



Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural
República de Colombia

Libertad y Orden



Corpoica
Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria

Prosperidad
para todos



Corpoica
Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria
www.corpoica.org.co



Manejo de la nutrición mineral en sistemas ganaderos de los Llanos Orientales de Colombia



BAC

BIBLIOTECA AGROPECUARIA DE COLOMBIA

www.corpoica.org.co

ISBN: 978-958-740-115-8



9 789587 401158



Ministerio de Agricultura y
Desarrollo Rural



Manejo de la nutrición mineral en sistemas ganaderos de los Llanos Orientales de Colombia

Autores

Álvaro Rincón Castillo*
José Eurípides Baquero Peñuela**
Hernando Flórez Díaz***

Editores

Álvaro Rincón Castillo
César Augusto Jaramillo Salazar

Compilación y Dirección

Álvaro Rincón Castillo

Villavicencio, Meta. Colombia

* I.A. Ph.D. Investigador de CORPOICA. Centro de Investigación La Libertad. Villavicencio, Meta. Colombia.

** I.A. M.Sc. Ph.D. Investigador de CORPOICA Centro de Investigación La Libertad. Villavicencio, Meta. Colombia.

*** MVZ. M.Sc. Ph.D. Investigador de CORPOICA. Centro de Investigación La Libertad. Villavicencio, Meta. Colombia.

Rincón Castillo, Álvaro; Baquero Peñuela, José Eurípides y Flórez Díaz, Hernando /
Manejo de la nutrición mineral en sistemas ganaderos de los Llanos Orientales de Colombia.
Villavicencio (Meta): CORPOICA, 2012. 164 p.

Palabras clave: GANADO BOVINO, NUTRICION, SUELO ACIDO, SUPLEMENTOS
MINERALES, NUTRICION DE LAS PLANTAS, LLANOS ORIENTALES-COLOMBIA



Esta publicación es un resultado del proyecto “Efecto de la nutrición mineral de los pastos sobre el mejoramiento de la producción y calidad del forraje del piedemonte llanero”, financiado por el Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural y ejecutado por investigadores de CORPOICA en el período 2007-2010.

Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – CORPOICA -,
C.I. La Libertad. Km. 17 Vía Villavicencio – Puerto López.
Villavicencio, Meta. Colombia. Teléfono: (8) 6709700.

Línea de atención al cliente: 018000121515
atencionalcliente@corpoica.org.co
www.corpoica.org.co

Revisión técnica: Doctores Martha Bolaños y Pablo Antonio Cuesta.
Investigadores CORPOICA Tibaitatá. Mosquera, Cundinamarca.

ISBN: 978-958-740-115-8
CA: PR08100266
CUI: 1381
Primera edición: Marzo de 2012
Tiraje: 900 ejemplares
Manual Técnico No. 16
Fotografías: Álvaro Rincón Castillo - Hernando Flórez D.

Producción editorial:
Diagramación, impresión y encuadernación



www.produmédios.org
Tel: 8937710

Diseño: Javier Nieto

Impreso en Colombia
Printed in Colombia

PRESENTACIÓN

Se reconoce que la actividad ganadera de la Orinoquia, es uno de los reglones productivos más importante de la región con un peso significativo del sector en el ámbito nacional, con una participación cercana al 25% de la población bovina del país. Actividad que se desarrolla en sus tres subregiones naturales: piedemonte, con especialización en el sistema bovino doble propósito y ganadería de ceba; la altillanura y la región inundable especializadas en ganadería de cría. En las cuales se han logrado avances significativos en los parámetros productivos, gracias, entre otros, a los recursos forrajeros incorporados a la producción, especialmente en el piedemonte y altillanura. Sin embargo, su competitividad se ve afectada fundamentalmente por la degradación de las praderas, que afecta la disponibilidad y calidad del forraje, ocasionada por un manejo inadecuado del cultivo no acordes a las condiciones edafoclimáticas de la región. Lo anterior, aunado a que en las condiciones del trópico los pastos, principal fuente de alimentación bovina, no alcanzan a suministrar las concentraciones requeridas de varios minerales, deficiencia que afecta directamente los índices productivos y reproductivos del ganado bovino, lo que hace obligatorio la suplementación permanente de estos en los bovinos de pastoreo.

En éste documento se consideran los aspectos nutricionales comprometidos en la relación suelo-planta-animal, que permite entender sus interacciones y se ofrecen recomendaciones para hacerlas más eficientes. El conocer las condiciones de fertilidad y acidez de los suelos, la oferta de recursos forrajeros con sus formas de producción y manejo, los nutrientes en el suelo con sus interacciones, las condiciones para mejorar su oferta y disponibilidad, la concentración de minerales en el suelo y su función, la determinación de las deficiencias como sus síntomas en la planta y el animal y sus recomendaciones de manejo, son el andamiaje tecnológico para lograr una producción sostenible y competitiva de la ganadería bovina regional.

Es responsabilidad de CORPOICA generar alternativas tecnológicas que contribuyan a mejorar la competitividad del sector que son las que se ofrecen en éste manual técnico.

JAIME TRIANA RESTREPO
Director CORPOICA C.I. LA LIBERTAD



CONTENIDO

INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO 1

9

ACIDIFICACIÓN DE LOS SUELOS E INTERCAMBIO IÓNICO

I.A. Ph.D. Álvaro Rincón Castillo.

Investigador de CORPOICA, C.I. La Libertad

arincon@corpoica.org.co

CAPÍTULO 2

24

LOS MINERALES EN EL SUELO

I.A. Ph.D. José Eurípides Baquero Peñuela.

Investigador de CORPOICA C.I. La Libertad

jbaquero@corpoica.org.co

CAPÍTULO 3

58

LOS MINERALES EN EL DESARROLLO Y PRODUCCIÓN DE LAS PLANTAS

I.A. Ph.D. Álvaro Rincón Castillo.

Investigador de CORPOICA, C.I. La Libertad.

arincon@corpoica.org.co

CAPÍTULO 4

81

REQUERIMIENTOS Y RECOMENDACIONES DE SUPLEMENTACIÓN CON MINERALES EN BOVINOS

MVZ. Ph.D. Hernando Flórez Díaz.

Investigador de CORPOICA. C.I. La Libertad.

hflorez@corpoica.org.co

CAPITULO 5

113

CONCENTRACION DE MINERALES EN SUELOS Y FERTILIZACIÓN DE PASTOS EN LOS LLANOS ORIENTALES DE COLOMBIA

I.A. Ph.D. Álvaro Rincón Castillo.

Investigador de CORPOICA. C.I. La Libertad.

arincon@corpoica.org.co

INTRODUCCIÓN

La ganadería bovina de la Orinoquía tiene una población aproximada de cinco millones de cabezas, que representan el 23% de la ganadería nacional y el 40% del hato de carne del país (Minagricultura, 2009). Los Llanos Orientales de Colombia comprenden los departamentos de Meta, Vichada, Casanare y Arauca; es una extensa región que forma parte de los 250 millones de hectáreas de las sabanas de Suramérica localizadas en Brasil, Venezuela, Bolivia y Colombia (Boddey *et al.*, 1998). Posee 26 millones de hectáreas, de las cuales 16 millones son aptas para sistemas de producción animal en pastoreo. De estas, el 11% están localizadas en el Piedemonte llanero, el 63% en la Altillanura y el 25% en la Orinoquia inundable.

La principal característica de estas sabanas es el alto grado de meteorización de sus suelos, lo que ha conducido al bajo contenido de bases intercambiables, fósforo y materia orgánica; mientras que la concentración de aluminio intercambiable se encuentra en niveles tóxicos para la mayoría de los cultivos. Los oxisoles se encuentran casi exclusivamente en regiones tropicales, cubriendo extensas áreas, en su mayoría planas y generalmente bien drenadas. Las características más notables del clima tropical son las altas temperaturas constantes durante todo el año y una elevada pluviosidad. Estas condiciones originan elevadas tasas de meteorización, por la velocidad a la que ocurren los procesos químicos.

La actividad ganadera en el país y particularmente en los Llanos colombianos no es competitiva, ocasionada, entre otras causas, por la baja disponibilidad de forraje en los potreros, como consecuencia de la degradación de praderas (Figura 1.1). Este problema se ha manifestado en forma más intensa en las praderas sembradas de *Brachiaria decumbens*, que cubre un poco más de 1.500.000 ha en la Orinoquia colombiana, y se extiende a todas las regiones ganaderas del país y a otros importantes países productores de carne bovina como Brasil, donde este problema ha aumentado desde la década de 1980, por mal manejo animal, prácticas culturales inadecuadas y falta de reposición de nutrientes; este proceso de degradación afecta entre un 70% a un 80% de las áreas cultivadas con pastos. La capacidad de carga es de un animal·ha⁻¹ en gramíneas introducidas y 0,3 cabezas·ha⁻¹ en praderas nativas. Los pastos

nativos e introducidos presentan baja disponibilidad y calidad de forraje, que van de acuerdo con la baja fertilidad del suelo. Sumado a esto, por la baja concentración de proteína, fósforo y calcio, se tienen bajos índices productivos y reproductivos del ganado.



Figura 1.1. Degradación de praderas en el piedemonte llanero.

Con el propósito de contribuir al mejoramiento de la ganadería de los Llanos Orientales de Colombia, se ha elaborado esta publicación para dar a conocer la importancia de los minerales en los tres componentes esenciales de los sistemas ganaderos: suelo, planta y animal. Son cinco temas presentados en capítulos, que inicia con información básica sobre los procesos de acidificación de los suelos y todo lo relacionado con el intercambio de aniones y cationes en el terreno, aspectos que son importantes para el entendimiento de todos los procesos que ocurren en el suelo para la disponibilidad de los minerales para las plantas. En el segundo se hace referencia a los minerales en el suelo, la forma como se encuentran, su disponibilidad para la planta y fuentes. En el tercer capítulo se presenta la función de los minerales en la planta, la forma como son absorbidos, las toxicidades y deficiencias en la planta. En el cuarto se da a conocer la función de los minerales en los bovinos, los síntomas de deficiencia, las concentraciones adecuadas para el buen desarrollo de los animales. En el quinto y último se presenta información sobre la concentración de minerales en suelos de la Orinoquia colombiana y se dan recomendaciones de fertilización de los pastos con base en estudios realizados con diferentes nutrientes.

ACIDIFICACIÓN DE LOS SUELOS E INTERCAMBIO CATIÓNICO

Alvaro Rincón Castillo ¹

INTRODUCCIÓN

Los suelos donde se desarrolla la mayoría de la actividad agropecuaria de la Orinoquia colombiana son ácidos. Los pastos, base de la alimentación de los bovinos, se han introducido, evaluado y seleccionado por su adaptación a la alta saturación de aluminio (Al); sin embargo, en los últimos años se han desarrollado nuevos cultivares con mayor potencial de producción de forraje, que expresan esta característica cuando se aumenta la saturación de bases de los suelos, además, los cultivos que se utilizan en los sistemas integrados de agricultura y ganadería exigen que la saturación de Al del suelo sea menor a lo que normalmente se encuentra en estos suelos, que supera el 70%. El Al puede afectar a la planta, interfiriendo en su absorción de nutrientes esenciales, como calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K), o ser directamente tóxico para las raíces, cuyas puntas sufren el mayor daño (Clarkson, 1965). El Al en forma iónica reduce la división celular de la raíz y su crecimiento, produciendo raíces cortas y gruesas que no conservan la capacidad de proporcionar agua y nutrientes en las cantidades necesarias para las plantas (Foy, 1992). Sin embargo, hay plantas que presentan un buen desarrollo de raíces y crecimiento vigoroso en suelos ácidos con toxicidad de Al. Se ha observado que la detoxificación de Al en las raíces de *Brachiaria decumbens* se da por la formación de quelatos de Al o por alcalinización de la rizosfera apical (Rao *et al.*, 1998). Para conocer y entender el comportamiento de los suelos ácidos y su rela-

I.A. PhD, Investigador CORPOICA. C.I. La Libertad. arincon@corpoica.org.co

ción con el desarrollo de las plantas cultivadas en ellos, además para dar una orientación sobre el intercambio iónico en estos suelos, se ha desarrollado este capítulo que servirá de base para la comprensión de algunos apartes de los siguientes capítulos.

ORIGEN DE LOS SUELOS DE LA ORINOQUIA

Los oxisoles y ultisoles son suelos que predominan en la Suramérica tropical, que incluye a la Amazonía, la Orinoquia de Colombia y Venezuela, el Cerrado brasileiro, las Pampas bolivianas y otras áreas menores (CIAT, 1994). Los suelos de los Llanos Orientales de Colombia se originaron a partir de los sedimentos transportados por los ríos que bajan de la Cordillera Oriental. Los materiales que forman actualmente los suelos de esta región han sufrido tres periodos de meteorización, lo cual, además del clima tropical con alternancia de periodos húmedos y secos, son los responsables del intenso lavado y baja concentración de nutrientes de estos suelos (Botero y López, 1982).

En general, son suelos muy antiguos, formados a partir de sedimentos con alto grado de evolución, que se manifiesta con el predominio de cuarzo en la fracción arena y de caolinita y óxidos de hierro en la fracción arcilla. Su topografía plana hace que sean fáciles de trabajar para fines agropecuarios. Sus propiedades químicas se caracterizan por la alta acidez, toxicidad de Al, baja disponibilidad de fósforo, baja capacidad de intercambio catiónico y deficiencias en la mayoría de nutrimentos esenciales para las plantas. Otra característica de estos terrenos es la baja capacidad de retención de agua en el espacio entre los agregados del suelo, presentándose baja disponibilidad de agua para las plantas (CIAT, 1983). En las llanuras aluviales del piedemonte llanero, los suelos son más fértiles y menos lavados por ser más jóvenes, y además porque reciben aportes en las crecientes procedentes de las áreas más altas y viejas del piedemonte (Botero y López, 1982).

Los oxisoles y ultisoles son los suelos más representativos del grupo denominado *suelos con arcillas de baja actividad*, con las siguientes características químicas y mineralógicas: baja capacidad de intercambio catiónico de la fracción arcillosa, carga dependiente del pH, estado avanzado de meteorización y arcillas que se dispersan difícilmente en el agua (CIAT, 1984). Tienen perfiles profundos y bien desarrollados, con una transición difusa entre los horizontes; el color característico varía desde amarillo o pardo, hasta rojo oscuro, influenciado por las concentraciones de óxidos de hierro.

ACIDIFICACIÓN DE LOS SUELOS

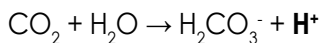
La acidificación del suelo es el proceso mediante el cual el pH disminuye, porque aumenta la concentración de hidrógeno (H^+) y la capacidad de neutralización de las bases. Aunque hay suelos naturalmente ácidos y seres vivos capaces de sobrevivir en estas condiciones, un suelo con un pH bajo puede presentar limitantes para el crecimiento de plantas y microorganismos. En el suelo normal, la micela coloidal está cubierta por cationes y guarda la secuencia normal de retención catiónica, ($Ca > Mg > K > Na$), sin la presencia o con una mínima cantidad de Al cambiante. En el suelo ácido, la secuencia normal es alterada en forma drástica por el catión de Al, el cual puede llegar a constituirse en el catión predominante.

• Causas de la acidificación de los suelos

Los suelos se acidifican por diversas causas, dentro las cuales las más importantes se mencionan a continuación (INPOFOS, 1995):

1. Lavado de bases

Sucede cuando la precipitación es mucho mayor que la evapotranspiración. Se presenta movimiento de cationes (Ca, Mg, Na, K) a capas inferiores del suelo, por lixiviación. Los cationes pueden formar pares iónicos con algunos aniones como los nitratos y sulfatos y desplazarse a capas profundas. El lavado de bases se ve facilitado por la formación de ácido carbónico cuando el agua entra al suelo:



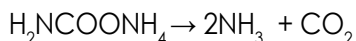
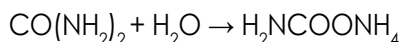
El H^+ desplaza a las bases de los sitios de intercambio del suelo.

2. Nitrificación

Transformación de amonio (NH_4^+) de los fertilizantes nitrogenados, principalmente la urea $CO(NH_2)_2$, el sulfato de amonio $(NH_4)_2SO_4$, la orina y las heces del ganado, en ácido nítrico por oxidación, dejando los hidrogeniones que contribuyen a la acidificación. La nitrificación requiere oxígeno (O_2), por lo tanto es necesario que el suelo se encuentre drenado y con espacios porosos para que el proceso se realice:



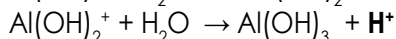
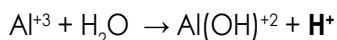
La utilización de la urea produce acidificación del suelo, aunque las reacciones iniciales permiten una elevación del pH aproximadamente a 8. En este ambiente alcalino, el carbamato de amonio se descompone rápidamente en amoníaco (NH_3) y en dióxido de carbono (CO_2):



El NH_3 formado en estas reacciones es un gas que se volatiliza fácilmente de la superficie del suelo, perdiéndose de esta forma una alta cantidad de nitrógeno (N) del sistema; sin embargo, el NH_3 en contacto con el agua se transforma en amonio (NH_4), permaneciendo en esta forma en el suelo, para ser absorbido por algunas plantas, o reaccionando con el oxígeno para formar nitrato y liberar H^+ como ya se explicó anteriormente. La mineralización del N de la materia orgánica también produce NH_4 , que también causa la acidificación del suelo.

3. Aluminio intercambiable

Se ha reconocido que uno de los factores principales en el desarrollo de la acidez del suelo es la presencia de Al^{+++} en la solución de este. Los iones de Al^{+++} desplazados de los minerales arcillosos por otros cationes, reaccionan con el agua del suelo, liberando H^+



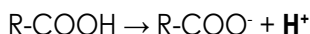
4. Intercambio de bases por H^+ en las raíces de las plantas

En las raíces se produce la absorción de nutrientes como Ca, K, Mg y se libera H^+ para mantener el equilibrio iónico o carga balanceada en el interior de la célula. El pH del citosol de la célula, casi no sufre cambios por su capacidad amortiguadora, permaneciendo entre 7 y 7,5. Sin embargo, la pared celular con frecuencia puede sufrir disminución en el pH hasta valores entre 5 y 5,5. Este fenómeno también ayuda a explicar la capacidad de las raíces de acidificar el suelo. Además, la liberación de CO_2 que se presenta durante

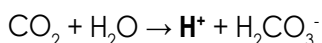
la respiración, también provoca la acidificación del suelo por la formación de ácido carbónico (Salisbury y Ross, 1992).

5. Descomposición de la materia orgánica

La materia orgánica contiene grupos carboxílicos y fenólicos que se disocian liberando H^+ :



Los microorganismos que descomponen la materia orgánica en un proceso aeróbico producen CO_2 , que al reaccionar con el agua se libera H^+ :



Por su carga negativa, el $H_2CO_3^-$ se une a cationes como Ca^+ , Mg^+ , K^+ y se desplazan a capas profundas por lixiviación.

• Efectos de la acidificación de los suelos

Los efectos que se producen en un suelo ácido son los siguientes:

- Disminución de la disponibilidad de nutrientes (P, Mg, Ca, K) en los sitios de intercambio catiónico de los suelos, donde pueden ser absorbidos por las plantas. Estos nutrientes se encuentran en bajas cantidades, por haber sido intercambiados por otros cationes como H^+ o Al^{3+} .
- Altas concentraciones que pueden llegar a niveles tóxicos de Al y Mn, principalmente, para la mayoría de los cultivos. El Al puede producir un descenso en el crecimiento de las plantas, porque puede inhibir el crecimiento y la división celular. Por su parte, el Mn provoca daños en las partes aéreas de las plantas, produciendo manchas necróticas en los tallos y manchas rodeadas de un halo de necrosis en las hojas, que además van a aparecer arrugadas (Marschner, 2002).
- Agotamiento de la capacidad de amortiguación del suelo. Se va produciendo una disminución progresiva de la capacidad de neutralizar ácidos, a medida que el pH disminuye.
- Disminución del crecimiento de plantas y de los procesos microbiológicos que ocurren en el suelo, especialmente si el pH disminuye por debajo de cuatro. De esta forma se va a perder aporte de materia orgánica, al haber menos biomasa, y los procesos de nitrificación que

realizan las bacterias serán afectados. Esto conlleva un debilitamiento de la estructura de agregados del suelo que favorecen la aireación y el movimiento de agua, y se van a formar costras superficiales que aumentan la escorrentía y disminuyen la lixiviación.

INTERCAMBIO IÓNICO EN EL SUELO

Algunos minerales y la materia orgánica se descomponen mediante procesos de meteorización, hasta llegar a formar partículas muy pequeñas a las que se les ha dado el nombre de coloides, que son los responsables de la reactividad química del suelo. En la mayoría de los suelos, los coloides de minerales arcillosos son más numerosos que los coloides orgánicos. Cada coloide tiene una carga negativa que se desarrolla durante los procesos de formación, y como un imán atrae las partículas con cargas positivas y repele las partículas con cargas negativas. A los elementos químicos que poseen cargas eléctricas se les denomina iones, a los que poseen cargas positivas se les llama cationes (Figura 1.2) y a los de carga negativa, aniones (Potash and Phosphate Institute, 1997).

El intercambio iónico es el proceso reversible por el cual son intercambiados los cationes y los aniones, principalmente entre las fases líquidas y sólidas del suelo. Las fracciones del suelo entre las que ocurre el intercambio iónico son la orgánica y la mineral, cuyas partículas tienen un diámetro menor a 20

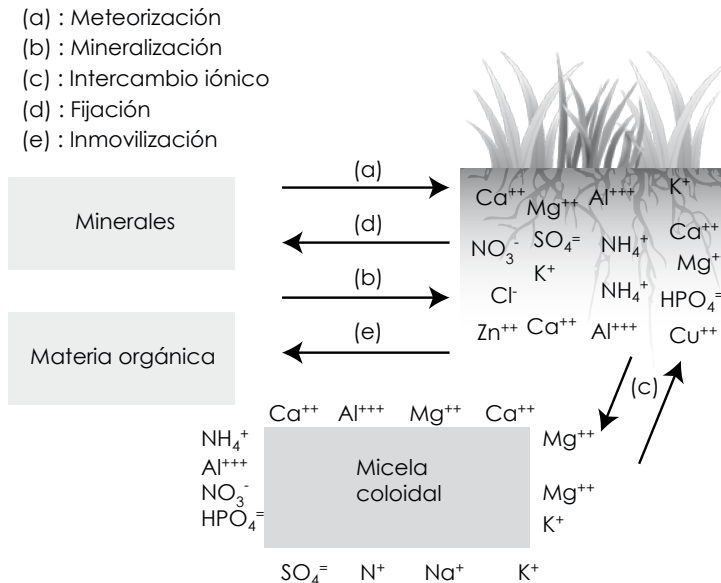


Figura 1.2. El intercambio iónico en el contexto de la relación suelo – planta (Guerrero, 1993).

micras, que incluye una parte de la fracción limosa y la totalidad de la arcilla y la materia coloidal.

1. Cationes cambiables

Los cationes tienen carga positiva y están constituidos por las bases cambiables importantes para la nutrición de las plantas (Ca, Mg, K y Na); de estos también forma parte la acidez cambiante constituida por H, Al, Mn y Fe. Otros componentes importantes son el amonio y los microelementos Cu y Zn (Figura 1.3).

La capacidad de intercambio catiónico (CICE) es la que tiene el suelo de retener e intercambiar cationes; es una de las propiedades químicas más importante del suelo, porque está relacionada con su fertilidad y acidez. Los que son retenidos por el suelo pueden ser reemplazados por otros, lo que significa que son intercambiables. Por ejemplo, el Ca puede ser reemplazado por el Al, por el H o por el K y viceversa ((Potash and Phosphate Institute, 1997). Mientras mayor sea la CICE, más cationes puede retener el suelo.

