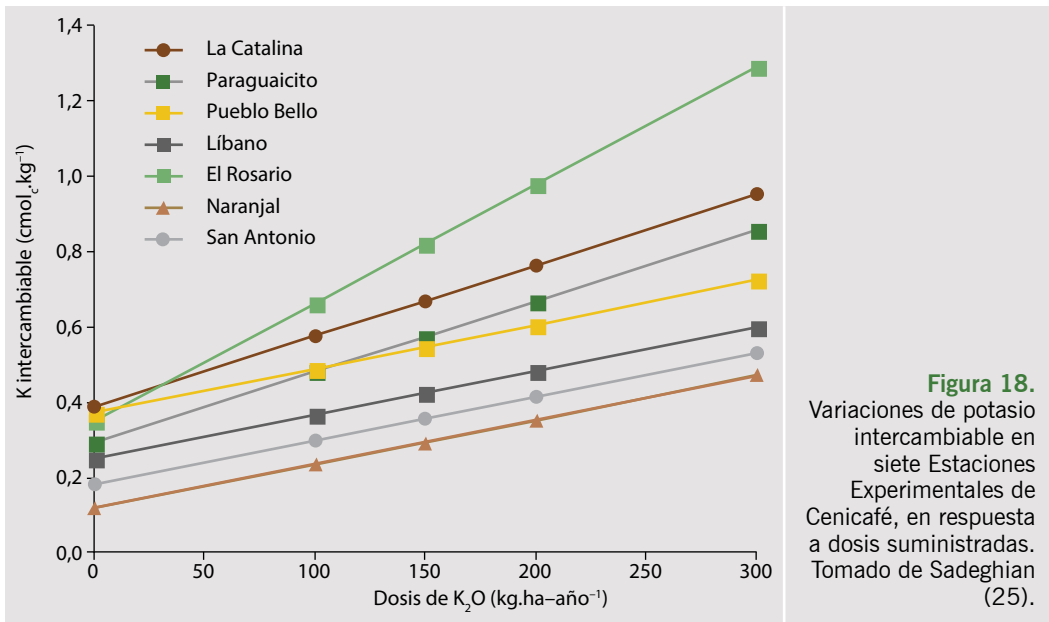


Figura 18. Variaciones de potasio intercambiable en siete Estaciones Experimentales de Cenicafé, en respuesta a dosis suministradas. Tomado de Sadeghian (25).

investigación desarrollada por Sadeghian (25), en 32 fincas cafeteras del país (20 al sol y 12 bajo semisombra), ubicadas en 25 municipios cafeteros, se demostró que la aplicación de la urea se traduce en pérdidas de K^+ ,

equivalentes al 36% (Figura 19).

La magnitud de las pérdidas de potasio en respuesta a la fertilización nitrogenada puede variar según el tipo de suelo, a

los contenidos de éste en la fase intercambiable y a las dosis de nitrógeno y de potasio suministradas, como se presenta en la Figura 20 para dos andisoles en las Estaciones Experimentales La Catalina (Risaralda) y El

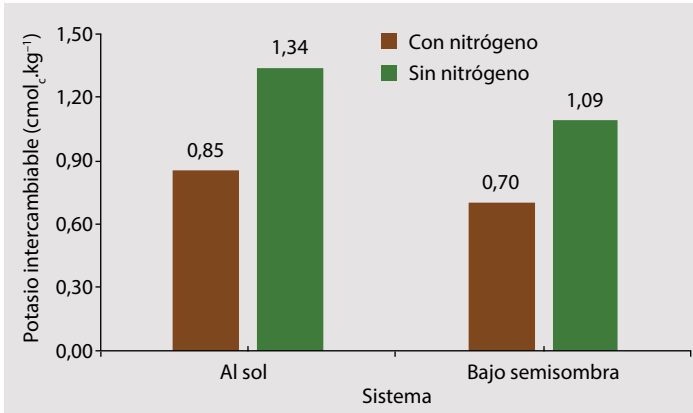


Figura 19. Efecto de la aplicación de nitrógeno en forma de urea en los contenidos de potasio intercambiable. Promedio de 20 lotes al sol y 12 bajo semisombra, ubicadas en 25 municipios cafeteros de Colombia. Tomado de Sadeghian (25).

Rosario (Antioquia). Aunque en ambos casos el potasio intercambiable disminuyó en conformidad al aumento de las dosis de nitrógeno –en especial para dosis medias y altas de potasio–, hubo diferencias notorias entre los sitios, pues el suelo de El Rosario fue capaz de retener una mayor cantidad de potasio y, por lo tanto,

fue menos susceptible a la lixiviación.

Además, estas pérdidas pueden presentar cambios a través de tiempo; por lo general, se incrementan gradualmente luego de la aplicación de la urea, para después descender; sin embargo, tanto la cantidad como las variaciones

temporales dependen de las propiedades del suelo. Mediante el empleo de tubos de PVC, Arias (1) midió en el laboratorio las pérdidas de potasio por lixiviación a través de tiempo, en respuesta a la fertilización con urea, en dos suelos de la zona cafetera de Colombia (Figura 21). Se registraron diferencias entre los suelos tanto en la cantidad perdida de K como en el comportamiento a través de tiempo (riegos).