La CICE depende de la cantidad y tipo de arcillas y del contenido de materia orgánica presente en el suelo. Los valores de CICE son bajos en lugares donde los suelos son muy meteorizados, como los de la altillanura colombiana. Los oxisoles han alcanzado un grado extremo de meteorización y la fracción mineral está constituida casi en su totalidad por óxidos y sesquióxidos de Fe y Al, con un CICE inferior a $8 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. Como consecuencia de esto se presenta una baja retención de cationes como K, Ca y Mg, los cuales son fácilmente lixiviados por el agua de percolación (CIAT, 1984).

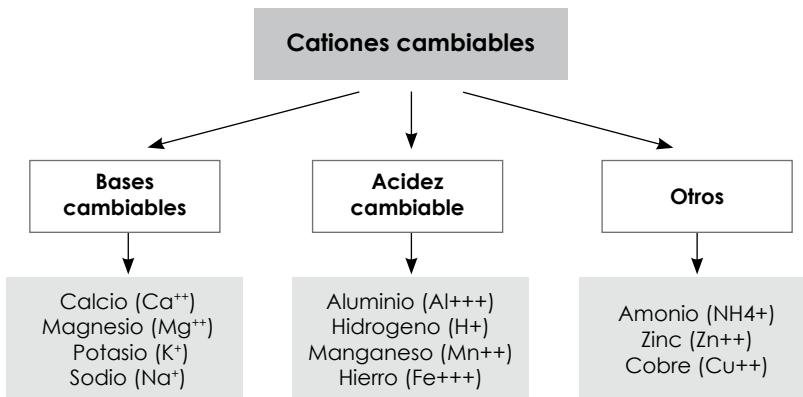


Figura 1.3. Cationes del suelo.

Los oxisoles se encuentran casi totalmente desprovistos de Ca, Mg y K disponibles para las plantas, como consecuencia de la fuerte lixiviación a que han sido sometidos por muchos años. Por su baja capacidad de intercambio catiónico, la mayor parte de estos cationes se encuentra en la solución del suelo, siendo fácilmente arrastrados por el agua de percolación. Aquellos que son bivalentes, como Ca y Mg, tienden a ser retenidos en mayor grado que los monovalentes, como el K y Na, y por lo tanto están menos expuestos a ser lixiviados.

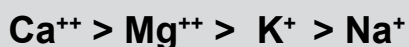
2. Secuencia de la retención catiónica

Los cationes cambiables no son retenidos con la misma intensidad por los coloides del suelo. La fuerza de retención o la capacidad de un ión para ocupar las posiciones de intercambio, depende de los siguientes factores:

- De la valencia (relación directa).
- Del tamaño del ion (relación directa).
- Del grado de hidratación del ion (relación inversa).

Como regla general, los cationes de valencia dos o tres están más intensamente unidos que los cationes monovalentes. También, la mayor capacidad de hidratación de un ion significa que está menos intensamente unido. Los suelos con grandes cantidades de arcilla y materia orgánica tendrán una mayor capacidad de cambio catiónico que los suelos arenosos con bajo contenido de materia orgánica.

Como resultado de la interacción de estos factores, se ha establecido la siguiente secuencia de retención:



La capacidad de intercambio de los diferentes coloides minerales o arcillas difiere entre sí. Por ejemplo, mientras la caolinita tiene una CICE entre 3 y 15 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, la CICE de la montmorillonita está comprendida entre 80 y 120 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. Ello supone que un suelo con 20% de arcilla montmorillonítica tendrá entre 16 y 24 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de CICE por concepto de arcilla, mientras que otro suelo con el mismo 20% de arcilla, pero esta vez de tipo caolinítico, tan solo tendrá entre 0,6 y 3,0 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de CICE derivada de la arcilla (Guerrero, 1993).

Aunque los criterios para interpretar la magnitud de la CICE de los suelos son variados, una escala que se utiliza con frecuencia, se presenta en la Tabla 1.1 (Guerrero, 1993):

Tabla 1.1. Valoración de la capacidad de intercambio catiónico

CICE (cmol.kg ⁻¹)	Interpretación
< 10	Baja
10 - 20	Media
> 20	Alta

Para conocer la CICE se aplica la siguiente fórmula:

$$\text{CICE (cmol.kg}^{-1}\text{)} = \text{Al} + \text{H} + \text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na}$$

3. Aniones cambiables

Con excepción del anión Cl⁻, todos los aniones son compuestos (nitrato, fosfato, sulfato, molibdato y borato). En esta forma como se encuentran en la solución del suelo, es como pueden ser absorbidos estos nutrientes por las raíces de las plantas, o ser adsorbidos a las cargas positivas de las micelas del suelo (Figura 1.4).

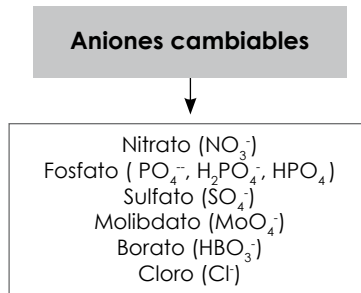


Figura 1.4. Aniones cambiables.

Igual que en los cationes, los aniones cambiables guardan una secuencia en cuanto a la intensidad con que son retenidos en el suelo. Se ha encontrado la siguiente secuencia de adsorción aniónica:



Esta secuencia de retención explica el comportamiento de los aniones en el suelo, con respecto a su ocurrencia y movilidad, lo cual tiene gran interés práctico cuando son adicionados como fertilizante. Por ejemplo, el nitrato (NO_3^-) es completamente móvil y se desplaza libremente en el agua del suelo, por su carga negativa no es retenido en el complejo de cambio y se constituye en una forma de pérdida de este nutrimento, por percolación a capas más profundas del suelo. Por ello, la fertilización nitrogenada exige en el medio tropical un manejo con base en aplicaciones fraccionadas a lo largo del ciclo del cultivo, para así garantizar un adecuado y permanente suministro del elemento (Guerrero, 1993).

La retención iónica por el complejo de cambio, no solamente permite el almacenaje de nutrientes liberados naturalmente por fenómenos de naturaleza química y bioquímica, sino que también reduce la posibilidad de que los nutrientes agregados como fertilizantes se pierdan en el agua de drenaje. La lixiviación o lavado de sales por el agua de drenaje es un proceso muy significativo como factor de pérdida de nutrientes en la agricultura tropical, particularmente en aquellas áreas de alta precipitación fluvial. Bajo estas condiciones, una proporción de los nutrientes agregados como fertilizantes pueden ser llevados a horizontes profundos del perfil del suelo, determinando así una baja eficiencia en la fertilización, pues solo una parte muy pequeña de nutrientes podrá ser utilizada efectivamente por las plantas.

Muy pocos suelos contienen una cantidad suficiente de los diferentes nutrimentos en solución para satisfacer los requerimientos promedios de una cosecha. Por otra parte, la liberación de formas disponibles desde los minerales del suelo por meteorización y desde los compuestos orgánicos por mineralización, es demasiado lenta para poder satisfacer los requerimientos de una planta en rápido crecimiento. Por consiguiente, el hecho de que exista un mecanismo de almacenamiento de iones nutritivos en la fase cambiante, constituye un factor decisivo que asegura el crecimiento normal de la planta en condiciones naturales.

La fase cambiante del suelo constituye lo que podría llamarse una "alacena" o almacén de nutrimentos minerales para los cultivos. Un bajo poder de retención iónica implica un bajo potencial de almacenamiento de nutrimentos; en tanto, una alta capacidad de intercambio supone también un alto potencial en la reserva nutricional de disponibilidad inmediata (Guerrero, 1993).

Los cationes más fácilmente lixiviables son el Na y el K, y los aniones más móviles son el cloruro y el nitrato. En contraste, los aniones fosfato son tan fuertemente retenidos, que no solamente no están sujetos a pérdidas por lixiviación, sino que, al contrario, tal intensidad de adsorción aniónica constituye uno de los mecanismos de fijación de fosfatos, problema ampliamente conocido y evaluado en la agricultura tropical, que lleva al mínimo la eficiencia de la fertilización fosfatada. Al respecto, es necesario tener en cuenta que tan solo un 10% a un 20% del fertilizante fosfatado aplicado en suelos tropicales es aprovechado en esta forma por el cultivo (Guerrero, 1993).

SATURACIÓN DE BASES

La saturación de bases es una propiedad importante de los suelos y se define como el porcentaje ocupado en el suelo por los cationes Ca, Mg, K y Na; está relacionada con el pH y la fertilidad del suelo. A mayor pH y mayor fertilidad del suelo, mayor es el grado de saturación de bases. A mayor grado de saturación de bases es mayor la facilidad con que los cationes son absorbidos por las plantas. Entre más ácido sea un suelo, menor será el porcentaje de saturación de bases, ya que un número creciente de los sitios de intercambio son ocupados por el Al y el H, debido a la pérdida de Ca, Mg, K y Na del sistema (Guerrero, 1993).

En el caso de los forrajes, una saturación de bases menor de 30% puede ser limitante para obtener una buena respuesta en su producción. Según estudios hechos en suelos ácidos como el Cerrado brasileiro (Tabla 1.2), los pastos poco exigentes como el *B. decumbens*, *B. humidícola* y *B. dictyoneura* requieren una saturación de bases de 30%, mientras que especies más exigentes como el *B. brizantha* cv Marandú, *B. brizantha* cv Toledo y todas las especies de *Panicum* exigen de una saturación de bases de 40% a 45% (Vilela et al., 1998).

Por lo tanto, con base en el análisis químico de suelos, es necesario determinar la saturación de bases para calcular los requerimientos de cal dolomítica, que además mejorará las concentraciones de Ca y Mg en el suelo, para ser aprovechados por los pastos.

Tabla 1.2. Saturación de bases requerida para las especies forrajeras en suelos ácidos

Especie	Grado de adaptación a baja fertilidad	Saturación de bases (%)
Gramíneas poco exigentes: <i>B. decumbens</i> , <i>B. humidícola</i> , <i>B. dictyoneura</i>	Alto	30
Gramíneas exigentes: (<i>B. brizantha</i> cv. Toledo, cv. La Libertad, cv. Marandú, <i>Panicum máximum</i>)	Medio	40
Gramíneas muy exigentes: <i>Panicum máximum</i> cv. Tanzania, Mombasa, Tobiata, Centenario, Vencedor <i>Pennisetum purpureum</i> cv. elefante y otros pastos de corte.	Bajo	45
Leguminosas poco exigentes: <i>S. capitata</i> cv. capica, <i>D. ovalifolium</i> cv. Maquenque. <i>P. phaseoloides</i> cv. Kudzú, <i>A. pintoi</i> cv. Maní forrajero <i>Cratylia argentea</i> cv. veranera	Alto	35
Leguminosas muy exigentes: <i>Leucaena leucocephala</i> Soya perenne	Bajo	45

Fuente: Vilela *et al.*, (1998).

Sin embargo, en las condiciones de la Orinoquia colombiana no se encontró respuesta en la producción de forraje de *B. decumbens* por la aplicación de cal dolomítica para incrementar la saturación de bases a 30%, 35% y 40%. En la Figura 1.5 se puede apreciar que la producción de forraje en la época lluviosa fue en promedio de 2000 kgMS·ha⁻¹; en tanto, en la época seca se redujo a 700 kgMS·ha⁻¹ en todos los tratamientos, sin llegarse a presentar diferencias significativas. Por lo tanto, no se obtuvo respuesta a la aplicación de enmiendas para aumentar la saturación de bases del suelo, lo que confirma la buena adaptación de esta gramínea a la alta saturación de aluminio y baja saturación de bases de los suelos de esta región.

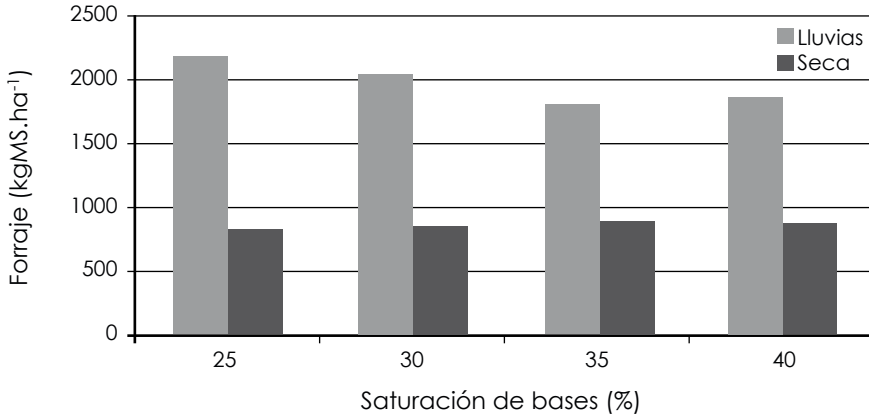


Figura 1.5. Producción promedio de forraje de *B. decumbens* con tratamientos para aumentar la saturación de bases, durante la época lluviosa y seca en el piedemonte llanero.

En el caso de pastos exigentes o de cultivos es necesario aplicar enmiendas como la cal dolomítica, con el fin de aumentar la saturación de bases y ofrecer mejores condiciones de fertilidad del suelo para el desarrollo vegetal. Para conocer las cantidades de cal a aplicar, se utiliza la siguiente fórmula, para lo cual es necesario conocer la saturación de bases del suelo.

Cálculo de la cal a aplicar de acuerdo con la saturación de bases:

$$\text{Cal (t·ha}^{-1}\text{)} = \frac{\text{sat. bases deseada} - \text{sat. bases del suelo} \text{ CICE}}{\text{PRNT}}$$

Para poder desarrollar la fórmula hay que hacer otros cálculos que se explican a continuación:

La saturación de bases deseada es aquella que requiere el cultivo para su buen desarrollo, información que debe ser conocida de acuerdo con pruebas de investigación previamente realizadas.

Para el cálculo de la saturación de bases del suelo se aplica la siguiente fórmula:

$$\text{Saturación de bases} = \frac{\text{Ca+Mg+K+Na} \text{ X100}}{\text{C.I.C.E}}$$

Donde:

CICE = Acidez intercambiable + Ca+Mg+K+Na

Acidez intercambiable = Al + H

PRNT = Poder relativo de neutralización de la cal

El poder relativo de neutralización de la cal representa la pureza química (equivalente químico) y la fineza de la cal (eficiencia granulométrica). Este valor depende de la calidad de la cal y fluctúa entre 60% y 100%.

Del mismo modo, se puede aplicar el concepto de saturación a cada uno de los cationes del suelo y calcular la saturación de Al, de Ca o de cualquier otro. Si de un suelo se dice que tiene una saturación de Al del 25%, debe entenderse que del total de cationes cambiables existentes, una cuarta parte es Al. Para hacer el cálculo de la saturación de otro catión se aplica la siguiente fórmula, en este caso se hace con el Al:

$$\text{Saturación de Al} = \frac{\text{Al}}{\text{CICE}} \times 100$$

La cal debe ser aplicada en suelo húmedo para que se dé la reacción y pueda cumplir su función de neutralización de la acidez, aumentar la saturación de bases y disminuir la saturación de Al. En el caso de cultivos como el maíz, la asociación maíz-pastos, la soya, la asociación soya forrajera-pastos, la cal debe ser incorporada con un pase de rastra. Una vez aplicada la cal, se debe esperar un tiempo prudencial (1 a 2 meses) para realizar la siembra.

CONCLUSIÓN

La baja fertilidad natural y la alta concentración de Al de los suelos ácidos de los Llanos Orientales limitan la producción de la mayoría de los cultivos; sin embargo, se han desarrollado e introducido forrajes y cultivos que pueden tolerar estas condiciones. El entendimiento de los factores que contribuyen a la acidificación de los suelos y los procesos de intercambio iónico, son la base para hacer de esta región una fuente importante de alimentos y materias primas para la agroindustria.

BIBLIOGRAFÍA

- Botero, P.J. y López, D. 1982. Los suelos de los Llanos Orientales (Una visión general sintetizada). Suelos Ecuatoriales, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Volumen XII. No. 2, Bogotá, Colombia. Pp. 18-29.
- Boddey, R.M.; Rao, I.M. y Thomas, R.J. 1998. Reciclaje de nutrientes e impacto ambiental de las pastures de *Brachiaria*. En: *Brachiaria: Biología, agronomía y Mejoramiento*. Eds. Miles, J.W.; Maass, B.L. y do Valle, C.B. Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA. Cali, Colombia. Pp. 79 – 95.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1984. Selección y evaluación de pastos tropicales en condiciones de alta concentración de aluminio y bajo contenido de P disponible. Guía de estudio para ser usada como complemento de la unidad audiotutorial sobre el mismo tema. Contenido Científico: Salinas, J.G. y Sanz, J.I. Cali, Colombia. 56 p.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1983. Oxisoles y ultisoles de América Tropical. Distribución, importancia y propiedades físicas. Guía de estudio para ser usada como complemento de la unidad audiotutorial sobre el mismo tema. Contenido Científico: Salinas, J.G. y Valencia, C.A. Cali, Colombia. 56 p.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1981. Programa de Pastos Tropicales. Informe anual. Cali, Colombia. 89 p.
- Clarkson, D.T. 1965. The Effect of Aluminum in Some Other Trivalent Cations on Cell Division in Root Apices of *Allium cepa*. *Ann. Bot.* 28: 309-315.
- De Faccio Carvalho, P.C. 2005. O manejo da pastagem como gerador de ambientes pastoris adequados a produção animal. Em: *Teoria e pratica da produção animal em pastagens*. Eds. Silveira P., C.G.; de Moura, J.C.; da Silva, S.C. y de Faria, P.V. Anais do 22º simpósio sobre manejo da pastagem. FEALQ. Piracicaba, Brasil. Pp 7 – 33.
- Foy, C.D. 1992. Soil Chemical Factors Limiting Plant Root Growth. *Adv. Soil Sci.* 19: 97-149.
- INPOFOS, 1995. Acidez y encalado de los suelos. *Informaciones Agronómicas* N° 20, 18 p.
- Guerrero, R. 1993. Las propiedades químicas del suelo y su significado agronómico. Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia. 58 p.
- Marschner, H. 2002. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. 2 ed. London, Academic Press. 889 p.
- Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, Corporación Colombia Internacional. 2009. Sistema de información de la oferta agropecuaria, forestal, pesquera y acuícola. Encuesta Nacional agropecuaria. Bogotá, Colombia. 194 p.
- Potash and Phosphate Institute. 1997. *Manual internacional de fertilidad de suelos*. USA: Norcross, G.A. 146 p.
- Salisbury, F.B. & Ross, C.W. 1992. *Fisiología vegetal*. México: Ed. Iberoamérica S.A. Pp. 293–295.
- Vilela, I.; Soares, W.V.; Sousa, D.M.G. y Macedo, C. 1998. Calagem e adubação para pastagens na região do Cerrado. Planaltina. Circular técnica N° 37. EMBRAPA. 16 p.

LOS MINERALES EN EL SUELO

José Eurípides Baquero¹

INTRODUCCIÓN

Los nutrientes esenciales para las plantas se encuentran en su gran mayoría presentes en la corteza y en la atmósfera de la tierra. De esta forma, el aire y el agua aportan la mayor cantidad de carbono (C), oxígeno (O), hidrógeno (H) e inclusive de nitrógeno (N), mientras la capa terrestre es fuente principal de los demás nutrientes, como fósforo (P), potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), azufre (S), hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu), zinc (Zn), boro (B) molibdeno (Mo), así como de cloro (Cl) y níquel (Ni), considerados recientemente como elementos menores esenciales. El carbono (C), el oxígeno (O) y el hidrógeno (H) son obtenidos por la planta del aire y el agua.

Los suelos ácidos tropicales de América Latina se caracterizan por presentar bajas cantidades de la mayoría de estos nutrientes y alta acidez intercambiable, originada principalmente por la presencia de Al^{+3} . Estas características especiales en los suelos tropicales obligan a tener un conocimiento sobre la dinámica de cada uno de los diferentes nutrientes esenciales en el suelo, para poder establecer el manejo adecuado de cada uno de ellos en la nutrición de cultivos. Todas las plantas en su ciclo vegetativo requieren de elementos nutritivos esenciales para su normal desarrollo, crecimiento y producción.

A continuación se hace una breve descripción de cada uno de los principales nutrientes esenciales para las plantas, con el propósito de conocer su dinámica y mejor aprovechamiento por las plantas.

¹ I.A. PhD, Investigador de CORPOICA, C.I. La Libertad.

NITRÓGENO (N)

• Ciclo geoquímico del N

El ciclo del N en el suelo representa solo una parte del total que se da en la naturaleza. Tanto hombres, animales y vegetales lo aprovechan proveniente de la atmósfera y del suelo. Después que los residuos de animales y vegetales regresan al suelo, sufren innumerables transformaciones, las cuales son en su mayoría originadas por procesos biológicos. De esta forma, a través de los procesos microbiológicos de fijación de N se produce un enriquecimiento del suelo. Todo esto conlleva a las diferentes alteraciones y transformaciones de los compuestos nitrogenados que presentan una naturaleza dinámica, siendo influenciados por los contenidos de materia orgánica, la humedad, la temperatura, la altitud, el pH, la fertilidad del suelo y aspectos texturales, entre otros.

En la Figura 2.1 se presenta un esquema de las diferentes transformaciones del N, tanto en la atmósfera como en el suelo. Cerca del 98% del N total de la

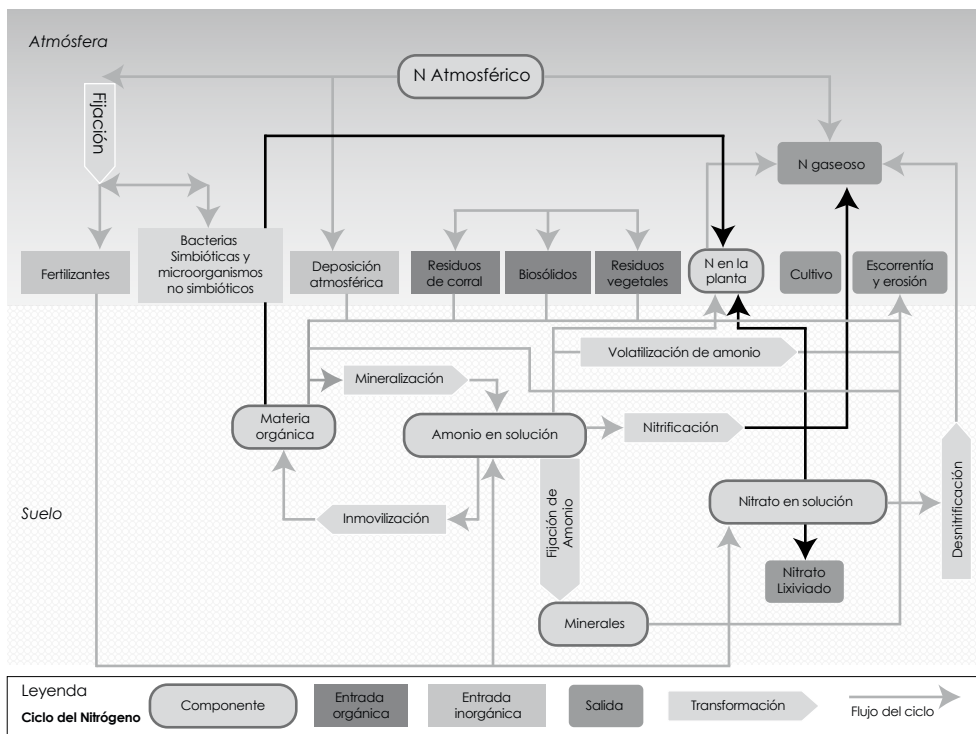


Figura 2.1. Ciclo del N en el sistema suelo-planta (Murell, 2003).

Tierra se encuentra en la litósfera (suelos, rocas, sedimentos y materiales fósiles). El resto del N se encuentra casi en su totalidad en el aire, del que constituye el 78%, presentándose en forma molecular (N_2). En las aguas de la hidrósfera el N aparece en forma molecular (N_2) e inorgánica, como NO_3^- , NO_2^- y NH_4 , y en forma orgánica, en partículas de materia orgánica (Stevenson, 1965).

A pesar de que el N representa cerca del 78% de los gases de la atmósfera, hay escasez de este nutriente en formas disponibles para las plantas, lo cual puede ser explicado por la alta estabilidad de su forma molecular N_2 , que a diferencia de otras moléculas diatómicas como el O_2 , NO o el CO, no presenta grandes reacciones químicas en condiciones naturales (Souza y Fernández, 2006).

• El N en el suelo

Existe una amplia variabilidad en los contenidos de N en suelos y plantas, determinados por las condiciones ecológicas y el tipo de especie vegetal. En el suelo su contenido medio se estima en 0,14%, variando ampliamente de acuerdo con las condiciones climáticas y con los contenidos de materia orgánica, la cual es más abundante en suelos de regiones frías y húmedas que en los suelos de regiones cálidas y de menor humedad (Garavito, 1979).

Entre un 90% a un 95% del N total del suelo corresponde a formas orgánicas complejas y solo una pequeña fracción se encuentra como inorgánico. En general, las formas de nitrógeno en el suelo pueden agruparse de la siguiente manera:

Compuestos nitrogenados orgánicos. Del total de N orgánico del suelo, se considera que solo un 50% de este se encuentra en compuestos fácilmente identificables como proteínas aminoácidos, ácidos nucleicos y aminoazúcares. El restante 50% se encuentra en formas complejas que se producen de la reacción del amonio con la lignina y de la polimerización de quinonas y compuestos nitrogenados, así como de la condensación de azúcares y aminas. Dentro de este grupo se encuentran también uno muy estable de aminoácidos y proteínas que están en combinación con arcillas lignina y otros minerales.

Compuestos nitrogenados inorgánicos. Las formas inorgánicas del N del suelo incluyen: NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , N_2O , NO y N elemental. Desde el punto de vista de la fertilidad del suelo, los más importantes son: NH_4^+ , NO_3^- y NO_2^{1-} , mientras que el óxido nitroso y el óxido nítrico son las formas del N que se pierde en el proceso de denitrificación.

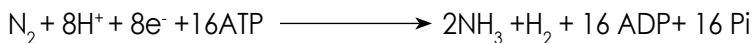
• Disponibilidad y transformaciones del N en el suelo

El N es considerado uno de los elementos más dinámicos de la naturaleza y está sujeto a una gran cantidad de cambios, procesos y transformaciones que lo llevan desde la forma inerte (N_2), hasta la biosfera a formas orgánicas (fijación) y posteriormente mediante el proceso de mineralización a formas inorgánicas que nuevamente pueden regresar a la atmósfera. Así mismo, el N también puede ser convertido de formas inorgánicas a formas orgánicas mediante el proceso de inmovilización, debido al uso del N inorgánico por parte de los microorganismos que lo requieren para la formación de aminoácidos y proteínas en los tejidos de su cuerpo. A continuación se reseñan en forma muy resumida estos procesos.

Fijación del N

Por fijación de N se entiende la combinación del N atmosférico (N_2) con moléculas de oxígeno o hidrógeno para formar óxidos o amonio que pueden incorporarse a la biosfera y ser asimilados por los organismos vivientes. Estas reacciones pueden ocurrir en condiciones naturales, como consecuencia de las descargas eléctricas o de los procesos de combustión, o por síntesis química realizada en la industria de fertilizantes con un alto consumo de energía. También puede ser llevada a cabo por bacterias en vida libre o en simbiosis con algunas especies vegetales de la familia de las leguminosas y algunas leñosas no leguminosas. A este último proceso se le conoce como fijación biológica de nitrógeno (FBN). Es de vital importancia para las plantas, puesto que es la manera como se puede utilizar la gran cantidad del N atmosférico presente.

En forma general, la reacción que se presenta en la fijación biológica del N es la siguiente:



Aunque el amoníaco (NH_3) es el producto directo de esta reacción, es rápidamente ionizada a amonio (NH_4^+). Algunas bacterias, por ejemplo las del género *Rizobium*, son los únicos organismos que fijan el N a través de procesos metabólicos. Esta simbiosis ocurre en la familia de las leguminosas. En esta relación, la bacteria que fija el N habita en los nódulos de las raíces y recibe carbohidratos de su planta anfitriona.

Mineralización

Es el conjunto de reacciones biológicas que transforman el N orgánico en compuestos inorgánicos (NH_4^+ , NO_2^- y NO_3^-). La mineralización completa, hasta la formación de nitratos, involucra varias etapas que son controladas por múltiples factores. Las principales etapas reconocidas dentro del proceso de mineralización de la materia orgánica son: la aminización, la amonificación, la nitrificación y la denitrificación.

Aminización

En este proceso se lleva a cabo la degradación hidrolítica de las proteínas y otros compuestos nitrogenados de la materia orgánica, mediante la hidrólisis enzimática de organismos heterotróficos con la producción de aminas y aminoácidos simples.



Amonificación

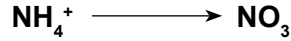
En este proceso, las aminas y aminoácidos liberados durante la aminización son transformados por bacterias y hongos a compuestos amoniacales mediante reacciones enzimáticas de desaminación y descarboxilación.



El NH_4 formado puede ser reincorporado a los tejidos microbianos, fijado entre las láminas de minerales arcillosos de relación 2:1, oxidado y transformado a formas nítricas, retenido por el complejo de intercambio de cationes, constituyendo una reserva de N disponible o absorbido por las plantas.

Nitrificación

Una vez que el N toma forma de amonio, está disponible para ser usado por algunas plantas que lo toman en esta forma o puede ser transformado en nitrito (NO_2) y luego en nitrato (NO_3^-) a través del proceso llamado nitrificación (Figura 2.1), realizado por un grupo de bacterias heterótrofas (*Nitrosomonas*) que requieren la presencia del oxígeno. Por consiguiente, la nitrificación puede suceder solamente en ambientes ricos en oxígeno.



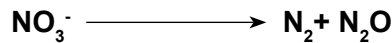
Denitrificación

A través de la denitrificación las formas oxidadas de N como el nitrato (NO_3^-) y el nitrito (NO_2^-) se convierten en NO, N_2 y, en menor medida, en gas óxido nítrico (N_2O). La denitrificación es un proceso anaeróbico llevado a cabo por bacterias, siguiendo la siguiente secuencia:



Los óxidos nítrico (NO) y nítrico (N_2O) pueden tener efectos contaminantes y causar efectos de invernadero, contribuyendo a los cambios climatológicos globales.

Una vez que el nitrato se convierte en N_2 , tiene pocas posibilidades de reconvertirse en una forma biológica disponible, ya que es un gas y regresa rápidamente a la atmósfera.



Adicionalmente a los procesos de fijación y mineralización descritos anteriormente, la disponibilidad del N para las plantas está condicionada por la inmovilización:

Inmovilización

La inmovilización del nitrógeno (N) es el proceso de transformación de inorgánico o mineral a la forma orgánica.



A medida que los microorganismos descomponen las fuentes de energía fresca (residuos animales y vegetales), ellos requieren del N para la construcción de aminoácidos y proteínas para los tejidos de su cuerpo. A menos que los residuos sean ricos en N, los organismos retiran el que está en forma inorgánica en el suelo para obtener lo que requieren; de esta forma el N mineral es convertido en orgánico en las proteínas de los microorganismos, que no está disponible para el crecimiento de las plantas. Sin embargo, una alta cantidad

de este elemento regresa a formas disponibles a medida que los cuerpos de los microorganismos se descomponen.

La mineralización y la inmovilización ocurren en forma simultánea en los suelos. El cambio hacia mineralización o inmovilización depende en gran forma de la relación C:N de los materiales orgánicos en descomposición. Los materiales con relación C:N alta (mayor a 30) favorecen la inmovilización, mientras que materiales con relación baja (menor de 20) favorecen una mineralización más rápida. Relaciones C:N en el rango de 20-30 presentan un equilibrio de los dos procesos.

La mineralización e inmovilización del N del suelo y la velocidad de recambio de los materiales orgánicos son afectadas por los organismos heterótrofos del suelo, incluyendo las bacterias y los hongos. Su requerimiento de energía lo satisfacen mediante la oxidación de los materiales que contienen carbono. Esta descomposición de la materia orgánica aumenta con la temperatura, la humedad y la cantidad de oxígeno.

Pérdidas de N

El N puede perderse en el suelo de varias maneras. Los cultivos lo remueven del campo por el acumulado en las partes cosechadas de las plantas. El N en la materia orgánica y el fijado como NH_4^+ en las arcillas puede desperdiciarse con la pérdida de suelo por erosión. El NH_4^+ y el NO_3^- en solución pueden perderse en el agua de escorrentía. El NO_3^- , debido a que no es retenido por los coloides del suelo, puede perderse hacia la lámina de aguas por lixiviación.

En condiciones de suelo húmedo, el NO_3^- puede convertirse a formas gaseosas de N a través del proceso llamado denitrificación. Estos gases regresan a la atmósfera. Una de estas formas gaseosas de N, el óxido nitroso (N_2O), es un gas de efecto invernadero. Finalmente, el NH_4^+ puede convertirse en gas amoníaco (NH_3) y regresar a la atmósfera mediante el proceso denominado volatilización.

• Fuentes de N en la agricultura

En la Tabla 2.1 se describen las principales fuentes de nitrógeno en la agricultura:

Tabla 2.1. Principales fertilizantes nitrogenados en la agricultura

Fertilizante	Garantía mínima	Forma del nutriente	Observaciones
Urea	44 %de N	Amida (NH ₂)	Biuret contenido de hasta 1,5% para la tierra y el 0,3% para la fertilización.
Sulfato de amonio	20% de N	Amoniacal (NH ₄ ⁺)	22% a 24% del contenido de azufre de tiocianato de amonio no superan el 1%.
Nitrato de amonio	32% de N	50 % de forma amoniacal (NH ₄ ⁺) y 50% de forma nítrica(NO ₃ ⁻).	
Nitrato de amonio y calcio	20 % de N	50 % de forma amoniacal (NH ₄ ⁺) y 50% de forma nítrica(NO ₃ ⁻).	2% a 8% de Ca y 1% a 5% de Mg.
Nitrato de sodio	15% de N	Nítrica (NO ₃ ⁻)	La concentración de perclorato de sodio no podrá exceder el 1%.

FÓSFORO (P)

De los tres macronutrientes (N-P-K), el P es requerido en menores cantidades por las plantas; sin embargo, su baja disponibilidad en el suelo y las múltiples reacciones que ocurren en este llevándolo a formas no disponibles por las plantas, han hecho de este nutriente uno de los más limitantes en la agricultura.

• Ciclo geoquímico del P

El ciclo del P en los suelos representa solo una parte del que cumple en la naturaleza; es un elemento relativamente estable en los suelos, no presenta compuestos inorgánicos, como los nitrogenados que pueden ser volatilizados y altamente lixiviados. Esta gran estabilidad resulta de su baja solubilidad, lo

que puede originar deficiencia en su disponibilidad para las plantas, a pesar de la continua mineralización de compuestos orgánicos en el suelo o de la meteorización de materiales primarios y secundarios; esto puede solucionarse con la aplicación de fosfatos al suelos, los cuales a su vez pueden sufrir procesos de fijación. Las plantas pueden absorber el P en dos formas diferentes: el ortofosfato primario ($H_2PO_4^-$) y el ortofosfato secundario (HPO_4^{2-}). El P es utilizado como una fuente de energía muy importante en todos los procesos bioquímicos. De esta forma, la dinámica del P incluye una serie de reacciones y transformaciones con entradas y salidas, tal como se puede observar en el ciclo del P en la Figura 2.2.

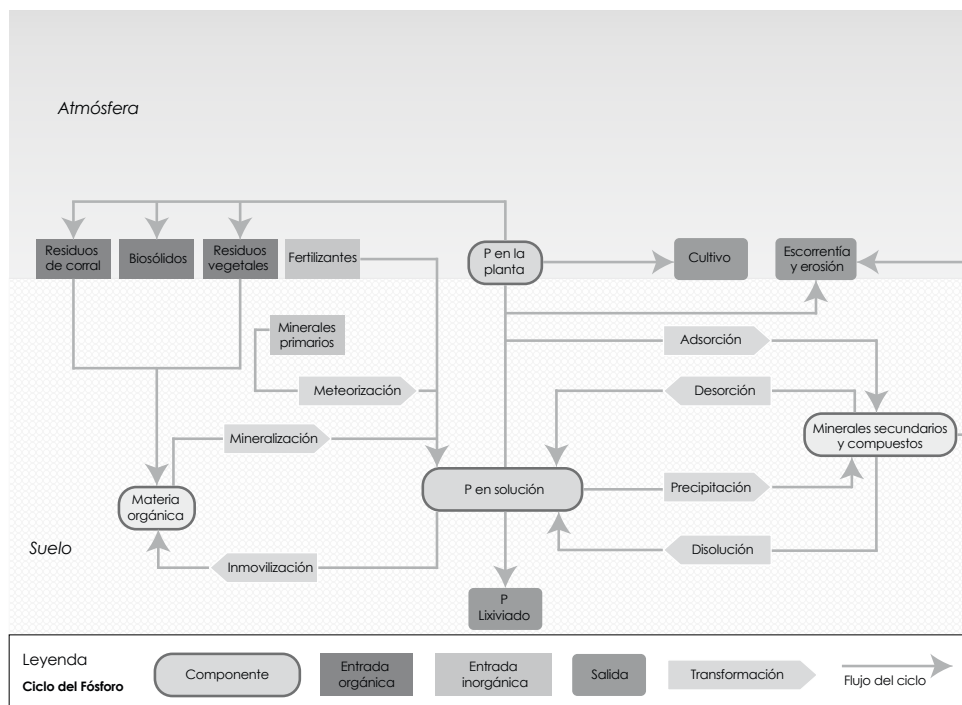


Figura 2.2. Ciclo del P en el sistema suelo-planta (Murell, 2003).

La interacción del P con otros constituyentes del suelo como Al, Fe y Ca, su presencia en formas orgánicas y su lenta tasa de difusión en la solución, lo convierten en uno de los nutrientes de menor disponibilidad en la rizósfera (Araujo y Machado, 2006). Así mismo, cuando son aplicados fertilizantes, la mayor parte del P adicionado es adsorbida en los coloides del suelo, tornándose con el tiempo en no disponible, dada la formación de compuestos de baja solubilidad. Por otra parte, el aporte mundial de P para la fabricación de fertilizantes constituye un recurso natural no renovable, lo cual exige el mejor

aprovechamiento de este nutriente, para garantizar la sostenibilidad de la agricultura (Vance *et al.*, 2003; Araujo y Machado, 2006).

El P en el suelo

La cantidad total de P en el suelo varía ampliamente, dependiendo de varios factores, siendo uno de los más importantes el material parental que lo conforma. Generalmente, la cantidad de P es más alta en suelos básicos o alcalinos, y menor en aquellos altamente intemperizados provenientes de rocas ácidas. Las cantidades en el suelo oscilan entre 0,01% y 0,15%. Las mayores reservas de P se encuentran en los sedimentos marinos, en el fosfato orgánico disuelto en los océanos y en rocas con minerales como la apatita (Stevenson y Cole, 1999). En la naturaleza existen más de 200 minerales que contienen P, en la que el grupo de las apatitas son las más utilizadas como fuentes de este nutriente.

Tanto en la fracción orgánica como en la mineral, la química del P está relacionada con las formas iónicas del ácido orto-fosfórico (H_3PO_4). Este ácido tiene tres constantes de disociación (pK), siendo estas de 2,1 y 7,2 en la transformación de H_3PO_4 en $H_2PO_4^-$ y HPO_4^{2-} , respectivamente, indicando que a pH inferiores a 6,0, la mayor parte de P de la solución del suelo está en la forma $H_2PO_4^-$, denominado usualmente P inorgánico (Pi). El tercer valor de pK es de 12,3 en el paso de HPO_4^{2-} a PO_4^{3-} , principalmente en pH alcalinos. Los valores de P en compuestos orgánicos (Po) en el suelo pueden variar desde casi cero hasta más de 2 g kg^{-1} ; dependiendo de la clase de suelo, el (Po) puede representar de 20% a 80% del P total (Stevenson y Cole, 1999). La liberación de (Po) para la solución del suelo es controlada por la tasa de mineralización de la materia orgánica y depende de la actividad microbiana (Barber, 1984).

El P se encuentra en el suelo, en su mayoría, en estado mineral (ortofosfatos), pero también combinado en estado orgánico. Los iones fosfóricos se hallan en el suelo en tres formas diferentes:

- Disueltos en la solución del suelo.
- Absorbidos sobre diferentes componentes minerales y orgánicos del suelo.
- Fijados mediante enlaces moleculares relativamente estables.

En orden creciente de asimilabilidad para las plantas, se tratarán a continuación cinco formas de P en el suelo:

P insoluble de la roca madre

Representa la mayoría del P total del suelo, no disponible para las plantas. Sin embargo, es la reserva a partir de la cual una pequeña parte pasa a la solución del suelo al final del proceso, mediante transformaciones físico-químicas o biológicas. Los minerales fosfatados insolubles en el suelo son esencialmente fosfatos tricálcicos (apatita), fosfatos magnésicos y fosfatos de hierro y de aluminio.

P precipitado o formando compuestos poco solubles

En los suelos ácidos es muy posible la precipitación de los fosfatos de hierro y aluminio, y en los suelos alcalinos, la precipitación de fosfato de calcio. Sin embargo, no se trata de formas insolubles indefinidamente. Las variaciones del pH, la acción de la materia orgánica, la actividad microbiana o la capacidad de algunas especies de absorberlos directamente, pueden hacer que los fosfatos, temporalmente insolubles, intervengan en la nutrición fosfatada de las plantas.

Se puede incluir en esta categoría de fosfatos a los iones fosfóricos que temporalmente se encuentran "bloqueados" en el interior de las arcillas y que pueden volver a la forma cambiante mediante la secuencia de humectaciones y desecaciones.

P orgánico

En la materia orgánica, la relación N/P es del orden de cuatro, esto es, en un suelo con un contenido de N orgánico del 1 por 1.000, la riqueza de P combinado con la materia orgánica será del orden de 0,25 por 1.000. Una hectárea de tierra que libere por mineralización $60 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de N, liberará también unos 15 kg de P.

La materia orgánica del suelo realiza una acción muy favorable sobre la nutrición fosfatada de la planta. Por combinación del humus y del P hay formación de humufosfatos que protegen a los iones PO_4 de la fijación más o menos irreversible por el suelo, manteniéndolos en una forma fácilmente recuperable por la planta. La buena conservación del humus del suelo es una condición esencial para la nutrición fosfórica normal de la planta. Como en el caso del N, la actividad microbiana desempeña un papel importante en el conjunto de los fenómenos que determinan la dinámica del P en el suelo.

Cerca del 50% del P total es P orgánico, constituido por fosfatos, esterres, fosfolípidos y ácidos nucleicos.

P fijado en las arcillas y los óxidos de hierro y aluminio

Los iones fosfóricos pueden fijarse al complejo arcilloso húmico y, en particular, sobre las arcillas, por medio del Ca. El suelo deja en reserva una parte del P de los fertilizantes y lo devuelve después a la solución del suelo a medida que la planta va agotando esta solución por la absorción de una parte de dichos iones. Los iones PO_4^{3-} fijados en la arcilla cálcica son fácilmente recuperables. La cantidad de P absorbido depende del contenido de arcilla, de su capacidad de cambio y del pH, es decir, de la cantidad de iones de Ca presentes.

Existen también en el suelo hidróxidos de Fe y Al, especialmente en los suelos ácidos, que se comportan como coloides electropositivos y pueden fijar iones PO_4^{3-} que pasan después a la solución del suelo, pero más lentamente que los fijados sobre la arcilla.

P en la solución del suelo

Al final de las transformaciones y cambios continuos que se efectúan en el suelo, se tiene la fracción menor y más importante del P para la planta, dado que son estos iones fosfóricos disueltos los que absorbe la planta.

La concentración de P en la solución del suelo es muy pequeña, en suelos fértiles se puede alcanzar y sobrepasar 1 mg L^{-1} , mientras que en los suelos pobres esta concentración puede bajar hasta $0,1 \text{ mg L}^{-1}$.

- **Disponibilidad de P**

Existen varios factores que determinan la disponibilidad de P en el suelo para las plantas, entre los cuales se encuentran:

pH del suelo

El pH influye fuertemente en la solubilidad de los compuestos de P del suelo. En suelos ácidos (pH bajo) el P reacciona con metales como el Fe y el Al, formando compuestos insolubles que no permiten que el P sea disponible para la planta. En suelos alcalinos (pH alto) el Ca reacciona con el P formando fosfatos de Ca insolubles, limitando de esta forma también la disponibilidad del P.

El ámbito de pH ideal para tener una buena disponibilidad de P fluctúa entre 5,5 y 7,0, Esto es particularmente cierto en suelos de las zonas templadas y subtropicales del mundo que están dominados por arcillas de tipo 2:1 (montmorillonita, vermiculita, illita). En este caso, un buen programa de encalado ayuda a mejorar la disponibilidad de P.

La aplicación de cal en los suelos tropicales corrige la toxicidad de Al y la deficiencia de Ca, y la corrección de estos factores permite un incremento en la absorción de P, aun cuando el encalado tiene muy poco efecto en su fijación, que ocurre principalmente por las reacciones en la superficie de las arcillas.

Tipos de arcilla

Existen algunos tipos de arcilla como la caolinita y los óxidos e hidróxidos de Fe y Al que predominan en suelos meteorizados y pobres, y la alófana y la imogolita que predominan en suelos volcánicos, que fijan altas cantidades de P. Esto se debe fundamentalmente a que este tipo de arcillas tienen una superficie con gran afinidad por el P, lo que permite que este nutrimento quede inmovilizado permanentemente en las arcillas.

- **Pérdidas de P**

Existen varias formas de cómo se puede perder el P del suelo; una de ellas es cuando se saca del campo la cosecha de un cultivo o por medio de la erosión, ya que este elemento está retenido fuertemente en la fase sólida del suelo; además, el que está en solución puede perderse por escorrentía. Existe cierta evidencia de que el P de los fertilizantes más solubles es más susceptible a estas pérdidas que otras fuentes menos solubles.

Por último, también se pierde por lixiviación en aquellos suelos que tienen superficies menos reactivas, por ejemplo, los muy arenosos en áreas de alta precipitación donde se han hecho aplicaciones muy altas de P. También existe evidencia que sugiere que las aplicaciones de residuos de corral producen un mayor movimiento de P, mediante el perfil del suelo, que sus formas inorgánicas (Murell, 2003).