Pérdidas de calcio

Los suelos de la zona cafetera de Colombia difieren en su capacidad para retener el calcio y, por lo tanto, permitir que se lixivie. En un estudio desarrollado por Sadeghian (26) se demostró que algunas unidades de suelos, tales como Paujil (Santander) y Timbío

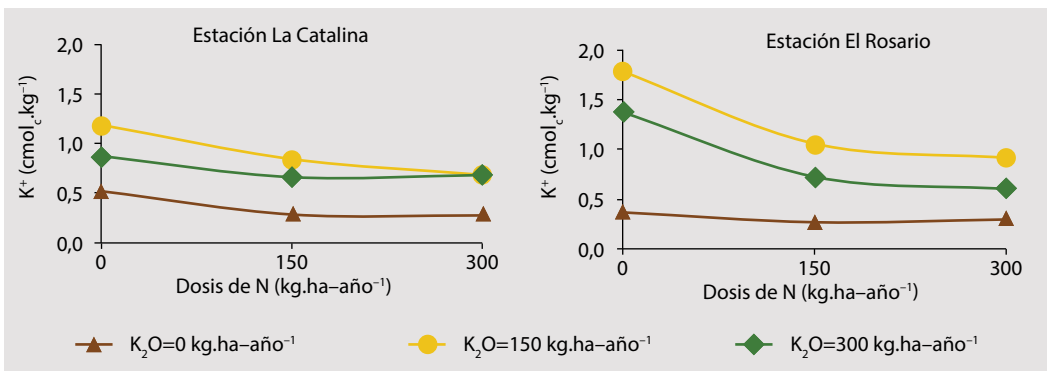


Figura 20. Contenido de potasio intercambiable (K⁺) en repuesta la aplicación de nitrógeno suministrado como urea en dos unidades cartográficas de suelo.

(Cauca), son capaces de retener una mayor cantidad de calcio en la fase intercambiable, hecho que reduce su pérdida por lixiviación. En contraste, otras unidades de suelos como Guadalupe (Huila), Chinchiná en Venecia (Antioquia) y en Chinchiná (Caldas), 200 en Jamundí (Valle del Cauca) y en Fresno (Tolima) retienen menores cantidades de este elemento (Figura 22).

Parte importante de las anteriores diferencias se relacionan con la capacidad

del suelo para retener cationes, la cual en la mayoría del área cafetera de Colombia depende de la acidez. Esto, por un lado se debe a que un aumento del pH conlleva al incremento de la capacidad de intercambio catiónico; por otro lado, con el aumento del pH se reduce el aluminio en el complejo de cambio (Figura 23), dando su lugar a otros elementos, principalmente el calcio, como se explicó anteriormente. Otro aspecto a tener en cuenta tiene que ver con la selectividad

de los coloides del suelo para retener este elemento; en este sentido, los suelos con mayor capacidad de intercambio catiónico, por una regla general prefieren los iones polivalentes como el Ca^{2+} que los monovalentes, por ejemplo, K^+ o Na^+ (4).

Las cantidades de calcio que se pierden por lixiviación tienden a ser relativamente bajas cuando no se realizan prácticas de abonamiento; en contraste, la aplicación de fertilizantes, en especial potásicos, contribuye

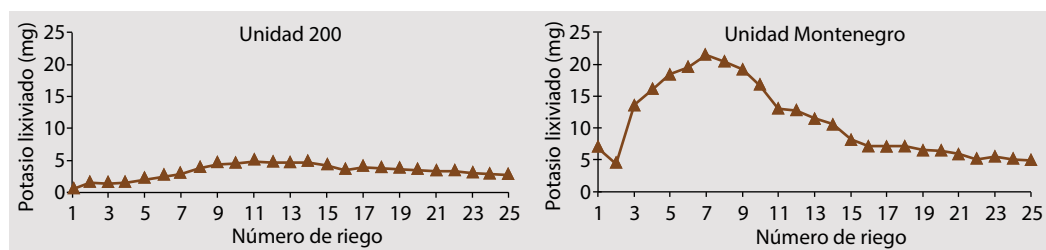


Figura 21. Pérdidas de potasio por lixiviación a través de tiempo, en respuesta a la fertilización con urea, en dos suelos de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Arias (1). Riegos realizados cada 4 días.

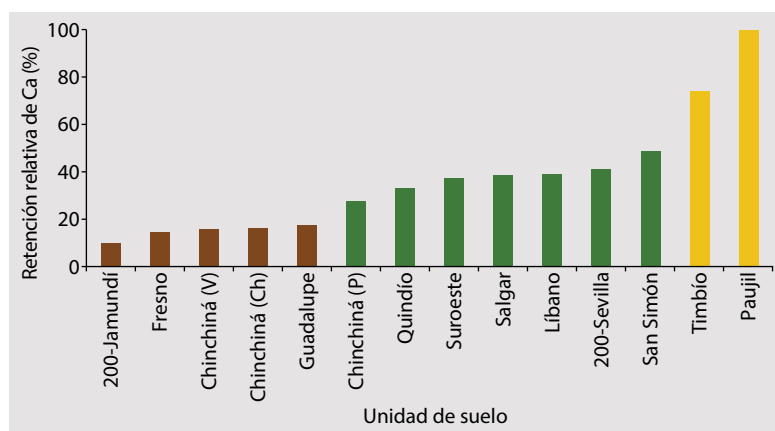


Figura 22. Retención de calcio en 14 unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Sadeghian (26). Se toma como referente (100%), la unidad Paujil.