• Fuentes de P en la agricultura

En la Tabla 2.2 se describen las principales fuentes de fósforo en la agricultura:

Tabla 2.2. Principales fuentes de P en la agricultura

Fertilizante	Garantía mínima	Forma de nutriente	Observaciones
Superfosfato simple	18% de P_2O_5 16% de P_2O_5	P_2O_5 soluble en CNA ^(*) + agua P_2O_5 soluble en agua	18% - 20% de Ca y 10% a 12% de S
Superfosfato triple	41% de P_2O_5 37% de P_2O_5	P_2O_5 soluble en CNA+agua P_2O_5 soluble en agua	12% a 14% de Ca
Fosfato monoamónico (MAP)	9% de N 48% de P_2O_5 44% de P_2O_5	N de forma (NH_4^+) P_2O_5 soluble en CNA + agua P_2O_5 soluble en agua	
Fosfato diamónico (DAP)	16% de N 45% de P_2O_5	N de forma (NH_4^+) P_2O_5 soluble en CNA + agua P_2O_5 soluble en agua	
Hiperfosfato	30% de P_2O_5 (polvo) 28% de P_2O_5 (granu- lado) 12% de P_2O_5	P_2O_5 total P_2O_5 soluble en ácido citríco al 2% en una relación de 1:100	30% a 34% de Ca
Fosfato de magnesio fundido	17% de P_2O_5 14% de P_2O_5 7% de magnesio	P_2O_5 total P_2O_5 soluble en ácido citríco al 2% en una relación de 1:100	18% a 20% de Ca
Fosfato natural parcialmente acidulado (fosfórico o sulfúrico)	20% de P_2O_5 9% de P_2O_5 ou 11% de P_2O_5	P_2O_5 Total P_2O_5 Soluble en CNA +agua P_2O_5 soluble en ácido citríco al 2% en una relación de 1:100	25% a 27% de Ca, 0% a 6% de S y 0% a 2% de Mg
Fosfato parcialmente acidulado (clorhídrico)	25% de P_2O_5 18% de P_2O_5	P_2O_5 Total P_2O_5 Soluble en CNA + agua	
Fosfato natural	24% de P_2O_5 4% de P_2O_5	P_2O_5 total P_2O_5 soluble en ácido citríco al 2% en una relación de 1:100	23% a 27% de Ca

(*)CNA = citrato de amonio neutro

POTASIO (K)

Después del N y el Ca, el K es el elemento absorbido en mayores cantidades por las plantas. Aunque sus funciones en la planta aún no están totalmente definidas, es un elemento esencial para los ciclos biológicos de las especies. Su ciclo biogeoquímico es el siguiente:

- **Ciclo geoquímico del K**

Así como con el N y el P, el K en el suelo representa solo una parte del ciclo total en la naturaleza. Las plantas absorben el potasio que se encuentra en la solución del suelo en forma del catión K. La cantidad de K en la solución del suelo está en función de la liberación del potasio intercambiable, generalmente localizado alrededor de las partículas de arcilla. Los cultivos extraen grandes cantidades de potasio del suelo para su crecimiento y desarrollo, y como es de esperarse, la falta de este elemento influye negativamente en el rendimiento y calidad del cultivo. Además, la deficiencia de K aumenta la vulnerabilidad del cultivo a enfermedades y lo hace menos resistente a condiciones de estrés tales como sequías, heladas, etc. En la Figura 2.3 se representa en forma esquemática el ciclo del K, el cual será interpretado a continuación:

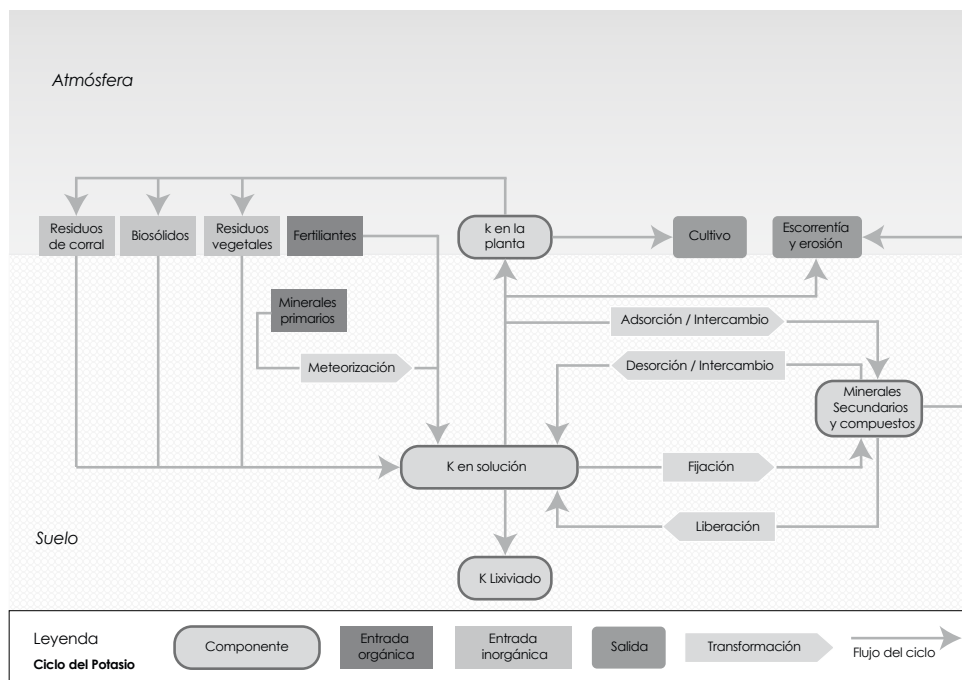


Figura 2.3. Ciclo del K en el sistema suelo – planta (Murell, 2003)

Las entradas de K son idénticas a las del P: residuos de corral, biosólidos, residuos de plantas, fertilizantes comerciales y por medio de la meteorización de los minerales en el suelo. Sin embargo, a diferencia del P, el K en las fuentes orgánicas está presente como inorgánico y no como un componente estructural de los compuestos orgánicos.

Debido a que no es parte de la estructura de los componentes orgánicos, el K no está sujeto a los procesos de mineralización o inmovilización. El K inorgánico es soluble y es la única forma como lo toman las plantas. Después de que la planta absorbe el ión K (K^+), éste permanece en forma inorgánica dentro de la planta.

Las reacciones dominantes del K inorgánico en la solución son reacciones de intercambio que permiten que el K sea retenido en las cargas negativas de la superficie de los minerales del suelo. Este K puede liberarse para regresar a la solución del suelo. Igual que el NH_4^+ , el K puede fijarse entre las capas de ciertas arcillas. Una parte de este K fijado puede regresar a la solución del suelo si existe un gradiente de potencial químico lo suficientemente alto (Murrell, 2003).

- **K en el suelo**

La distribución del contenido total de K en los suelos está relacionada con la presencia y la meteorización de los feldespatos y micas en los materiales parentales. Los suelos arenosos, formados a partir de rocas pobres en feldespatos y micas, serán pobres en K; esta pobreza es extrema si las condiciones de meteorización son muy intensas, como sucede en oxisoles. Los suelos arcillosos, formados a partir de rocas ricas en minerales feldespáticos y micáceos, resultan ricos en K, como sucede con los molisoles y vertisoles (Fasbender, 1994).

El K se encuentra en los suelos como componente de la roca madre en forma de silicatos, en el interior de las láminas de la arcilla, fijado al complejo arcillo-húmico y en la solución del suelo. Únicamente el que está en la solución de suelo es asimilable por las plantas (Figura 2.3).

El ion K en la solución del suelo es la forma como las plantas absorben este nutriente. La cantidad de K en la solución, necesario para el crecimiento de las plantas, depende de la especie y de su etapa de crecimiento. La concentración de K en la solución del suelo puede variar de 1 a 50 $mg L^{-1}$ o más en suelos fertilizados, y depende de las características químicas y mineralógicas de los suelos (Meurer, 2006).

El abastecimiento de K en el suelo es limitado, aun los suelos que contienen arcillas ricas en este mineral no pueden suplirlo indefinidamente. Es un error creer que en suelos que por naturaleza son ricos en K (por ej.: vertisoles), es innecesaria la adición de K como fertilizante.

El K extraído por los cultivos debe regresarse al suelo para no disminuir la fertilidad del mismo; cuando el agricultor saca la cosecha del campo, se está llevando consigo el K fuera del sistema agrícola. En los sistemas de agricultura moderna, la cosecha es probablemente la forma en la cual se extrae mayor cantidad de K del suelo. No regresar lo que se extrae o se pierde durante el ciclo del K origina pérdida de la fertilidad y de la productividad potencial del suelo (Figura 2.3).

Las formas de incorporación del K al suelo son: adición de residuos vegetales, estiércoles, residuos animales sólidos y fertilizantes minerales. Algunos fertilizantes minerales como el cloruro de K (KCl) y el sulfato de K y Mg ($K_2SO_4 \cdot 2MgSO_4$), son extraídos de yacimientos de silvinita, silvita y langbeinita, respectivamente.

• Disponibilidad del K

El K en el suelo se encuentra en diferentes formas de disponibilidad. La forma de rápida disponibilidad corresponde al K de la solución del suelo (que representa menos del 1% del K total del suelo). Este K se encuentra en equilibrio dinámico con el K adsorbido en las arcillas, denominado K intercambiable, y con las formas de escasa accesibilidad: K fijado al complejo arcilloso (5%-10%) y K estructural o de reserva (90%-95%).

La tasa de transformación de formas de K más estables a más lábiles está determinada por factores ambientales (humedad y temperatura de suelo) y por la capacidad buffer de este. Suelos de texturas medias y arcillosas poseen mayor capacidad buffer que los de texturas gruesas. Por lo tanto, en suelos de texturas gruesas (arenosos) la concentración de K en la solución del suelo varía significativamente ante los cambios en factores ambientales, mientras que en los suelos arcillosos, el rango de concentración se mantiene relativamente constante. Asimismo, el K agregado vía fertilizante incrementa rápidamente el nivel de este nutriente inmediatamente disponible en suelos de texturas gruesas, mientras que en suelos de texturas medias a finas, parte del mismo pasa a formas menos lábiles (K intercambiable o fijado).

La carencia de K es mucho más frecuente en los suelos arenosos, debido a que este elemento se lava con la lluvia y el riego continuado, dejándolo fuera del alcance de las raíces.

Para que la absorción ocurra, es necesario que las raíces entren en contacto con el ion presente en la solución del suelo. La difusión o el flujo de masa son los principales mecanismos de transporte de K desde la solución del suelo hasta la superficie radicular (Barber, 1995). El transporte por flujo de masa depende de la cantidad de agua transpirada por la planta y de la concentración de K en la solución del suelo. La difusión, que es el principal mecanismo de suministro a las raíces, ocurre como respuesta a un gradiente resultante de la diferencia de concentración del K entre la superficie de las raíces y la rizosfera, y está limitada a ésta última, es decir a distancias muy cortas de la superficie de la raíz, generalmente entre 1 a 4 mm.

• Pérdidas de K

Como en el caso del N y el P, el K se pierde del suelo por medio de la extracción del campo de la cosecha de los cultivos. El K absorbido y fijado en el suelo puede perderse por erosión; en suelos con bajo potencial de adsorción y fijación, en áreas de alta precipitación, se puede perder hacia las aguas subterráneas por lixiviación.

• Fuentes de K en la agricultura

En la Tabla 2.3 se describen las principales fuentes de potasio en la agricultura.

Tabla 2.3. Principales fuentes de K en la agricultura

Fertilizante	Garantía mínima	Forma de nutriente	Observaciones
Cloruro de potasio	58% de K ₂ O	K ₂ O soluble en agua (cloruro)	45% a 48% de Cl
Sulfato de potasio	48% de K ₂ O	K ₂ O soluble en agua (sulfato)	15% a 17% de S 0% a 1.2% de Mg
Sulfato de potasio y magnesio	18% de K ₂ O 4,5 de Mg	K ₂ O y magnesio solubles en agua (sulfato)	22% a 24% S 1% a 1,25% de Cl
Nitrato de potasio	44% de K ₂ O 13% de N	K ₂ O soluble en agua N en forma de nitrato (NO ₃ ⁻)	

CALCIO (Ca), MAGNESIO (Mg) Y AZUFRE (S)

Dentro de los elementos esenciales para el desarrollo y crecimiento de las plantas, el Ca, el Mg y el S integran los denominados elementos secundarios, en virtud de que, a pesar que las plantas los requieren en altas cantidades, su deficiencia en los suelos suele ser menor. Por otra parte, estos elementos son aplicados al suelo en altas cantidades, ya sea como materiales de encalado (Ca y Mg) o como mejoradores en suelos alcalinos (S y Ca) (Garavito, 1979).

- **Ciclo geoquímico del Ca y el Mg**

Estos elementos presentan un amplio ciclo en la naturaleza, en el cual los suelos conforman solo una parte de este. La corteza terrestre contiene aproximadamente 4,2% de Ca y 1,95% de Mg. En las rocas, estos elementos se encuentran en diferentes minerales y con distintos contenidos; se destacan los minerales primarios como la augita, la plagioclasa, la muscovita, la biotita, el piroxeno y el anfíbol.

Debido a la fácil meteorización de los minerales primarios con Ca y Mg, existen minerales sedimentarios importantes con altos contenidos de ellos como las calizas, las dolomitas y el yeso, entre otros. En la Figura 2.4, se puede observar que dentro del ciclo del Ca y el Mg, las principales entradas corresponden a los minerales, a la materia orgánica y a las adiciones de materiales de encalado o fertilizantes. Por procesos de mineralización y meteorización, estos pueden llegar a la solución del suelo y posteriormente ser absorbidos por las plantas, las cuales pueden regresar estos nutrientes al suelo por la descomposición de residuos orgánicos. En la solución del suelo y en las partículas micelares, el Ca y el Mg pueden sufrir reacciones de intercambio con otros nutrientes o ser fijados en forma interlamina, especialmente con arcillas de relación 2:1.

Ca EN EL SUELO

El Ca en el suelo se puede encontrar en cantidades que varían entre 1 a 250 g kg⁻¹ (Vitti *et al.*, 2006). Los suelos calcáreos, en ambientes áridos, presentan los mayores contenidos de este nutriente (Lopes, 1998), mientras que suelos minerales tropicales como oxisoles y ultisoles con altas precipitaciones, presentan los más bajos contenidos. En general, los suelos arcillosos presentan cantidades mayores de Ca que los suelos arenosos.

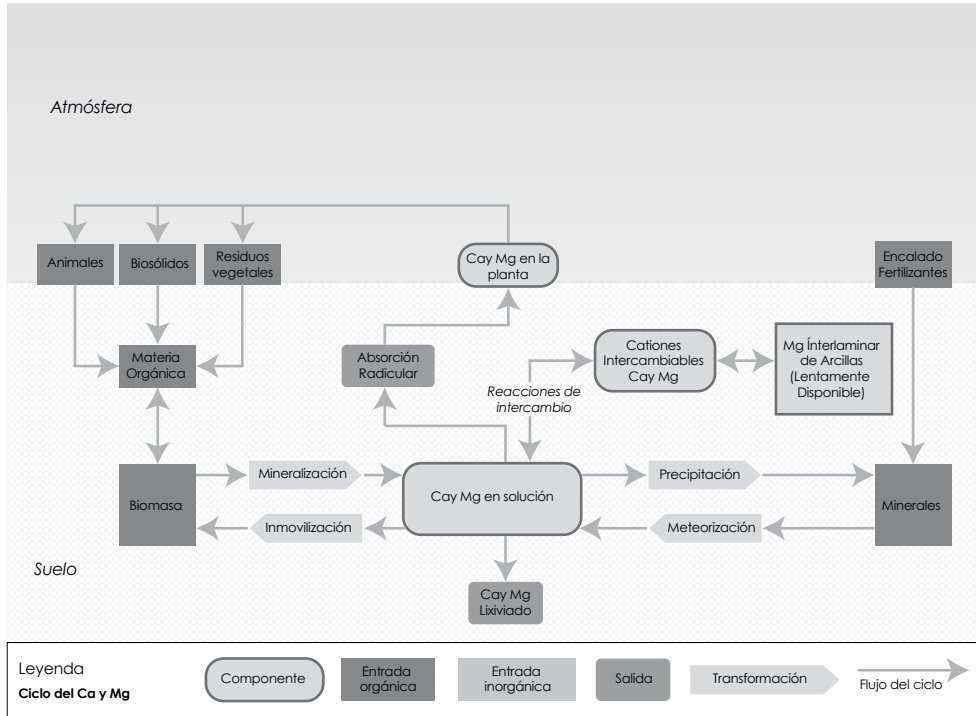


Figura 2.4. Ciclos del Ca y el Mg en el sistema suelo-planta (Murell, 2003).

El Ca en el suelo se encuentra principalmente en formas de carbonatos metamórficos o sedimentarios, sulfatos o silicatos. Se presenta en mayores cantidades en algunos minerales primarios, como anortita, augita, epidoto y apatita, y en cantidades más bajas en minerales secundarios. En términos generales, el Ca en el suelo presenta sus mayores concentraciones en minerales como la dolomita, calcita, apatita y feldespatos cálcicos.

El Ca puede encontrarse en forma intercambiable y soluble, siendo la primera más frecuente en suelos más arcillosos como catión dominante en el complejo de cambio (65%), seguido de Mg (20%), K (5%) y H (10%). En la solución del suelo se encuentra en concentraciones muy bajas, en especial en suelos ácidos de las regiones tropicales (Vitti *et al.*, 2006).

• Disponibilidad del Ca

Como catión, participa del fenómeno de Capacidad de Intercambio Catiónica (CIC), en el que es retenido como Ca^{2+} (intercambiable) en las superficies con cargas negativas de las arcilla y de la materia orgánica.

En suelos ácidos tropicales, el Ca^{2+} se encuentra en bajas concentraciones, limitando el crecimiento y producción de cultivos, especialmente de los más exigentes en este nutriente. Se considera que las dicotiledóneas tienen un mayor requerimiento que las monocotiledóneas; los contenidos registrados en éstas constituyen entre 0,5% y el 2% y el 0,15% y el 0,5% de materia seca, respectivamente (Brady y Weil, 2002).

El Ca es absorbido por las raíces de las plantas en la forma iónica Ca^{2+} . Su absorción puede ser reducida por altas concentraciones de K^+ , Mg^{2+} y NH_4^+ , en la solución del suelo (Vitti *et al.*, 2006).

El exceso de Ca, al encontrarse como carbonato, produce inmovilización de algunos elementos en el suelo, como el Fe, B, Zn y Mn. Lo anterior es originado por el aumento del pH del suelo, que favorece la precipitación de dichos elementos. También puede provocar una inhibición de asimilación de K y Mg por competencia catiónica en los sitios de absorción (Devlin, 1982).

El exceso de Ca produce inmovilización de algunos elementos en el suelo, como el Fe, B, Zn y Mn, al encontrarse el Ca como carbonato. Lo anterior es originado

MAGNESIO (Mg) EN EL SUELO

El Mg en el suelo aparece en forma iónica Mg^{2+} , en solución y como catión intercambiable. Hace parte de la estructura de las micas y minerales de arcilla del tipo 2:1, especialmente en suelos menos intemperizados, en los cuales es posible encontrar minerales que contienen este nutriente.

En condiciones de buen drenaje, las concentraciones de Ca intercambiable predominan en la suma de bases, seguidas de concentraciones más bajas de Mg y después de K.

La distribución del Mg en los suelos puede ser considerada similar a la el K y Ca, y puede ser dividida en las formas no intercambiable, intercambiable y en solución o soluble. La fracción predominante de Mg en el suelo es la forma intercambiable, que incluye todo el que se encuentra en los minerales primarios y en la mayor parte de los minerales secundarios. El Mg intercambiable es del orden del 5% del Mg total ($0,4 - 3,4 \text{ g kg}^{-1}$); esta fracción, junto con el Mg

soluble, es de la mayor importancia en el aporte de este nutriente para las plantas. Esta forma intercambiable constituye de 4% a 20% de la CIC, menor al porcentaje encontrado con el Ca (65%). En la solución del suelo la concentración de Mg es del orden de 48 a 120 mg L⁻¹, la cual es casi el doble de la concentración de K en solución (Vitti *et al.*, 2006).

• Disponibilidad de Mg

Similar a lo encontrado con el Ca y el K, el Mg se encuentra en el suelo en diferentes formas:

- El contenido en minerales (primarios y secundarios).
- Intercambiable: representa la fracción sorbida al complejo de cambio arcillo húmico.
- En solución: se encuentra en pequeñas cantidades, pero hay una rápida reposición a partir de la fase de cambio.

La principal fuente disponible para las plantas se encuentra en la forma intercambiable. Como el Mg intercambiable es removido por las plantas y es susceptible de lavado, este pool es repuesto a partir del Mg mineral por la meteorización de los minerales (como dolomita, hornblenda y serpentina). Algunos suelos también proveen Mg intercambiable a partir del que se encuentra en las interláminas de ciertas arcillas de tipo 2:1 (Mg lentamente disponible) (Figura 1.2).

De acuerdo con Vitti *et al.*, (2006), la deficiencia de Mg en el suelo puede aparecer bajo cualquiera de las siguientes condiciones: 1. suelos ácidos con pH menor a 5.4; 2. proporción de Mg en la CIC menor a 6%; 3. alta concentración de K; 4. relación K/Mg mayor a 4; y 5. concentración inferior a 0,04 cmol. kg⁻¹ de Mg en el suelo.

• Pérdidas de Ca y Mg

Las pérdidas de estos dos elementos en el suelo están relacionadas con la extracción por parte de los cultivos. Así mismo, pueden ser lavados bajo condiciones de altas precipitaciones, especialmente en suelos de texturas más gruesas y de baja CIC. También pueden ser retenidos, como en el caso de Mg, en forma interlaminar en arcillas de relación 2:1.

EL AZUFRE (S)

El S es un elemento esencial para las plantas y forma parte del grupo de los llamados elementos secundarios. Cumple varias funciones dentro de la plantas, entre las cuales se encuentra la síntesis de tres aminoácidos esenciales que contienen S (cisteína, cistina y metionina), que son componentes esenciales de las proteínas, en la formación de clorofila, la activación de enzimas proteolíticas tales como las papainasas, la síntesis de vitaminas (biotina, tiamina y B1), glutatiónina y coenzima A, la formación de glucósidos que son componentes esenciales de los aceites de cebolla, ajo y crucíferas, la formación de proteínas (ferredoxina), y la actividad de la ATP sulforilasa, una enzima que interviene en el metabolismo del S (Kanwar y Mudahar, 1986).

- **El ciclo del S**

El ciclo del S comienza con la entrada a la biosfera de este elemento, principalmente de fuentes naturales (gases) como el sulfuro de hidrógeno (H_2S) y el SO_2 que se origina de las emanaciones volcánicas, la quema de combustibles fósiles, de la madera y de otros productos orgánicos. El SO_2 es oxidado en parte a SO_4^{2-} y transportado al suelo por las lluvias (Vitti *et al.*, 2006).

Cerca de un tercio de todos los compuestos de S y 99% del dióxido de S que llegan a la atmósfera desde todas las fuentes, provienen de las actividades humanas. La combustión de carbono y petróleo que contienen azufre, destinada a producir energía eléctrica, representa cerca de dos tercios de la emisión de dióxido de azufre a la atmósfera. El tercio restante proviene de procesos industriales como la refinación del petróleo y la conversión (por fundición) de compuestos azufrosos de minerales metálicos en metales libres como el Cu, Pb y Zn.

La corteza terrestre tiene cerca de $1,1 \text{ g kg}^{-1}$ de S, donde la roca madre constituye la fuente primaria de este elemento; ella abastece de sulfatos metálicos, los cuales en suelos bien drenados se transforman rápidamente en sulfatos. Entre las principales fuentes minerales se encuentran la pirita, la calcopirita, la galena y la blenda, que predominan en las rocas ígneas. Como fuentes no ígneas se encuentran los depósitos de yeso, especialmente en regiones áridas, y el carbón mineral, el cual contiene en promedio 1,5% de S. Junto al S mineral se encuentran el orgánico proveniente de los restos animales y vegetales y de la materia orgánica del suelo.

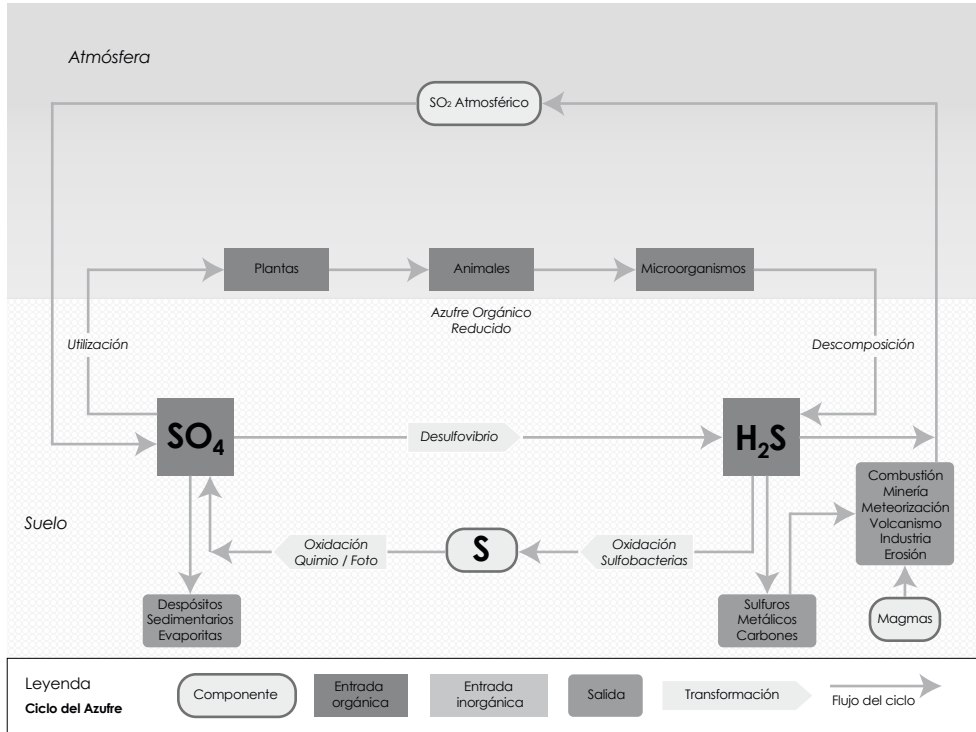


Figura 2.5. Ciclo del S en el sistema suelo-planta (Murell, 2003).

• S en el suelo

La mayor parte del S del suelo está en forma orgánica, la cual, por acción de los microorganismos, es transformada a formas solubles por la planta. Así mismo, se encuentra como S mineral (sulfuros y sulfatos) en cantidades variables, correspondiendo las mayores cantidades a las regiones áridas. La proporción relativa de estas formas depende del clima y de las propiedades de los suelos; en zonas áridas predominan los sulfatos, mientras que en climas húmedos el S orgánico adquiere mayor importancia. Por otro lado, en suelos mal drenados se encuentran abundantes cantidades de sulfuros (piritas H₂S).

El S es tomado por las plantas como ion SO₄²⁻, el cual en el metabolismo vegetal es reducido a S²⁻ y HS⁻, formas que son integrantes de aminoácidos como cistina, cisteína y metionina, y de proteínas. También es constituyente de la tiamina, la biotina, coenzima A y aceites aromáticos (Figura 2.5).

Aunque gran parte del S orgánico del suelo permanece no caracterizado, existen tres grupos reconocidos: 1. Fracción de S reducible (fracción más lábil del S orgánico), no está ligada directamente al C y se cree que la mayor parte está bajo la forma de ésteres; 2. S ligado al C, contenido en aminoácidos, cistina y metionina; y 3. Fracción inerte o residual, es una fracción no reducible, excepcionalmente estable y probablemente de escasa importancia como fuente potencial de S para las plantas.

El contenido de S de los suelos es muy variable; los valores más bajos se encuentran en suelos arenosos (20 mg kg^{-1}), mientras que los valores más altos se encuentran en zonas de mareas donde el S tiende a acumularse ($35.000 \text{ mg kg}^{-1}$). Pero el rango normal en suelos agrícolas en regiones húmedas y semihúmedas es de 100 a 500 mg kg^{-1} , lo que equivale a 225 a $1.120 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$ de este nutriente.

• Disponibilidad del S

En los últimos años se han incrementado, en todas partes de mundo, los informes señalando las deficiencias de S, especialmente en zonas tropicales y subtropicales, lo cual se debe principalmente a las siguientes causas:

- El incremento en el uso de fertilizantes más puros, cuyos contenidos de S son sólo trazas, por ejemplo, el uso de la urea fosfato de amonio, fosfato diamónico, el superfosfato triple, etc., en lugar del sulfato de amonio que se utilizaba para cubrir necesidades de N, pero que agregaba S junto al N.
- Incrementos en los rendimientos, con la introducción de híbridos de alto rendimiento, con respuesta a N, resultando en una rápida disminución del S del suelo.
- Reducción de emisiones de óxidos de S, debido al control en la contaminación ambiental.
- Bajo uso de abonos orgánicos, tanto en países desarrollados como en los en vías de desarrollo.
- Inmovilización del azufre en la materia orgánica acumulada por la utilización de labranzas conservacionistas. Estos sistemas de labranza tienden a conservar la materia orgánica del suelo y por lo tanto disminuye la liberación de azufre inorgánico asimilable para las plantas, aunque aumenta el S total del suelo.

Las reacciones del S en el suelo son diversas y complejas, debido a su presencia tanto en forma orgánica como inorgánica.

Las transformaciones orgánicas del S son similares a las del N. Cuando los residuos animales y vegetales se incorporan al suelo, inmediatamente se inicia su descomposición por acción de los microorganismos, los cuales efectúan la mineralización del S orgánico o lo convierten a otra forma orgánica. El producto final de la mineralización depende de las condiciones del suelo, donde el drenaje es el factor más importante. En medios reducidos por la acción de bacterias anaeróbicas, se acumulan las concentraciones de sulfuros y H_2S , mientras en suelos aireados el producto final son los sulfatos (SO_4^{2-}), originados por la acción de microorganismos aeróbicos.

La cantidad de sulfatos producida depende no solo de las condiciones de aireación, sino también del S contenido en los residuos orgánicos, del pH, la temperatura y la disponibilidad de otros nutrientes.

Por su parte, las transformaciones inorgánicas de S en el suelo son casi exclusivamente de los sulfuros (S^{2-}) y los sulfatos (SO_4^{2-}); el predominio de una de estas formas depende del potencial de óxido-reducción, destacándose los sulfuros en medios reducidos y los sulfatos en medios aireados.

Las formas y cantidades de S presentes son muy variables de un suelo a otro y las condiciones encontradas van desde deficiencia hasta exceso. Como regla general, un suelo con menos de 14 mg kg^{-1} (ppm) de SO_4^{2-} soluble se considera un suelo deficiente en S disponible para las plantas.

• Fuentes de Ca, Mg y S en la agricultura

En la Tabla 2.4 se describen las principales fuentes de Ca, Mg y S en la agricultura.

Tabla 2.4. Principales fuentes de Ca, Mg y S en la agricultura

Fertilizante	Garantía mínima	Forma de nutriente	Observaciones
Sulfato de calcio	16% de Ca 13% de S	Ca y S determinados en forma elemental	
Sulfato de magnesio	9% de magnesio	Soluble en agua	12 a 14% S
Oxido de magnesio	55% de Mg	Magnesio total en forma de oxido (MgO)	
Carbonato de magnesio	27% de Mg	Magnesio total en forma de carbonato ($MgCO_3$)	

MICRONUTRIENTES

Los microelementos son elementos esenciales para el crecimiento de las plantas y se caracterizan por ser absorbidos en pequeñas cantidades (del orden de algunos miligramos por kilogramo de materia seca de la planta). Esto se debe a que ellos no participan de las estructuras de la planta, pero sí de la constitución de enzimas o como activadores enzimáticos (Dechen y Nachtigall, 2006).

Los materiales constitutivos de los suelos determinan, en gran medida, los contenidos de los elementos menores, especialmente en suelos poco desarrollados. En el caso de suelos muy meteorizados como los oxisoles, se encuentra que han presentado una fuerte pérdida de estos nutrientes, lo que origina contenidos bajos para el crecimiento de las plantas. La deficiencia de cualquier microelemento puede originar serios disturbios nutricionales que afectan la calidad y cantidad del producto vegetal.

Los micronutrientes se clasifican en:

Catiónicos: cobre (Cu), hierro (Fe), manganeso (Mn), níquel (Ni), zinc (Zn).
Aniónicos: boro (B), cloro (Cl), molibdeno (Mo).

- **Micronutrientes en el suelo**

Los micronutrientes catiónicos son de naturaleza metálica y se encuentran en los suelos en forma de óxidos, hidróxidos y como sales, y son insolubles a pH altos. Los micronutrientes aniónicos B y Cl son considerados no metálicos, mientras que el Mo es considerado un metal de transición.

A excepción del Fe, que es constituyente principal de la mayoría de los silicatos, los demás elementos menores se encuentran como accesorios en los minerales. Su presencia se explica con base en su tamaño iónico generalmente bajo, el cual permite que estos elementos puedan sustituir isomórficamente a los elementos principales en los minerales. De esta forma se puede encontrar la presencia de Cu en olivino, augita y hornblenda por sustitución de Ca y Fe; y en las plagioclasas por la sustitución de Na. Así mismo, el Mn sustituye el Ca de las plagioclasas y posiblemente el Fe y el Mg en ferromanesianos. El Zn presente en olivinos, augita, hornblenda y biotita, obedece a la sustitución de Mg y Fe por este elemento (Garavito, 1979). El mismo fenómeno explica la presencia de algunos microelementos en arcilla de relación 2:1; mientras que su ausencia en minerales de relación 1:1 obedece a que estos no tienen suficientes sustituciones isomórficas.

• Factores que afectan la disponibilidad de los micronutrientes

La solubilidad de los microelementos está controlada por varios factores, los cuales pueden describir el comportamiento de todos o de algunos de ellos.

Reacciones de oxidorreducción

La disponibilidad de algunos de los microelementos como el Fe y Mn está controlada por las reacciones redox. Las formas solubles y disponibles de estos elementos son las reducidas (Fe^{++} y Mn^{++}), mientras que las formas oxidadas (Fe^{3+} , Mn^{3+} y Mn^{4+}) son insolubles. De esta manera, los procesos que originen reducción (mal drenaje) aumentan la disponibilidad, mientras que la oxidación la disminuye.

El proceso de reducción no solo requiere que el suelo se encuentre saturado (mal aireado), sino que además necesita la presencia de materia orgánica de fácil descomposición. Así mismo, la oxidación en suelos aireados es mayor entre los espacios de los agregados, en los que el oxígeno puede penetrar por los macroporos, que dentro de los agregados, debido a la alta proporción de microporos entre estos.

Reacciones de precipitación

Uno de los fenómenos más importantes que afecta la disponibilidad de los micronutrientes está relacionado con la formación de precipitados insolubles, entre los cuales se encuentran los óxidos, hidróxidos, carbonatos, fosfatos, molibdatos y boratos. Las reacciones de precipitación están relacionadas con el pH del suelo. En términos generales, con un pH alto disminuye la solubilidad y absorción de Cu, Zn, Fe y Mn, mientras que se incrementa la solubilidad del Mo.

Formación de complejos orgánicos

Muchos de los microelementos metálicos (Cu, Fe, Zn, Mn) forman complejos con la materia orgánica presente en el suelo. Los principales compuestos orgánicos que intervienen en estas reacciones son los ácidos húmicos, fúlvicos y sustancias bioquímicas individuales. El B que es un elemento no metálico y puede formar boratos complejos con azúcares simples.

Los principales efectos de los agentes complejantes son: la transformación de micronutrientes de la fase sólida a formas disponibles; servir como transporte de microelementos hacia la raíz; mantener en solución en forma de complejos solubles a micronutrientes que podrían precipitar en compuestos insolubles; ayudar en la intemperización de la roca madre, incrementando el contenido de los microelementos en el suelo, y transformar a formas no asimilables algunos micronutrientes que podrían perderse por lixiviación, entre otros.

La estabilidad de los complejos orgánicos con microelementos dependen de la clase del agente complejante, de los grupos funcionales involucrados, de la clase de ion complejo y del pH. Los complejos son resultantes de la disociación de iones H^+ de los grupos responsables de este fenómeno, los cuales son: $-COOH$; $-OH$, $-NH_2$ y $-HS$, en los que el ion metálico queda ligado por las cargas negativas que se originan en esta disociación.

Características físicas de los suelos

Aunque no es una norma generalizada, se puede indicar que suelos de textura gruesa (arenosos) presentan con mayor frecuencia baja disponibilidad de B, Cu, Mn, Mo y Zn, debido a la mayor lixiviación de estos elementos, así como a la baja presencia de minerales primarios y secundarios que aporten estos nutrientes.

Reacciones biológicas

Los microorganismos desempeñan una importante función en la disponibilidad de los microelementos, ya que ellos participan en gran parte de las reacciones de precipitación, oxidorreducción y complejamiento.

Entre las formas como los microorganismos intervienen en la disponibilidad de microelementos, se encuentran las siguientes:

- Liberación de aniones y cationes en el proceso de mineralización de la materia orgánica.
- Inmovilización e incorporación de microelementos en las estructuras microbianas.
- Oxidación hasta formas menos aprovechables.
- Reducción de las formas oxidadas en ausencia del oxígeno.
- Cambios en el valor de pH y/o potencial de oxidorreducción afectando la forma y solubilidad de los microelementos.

• Fuentes de microelementos en la agricultura

En las Tablas 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, 2.10 y 2.11 se describen las principales fuentes de microelementos en la agricultura.

Tabla 2.5. Principales fertilizantes con contenido de B en la agricultura

Elemento	Fertilizante	Garantía mínima	Forma de nutriente	Observaciones
Boro	Bórax	11% de B	Borato de sodio ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) o ($\text{Na}_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	Soluble en agua
	Acido borico	17% de B	Acido (H_3BO_3)	Soluble en agua
	Pentaborato de sodio	18% de B	Borato de sodio ($\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16} \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) o ($\text{Na}_2\text{B}_{10}\text{O}_{16}$)	Soluble en agua
	Ulexita	8% de B	Borato de sodio ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{CaO} \cdot 5\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 16\text{H}_2\text{O}$)	Insoluble en agua 12 a 14% Ca
	Colemanita	10% de B	Boro total en forma de borato de calcio ($\text{CaO} \cdot 3\text{B}_2\text{O}_3 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$)	Insoluble en agua
	FTE	1% de B total	Silicato	Insoluble en agua

Tabla 2.6. Principales fertilizantes con contenido Zn en la agricultura

Elemento	Fertilizante	Garantía mínima	Forma de nutriente	Observaciones
Zinc	Sulfato de zinc	20% de Zn	$\text{Zn SO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Soluble en agua y 16 a 18% de azufre (S)
	Carbonato de zinc	52% de Zn	ZnCO_3	Soluble en agua 16% a 18% de S
	Oxido de zinc	50% de Zn total	ZnO	Insoluble en agua
	FTE	3% de Zn total	Silicato	Insoluble en agua
	Quelato	7% de Zn	Ligado a EDTA, HEDTA,	Soluble en agua

Tabla 2.7. Principales fertilizantes con contenido Cu en la agricultura

Elemento	Fertilizante	Garantía mínima	Forma de nutriente	Observaciones
Cobre	Sulfato de cobre	13% de Cu	Sulfato	Soluble en agua 16% a 18% de S
	Fosfato cúprico amoniacal	32% de Cu	Fosfato de amonio y cobre ($\text{CuNH}_4\text{PO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$)	34 a 36% de P_2O_5 soluble en CNA +agua y 5% a 7% de N total
	Cloruro de cobre	16% de Cu	Cloruro (CuCl_2)	Soluble en agua y 50% a 52% de Cl
	Oxido cúprico	75% de Cu	Oxido (CuO)	
	Oxido cuproso	89% de Cu	Oxido (Cu_2O)	
	FTE	1% de Cu total	Silicato	Insoluble en agua
	Quelato	5% de Cu	Ligado a EDTA, HEDTA	Soluble en agua

Tabla 2.8. Principales fertilizantes con contenido de Fe en la agricultura

Elemento	Fertilizante	Garantía mínima	Forma de nutriente	Observaciones
Hierro	Fosfato ferroso amoniaca	29% de Fe	$\text{Fe}(\text{NH}_4)\text{PO}_4\cdot\text{H}_2\text{O}$	Soluble en agua 36% a 38% de P_2O_5 y 5 a 7 de N total
	Polifosfato de hierro y amonio	22% de Fe	$\text{Fe}(\text{NH}_4)\text{HP}_2\text{O}_7$	55% a 59% de P_2O_5 y 4 a 5% de N total
	Sulfato ferrico	23% de Fe	$\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	18% a 20% de S
	Sulfato ferroso	19% de Fe	$\text{Fe}_2\text{SO}_4\cdot 7\text{H}_2\text{O}$	10% a 11% de S
	FTE	2% de Fe	Silicato	Insoluble en agua
	Quelato	5% de Fe	Ligado a EDTA, HEDTA,	Soluble en agua

Tabla 2.9. Principales fertilizantes con contenido de Mo en la agricultura

Elemento	Fertilizante	Garantía mínima	Forma de nutriente	Observaciones
Molibdeno	Molibdato de amonio	54% de Mo	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Soluble en agua y 5% a 7% de N total
	Molibdato de sodio	39% de Mo	$\text{Na}_2\text{MoO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Soluble en agua
	Trióxido de molibdeno	66% de Mo total	MoO_3	Insoluble en agua
	FTE	0.1% de Mo	Silicato	Insoluble en agua

Tabla 2.10. Principales fertilizantes con contenido de Mn en la agricultura

Elemento	Fertilizante	Garantía mínima	Forma de nutriente	Observaciones
Manganeso	Sulfato manganoso	26% de Mn	$\text{MnSO}_4\cdot 3\text{H}_2\text{O}$	Soluble en agua y 14% a 15% de S
	Oxido manganoso	41% de Mn	MnO	Insoluble en agua
	FTE	2% de Mn	Silicato	Insoluble en agua
	Quelato	5% de Mn	Ligado a EDTA, HEDTA, poliflavonoides, ligno-sulfonatos	Soluble en agua

Tabla 2.11. Principales fertilizantes con contenido de Co en la agricultura

Elemento	Fertilizante	Garantía mínima	Forma de nutriente	Observaciones
Cobalto	Cloruro de cobalto	34% de Co	$\text{CoCl}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Soluble en agua
	Oxido de cobalto	75% de Co total	COO	Insoluble en agua
	FTE	0.1% de Co	Silicato	Insoluble en agua

CONCLUSIONES

Lo elementos esenciales para las plantas presentan diferentes reacciones y cambios en el suelo que aumentan o disminuyen su disponibilidad para las plantas. Gran parte de estos procesos ocurren dentro de su ciclo biogeoquímico, el cual presenta diferencias de acuerdo con la naturaleza de cada nutriente. Entre los principales factores que afectan su disponibilidad en las plantas se encuentran procesos físicos, químicos y biológicos. Conocer cada una de las interacciones de los elementos esenciales en su ciclo biogeoquímico, permite entender mejor el proceso de transformaciones y cambios para incrementar su disponibilidad y toma por las plantas.

BIBLIOGRAFÍA

- Araujo, A.P.; Machado C.T.T. 2006. P In: Nutrição Mineral de Plantas. Fernandez, M.S. (ed.). Viçosa, MG. Sociedade Brasileira De Ciência do Solo. Pp. 254-273.
- Barber, S.A. 1984. Soil Nutrient Bioavailability: A Mechanistic Approach. New York: Wiley-Inter Science. 398 p.
- _____. 1995. Soil nutrient bioavailability: A mechanistic approach. 2a. ed. New York: John Wiley & Sons. 414 p.
- Brady, N. & Weil, R. 2002. Soil Acidity: Calcium and Magnesium as Plant Nutrients. Cap 9:11. Pp. 404- 410,
- Dechen, A.R. & Nachtigall, G.R. 2006. Micronutrientes. In: Nutrição Mineral de Plantas. Fernandez, M.S. (ed.). Viçosa, MG. Sociedade Brasileira De Ciência do Solo. Pp. 328-352.
- Devlin, R.M. 1982. Fisiología Vegetal. Barcelona, España: Ediciones Omega. 517 p.
- Epstein, E., Bloom, A.J. 2006. Nutrição mineral de plantas: Principios e perspectivas. 3a. ed. Londrina: planta. 403 p.
- Fassbender, H.W. 1994. Química de suelos con énfasis en América Latina. San José, Costa Rica: Ed. Hans w. Fassbender y Elemer Bornemisza. 2ª ed. Rev. IICA. 420 p.
- Garavito, N.F. 1979. Propiedades químicas de los suelos. Publicación IGAC. Bogotá, D.C., Colombia: Editora Andes. 321 p.
- Kanwar, J.S. & Mudahar, M.S. 1986. Fertilizer Sulphur and Food Production. Mengel and Kirby. Principles of Plant Nutrition. 247 p.
- Lopes, A.S. 1998. Manual internacional de fertilidade do solo. Piracicaba: Instituto da Potassa & Fosfato-Potafos. Pp.79-85.
- Marschner, H. Mineral Nutrition of Higher plants. 2a. ed. London: Academic Press. 889 p.
- Meurer, E.J. 2006. Potássio Em: Nutrição Mineral de Plantas. Fernandez, M.S. (ed.). Viçosa, MG. Sociedade Brasileira De Ciência do Solo. Pp. 282-295.
- Murell, T.S. 2003. Transformaciones de los nutrientes en el suelo. Informaciones Agronómicas. INPOFOS No 49. Pp.1-4.
- Souza, S.R.; Fernandez, M.S. 2006. Nitrogênio. In: Nutrição Mineral de Plantas. Fernandez, M.S. (ed.). Viçosa, MG. Sociedade Brasileira De Ciência do Solo. Pp. 215-252.
- Stevenson, F.J. 1965. Origin and Distribution of Nitrogen in Soil. In: Bartholomew W.V. & Clark F.E. (Eds.). Soil Nitrogen. Madison, Wisconsin: American society of Agronomy. Pp. 1-42.
- Stevenson, F.J. & Cole, M.A. 1999. Cycles of Soil Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. 2a. ed. New York: Wiley & Sons. 427 p.
- Vance, CP.; Uhde-Stone, C. & Allen, D.L. 2003. Phosphorus Acquisition an Use: Critical Adaptations by Plants for Securing a Nonrenewable Resource. New Phytol., 157: 423-447.
- Vitti, G.C.; Lima, E. & Cicarone, P. 2006. Cálcio, Magnésio e Enxofre. In: Nutrição Mineral de Plantas . Fernandez, M.S. (ed.). Viçosa, MG. Sociedade Brasileira De Ciência do Solo. 432 p.

LOS MINERALES EN EL DESARROLLO Y PRODUCCIÓN DE LAS PLANTAS

Alvaro Rincón Castillo ¹

INTRODUCCIÓN

La nutrición de las plantas está integrada por nutrientes orgánicos e inorgánicos. Los nutrientes orgánicos representan entre el 90% y 95% de la masa seca de la planta y en ellos se incluyen al carbono, el oxígeno y el hidrógeno, los cuales la planta los obtiene del gas carbónico de la atmósfera (CO₂) y del agua del suelo. Los nutrientes inorgánicos están representados por los minerales que en su gran mayoría son absorbidos por las raíces desde el suelo y completan el 5% a 10% de la materia seca de la planta (Bonilla, 2001). La proporción de los minerales en la planta es baja en comparación con los elementos orgánicos; sin embargo, la deficiencia de uno de los 17 elementos esenciales puede afectar notablemente el desarrollo y la producción vegetal.

Los minerales en los pastos son de especial importancia biológica y económica, considerando que estos se constituyen en la principal fuente alimenticia de los bovinos. Los forrajes establecidos en suelos ácidos presentan bajas concentraciones, en el tejido foliar, de aquellos minerales deficientes en el suelo, siendo los de mayor importancia el P, el Ca y el S. Esta situación justifica la implementación de un plan de fertilización para suplir la deficiencia de minerales en el suelo y mejorar el valor nutritivo de los pastos. En este capítulo se presenta la importancia del agua en la nutrición mineral de las plantas y la función de los minerales esenciales y los síntomas de deficiencia.

¹ I.A. Ph.D., Investigador de CORPOICA. C.I. La Libertad. arincon@corpoica.org.co

EL AGUA EN LA PLANTA

El hidrógeno (H^+), elemento esencial en todas las moléculas orgánicas, es tomado por la planta a partir del agua, el cual es absorbido y posteriormente asimilado durante la fotosíntesis, por lo tanto, el agua debe considerarse como un nutriente para la planta. No obstante, la cantidad de agua que se requiere para en proceso fotosintético es pequeña y solo constituye aproximadamente un 0,1% de la cantidad total utilizada por la planta (Sánchez y Aguirreolea, 2001). En promedio, el protoplasma contiene de 85% a 90% de agua, y en los organelos como cloroplastos y mitocondrias celulares, el 50% es agua. El contenido de agua de las raíces, expresado en peso fresco, varía de 71% a 93%; el de los tallos, de 48% a 94%; el de las hojas, de 77% a 98%; el de los frutos entre 84% y 94%, y el de las semillas, de 5% a 11% (Salisbury y Ross, 1992).