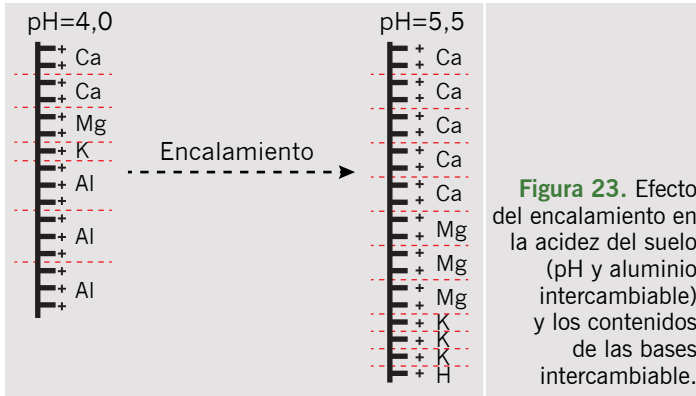


Figura 23. Efecto del encalamiento en la acidez del suelo (pH y aluminio intercambiable) y los contenidos de las bases intercambiables.

Chinchiná en Chinchiná (Caldas) y en Venecia (Antioquia), se caracterizaron por retener bajas cantidades de magnesio en la fase intercambiable, en tanto que las unidades Suroeste (Antioquia), 200 en Sevilla (Valle del Cauca), San Simón en Ibagué (Tolima), Timbío (Cauca) y Paujil (Santander) retuvieron una mayor cantidad del elemento; las demás unidades—Chinchiná en Pereira (Risaralda), Guadalupe (Huila), Quindío, Líbano (Tolima) y Salgar (Antioquia)—presentaron una tendencia intermedia.

significativamente a incrementar dichas pérdidas, especialmente durante los siguientes seis a ocho eventos de lluvia luego de la fertilización (Figura 24). Aunque una situación similar sucede con el suministro de productos amoniacales o los que generan amonio—por ejemplo urea—, su magnitud es menor.

Entre los factores que condicionan las pérdidas de Ca por lixiviación en la zona cafetera de Colombia se pueden mencionar la

cantidad del elemento en el complejo intercambiable y la selectividad del suelo para retenerlo, antes que la textura (1).

Pérdidas de magnesio

A través de la técnica de isotermas de adsorción, Sadeghian (26) midió la retención de magnesio en 14 unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia (Figura 25). Los suelos de las unidades Fresno (Tolima), 200 en Jamundí (Valle del Cauca),

La dinámica de la adsorción de magnesio se asemeja a la de calcio; esto significa que por lo general los suelos que retienen más cantidad de calcio también almacenan una mayor cantidad de magnesio; tendencia que tiene su origen tanto en la selectividad de este elemento como en la capacidad de

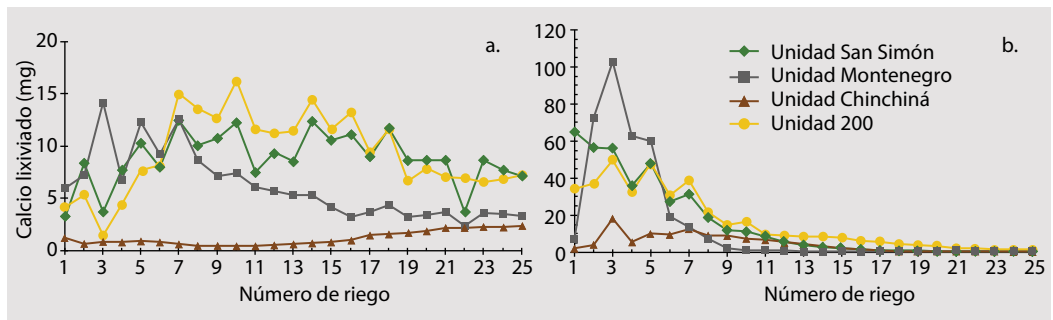


Figura 24. Pérdidas de calcio por lixiviación a través de tiempo, ocurridas por la fertilización con urea (a) y cloruro de potasio (b), en cuatro unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Arias (1). Riegos realizados cada 4 días.

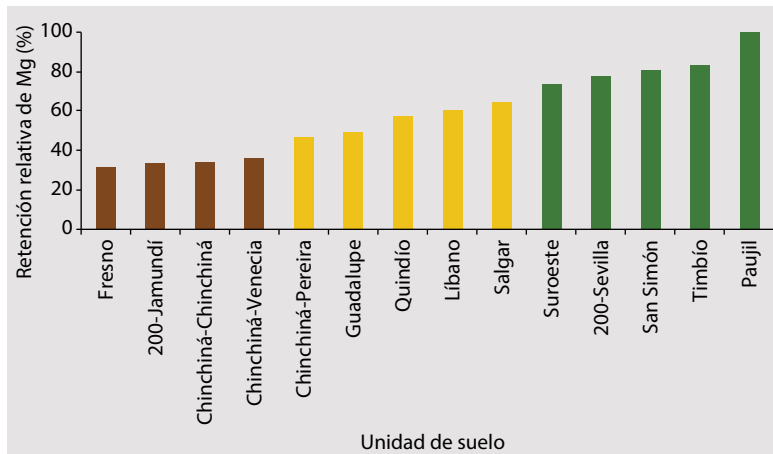


Figura 25. Retención de magnesio (Mg) en 14 unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Sadeghian (2). Se toma como referente (100%), la unidad Paujil.

intercambio catiónico, como se muestra en la Figura 26.