Todos los procesos fisiológicos, especialmente los relacionados con fotosíntesis, nutrición mineral y transporte de nutrientes en la planta, requieren de agua. Todas las sustancias que penetran en las células vegetales deben estar disueltas, ya que en las soluciones se efectúa el intercambio de sustancias nutritivas entre células, órganos y tejidos. El agua, como componente del citoplasma vivo, participa en el metabolismo y en todos los procesos bioquímicos. Una disminución del contenido hídrico va acompañado por una pérdida de turgencia, por marchitamiento y por una disminución del alargamiento celular, por lo que se cierran los estomas y se reducen la fotosíntesis y la respiración. La deshidratación continuada ocasiona la desorganización del protoplasma y la muerte de muchos organismos (Sánchez y Aguirreolea, 2001; Salisbury y Ross, 1992).

A la temperatura ambiental, el agua conserva su estado líquido, formando enlaces o puentes de H^+ entre las moléculas de agua, la cual posee dos átomos de H^+ unidos a uno de oxígeno (O^-). La estructura de un volumen de agua está formada por agregados de moléculas, debido a los puentes de H^+ (Figura 3.1), que si bien son débiles, existen en una cantidad tan numerosa que

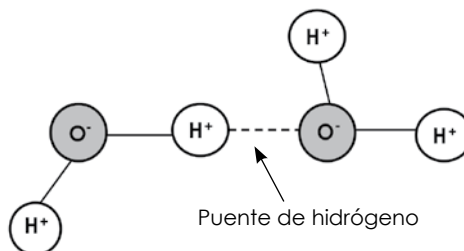


Figura 3.1. Dos moléculas de agua unidas por un puente de hidrógeno.

le otorga a este líquido una fuerza de cohesión molecular muy elevada. Esta propiedad tiene implicaciones muy importantes en el ascenso del agua por los vasos, desde el suelo hasta la copa de los árboles muy altos, sin que la columna de agua se rompa y termine así el flujo (Montaldi, 1995).

ABSORCIÓN DE LOS MINERALES DEL SUELO POR LAS PLANTAS

Las plantas resuelven el problema de la absorción de agua y de los elementos minerales del suelo, que generalmente son escasos, produciendo grandes sistemas radicales. Si bien en muchas plantas las raíces representan del 20% al 50% de su peso total, en algunos casos representan el 90%, sobre todo cuando las plantas se desarrollan con déficit de agua y de minerales en el suelo (Salisbury y Ross, 1992). La forma de los sistemas radicales de las plantas es controlada principalmente por mecanismos genéticos, más que ambientales, así, por ejemplo, los pastos tienen raíces muy ramificadas y fibrosas que crecen a nivel superficial del suelo y en algunos casos penetran a capas más profundas, y las leguminosas, como la alfalfa, la *Cratylia argentea* y el maní forrajero poseen una raíz primaria o pivotante que puede llegar a varios metros de profundidad.

El suelo es el medio que suministra los elementos minerales a las plantas. El ambiente edáfico en el cual crecen las raíces de las plantas está constituido por una parte mineral y sólida, asociada con partículas orgánicas (Humus), una parte gaseosa, de la cual forman parte los poros, y una líquida, que llena los capilares y poros, y es el medio en donde se mueven los iones hasta las raíces. La región apical de las raíces excretan una sustancia gelatinosa constituida por diversos polisacáridos que forman un mucílago sobre la epidermis, que favorece el crecimiento de la raíz, protegiéndola de la desecación en épocas de sequía (Montaldi, 1995).

Por lo general, existe un gradiente de potencial hídrico, por efecto del flujo que crea la transpiración, que favorece el movimiento del agua junto con los minerales, desde la raíz hasta las hojas. El agua y los nutrientes minerales presentes en la solución del suelo penetran al apoplasto o xilema de la raíz por difusión pasiva, pero primero deben penetrar la membrana plasmática que representa una barrera importante para la absorción de iones.

Para que un elemento sea absorbido por la raíz debe tener contacto físico, que se puede dar de tres formas (Salisbury y Ross, 1992; Marschner, 1995):

1. Por flujo de masas: el agua lluvia o de riego se percola en el perfil del suelo y arrastra iones.
2. Por difusión: se da desde condiciones de mayor concentración de minerales, a condiciones de menor concentración.
3. Por intercepción radical: por crecimiento de las raíces, explorando nuevos volúmenes de suelo (Tabla 3.1).

Tabla 3.1. Movimiento de los nutrientes hacia la raíz, para que estos puedan ser absorbidos por la planta

Movimiento hacia la raíz	Nutriente
Intercepción radical	Ca, Mg, Zn, Mn
Flujo de masa	Ca, Mg, Zn, Fe, Cu, B
Difusión	K, P, Mn

Cuando la absorción de nutrientes del suelo es muy activa, el exceso de minerales que no emplea la planta en el metabolismo, es acumulado en la vacuola de la célula, para posteriormente ser utilizado en el caso de un suministro radical de minerales insuficiente. Estos elementos salen de la vacuola al citoplasma y nuevamente pasan al xilema por difusión pasiva, para ser aprovechados en el metabolismo de la planta.

MOVILIDAD DE LOS NUTRIMENTOS EN LA PLANTA

El agua junto con los nutrientes del suelo son absorbidos por las raíces, penetran la epidermis, la corteza de la raíz y luego pasan a la endodermis y a los tejidos vasculares que se distribuyen en la planta por el xilema en un flujo unidireccional a lo largo del tallo, hasta las hojas, donde puede tomar dos rutas: el agua que utilizará la planta para mantener la turgencia de las células (1%) y la que formará parte de la biomasa (0,1%), importante para el crecimiento y desarrollo de la planta, y el agua que sale de la planta por los estomas mediante la transpiración, la cual representa un 99% de la absorbida por las raíces (Figura 3.2).

A nivel de los nudos del tallo se originan ramificaciones del sistema vascular que pasan a través del pecíolo hasta el limbo foliar. Dentro del limbo las ramificaciones son extensas (nervaduras), por donde se distribuyen el agua y los nutrientes minerales. En las hojas de las gramíneas, las nervaduras se encuentran distribuidas en forma paralela, en tanto que en las hojas de las leguminosas y en todas las hojas anchas, las nervaduras forman una gran red.

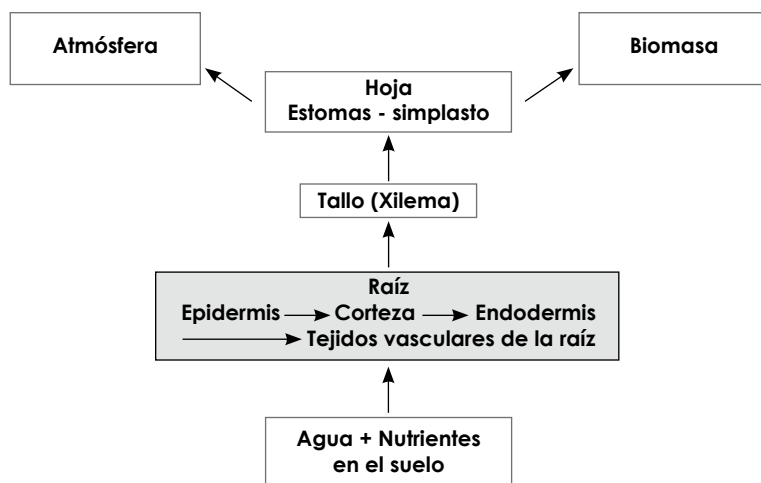


Figura 3.2. Esquema del flujo de agua y nutrientes minerales en la planta.

En el ascenso del agua hasta grandes alturas interviene la transpiración, que genera una tensión en el xilema por la diferencia en el potencial hídrico y la cohesión de las moléculas de agua que forman los hilos de agua en un permanente flujo (Figura 3.3). En la hoja, el agua puede seguir la ruta del floema, también llamada ruta simplástica, medio que utiliza para llegar a puntos en activo crecimiento o a los frutos. Por el floema el agua cumple una función de transporte de los fotoasimilados fabricados en los cloroplastos de las hojas mediante el proceso de la fotosíntesis; estos compuestos, constituidos principalmente por la sacarosa, se distribuyen hacia todos los órganos de la planta, como los tallos, raíces y frutos.

Los elementos muy móviles, como son el P, el K, el N y el Mg, son transferidos al floema cuando se hallan en exceso las necesidades de las hojas, generándose una recirculación de estos nutrientes por toda la planta. En la Tabla 3.2 se indica que la mayoría de los elementos se movilizan o redistribuyen entre los órganos por el floema, en mayor o menor grado, con excepción el Ca y el B (Montaldi, 1995).

La movilidad y redistribución de los nutrimentos en la planta hacen que los síntomas de deficiencia de cada elemento se presenten en sitios específicos; por lo tanto, el síntoma y su localización son las bases para el diagnóstico visual de las deficiencias y toxicidades minerales en las plantas. Los tres macronutrientes (N, P K) y el Mg tienen alta movilidad. Debido a esto, cuando el suministro de alguno de ellos es deficiente, se moviliza desde las hojas viejas, donde

inicialmente se acumula en mayor cantidad, y se redistribuye entre las partes jóvenes de la planta. Por esta razón, los síntomas de deficiencia de estos elementos de alta movilidad aparecen inicialmente y en forma más acentuada en las hojas viejas.

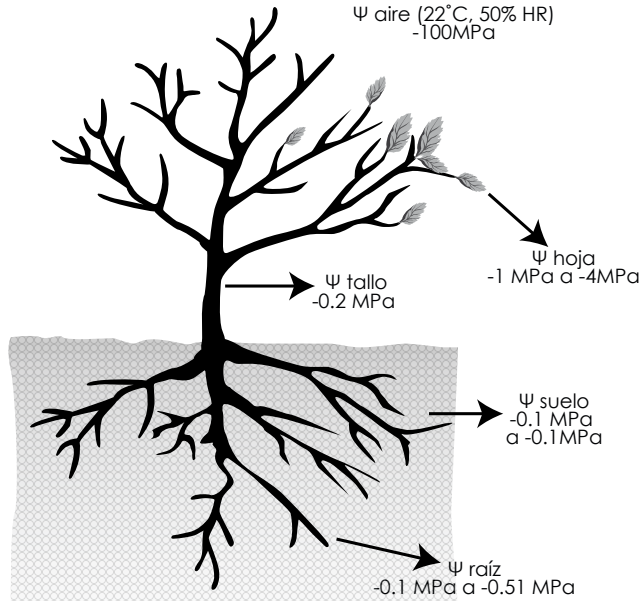


Figura 3.3. Diferencial de potencial hídrico entre suelo y atmósfera, que permite el flujo de agua y nutrientes a la planta (Sánchez-Díaz y Aguirreolea, 2001).

El Ca, por el contrario, es un nutrimento de muy baja movilidad en la planta. Cuando la planta presenta deficiencia de Ca, éste se acumula principalmente en las hojas más viejas. Las hojas jóvenes, por el contrario, reciben menor cantidad de este elemento y presentan los síntomas iniciales de deficiencia. El S tiene un grado intermedio de movilidad en la planta. Por ello, los síntomas de su deficiencia se manifiestan con más frecuencia en las hojas intermedias y jóvenes, sin que se afecten las hojas viejas (Marschner, 1995).

El Mo es un micronutriente de alta movilidad en la planta; por lo tanto, los síntomas de deficiencia aparecen inicialmente y en forma más acentuada en las hojas viejas. El Cu, el Zn y el Fe tienen un grado de movilidad entre media y baja dentro de la planta. La deficiencia de estos elementos se presenta principalmente en las hojas jóvenes y en menor grado en las hojas intermedias (Montaldi, 1995).

Tabla 3.2. Movilidad de los minerales en la planta

Móviles	K	Na	Mg	P	N	Cl
Intermedios	Fe	Mn	Cu	Zn	Mo	S
Inmóviles	Ca	B				

Fuente: Montaldi (1995).

NUTRICIÓN FOLIAR

La absorción de los elementos minerales por las hojas, ha sido utilizada para suministrar a las plantas fertilizantes y algunos micronutrientes en soluciones acuosas o suspensiones de nutrientes. La cutícula de la hoja es una superficie que sirve de protección, con alto contenido de cutina y cera; sin embargo, no es totalmente infranqueable al paso de soluciones acuosas, que se hace a través de poros denominados ectodermos. El grado de su permeabilidad depende de la especie, de la edad de las hojas y de las condiciones climáticas. La fertilización foliar presenta varias limitaciones, las cuales se mencionan a continuación:

- La penetración de las soluciones es lenta.
- Se presenta secado muy rápido de la solución antes de penetrar en la hoja.
- La hoja no tiene la capacidad de retener la solución asperjada.
- La incorporación de la cantidad de fertilizante en cada aspersión es muy reducida.
- Se puede presentar lavado del fertilizante por la lluvia.

No obstante estas desventajas, la fertilización foliar se puede emplear como complemento a la fertilización realizada al suelo, por la rápida respuesta de las plantas y porque es posible aplicarla junto con los herbicidas (Montaldi, 1995).

ELEMENTOS ESENCIALES PARA LAS PLANTAS

A comienzos del siglo XIX se comprobó la presencia de minerales en las plantas; utilizando las técnicas de la química analítica y los métodos de análisis modernos se identificaron en los vegetales 17 elementos esenciales que, junto con la luz solar, la mayoría de las plantas son capaces de sintetizar todos los compuestos que necesitan. Salisbury y Ross (1992) mencionan dos criterios para que un elemento sea considerado esencial:

- Primero: si la deficiencia del elemento impide que la planta complete su ciclo vital, hasta formar semillas viables.
- Segundo: si el elemento forma parte de cualquier molécula o constituyente de la planta que es esencial, como por ejemplo el Mg en la clorofila.

La mayoría de los 17 elementos que se presentan en la Tabla 3.3 cumplen con estos dos requisitos.

Tabla 3.3. Elementos esenciales para la mayoría de las plantas superiores y sus concentraciones internas consideradas como adecuadas

Elemento	Símbolo químico	Forma disponible para la planta	Concentración en tejido seco (%)
Macroelementos:			
Carbono	C	CO ₂	45
Oxígeno	O	O ₂ , H ₂ O	45
Hidrógeno	H	H ₂ O	6
Nitrógeno	N	NO ₃ ⁻ , NH ₄ ⁺	1,5
Potasio	K	K ⁺	1,0
Calcio	Ca	Ca ²⁺	0,5
Magnesio	Mg	Mg ²⁺	0,2
Fósforo	P	H ₂ PO ₄ ⁻ , HPO ₄ ²⁻	0,2
Azufre	S	SO ₄ ²⁻	0,1
Microelementos:			
Cloro	Cl	Cl ⁻	0,01
Hierro	Fe	Fe ³⁺ , Fe ²⁺	0,010
Boro	B	H ₃ BO ₃ ⁻	0,002
Manganeso	Mn	Mn ²⁺	0,005
Zinc	Zn	Zn ²⁺	0,002
Cobre	Cu	Cu ⁺ , Cu ²⁺	0,0006
Níquel	Ni	Ni ²⁺	—
Molibdeno	Mo	MoO ₄ ²⁻	0,00001

Fuente: Salisbury y Ross (1992).

Al eliminar el agua de los tejidos sometidos a temperaturas entre 70 °C y 80 °C, los macroelementos constituyen aproximadamente el 99,5% de la materia seca y son necesarios en cantidades relativamente grandes (1 mg·g⁻¹ de materia seca), mientras que los microelementos forman cerca del 0,03%. Esta

menor cantidad no significa que los microelementos tengan menos importancia, porque la deficiencia de alguno de ellos puede llevar a la aparición de graves anomalías en el crecimiento y su carencia absoluta puede causar la muerte de la planta (Montaldi, 1995).

El contenido mineral de los tejidos vegetales es variable, dependiendo del tipo de planta, de las condiciones climáticas prevalecientes durante el período de crecimiento, de la composición química del medio y de la edad del tejido, entre otros. Por ejemplo, una hoja madura es probable que tenga un contenido mineral mayor que una hoja muy joven. Así mismo, una hoja joven puede tener un contenido mineral mayor que una hoja vieja, la que sufre una pérdida apreciable de minerales solubles en agua al ser lavada por el agua de lluvia o mediante mecanismos de translocación hacia hojas jóvenes.

MACROELEMENTOS

En la Tabla 2.11 se puede ver nueve elementos (C, O, H, N, Ca, K, S, P y Mg) que son requeridos por las plantas en grandes concentraciones, denominados macroelementos. Se ha determinado que las concentraciones apropiadas de algunos macroelementos para el crecimiento óptimo de la planta, varían de 1 a 15 mg por gramo de peso seco de tejido. Los requerimientos más altos son de carbono y oxígeno con 450 mg por gramo de peso seco.

En el presente capítulo no se hace referencia detallada de los elementos carbono, hidrógeno y oxígeno, ya que estos forman parte de los compuestos orgánicos como son los carbohidratos, lípidos, proteínas, ácidos nucleicos, metabolitos secundarios, etc.; aunque en las proteínas y ácidos nucleicos participa conjuntamente con estos el elemento N. A continuación se presentan los principales minerales en la nutrición de las plantas, con sus funciones y síntomas de deficiencias.

- **Nitrógeno (N)**

Su función en la planta

El N es un elemento primario de las plantas y se puede encontrar en los aminoácidos, por tanto forma parte de las **proteínas**. También forma parte de las amidas, hormonas (**auxinas** y **citoquininas**), nucleótidos, vitaminas, alcaloides y ácidos nucleicos. Es necesario para la síntesis de la clorofila y forma parte de esta molécula, por lo tanto interviene en el proceso de la fotosíntesis. Este

nutriente es el que promueve los mayores aumentos de producción de materia seca; es considerado el elemento más importante en los forrajes tropicales, por la respuesta que propicia en la producción de biomasa y en el contenido de proteína, factores importantes que determinan los rendimientos de carne y leche (Rincón y Ligarreto, 2008).

El 78% del aire es N_2 ; sin embargo, la mayoría del N en la atmósfera no está disponible para ser usado por las plantas. La razón es el fuerte enlace triple entre los átomos N en las **moléculas** de este elemento. Para poder utilizarlo, hay que romper estos enlaces y fijar o unir el N a otros elementos como el oxígeno o el hidrógeno (Orozco, 1999). Las formas iónicas que una raíz puede absorber son el **nitrato** (NO_3^-) y el **amonio** (NH_4^+), y se mueve en la planta por el xilema (Montaldi, 1995).

Como la mayor parte del N del suelo está en forma orgánica, es necesaria una actividad microbiológica desarrollada por bacterias como las Nitrosomas y las Nitrobacter, para que lo convierta en amonio o nitrato. Si la planta absorbe el N en forma de nitrato, tiene que reducirlo a una forma amoniacal antes de que pase a formar parte de los compuestos orgánicos. El amonio no se acumula sino que se incorpora directamente a compuestos como la **glutamina**, procedentes del **ciclo de Krebs**. Altos niveles de amonio en la planta son tóxicos y provocan daño a la membrana celular, por este motivo, todo el amonio absorbido o generado es rápidamente asimilado o almacenado en la vacuola de la célula (Menezes y Silveira, 2004; Orozco, 1999).

Síntomas de deficiencia en la planta

Las plantas que crecen con bajos niveles de N son de color verde claro y muestran una clorosis generalizada, principalmente en las hojas viejas. Las hojas jóvenes permanecen verdes por períodos más largos, ya que reciben N soluble de las hojas más viejas (Marschner, 2002; Ascon-Bieto y Talon, 2001). Las plantas deficientes en N se quedan pequeñas y el crecimiento es lento; las gramíneas presentan menor macollamiento. En los pastos surgen deficiencias de proteína y disminuye la producción de forraje.

El exceso de N produce un crecimiento exagerado de la planta y un color verde intenso, principalmente en las hojas. Por esto se forman plantas débiles con tejidos tiernos, y, por tanto, más propensas a las plagas y las enfermedades, al viento, a la lluvia, al granizo y a las heladas. La floración es escasa por el predominio de la producción de hojas. Se presenta la caída de flores y frutos.

Intoxicación de bovinos por nitratos y nitritos

La intoxicación del ganado bovino producida por nitratos y nitritos se da por la alta acumulación de estos compuestos nitrogenados en las hojas y tallos de los pastos, los cuales no alcanzan a ser transformados en amonio ni en compuestos nitrogenados orgánicos. Esta acumulación se da por la alta absorción de nitratos y nitritos por parte de las raíces de la planta al inicio de lluvias, factor que contribuye a una mayor disponibilidad de N en el suelo, por reacciones de mineralización y actividad biológica, favorecidas por la humedad del suelo después de un periodo seco. También se puede presentar este problema cuando se aplican altas dosis de N a las praderas y la planta no produce cantidades suficientes de la enzima nitrato reductasa, encargada de transformar estos compuestos nitrogenados, por lo tanto aparece una alta acumulación de nitratos y nitritos en el tejido foliar, siendo tóxico para el ganado (Romero, 1986).

A esta acumulación también contribuye una disminución en la fotosíntesis en esta época de inicio de lluvias, por la menor radiación producida en los días nublados, debido a que los procesos de transformación de nitratos en compuestos nitrogenados orgánicos en la planta (aminoácidos y proteínas) están estrechamente relacionados con la fotosíntesis. Otro factor que contribuye a la acumulación de nitratos en algunas plantas de hoja ancha, consideradas como malezas en los potreros, está relacionado con la aplicación de herbicidas hormonales con base en 2,4-D, que inducen a una acumulación temporal de nitratos (Benejam, 2006).

La acumulación de nitratos se presenta en gran cantidad de pastos, como guinea, angleton, puntero, pangola, kikuyo y en general en todas las especies de *Brachiaria* donde se han encontrado concentraciones de $1350 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de nitratos. También se han hallado altos niveles en sabanas nativas, llegando a $250 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de nitratos y $7500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de nitritos.

Cuando los rumiantes consumen forrajes con altos niveles de nitratos (NO_3), los microorganismos del rumen lo reducen gradualmente a nitrito (NO_2). Si el nitrito no es reducido rápidamente a amonio, puede pasar a la sangre en cantidades excesivas. El nitrito en sangre convierte a la hemoglobina en metahemoglobina, impidiendo el transporte de oxígeno a los tejidos. La metahemoglobina le confiere a la sangre un color marrón achocolatado característico. Si la proporción de metahemoglobina es muy alta, el animal no obtiene suficiente oxígeno y puede morir en pocas horas (Romero, 1986).

• Fósforo (P)

Su función en la planta

El P es un elemento esencial para el crecimiento de las plantas, el cual es absorbido en su mayoría como ion ortofosfato primario (H_2PO_4^-). También puede ser absorbido en menor cantidad como ion ortofosfato secundario (HPO_4^-). Se encuentra en estado mineral y formando complejos orgánicos fosforados con lípidos, proteínas y carbohidratos. El P interviene activamente en la mayor parte de las reacciones bioquímicas de la planta, como la fotosíntesis, la respiración, la síntesis y la descomposición de carbohidratos, y la síntesis de proteínas. Es un constituyente estructural de los ácidos nucleicos, específicamente de las moléculas DNA y RNA, responsables de la información genética (Marschner, 2002). El papel fundamental del P en la planta es la transferencia de energía necesaria para los procesos fisiológicos. Los iones fosfóricos son capaces de recibir la energía luminosa captada por la clorofila y transportarla a través de la planta. También tiene una gran importancia en el metabolismo de diversas sustancias bioquímicas. El desarrollo radical, en particular, se ve favorecido por una buena disponibilidad de P al principio del ciclo vegetativo, por lo cual en el momento de la siembra es necesario localizar una pequeña cantidad de fertilizante fosfórico cerca de la semilla, especialmente en suelos deficientes. (Potash and Phosphate Institute, 1997).