Una vez expuesto lo anterior, resulta evidente demostrar la competencia que ejercen elementos como el potasio y nitrógeno –en su forma amoniacal– sobre el magnesio; de allí que las fertilizaciones con estos nutrientes aumenta la lixiviación de magnesio (Figura 27). Al igual que el Ca, no es necesariamente la textura la propiedad que más define las pérdidas de Mg por lixiviación, pues pueden tener igual o mayor importancia características mineralógicas de las arcillas, la capacidad de intercambio catiónico y el pH del suelo, entre otros.

En un ensayo realizado en Cenicafé se midió el efecto de las dosis de potasio en las pérdidas de magnesio por lixiviación (Figura 28).

Cuando no se aplicó potasio (K=0) la cantidad de magnesio lixiviado fue muy baja y constante a través del tiempo, pero conforme al aumento de las dosis, las pérdidas fueron mayores y se incrementaron con los riegos.

Cabe resaltar que la lixiviación del Ca y Mg en el suelo no se presenta en forma aislada; el movimiento de éstos

está acompañado de un anión, con el fin de que se mantenga la electro-neutralidad del sistema. Esta circunstancia depende de la solubilidad de la fuente fertilizante utilizada y de la naturaleza del anión acompañante. La fuente fertilizante más empleada en Colombia es el cloruro de potasio–KCl de allí que las pérdidas de Ca y Mg ocurran en acompañamiento del ion cloruro. Además, el cloruro

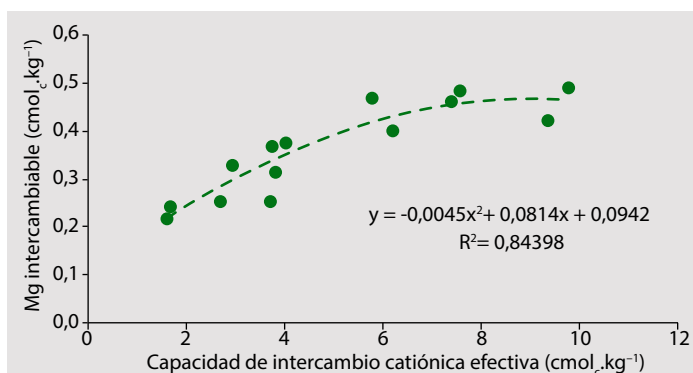


Figura 26. Magnesio intercambiable en función de la capacidad de intercambio catiónico (CICE).

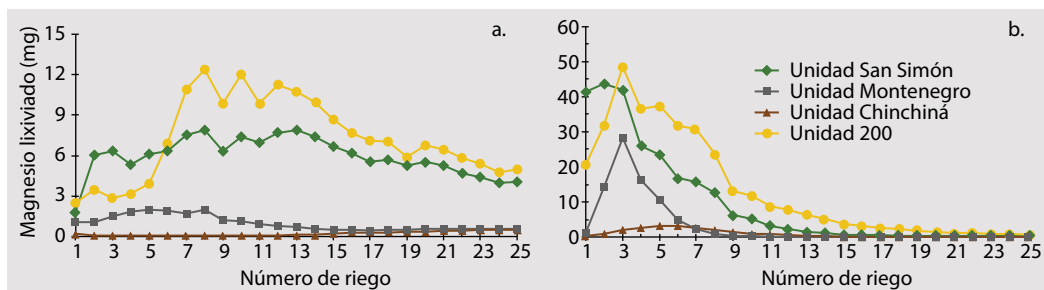


Figura 27. Pérdidas de magnesio por lixiviación a través de tiempo con fertilización nitrogenada (a) y potásica (b), en cuatro unidades de suelos de la zona cafetera de Colombia. Adaptado de Arias (1). Riegos realizados cada 4 días.

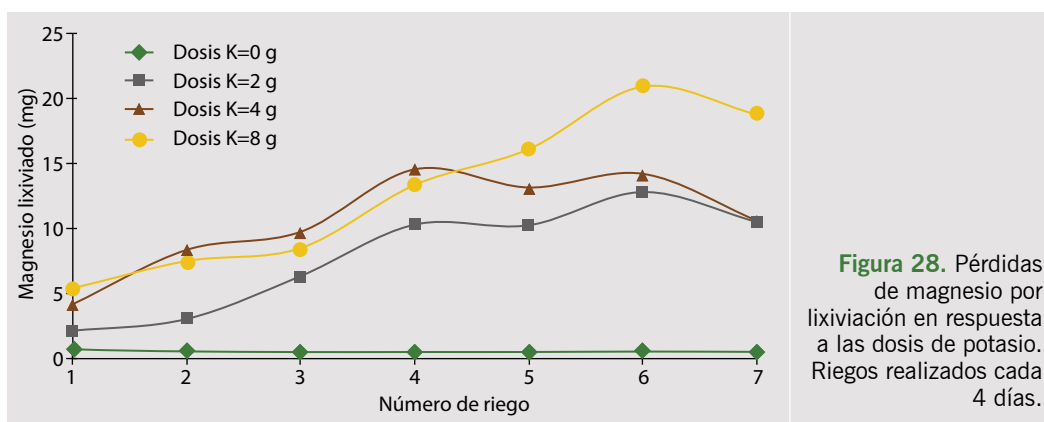


Figura 28. Pérdidas de magnesio por lixiviación en respuesta a las dosis de potasio. Riegos realizados cada 4 días.

no tiene la capacidad de corregir la acidez del suelo y, por su potencial para formar sales solubles, el Ca^{2+} y el Mg^{2+} son más propensos a ser lixiviados como CaCl_2 y MgCl_2 , respectivamente.

Durante los últimos años la solubilidad de los fertilizantes ha sido uno de los principales argumentos para su uso y promoción; sin embargo, no siempre los productos más solubles presentan mayores beneficios; por ejemplo, el

empleo continuado de óxido de Mg –producto con una relativa baja solubilidad– puede incrementar más la concentración del elemento en el suelo y en la planta que el sulfato de Mg, en razón de su mayor residualidad, pérdidas más bajas por lixiviación y posible efecto en la acidez (Figura 29). Lo anterior refuerza la idea de que la fertilización no sólo debe atender los requerimientos inmediatos del cultivo sino las futuras necesidades,

mediante la construcción de reservas a mediano y largo plazo.

Prácticas que ayudan a reducir la pérdida de nutrientes por lixiviación

Dadas las consecuencias económicas y ambientales de las pérdidas de los nutrientes por lixiviación, se hace necesario definir estrategias y prácticas que las minimicen.

Un primer paso para lograr este propósito radica en conocer los factores que la afectan, los cuales se relacionan con la interacción entre **la planta, el clima, el suelo y el manejo**.

Aspectos relacionados con la planta

El establecimiento de especies y variedades adaptadas a las condiciones locales, provistas de un sistema de raíces funcional y bien desarrollado, ayuda a la absorción eficiente de los nutrientes, disminuyendo la posibilidad que se pierdan por lavado.

El crecimiento de las raíces contribuye al desarrollo de la parte aérea de la planta y viceversa. En razón de ello, las plantas que poseen suficientes hojas pueden transpirar más, y favorecer así la extracción de una mayor cantidad de agua

desde el suelo, lo cual conlleva a que la absorción de los nutrientes que se encuentran en la solución del suelo sea más alta, en especial aquellos que ingresan principalmente a la planta vía flujo de masa (por ejemplo nitrógeno, calcio, magnesio, azufre y boro).

Durante la fase de establecimiento del cultivo, las plantas son poco eficientes en la toma de nutrientes, condición que se modifica conforme avanza el tiempo. A medida que las raíces crecen, exploran una mayor área del suelo y toman más cantidad de nutrientes, fenómeno que contribuye a la reducción de su pérdida en el agua que drena. Adicional a esto, la raíz posee capacidad de adsorber iones positivos y negativos, característica que favorece la retención de nutrientes. Por las anteriores razones, la

arquitectura de la raíz y el volumen que explora este órgano son factores determinantes de la producción, especialmente en ambientes con limitaciones de agua y de nutrientes en el suelo.

Aspectos relacionados con el clima

El clima, en su condición macro, es un factor que no se puede alterar; solo mediante algunas prácticas culturales es posible modificar parcialmente alguno de sus componentes en el ámbito local (microclima). Debido a que el agua es el principal agente en el proceso de lixiviación, se hace necesario conocer la cantidad y distribución de la lluvia a través de tiempo, con el fin de evaluar su influencia en la pérdida de los nutrientes vía precolación y tomar las medidas necesarias para reducirla.

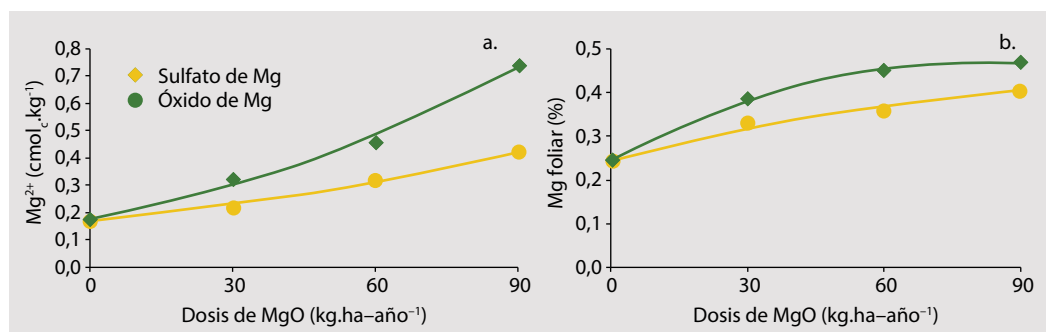


Figura 29. Magnesio intercambiable (a) y foliar (b) en respuesta a dosis y fuentes del magnesio en un cafetal de la Estación Central Naranjal (Chinchiná, Caldas), (27).