Las plantas pueden absorber pequeñas cantidades de P por contacto directo de las raíces con los elementos sólidos, pero la mayor parte la toman de la solución del suelo, en forma de iones fosfato. Estos iones se desplazan desde las raíces hasta las hojas por medio de la corriente que crea la transpiración de la planta. La absorción es muy activa durante el período de máximo crecimiento y se reduce a partir de la floración. El P se acumula, en primer lugar, en los tejidos jóvenes, luego en la biomasa durante el envejecimiento de los órganos verdes, para concentrarse por último en los órganos de reproducción y en los frutos o semillas. Es un elemento muy móvil en la planta y puede circular cuando existe un exceso, a través del xilema y el floema (Montaldi, 1995).

El P es muy poco móvil en el suelo y los iones fosfato no pueden ser absorbidos por una raíz cuando están separados por una distancia de más de 2 mm, mientras que el N y el K se mueven más fácilmente en el suelo. Por lo tanto, teniendo en cuenta esta escasa movilidad del P en el suelo y la importancia de las extracciones por las plantas en ciertos periodos, es necesario localizar el abono fosfórico y utilizar dosis superiores en relación con las extracciones

anuales, para asegurar a la planta el ácido fosfórico indispensable para su desarrollo y producción.

Síntomas de deficiencia

Los síntomas de deficiencia de P se manifiestan con enanismo, crecimiento lento de la planta y en las hojas la forma se distorsiona y en algunas plantas les aparece un color púrpura. Los síntomas visuales de deficiencia de este elemento son difíciles de detectar en el campo, con excepción de la presencia de plantas anormalmente pequeñas y a veces de un color verde intenso.

En el análisis de la planta, una mala nutrición con P se manifestará con un contenido menor de P en los órganos verdes y en los frutos, con un retraso del crecimiento, con una fecundación defectuosa, con un movimiento anormal de las reservas y con un retraso de la maduración, lo que determina en conjunto una reducción más o menos pronunciada de la cosecha y menor calidad de la misma.

El P en exceso determina un gran desarrollo de las raíces en relación con la parte aérea (Bonilla, 2001).

• Potasio (K)

Su función en la planta

El K es un nutriente esencial para la planta, es absorbido del suelo rápidamente en forma iónica (K^+) y a diferencia del N y del P, no forma compuestos orgánicos en la planta. Es un elemento nutritivo esencial para todos los organismos vivos. Los vegetales necesitan cantidades elevadas de este nutriente, siendo semejante al requerimiento de N (Mengel y Kirkby, 2001). En los análisis foliares de los pastos, este mineral es el que se encuentra en mayores concentraciones. Está en todos los órganos, movilizándose fácilmente de una parte a otra de la planta.

Es un elemento muy activo en la planta, tiene alta movilidad intracelular y en los tejidos, trasladándose de los más viejos para los más nuevos. Está presente con altas concentraciones en el citoplasma y los cloroplastos ($100-200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$), neutralizando aniones y ácidos orgánicos e inorgánicos insolubles y estabilizando el pH entre 7-8 en esos compartimientos. También se encuentra en la vacuola y en células acompañantes de los estomas. Los órganos de las plantas preferiblemente abastecidos con K por el floema son las hojas nuevas, los tejidos meristemáticos y los frutos frescos, los cuales presentan altas con-

centraciones de K (Marschner, 2002). En las etapas iniciales de crecimiento, las concentraciones de este mineral en las plantas son más elevadas, decreciendo en las etapas más avanzadas, debido a la menor actividad de la raíz y a la menor cantidad del elemento metabólicamente absorbido (Meurer, 2006).

El K cumple una función importante en la activación de un número de enzimas (más de 60) que actúa en diversos procesos metabólicos, tales como fotosíntesis, síntesis de proteínas y carbohidratos; en la síntesis de clorofilas mejora la nodulación de las leguminosas, también tiene incidencia en el balance de agua y en el crecimiento meristemático (Mengel y Kirby, 2001; Montaldi, 1995). Esta alta movilidad en las plantas explica las principales funciones y características del K^+ como el principal catión que actúa en la neutralización de cargas y como el más importante y activo componente inorgánico osmótico (Clarkson y Hanson, 1980). Al participar de estos procesos metabólicos, el K actúa favoreciendo el crecimiento vegetativo, la fructificación, la maduración y la calidad de los frutos. Asimismo, una buena nutrición potásica aumenta la resistencia a condiciones adversas como las sequías o la presencia de enfermedades.

Las plantas obtienen el K del suelo que proviene de la meteorización de los minerales, de la mineralización de los residuos orgánicos o de los abonos y fertilizantes. Las necesidades de K para un óptimo crecimiento de las plantas se sitúa en la franja de 20-50 $g \cdot kg^{-1}$ de la masa de las partes secas de la planta, frutas o tubérculos; sin embargo, las plantas tienen la capacidad de absorber cantidades de K superiores a las necesitadas, lo que comúnmente se denomina "consumo de lujo".

Los requerimientos internos de K en gramíneas y leguminosas son variables, de acuerdo con la especie, siendo mayores para las leguminosas, que pueden ser más afectadas por las deficiencias de K, debido a que las gramíneas son más eficientes en la extracción de este elemento.

Síntomas de deficiencia

Los cultivos extraen grandes cantidades de K del suelo para su crecimiento y desarrollo, y como es de esperarse, la falta de éste elemento influye negativamente en el rendimiento y calidad del cultivo. Además, la deficiencia de K aumenta la vulnerabilidad del cultivo a enfermedades y lo hace menos resistente a condiciones de estrés, tales como sequías y heladas. Las plantas con deficiencia de K presentan una mayor susceptibilidad al ataque de patógenos en la raíz y una mayor fragilidad en los tallos. También puede provocar

un acortamiento de entrenudos (planta achaparrada), hojas con tonalidad verde azulada, márgenes reseco y manchas pardas. Los frutos o los productos agrícolas en general deficientes en K son más sensibles a los ataques de hongos. Como el K es removido a las hojas más jóvenes, los síntomas de deficiencia aparecen primero en las hojas viejas.

No hay excesos de K que produzcan toxicidad en la planta, puesto que serían necesarias cantidades muy grandes de fertilización con este nutriente. Sin embargo, altas cantidades de K pueden provocar la deficiencia de Mg y Ca, por antagonismo con él.

• Calcio (Ca)

Su función en la planta

El Ca es otro de los elementos esenciales para el desarrollo vegetal; es absorbido por las plantas en forma del catión divalente Ca^{2+} , siendo afectada su absorción por altas concentraciones de K^+ , Mg^{2+} y NH_4^+ . Es un elemento abundante en las hojas, donde su concentración normal oscila entre 0,2% y 1%. Aunque frecuentemente el Ca está presente en la savia de las células como Ca libre, también puede estar asociado con estados inmóviles orgánicos y con iones orgánicos como los carboxilos, fosforitos e hidroxilos fenólicos. También pueden estar en depósitos de oxalato de Ca y de carbonatos y fosfatos en las vacuolas celulares; las fitinas en muchas semillas pueden ser una sal cálcica o magnésica del ácido fítico.

Entre las funciones del Ca en las plantas se encuentran las siguientes:

- Elongación y división celular.
- Estimula el desarrollo de raíces y de hojas.
- Forma parte de la estructura y permeabilidad de las membranas celulares.
- Metabolismo del N. Participa en la reducción del nitrato (NO_3) en la planta.
- Constituyente de la estructura de los cromosomas.
- Traslación de carbohidratos.

El Ca entra fácilmente al apoplasto y se une de manera intercambiable a las paredes celulares y a la superficie exterior de la membrana plasmática. Se encuentra en altas concentraciones en la laminilla media de las paredes celulares, que cementa las células entre sí. La función principal del Ca es la regulación de la permeabilidad de la membrana y el endurecimiento de las paredes celulares.

El Ca es considerado como un elemento inmóvil. Hay muy poca traslocación de Ca en el floema y por ello es frecuente un pobre suministro de Ca a las frutas y a los órganos de almacenaje.

Generalmente, la concentración de Ca en la solución del suelo es cerca de 10 veces superior a la de K; sin embargo, la tasa de absorción de Ca es generalmente menor que la de K. La capacidad de absorción de Ca por parte de los cultivos es baja, debido a que solamente se hace por las "puntas" de las raíces jóvenes (Guerrero, 1993).

Síntomas de deficiencia en la planta

La ausencia de un suministro adecuado de Ca a la planta afecta el crecimiento de órganos y tejidos, no hay alargamiento celular y se inhibe el crecimiento de las raíces y se tornan negras o se pudren; también se puede afectar la reproducción al inhibir el alargamiento del tubo polínico (Clavijo, 1994). Por ser un elemento inmóvil en la planta, los síntomas de deficiencia se presentan en la hojas jóvenes y en los tejidos meristemáticos; en casos severos de deficiencia, los puntos de crecimiento mueren (Potash and Phosphate Institute, 1997).

- **Magnesio (Mg)**

Su función en la planta

El Mg es absorbido por las plantas como catión Mg^{2+} desde la solución del suelo y, al igual que el Ca, se mueve hacia la raíz por flujo de masa o por difusión. La cantidad de Mg utilizada por las plantas es menor que la del Ca, y las diferentes especies y variedades de cultivos difieren en la demanda de Mg. Los pastos, el maíz, la papa, la palma de aceite, el algodón, los cítricos, el tabaco y la remolacha azucarera tienen requerimientos relativamente altos de este elemento.

En general, el Mg tiene que ver con la asimilación de nutrientes y con el transporte de carbohidratos y nutrientes. Es un elemento muy importante en las plantas, porque es un constituyente central del átomo en la molécula de la clorofila, por lo tanto participa activamente en el proceso de la fotosíntesis.

Como un catión divalente, el Mg está relacionado con el balance aniones-cationes, por lo cual es responsable de la regulación del pH y del ajuste de la turgencia de las células; está ligado con los pectatos y sirve como elemento estructural en las paredes celulares.

El Mg que no está ligado con estructuras, tales como la clorofila y las paredes celulares, es altamente móvil y se estima que un 20% del Mg asimilado circula en el sistema vascular del xilema y del floema. Debido a la alta movilidad en el floema, el Mg es fácilmente traslocado desde las hojas viejas hasta lugares de intensa actividad metabólica, tales como los retoños, las raíces jóvenes y hasta de órganos de almacenamiento, tales como: granos, frutas y tubérculos. Esta es la razón por la cual los síntomas de deficiencia de Mg se localizan, primero, en las hojas más viejas.

El Mg es importante como cofactor en casi todas las enzimas activadoras de los procesos de fosforilación, sirviendo de puente al ATP o al ADP y a la enzima. Estos complejos Mg-ATP son requeridos en los procesos de transferencias de energía, por ejemplo durante la síntesis de almidones que se ve afectado si el suministro de Mg es bajo. Por otra parte, la deficiencia de Mg también inhibe la degradación del almidón en hojas viejas, que sirve como fuente de energía en los vertederos u órganos de reservas.

El Mg también es esencial para la asimilación de otros nutrientes vía raíz, como el P o el K. Esto indica que la baja disponibilidad de Mg no solamente limita su asimilación, sino también la de otros nutrientes.

Síntomas de deficiencia en la planta

Los síntomas de deficiencia de Mg en la planta aparecen primero en las hojas inferiores u hojas viejas, debido a su traslocación desde estas hojas viejas a las hojas jóvenes. Las hojas afectadas por deficiencia presentan un color amarillento o rojizo, mientras que las nervaduras permanecen verdes.

- **Azufre (S)**

Su función en la planta

El funcionamiento del S en las plantas es similar al nitrógeno (N); es absorbido en forma de sulfato, SO_4^- , es decir, en forma aniónica, perteneciente a las distintas sales: sulfatos de Ca, de Na y de K, ($\text{SO}_4 \text{Ca}$, $\text{SO}_4 \text{Na}_2$).

El S no solo ingresa a la planta a través de las raíces, sino también por las hojas en forma de gas de SO_2 , que se encuentra en la atmósfera, en donde se concentra debido a los procesos naturales de descomposición de la materia orgánica, la combustión de carburantes y la fundición de metales.

Este elemento, en el interior de las células tiene características de poca movilidad. Cumple fisiológicamente algunas funciones importantes, además de ser constituyente de distintas sustancias vitales, como las siguientes:

- Forma parte de los aminoácidos (cistina, cisteína, metionina) y de las vitaminas (biotina, tiamina).
- Es constituyente de las distintas enzimas, con el sulfidrilo (HS^-) como grupo activo, que actúan en el ciclo de los hidratos de carbono y en los lípidos (en la oxidación de los **ácidos** grasos, como la *coenzima A*, CoA).
- Interviene en los mecanismos de óxido-reducción de las células.
- Interviene en la estructura terciaria de las proteínas; las proteínas se ordenan en grandes cadenas moleculares, el S ayuda a la constitución de estas macromoléculas, además de formar parte de los aminoácidos (compuestos moleculares imprescindibles para la formación de los péptidos, que se unen a su vez para la formación de las proteínas).
- Incremento en la concentración de proteína cruda en forrajes.
- Mejoramiento de la calidad harinera de los cereales.
- Incremento en el contenido de aceite en oleaginosas.
- Incremento en la resistencia al frío.
- Incremento en la tolerancia a la sequía.
- Control de ciertos patógenos del suelo.
- Aumento en la tasa de descomposición de los residuos vegetales y abono verde.

Algunas especies como las crucíferas, y entre ellas las liliáceas, absorben una gran cantidad de sulfatos, produciendo en su contenido celular gran cantidad de sulfuro de alilo que ocasiona el olor característico de algunos vegetales como la cebolla.

Este elemento también contribuye en la formación de la clorofila, a un mejor desarrollo del sistema radical y de las bacterias nodulares que asimilan el N atmosférico y que viven en simbiosis con las leguminosas. Parte del S se encuentran en las plantas en forma oxidada de compuestos inorgánicos.

Deficiencias del S en la planta

Cuando el S se encuentra en escasa concentración en las plantas, se alteran los procesos metabólicos y la síntesis de proteínas, afectando el desarrollo de éstas.

Las deficiencias de S en las plantas se parecen a las deficiencias de N y las hojas adquieren un color amarillo pálido. El S es de menor movilidad que el N en la planta y las hojas más jóvenes son las que generalmente se tornan cloróticas, mientras que las hojas viejas se mantienen verdes. Esto es opuesto a lo que ocurre con la deficiencia de N.

Los síntomas de deficiencia de S son debidos a los trastornos fisiológicos, manifestándose en los siguientes puntos:

- Crecimiento lento.
- Debilidad estructural de la planta, tallos cortos.
- Clorosis en hojas jóvenes, un amarillamiento principalmente en las nervaduras foliares e inclusive aparición de manchas oscuras.
- Desarrollo prematuro de las yemas laterales.
- Formación incompleta de los frutos.

• **Micronutrientes**

Hierro (Fe)

Entre todos los micronutrientes, el Fe es requerido en mayor cantidad por las plantas. Es absorbido por las plantas en forma ferrosa (Fe^{++}), mientras que la forma férrica (Fe^{+++}) necesita ser reducida en la superficie de las raíces, antes de ser transportada al citoplasma. Se acumula en las hojas viejas y es relativamente inmóvil en el floema.

Las principales funciones de este microelemento en las plantas son la formación de complejos y la participación en los sistemas reversibles de oxidorreducción. En las proteínas de Fe y S, el Fe se combina con los grupos tioles de la cisteína o directamente con S orgánico. El compuesto más importante de este grupo es la ferredoxina, que actúa como un transportador de electrones en varios procesos metabólicos. El Fe cumple un papel fundamental en la biosíntesis de la clorofila (Clavijo, 1994). Cerca del 80% del Fe en las hojas se localiza en los cloroplastos en forma de fitoferritina.

Las deficiencias de Fe se manifiestan con una clorosis intervenal en las hojas jóvenes, seguida por clorosis en las venas, dando un aspecto amarillento en toda la hoja y pudiendo tornarse blanca en casos extremos (Bonilla, 2001). En los oxisoles su contenido es alto, por lo tanto las plantas no presentan deficiencia, encontrándose un alto contenido de Fe en las hojas.

Manganeso (Mn)

El Mn es traslocado desde las raíces al tallo por el xilema, como un catión divalente libre (Mn^{++}). Forma parte de las metaloproteínas, donde actúa como componente estructural, participa en la fotosíntesis en el proceso de la fotólisis del agua y actúa como activador de enzimas respiratorias del ciclo de Krebs.

El síntoma más significativo de la deficiencia de Mn es la clorosis intervenal, asociada con el desarrollo de pequeñas manchas necróticas. A nivel celular, la deficiencia de Mn presenta una desorganización de las membranas del núcleo, de las mitocondrias y de los tilacoides de los cloroplastos (Bonilla, 2001).

Cobre (Cu)

El Cu es un catión divalente Cu^{++} que tiene la facilidad de unirse a compuestos orgánicos para formar quelatos. La mayoría de sus funciones como nutriente se basan en su participación en reacciones de oxidorreducción. Forma parte de la plastocianina, que es una proteína cloroplástica involucrada en el transporte de electrones entre el fotosistema II y el fotosistema I (Bonilla, 2001). El Cu participa en la síntesis de la lignina, de los alcaloides y de otros compuestos de las membranas de los cloroplastos.

Su deficiencia en la planta se manifiesta con una reducción en la lignificación y acumulación de fenoles. También se presenta enanismo, malformación de las hojas y muerte de meristemas que induce a una ramificación anormal (Montaldi, 1995).

Zinc (Zn)

El Zn es absorbido como catión divalente Zn^{++} y transportado por el xilema en forma libre o unido a ácidos orgánicos. En las plantas el Zn no es oxidado ni reducido y actúa como componente metálico de enzimas o como cofactor. Este microelemento, que interviene en el metabolismo de los carbohidratos y en la síntesis de proteínas, es un constituyente estructural de los ribosomas y su presencia en el RNA polimerasa lo convierte en un regulador de la expresión genética, además participa en el metabolismo de las auxinas y del ácido indolacético.

La deficiencia de Zn produce clorosis intervenal, disminución en el crecimiento de las hojas y acortamiento en la longitud de los entrenudos (Clavijo, 1994).

Boro (B)

El 95% del B en las plantas se encuentra en la pared celular, con una función importante en su estabilidad. Estimula el alargamiento del tubo polínico y la germinación. Por otra parte, el B se relaciona con los principales procesos de la fisiología vegetal como la división y el crecimiento celular, y la germinación y la regulación hormonal, por lo tanto su deficiencia en las plantas se manifiesta con la inhibición en el crecimiento y desarrollo de las raíces, y la detención de la división celular en tallos y hojas, siguiendo la necrosis en los meristemos (Bonilla, 2001).

Los requerimientos externos de micronutrientes en la mayoría de las especies forrajeras comerciales y promisorias son bajos. En algunas especies forrajeras tropicales no se ha observado una respuesta clara a la aplicación de micronutrientes. Sin embargo, en algunas leguminosas se puede presentar deficiencias de B, seguidas por deficiencias de Zn y molibdeno.

En la Tabla 3.4 se resume de manera general, los síntomas que presenta la planta cuando hay alguna deficiencia de minerales.

Tabla 3.4. Síntomas en la planta por deficiencias de algunos minerales

Deficiencia nutricional	Síntoma	Parte de la planta
N	Clorosis uniforme	Hojas adultas
Fe, S	Necrosis bordes y puntas Clorosis uniforme	Hojas adultas Hojas jóvenes
Mg, Mn	Necrosis intervenal	Hojas adultas
Zn, Mn	Clorosis intervenal	Hojas jóvenes
Ca, B, Cu	Clorosis y Necrosis	Hojas jóvenes
Mo, Zn, B	Deformaciones	Hojas jóvenes

CONCLUSIÓN

La importancia de los minerales en las plantas ha sido estudiada y comprobada su esencialidad para el crecimiento, desarrollo y producción de cosechas. La falta de un solo elemento o el desbalance entre nutrientes contribuyen a la alteración de los procesos metabólicos y a las bajas respuestas agronómicas y productivas de las plantas. Esto es de especial importancia en los forrajes, ya que las deficiencias de minerales en ellos afectan directamente al ganado bovino, presentando bajos índices productivos y reproductivos, especialmente en los llanos colombianos, donde el principal alimento de los animales son los pastos.

BIBLIOGRAFÍA

- Ascón-Bieto, J. & Talon, M. 2001. Fundamentos de fisiología vegetal. McGraw Hill Interamericana. Ediciones Universidad de Barcelona. 522 p.
- Bonilla, I. 2001. Introducción a la nutrición mineral de las plantas. Los elementos minerales. *En*: Fundamentos de fisiología vegetal. Eds.: Ascón-Bieto, J. & Talon, M. McGraw Hill Interamericana. Ediciones Universidad de Barcelona. Pp. 83-130.
- Clarkson, D.T. & Hanson, J.B. 1980. The Mineral Nutrition of Higher Plants. *Ann. rev. plant Physiol.*, 31: 239-298.
- Clavijo, J. 1994. Metabolismo de los nutrientes en las plantas. *En*: Fertilidad de suelos, diagnóstico y control. Bogotá, D.C., Colombia: Ed. Silva, F. Sociedad Colombiana de la ciencia del suelo. Pp. 13-28.
- Guerrero, R. 1993. Las propiedades químicas del suelo y su significado agrónomico. Bogotá, D.C.: Universidad Nacional de Colombia. 58 p.
- Marschner, H. 2002. Mineral Nutrition of Higher Plants. 2a. ed. London: Academic Press. 889 p.
- Menezes, J. & Silveira, C.G. 2004. Caracterização do Grau de degradação de pastagens. *En*: Fertilidade do solo para Pastagens produtivas. Anais do 21º simpósio sobre manejo da pastagens. Eds.: Silveira C.G.; Moura, C. & Pedroso de Faria, V. Piracicaba, Brasil: Fundação de estudos Agrarios Luis de Queiroz, FEALQ. Pp. 7-32.
- Mengel, K. & Kirkby, E. 2001. Principles of Plants Nutrition. 5a. ed. Dordrecht Kluwer Academia Publishers. 498 p.
- Montaldi, E. 1995. Principios de fisiología vegetal. La Plata, Argentina: Ediciones Sur. 298 p.
- Orozco, F.H. 1999. Biología del N, conceptos básicos sobre sus transformaciones biológicas. Medellín, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. 231 p.
- Potash and Phosphate Institute. 1997. Manual internacional de fertilidad de suelos. Norcross, G.A. USA. 146 p.
- Rincón, A. & Ligarreto, G.A. 2008. Productividad de la asociación maíz - pastos en suelos ácidos del Piedemonte llanero colombiano. *CORPOICA, Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 9(1): 73-80,
- Romero, J.J. 1986. Anotaciones sobre intoxicaciones por nitratos y nitritos. Documento de trabajo. Boletín divulgativo. Bogotá, D.C.: Subgerencia de Fomento y Servicios. División de Sanidad Animal. Sección Epidemiología. Instituto Colombiano Agropecuario ICA. 10 p.
- Salisbury, F.B. & Ross, C.W. 1992. Fisiología vegetal. México: Ed. Iberoamérica S.A. Pp. 319-338.
- Sánchez-Díaz, M. & Aguirreolea. 2001. El agua en la planta. *En*: Fundamentos de fisiología vegetal. Eds.: Ascón-Bieto, J. & Talon, M. McGraw Hill Interamericana. Ediciones Universidad de Barcelona. Pp. 17-30

REQUERIMIENTOS Y RECOMENDACIONES DE SUPLEMENTACIÓN CON MINERALES EN BOVINOS

Hernando Flórez Díaz¹

INTRODUCCIÓN

Los bovinos requieren un adecuado balance de agua, energía, proteínas, vitaminas y minerales para obtener niveles adecuados de crecimiento, producción de leche y reproducción. En las condiciones del trópico bajo colombiano, sin embargo, los pastos no alcanzan a suministrar las concentraciones requeridas de varios minerales necesarios para este propósito, por lo tanto, los bovinos en pastoreo se deben suplementar con una fuente permanente de estos elementos (Figura 4.1).