En sitios con déficit hídrico durante algunos meses del año y en donde es necesario establecer sombrío para menguar el efecto del clima (reducir la temperatura y la pérdida del agua), la disposición multi-estrata de los árboles regula en mayor grado el ingreso del agua al sistema en los períodos lluviosos, acción que es secundada por la presencia de hojarasca, en la superficie del terreno.

La temperatura tiene un efecto directo en la regulación hídrica del suelo a través de la evaporación, y de manera indirecta afecta el crecimiento de las plantas, la actividad de los microorganismos y la transpiración de las especies vegetales.

Aspectos relacionados con el suelo

Conocer las propiedades del suelo permite, en primer lugar, identificar posibles limitantes físicos y químicos que afectan el desarrollo radical y, por ende, la toma de nutrientes. Entre éstos están: compactación, profundidad efectiva superficial, drenaje imperfecto, baja fertilidad, problemas de acidez o alcalinidad, toxicidad por aluminio y manganeso, desbalances nutricionales

y salinidad, entre otros. Lo anterior también ayuda a distinguir aquellas características del suelo que afectan las pérdidas de los nutrientes vía lixiviación, por ejemplo, reducida capacidad para retener el agua y los nutrientes. Es pertinente hacer hincapié en que algunas de las propiedades del suelo se pueden mejorar a corto y mediano plazo, en tanto que otras como la mineralogía y la textura son prácticamente inmodificables.

Si bien, el porcentaje de arenas, limos y arcillas puede ser indicador del potencial de infiltración de agua y nutrientes en los suelos, en lo que a la lixiviación se refiere, los suelos no deben ser vistos única y exclusivamente bajo la óptica del tamaño de sus partículas minerales, pues es bien sabido que el humus, los microorganismos y materiales en diferente estado de descomposición forman parte integral de este recurso y cada componente le otorga propiedades específicas que afecta la dinámica de los nutrientes nativos o aquellos que se suministran mediante la fertilización. De hecho, en los suelos derivados de cenizas

volcánicas que se destacan por su porosidad, el material parental imprime en ellos una alta capacidad para la acumulación de materia orgánica respecto a otros suelos de origen diferente y asociada a esta característica un elevado potencial para retener humedad.

Aspectos relacionados con el manejo

Se puede decir que todas o casi todas las labores culturales tienen que ver de algún modo con la lixiviación; algunas de ellas de manera positiva y otras en forma negativa. Cuando las variedades de alta producción se siembran de forma correcta, en épocas favorables, en óptimas densidades y bajo condiciones adecuadas, y cuando la presencia de plagas y enfermedades dejan de ser un limitante y las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo no se constituyen como impedimentos, se potencializa la toma de nutrientes por las raíces, disminuyendo así su pérdida. Del mismo modo, una planta sin problemas sanitarios en su tallo, ramas, hojas y raíces es más activa y, por lo tanto, demanda y absorbe más cantidad de nutrientes desde el suelo; además,

debido a su follaje regula la cantidad y la velocidad de la lluvia que llega al suelo, y ayuda a reducir el exceso de la humedad cuando transpira.

Los cultivos intercalados, incluso las arvenses de baja interferencia, contribuyen a menguar la lixiviación de los nutrientes. En contraste, lotes en barbecho y el uso ineficiente del área cubierta por el cultivo conducen a resultados contrarios. La ubicación de los fertilizantes en las áreas donde las raíces presentan la máxima actividad, contribuye a lograr el objetivo propuesto.

Un mayor fraccionamiento de los fertilizantes durante el año constituye una opción para aquellas localidades con exceso de lluvia o donde la capacidad del suelo para almacenar los nutrimentos es baja, bien sea por su naturaleza química o física. En cuanto a las épocas de aplicación se refiere, se deben seleccionar aquellas en las que las raíces son más activas y absorben una mayor cantidad de nutrientes. Durante la etapa de establecimiento, es decir, cuando las plantas no cuentan con un sistema radical bien desarrollado, se debe procurar por un mayor fraccionamiento.

Estrategias para reducir la pérdida de nutrientes por lixiviación

A continuación se resumen las sugerencias que, en su conjunto, contribuyen a reducir las pérdidas de los nutrientes por lixiviación:

- Conocer la cantidad y la distribución de la lluvia durante el año. Esto permitirá saber qué tan húmeda es la zona e identificar los meses más críticos. Un punto de referencia puede ser 2.500 mm al año; valores mayores a éste se considerarían altos.
- Analizar los suelos de la finca con el fin de identificar las propiedades que pueden afectar la lixiviación en los diferentes lotes. Son de importancia la textura, la acidez (pH y aluminio intercambiable– Al^{3+}), el contenido de las bases intercambiable (Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+), la Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva–CICE (suma de bases y Al^{3+}) y la materia orgánica.
- Corregir la acidez del suelo mediante el encalamiento. Esta práctica aumenta el pH, reduce la toxicidad de aluminio, proporciona calcio y magnesio, favorece la

disponibilidad de fósforo y algunos elementos menores, estimula la actividad de los microorganismos, contribuye al crecimiento de las raíces y aumenta la capacidad del suelo para retener elementos como nitrógeno (en forma de amonio– NH_4^+), Ca^{2+} , Mg^{2+} y K^+ .

- Evitar que el suelo se erosione, pues el horizonte superficial tiende a ser el más fértil y el que más materia orgánica contiene; componente que ayuda a retener la humedad y los nutrientes.
- Seleccionar variedades productivas y adaptadas a las condiciones locales.
- Realizar prácticas que favorezcan el desarrollo de un sistema radical sano y funcional.
- Llevar almácigos sanos y vigorosos al campo.
- Incorporar abono orgánico en el hoyo al momento de la siembra.
- Establecer plantaciones con densidades óptimas.
- Establecer cultivos intercalados y evitar que el terreno permanezca desnudo.
- Definir la cantidad de los nutrientes con base en

el análisis de suelos y el sistema de producción. No aplicar fertilizantes en exceso y racionalizar el uso de los fertilizantes que generan acidez.

- Seleccionar adecuadamente las fuentes fertilizantes. No siempre las más solubles son las más eficientes, pues bajo condiciones de alta humedad pueden perderse rápidamente si no se fraccionan adecuadamente.

- Aumentar el fraccionamiento de los fertilizantes en sitios lluviosos o en años La Niña, cuando se exceden los 2.500 mm al año.

- Realizar la fertilización al comenzar los períodos lluviosos.

- Aplicar abonos y residuos orgánicos con el fin de generar un ambiente más propicio para el crecimiento de las raíces y aumentar la retención de humedad y de nutrientes.

- Promover la asociación de café con especies arbóreas que aporten residuos orgánicos.

- Distribuir de manera homogénea el fertilizante en los sitios donde las raíces son más activas.

- Realizar desyerbas oportunas para reducir la competencia en la toma de nutrientes por las raíces.

- Realizar nutrición balanceada con el propósito de reducir el efecto negativo de los antagonismos que favorecen las pérdidas, por ejemplo K-Mg y N-bases de cambio.

- Manejar las plagas y enfermedades con el fin de que las plantas sean sanas y absorban eficientemente los nutrientes.

Literatura citada

1. ARIAS S., E. Efecto de la textura del suelo sobre las pérdidas por lixiviación de nitrógeno, fósforo y potasio, aplicados en la fertilización. Manizales (Colombia), Universidad de Caldas. Facultad de Ciencias Agropecuarias, 2008. 96 p.
2. ARIAS S., E.; SADEGHIAN K., S. Lixiviación del fósforo en suelos de la zona cafetera y su relación con la textura. Suelos ecuatoriales 41(2):150-154. 2011.
3. ARIAS S., E.; SADEGHIAN K., S.; MEJÍA M., B.; MORALES L., C.S. Lixiviación del nitrógeno en algunos suelos de la zona cafetera y su relación con la textura. *Cenicafé* 60(3):239-252. 2009.
4. BOHN, H. L.; MCNEAL, B.L.; O'CONNOR, G. A Soil Chemistry. Tercera edición. John Wiley & Sons, INC, New York. 307 p. . 2001.
5. BRAVO G., E.; GÓMEZ A., A. Capacidad de fijación de fósforo en seis unidades de suelos andosólicos de la zona cafetera colombiana. *Cenicafé* (Colombia) 25(1):19-29. 1974.
6. DAVIES, D.M.; WILLIAMS, P.J. The effect of the Nitrification Inhibitor Dicyandiamide on Nitrate Leaching and Ammonia Volatilization: A U.K. Nitrate Sensitive Areas perspective. *Journal of Environmental Management* 45, 263-272. 1995.
7. FOX, R.L. Examples of anion and cation adsorption by soils of tropical America. *Tropical Agriculture* (Trinidad). 51 (2): 200-209. 1974.
8. GÓMEZ DE R., C.; CARRILLO P., I.F.; ESTRADA E., G. Adsorción de potasio en andosoles de la zona cafetera. *Cenicafé* (Colombia) 33(4):104-128. 1982.
9. GONZÁLEZ O., H. Opciones para el manejo eficiente de los fertilizantes: actualidad y perspectivas. En: Centro nacional de investigaciones de café – *Cenicafé*. CHINCHINÁ. COLOMBIA. Informe anual de actividades Disciplina Suelos. 2012 – 2013. Chinchiná, *Cenicafé*. p 28-38.
10. GONZÁLEZ O., H.; SADEGHIAN KH., S. Lixiviación de nitrógeno en suelos de la zona cafetera a partir de diferentes fuentes fertilizantes. *Cenicafé* (Colombia) 63(1): 111-119. 2012.
11. GROENEVELD, R.; BOUWMAN, A.F.; KRUITWAGEN, S.; VAN IERLAND, E.C. 1998. Nitrate leaching in dairy farming: economic effects of environmental restrictions. *Environmental Pollution* 102 S1: 755:761.
12. HENAO T., M.C.; DELVAUX, B. Propiedades de intercambio K-Mg en suelos derivados de materiales volcánicos de la zona cafetera central de Colombia. *Cenicafé* (Colombia) 49(2):136-150. 1998.
13. HENAO T., M.C.; DELVAUX, B. Comportamiento catiónico en andisoles de la zona cafetera: base para plantear estrategias de fertilización en plátano. In: SIMPOSIO sobre Suelos de la Zona Cafetera Colombiana. Chinchiná (Colombia), Julio 24-28, 2000. Ponencias. Chinchiná (Colombia), *Cenicafé*, 2000. 11 p.
14. HENAO T., M.C.; DELVAUX, B. Lixiviación de elementos fertilizantes en algunos andisoles de la zona cafetera central colombiana. In: CONGRESO Colombiano de la Ciencia del Suelo, 10. Medellín (Colombia), Octubre 11-13, 2000. Programa y resúmenes. EDITADO EN Medellín (Colombia), Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo-Universidad Nacional-Universidad de Antioquia, 2000. p35.
15. HINCAPIÉ G., E.; HENAO T., M.C. Efecto de la fertilización del café sobre la composición de la fase líquida en suelos derivados de cenizas volcánicas. In: CONGRESO Colombiano de la Ciencia del Suelo, 14. Villavicencio (Colombia), Octubre 29-31, 2008. Resúmenes. Villavicencio (Colombia), Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 2008.
16. LEAL V., L.A. Avances sobre la dinámica del nitrógeno en suelos de la zona cafetera. Chinchiná (Colombia), *Cenicafé*, 2007. 1 p.
17. LEHMANN J.; SCHROTH G. 2003. Chapter 7 – Nutrient leaching. Tree, crops and soil fertility. In: Schroth, G., Sinclair, F.L. (ed.). *Tress, crops and soil fertility*. CAB international. p. 151-166.

18. LÓPEZ A., M. Valoración de las formas de fósforo, orgánica e inorgánica, de un suelo de la zona cafetera de Colombia. *Cenicafé* (Colombia) 11(7):189-204. 1960.
19. LUNA Z., C.; SUÁREZ V., S. El potasio en suelos derivados de cenizas volcánicas. *Suelos Ecuatoriales* (Colombia) 9(2):37-44. 1978.
20. MALAVOLTA, E. 2006. Manual de nutrição mineral de plantas. Editora Agronômica Ceres, São Paulo. 631 p.
21. MENGEL, K.; KIRKBY, E. A. 2000. Principios de nutrición vegetal. Traducción al español de la 4ª edición (1987). Internacional Potash Institute. Basel, Switzerland. 692 p.
22. NAVARRO B., S.; NAVARRO G., G. 2003. Química agrícola. El suelo y los elementos químicos esenciales para la vida vegetal. Segunda edición. Ediciones Mundi-Prensa, Madrid. 487 p.
23. PEREGO, A.; BASILE, A.; BONFANTE, A.; DE MASCELLIS, R.; TERRIBILE, F.; BRENNNA, S.; ACUTIS, M. 2012. Nitrate leaching under maize cropping systems in Po Valley (Italy). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 147: 57-65.
24. REYNOLDS V.; RICHTER V.V. Nitrate in groundwater of the Central Valley, Costa Rica. *Environment international* 21(1): 71-79. 1995.
25. SADEGHIAN K., S. Calibración de análisis de suelo para N P K y Mg en cafetales al sol y bajo semisombra. *Cenicafé* 60(1):7-24. 2009.
26. SADEGHIAN K., S. 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 almácigo. Medellín: Univesidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias agropecuarias, 2012. 157 p.
27. SADEGHIAN K., S.; Manejo integrado de nutrientes para una caficultura sostenible. *Suelos Ecuatoriale* 44(2): 74-89. 2014
28. SADEGHIAN K., S.; HERNÁNDEZ G., E.; ROSS, M.; GUERRERO R., R. Fuentes solubles de magnesio y azufre en la producción y calidad del café. In: CONGRESO Colombiano de la Ciencia del Suelo, 13. Bogotá (Colombia), Octubre 4-6, 2006. Memorias. Bogotá (Colombia), Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo, 2006. 7 p.
29. SADEQ, M.; MOE L., C.; ATTARASSI, B.; CHERKAOUI, I.; EIAOUUAD, R.; IDRISSE, L. 2008. Drinking water nitrate and prevalence of methemoglobinemia among infants and children aged 1-7 years in Moroccan areas. *Int. J. Hyd. Environ. Health* 211: 546-554.
30. STEVENSON, F.J.; COLE, M.A. Cycles of soil: Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. 2 ed. New York, John Wiley, 1999. 427 p.
31. STRAHM, B. D.; HARRISON, R.B.; TERRY, T. A.; FLAMING B. L.; LIXCATA, CH.; PETERSEN, K. S. 2005. Soil solution nitrogen concentrations and leaching rates as influenced by organic matter retention on highly productive Douglas-fir site. *Forest Ecology and Management* 218: 74-88.
32. SUÁREZ V., S.; CARRILLO P., I.F. Comportamiento de tres fertilizantes potásicos en un Typic Dystrandept. *Cenicafé* (Colombia) 35(2):31-39. 1984.
33. SYSWERDA, S.P.; BASSO, B.; HAMILTON, S.K.; TAUSIG, J. B.; ROBERTSON, G.P. 2012. Long-term nitrate loss along an agricultural intensity gradient in the Upper Midwest USA. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 149: 10-19.
34. ZAPATA, H. R. Química de la acidez del suelo. Ed. Cargraphics. Cali, 2004. 208p.



Cenicafé

Ciencia, tecnología
e innovación
para la caficultura
colombiana