Los 15 minerales indispensables para los bovinos se dividen en mayores (macro) y trazas (micro) minerales. Los siete minerales mayores se requieren en cantidades de gramos, se expresan en porcentaje del total de la dieta e incluyen calcio (Ca), fósforo (P), sodio (Na), cloro (Cl), potasio (K), magnesio (Mg) y azufre (S). Los macrominerales son importantes componentes estructurales del hueso y otros tejidos, y sirven como constituyentes de los fluidos corporales. Estos minerales mayores cumplen un papel esencial en el mantenimiento del equilibrio ácido base, de la presión osmótica, del potencial eléctrico de las membranas y de la transmisión nerviosa.

¹ MVZ., M.Sc., Ph.D. Investigador CORPOICA. La Libertad. hflorez@corpoica.org.co



Figura 4.1. Suplementación con sal mineralizada a bovinos.

Los ocho minerales trazas se requieren en muy bajas cantidades, pero son esenciales y se reportan en partes por millón (ppm). Estos minerales involucran: cobre (Cu), cobalto (Co), hierro (Fe), manganeso (Mn), molibdeno (Mo), selenio (Se), yodo (I) y zinc (Zn). Los microminerales sirven como componentes de las metaloenzimas y cofactores de enzimas o como componentes de hormonas del sistema endocrino.

En términos del balance y la disponibilidad de minerales en el organismo, es importante tener en cuenta la concentración del mineral en el forraje, la capacidad de selección del animal en pastoreo, la disponibilidad del mineral para el bovino y la cantidad que se absorbe. Este capítulo tiene como objetivo presentar los principales aspectos de la nutrición mineral en bovinos, las recomendaciones de suplementación y la importancia de estos nutrientes para la producción y reproducción en ganaderías de carne del trópico bajo colombiano.

FUNCIONES DE LOS MINERALES MAYORES

- **Calcio (Ca)**

Aproximadamente el 98% del Ca en el organismo hace parte del esqueleto y el 2% restante se encuentra en el fluido extracelular. El Ca extracelular

es necesario para la formación de los huesos, la transmisión de impulsos nerviosos, la contracción del músculo esquelético y cardiaco, la coagulación de la sangre y como componente de la leche. El Ca intracelular es importante para la función de las enzimas y actúa como segundo mensajero de la acción hormonal.

La concentración normal del Ca en el plasma sanguíneo se encuentra entre 9 y 10 mg/dL en vacas adultas, siendo levemente mayor en terneros. Entre el 40% y 45% de este Ca se encuentra unido a la albúmina y un 5% al citrato y elementos inorgánicos, y el restante 45% a 50% está ionizado en forma soluble.

La absorción de Ca en el intestino depende de la vitamina D. En caso de deficiencia, el Ca se moviliza del hueso. Si la deficiencia se prolonga, se desarrolla osteoporosis y fracturas. Una deficiencia en animales jóvenes afecta la mineralización del hueso y retarda el crecimiento. La concentración de Ca en la leche no se altera incluso en casos severos de deficiencia.

El exceso de Ca en la dieta generalmente no causa intoxicación, pero una concentración del 1% en la dieta puede disminuir el consumo de alimento. El exceso puede afectar la absorción de microminerales como el Zn. En el caso de vacas alimentadas con ensilaje de maíz, el suministro de Ca por encima de los requerimientos mejora la eficiencia de producción.

Las demandas de Ca aumentan en la transición entre el parto y la lactancia. La deficiencia súbita en este período (hipocalcemia) conlleva a la presentación de la fiebre de leche o vaca caída, que es más común en vacas lecheras que en vacas de carne. En la hipocalcemia, el tono muscular en el útero disminuye y se presentan partos prolongados y retención de placenta, así mismo, la involución uterina se retrasa y se presentan problemas de fertilidad posparto. Cuando la dieta se suplementa con grasa, los requerimientos se deben ajustar, ya que estos aumentan. La relación Ca : P se debe mantener entre 1:1 y 5:1. La eficiencia de la absorción del Ca disminuye con la edad del animal; los jóvenes lo absorben con mayor eficiencia que los adultos (NCR, 2001).

En pastos del género *Brachiaria*, manejados en forma tradicional, la concentración foliar de Ca no alcanza, en muchos casos, a llenar los requerimientos para lactancia y crecimiento del ganado de carne. En general, la eficiencia de absorción del Ca proveniente de los forrajes se estima en 30%, mientras que para granos y concentrados es del 60%. En los suplementos minerales, la

eficiencia es mayor que en los pastos y concentrados, y es de 50% para los óxidos de Ca, 75% para carbonato de Ca y 95% para cloruro de Ca y fosfato de Ca (NRC, 2001).

- **Fósforo (P)**

Aproximadamente el 80% del P se encuentra en el esqueleto y los dientes. En los huesos se une con el Ca para formar sales de hidroxapatita y fosfato de Ca. El P es importante en el metabolismo energético de cada célula, como parte del ATP. Este mineral actúa en los sistemas buffer ácido-base de la sangre y otros fluidos, en la diferenciación celular y como componente de fosfolípidos, fosfoproteínas y ácidos nucleicos.

La concentración de P en el plasma sanguíneo es de 6 a 8 mg/dL en animales jóvenes y de 4 a 6 mg/dL en adultos. En un animal de 600 Kg de peso circulan aproximadamente de 1 a 2 g de P inorgánico y el total de P intracelular para el mismo animal es de 155 g (Goff, 1998a; citado por NRC, 2001).

Los microorganismos del rumen requieren P para la digestión de la celulosa y la síntesis de la proteína microbiana. Para optimizar la digestión de la fibra se recomienda que el P disponible dentro del rumen (de la dieta y el que se recicla en la saliva) sea de al menos 5 g/kg de materia orgánica digerida. La absorción de P se lleva a cabo principalmente en el duodeno y en el yeyuno, y depende directamente de la concentración en el lumen intestinal. Cuando el alimento presenta baja concentración de P, la absorción depende de la vitamina D (NRC, 2001).

El P que se absorbe por el intestino se secreta en la leche o en el tracto digestivo con las heces. El equilibrio en el organismo se lleva a cabo por el reciclaje en la saliva y por la excreción en las heces. La concentración de P en la saliva es 4 a 5 veces mayor que en el plasma. En vacas lecheras entre 30 g y 90 g de P inorgánico se secretan diariamente en la saliva. La eficiencia de absorción del P se estima en 90% para terneros lactantes y 78% para terneros entre 100 y 200 kg. Con respecto a los alimentos, la eficiencia de absorción es menor en los forrajes (64%) que en los concentrados (70%). En los suplementos minerales, la eficiencia de absorción es del 80% para fosfato de amonio, 85% en fosfato de dicalcico y 90% para fosfato de Na (NRC, 2001). La eficiencia de absorción disminuye a medida que aumenta el consumo de P. El exceso de P en la dieta reduce la eficiencia de absorción del P inorgánico y el que está presente en la saliva.

Los requerimientos para el crecimiento dependen de la ganancia de peso, y en vacas en lactancia, de la producción y la concentración en la leche. Para vacas gestantes, los requerimientos aumentan en el último tercio de la gestación.

El P es el mineral más deficiente en los bovinos y en los pastos de todo el mundo, debido a la baja concentración en el suelo. A diferencia del Ca, la deficiencia de P se presenta en bovinos que pastorean praderas sin fertilización o en praderas nativas. La deficiencia de P también se presenta cuando los animales consumen una dieta con exceso de forrajes maduros o residuos de cosecha con baja concentración de P (menos de 0,25 % de P en la MS). Los signos de deficiencia no son específicos e incluyen: pérdida del apetito, baja ganancia de peso y producción de leche y baja fertilidad, pero los signos se complican porque simultáneamente se presentan deficiencias de energía y proteína. Los animales presentan baja concentración de P en la sangre (2-3 mg/dL) pero la concentración en la leche se mantiene normal. En casos severos de deficiencia se presenta consumo de huesos, tierra, etc., raquitismo en terneros y osteomalacia (debilidad del hueso) en bovinos adultos. Los signos de deficiencia de P son similares a los de Cu pero se diferencian por la baja concentración de P y hemoglobina en la sangre, respectivamente. El consumo de P en exceso por largo tiempo, afecta el metabolismo del Ca y produce pérdida de hueso y cálculos urinarios (NRC, 2001).

El P es el mineral más costoso en la sal mineralizada. Por lo tanto, es importante realizar análisis de su concentración en los forrajes y suplementos con el fin de elaborar una formulación exacta y correcta del suplemento mineral. En general, se presenta una alta variación en la concentración de P en los forrajes y suplementos proteico-energéticos. En pastos del género *Brachiaria*, manejados de forma tradicional, la concentración foliar de P no alcanza a llenar los requerimientos para lactancia y crecimiento del ganado de carne. Según Mc Dowell (1985), el P produce el mayor retorno de la inversión cuando se suplementa.

Anteriormente se hacía mucho énfasis en la relación Ca-P para la formulación de las dietas. Este factor es importante únicamente si hay deficiencia de Ca y/o P. Lo importante es asegurar que los requerimientos de cada elemento se cumplan.

En la literatura se menciona mucho la importancia del P para la reproducción. En varios trabajos, pero no en todos, se ha observado que la deficiencia

severa de P causa problemas de fertilidad y reducción de los parámetros reproductivos. En casos de deficiencia, se reduce el consumo de alimento, lo que ocasiona deficiencia de proteína, energía y otros nutrientes, lo que puede afectar la reproducción. Se piensa que la baja ganancia de peso corporal en vacas con deficiencia de P es la principal causa de problemas reproductivos (Holmes, 1981; citado por NRC, 2001). En vacas de carne, la deficiencia de P y proteína en conjunto afectan la presentación del primer calor posparto. El NRC (2001) concluye que la literatura no muestra información que soporte que el suministro de P más allá de los requerimientos, mejore la reproducción.

- **Sodio (Na)**

El Na es el principal catión extracelular y entre el 30% y el 50% de este mineral se encuentra en el hueso como parte de la estructura cristalina. El Na con el Cl y el K son importantes para mantener el líquido extracelular y el equilibrio ácido – base. Con el K actúan en la función del corazón, en la transmisión de impulsos nerviosos y en la bomba de Na y K, mecanismo esencial en todas las células para el transporte de glucosa, aminoácidos, fosfatos, Ca, bicarbonato, K y Cl. El Na es el componente principal de las sales de la saliva que ayudan a mantener el pH del rumen.

La concentración de Na en el organismo es de 1,68 a 2,01 g/kg de peso corporal y en el hueso del 0,4%. En la sangre la concentración es de 150 meq/L y en la saliva está entre 160 y 180 meq/L. La concentración en la leche es de 25 a 30 meq/L. y aumenta en casos de mastitis (NRC, 2001).

La absorción activa de Na se lleva cabo en retículo-rumen, abomaso, omaso y duodeno y la pasiva a nivel intestinal. La excreción en las heces es escasa, porque los bovinos pueden permanecer largos períodos de tiempo con bajo nivel de Na en la dieta. La concentración de Na en la sangre se mantiene por reabsorción y excreción en los riñones. En caso de deficiencia, el riñón reabsorbe eficientemente el Na y se disminuye la secreción en la saliva. Los requerimientos diarios de Na para bovinos en crecimiento y vacas preñadas no lactantes es de 1,5 g/100 kg de peso vivo. En vacas lecheras se requieren 0,038 g/kg de peso por día. Cuando la temperatura ambiental está entre 25 y 30 °C se requiere para mantenimiento un adicional de 0,10 g/100 kg de peso vivo y en temperaturas mayores de 30 °C de 0,50 g/100 kg de peso vivo (ARC, 1980). Para crecimiento, los requerimientos son de 1,4 g/kg de ganancia de peso para bovinos entre 150 y 600 kg, y para vacas en el último trimestre de gestación es de 1,39 g/d. La concentración promedio de Na en la leche es de 0,63 g/kg.

La absorción aparente de Na en vacas lecheras alimentadas con forrajes frescos es de 85% y con ensilaje de maíz de 74%; el Na en la sal blanca (cloruro de Na) está 100% disponible. En general, el coeficiente de absorción del Na es de 90%.

La deficiencia de Na se manifiesta por el consumo de tierra, orina, disminución del apetito y de la producción de leche, pérdida de peso y pelaje opaco. La intoxicación con Na depende de la disponibilidad de agua para consumo, los signos incluyen falta de apetito, disminución en el consumo de agua, deshidratación y pérdida de peso. La concentración máxima de cloruro de Na en la dieta de ganado lechero es de 4% (1,6 % de Na en la MS) (NRC, 2001).

La sal blanca es esencial en los bovinos. El Na y el Cl son electrolitos que se encuentran en los fluidos corporales y no existen reservas importantes en el organismo. Estos elementos ayudan a mantener el volumen celular, el pH y la osmolaridad (balance de agua) de los fluidos corporales como la sangre. La sal blanca promueve el consumo de agua, lo cual ayuda a mantener la producción de leche; debido a esto, en los bovinos se pueden presentar deficiencias rápidamente, por lo tanto, en los potreros debe haber un acceso permanente a la sal o a un suplemento que la contenga. En promedio, los bovinos deben consumir entre 11 y 15 g de sal blanca por día. Ambos elementos se pueden consumir en grandes cantidades sin efectos negativos, siempre y cuando exista agua disponible. Los niveles de la dieta no deben superar el 8%, ya que el exceso se excreta a través de la orina.

- **Cloro (Cl)**

El Cl es el anión más abundante en el organismo. La mayoría se encuentra en el líquido extracelular, en el plasma sanguíneo y en el fluido cerebrospinal. Las concentraciones en sangre están en el rango entre 90 y 110 meq/L, entre 10 y 30 meq/L en el líquido ruminal y entre 25 y 30 meq/L en la leche. Sus funciones incluyen la regulación de la presión osmótica, el transporte de dióxido de carbono y oxígeno con el Na y K, y como parte del ácido clorhídrico que se secreta en el abomaso cumple un papel determinante en la digestión de las proteínas (NRC, 2001).

Una gran proporción (80%) del Cl que entra al tracto digestivo proviene de la secreción de la saliva, de los jugos abomasal y pancreático, y se absorbe en la parte alta del intestino delgado por difusión; también se transporta con el Na a través de la pared del rumen, en contra de su gradiente de concentración.

El exceso de Cl se excreta en la orina y las heces, con pequeñas cantidades en el sudor como cloruro de Na o K. La excreción en el sudor en una vaca de 500 kg es de 1,6 g/d en condiciones tropicales (CSIRO, 2007).

Los requerimientos de mantenimiento de Cl son de 2,25 g/100 kg de peso corporal, para crecimiento de 1,0 g/kg de ganancia de peso entre 150 y 600 kg, y para el último tercio de la gestación es de 1,0 g/d. La concentración de Cl en la leche es de 1,15 g/L. La concentración en el calostro es alta y disminuye en la leche durante la lactancia, pero aumenta al final de esta. Los requerimientos en lactancia son de 1,15 g/kg de leche producida (NRC, 2001).

La absorción aparente del Cl en vacas lecheras alimentadas con forrajes frescos es de 88%. Para el cloruro de Na, la eficiencia de absorción se estima en el 100%. En general, para alimentos y fuentes minerales el coeficiente de absorción del Cl es de 90% (NRC, 2001).

La deficiencia de Cl en bovinos se manifiesta por anorexia, pérdida de peso, aletargamiento, polidipsia, poliuria y disminución en la producción de leche. El exceso de Cl en la dieta produce alteración del equilibrio ácido-base. En vacas lecheras, la concentración máxima tolerable de cloruro de Na es de 4,0 % en la materia seca (MS).

- **Potasio (K)**

El K es el tercer mineral más abundante en el organismo. Este mineral se almacena poco y sus requerimientos son los más altos de todos los cationes. El exceso de K se excreta en la orina.

La función del K se relaciona con el equilibrio ácido - base, el balance de agua, la transmisión nerviosa, la contracción muscular y el transporte de dióxido de carbono y oxígeno. También actúa en la fosforilación de la creatinina, en la actividad de la piruvato kinasa, en la síntesis de proteína, metabolismo de carbohidratos y en la función del tejido cardíaco y adrenal (NRC, 1980).

El K es el principal mineral intracelular (150 – 155 meq/L), pero por fuera de la célula su concentración es muy baja (5 meq/L). La saliva contiene 10 meq/L y el fluido ruminal entre 40 y 100 meq/L. El plasma sanguíneo contiene entre 5 y 10 meq/L. La concentración de K en bovinos es de 2,37 y 2,01 g/kg para animales entre 75 y 500 kg, respectivamente. La concentración de K en la leche

es la mayor de todos los minerales (1,5 g/L) (NRC, 2001). El K no se almacena en el cuerpo, por lo tanto los bovinos lo deben consumir diariamente.

En temperaturas ambientales entre 25 °C y 30 °C se requieren para mantenimiento 0,04 g de K adicionales por cada 100 kg de peso corporal, y por encima de 30 °C se deben adicionar 0,36 g de K, para un total de 0,4 g de K por cada 100 kg de peso vivo (NRC, 2001).

Se ha observado aumento del consumo de alimento y de la producción de leche en vacas bajo temperaturas superiores a 35 °C, cuando se suplementan con 10 a 12 g/kg de MS de K en dietas con alto proporción de granos (West *et al.*, 1987; citados por NRC, 2001).

El K se encuentra por encima del 1% en la mayoría de los forrajes, valor superior a los requerimientos para los bovinos. En casos de fertilización con exceso de estiércol o con compuestos de K, su concentración aumenta en mayor proporción y disminuye la de Na y Mg. Esto ocasiona hipomagnesemia y edema de la ubre en bovinos que pastorean este tipo de praderas y exceso de K en el ambiente. En general, los cereales contienen menos K que los forrajes. La absorción aparente del K de los forrajes es del 85% y de las fuentes minerales como cloruro o sulfato de K supera el 90%.

Los signos de deficiencia de K incluyen: disminución del consumo de alimento y agua, pérdida de peso, baja producción de leche, consumo de tierra y caída del pelo. Si se suplementan dietas con altos niveles de concentrado, se puede presentar deficiencia de K, ya que la mayoría de los granos de maíz y los subproductos presentan baja concentración de este elemento, pero el ensilaje de maíz es una buena fuente de este elemento. Los bovinos requieren entre 0,6 y 0,7% de K, por lo tanto, en la mayoría de situaciones la suplementación no es necesaria. En casos de estrés por transporte y calor, el K se pierde en mayor grado a través del sudor, lo cual requiere de un aporte extra de este elemento por medio de la dieta.

- **Magnesio (Mg)**

El Mg es el principal catión intracelular que actúa como cofactor enzimático en la conducción nerviosa, la contracción muscular y la formación del hueso. La concentración de Mg en el plasma es de 0,75 a 2,4 mmol/L. En una vaca de 500 kg hay aproximadamente 0,7 g de Mg en la sangre, 2,5 g en el líquido extracelular, 70 g en el intracelular y 170 g en el hueso. En animales jó-

venes el Mg se absorbe principalmente en el intestino delgado, y en adultos, en el rumen. La eficiencia de absorción es del 16%. La principal fuente de suplementación para la sal mineralizada es el óxido de Mg, con un coeficiente de absorción entre 28% y 49%, mientras que en el carbonato de Mg es de 44%. El sulfato y cloruro de Mg están en el 50%.

Las dietas con alta humedad y concentración de N disminuyen la eficiencia de absorción. Esto es común en forrajes tiernos. Los bovinos excretan grandes cantidades de Mg en la orina, por lo que es poco probable la intoxicación. El exceso de Mg en la sal mineralizada (como sulfato y cloruro de Mg) afecta la palatabilidad de la sal, disminuye su consumo y ocasiona diarrea con moco.

Los pastos y leguminosas presentan concentraciones adecuadas de Mg durante todo el año. Pero al inicio de lluvias en praderas de rápido crecimiento y que han sido fertilizadas, se puede presentar baja concentración. Bajo estas condiciones, también puede haber alta concentración de K, el cual puede interferir con la absorción de Mg. Los casos de la tetania del pasto se presentan cuando vacas recién paridas pastorean estas praderas, las cuales no alcanzan a aportar los mayores requerimientos del inicio de la lactancia.

- **Azufre (S)**

Aproximadamente el 0,15% del peso corporal del bovino corresponde al S, el único mineral que hace parte de los aminoácidos (metionina, cisteína, homocisteína y taurina). Los microorganismos ruminales utilizan el S inorgánico para la síntesis de proteína microbiana y vitaminas como tiamina y biotina. El S también se encuentra en el condroitin sulfato de los cartílagos y se relaciona con el balance ácido - base. El S se absorbe con los aminoácidos en el intestino delgado.

En general, la concentración de S en los alimentos se relaciona directamente con la de proteína. Cuando se utiliza N no proteico (urea) en la dieta, es necesaria la suplementación de S para facilitar la síntesis de los aminoácidos (AA) azufrados como la metionina. Para que se presente una utilización eficiente de la urea, la relación N:S debe estar entre 10 y 12:1 (Bouchard y Conrad, 1973b; citados por NRC, 2001). En los casos de deficiencia de proteína degradable en el rumen, se disminuye el aporte de S para los microorganismos y se afecta la digestión de la celulosa, lo que disminuye la digestión de la fibra (NRC, 2001).

En las condiciones de los Llanos Orientales, el suministro de S en la sal mineralizada en forma de flor de azufre presentó efectos positivos en el peso al destete de terneros de vacas suplementadas con el 12% en la sal mineralizada (213 kg), en comparación con vacas no suplementadas (198 kg) y en la ganancia diaria de peso de bovinos Sanmartineros que se suplementaron con el 9% (475 g/d) y 12% (544 g/d), en comparación con el grupo suplementado con 6% (424 g/d) y el grupo control 0% (414 g/d) (Villar, 2006). Así mismo, se observó un efecto benéfico en la resistencia natural a la infestación por garrapatas de la especie *Boophilus microplus*, siendo estas de menor tamaño y con menor capacidad de ovoposición (Villar y col., 1992).

La deficiencia de S se relaciona con la disminución del apetito y emaciación. La baja concentración afecta la utilización de nitrógeno no proteico (urea), lo cual reduce el crecimiento de los microorganismos y la fermentación ruminal. El S es un mineral deficiente en los forrajes de los Llanos Orientales y no alcanza a llenar los requerimientos de bovinos para carne en pastoreo. Mientras que subproductos de la agroindustria, como la torta de soya, tienen una concentración adecuada de S.

El exceso de S en la dieta afecta la absorción de Cu y selenio. En ganado de carne se ha observado que el consumo de dietas con subproductos de destilería del maíz (0,5% de S en la MS; límite máximo de 0,4%) produce poliencefalomalacia, que cursa con signos neurológicos como ceguera, temores musculares, opistótono, hemorragias en riñón y coma (Zanton y Heinrichs, 2010; Vanness *et al.*, 2010). Por otra parte, el agua que tiene una concentración de más de 5 g/kg de sulfato de Na, disminuye el consumo de alimento y la ganancia de peso.

MICROMINERALES O MINERALES TRAZA

- **Cobalto (Co)**

El Co es necesario exclusivamente en el rumen como sustrato para la síntesis microbiana de vitamina B₁₂. Los microorganismos ruminales utilizan la vitamina B₁₂ para la producción de propionato (un ácido graso volátil importante para la síntesis de glucosa). Aunque los bovinos no absorben cobalto, su papel en la síntesis de la vitamina B₁₂ lo hace esencial en la nutrición de los rumiantes. Solo el 3% del Co de la dieta se utiliza para la síntesis de vitamina B₁₂. Los requerimientos de Co aumentan cuando se suministran dietas con alta proporción de

granos. La deficiencia incluye signos como: disminución del consumo de alimento, del crecimiento y de la producción de leche; anemia, baja inmunidad por daño en la función de los neutrófilos y pelaje opaco. Los animales jóvenes son más sensibles que los adultos.

Las plantas y los subproductos de la agroindustria presentan entre 0,1 y 0,5 mg Co/kg de MS. Los suelos alcalinos limitan la absorción de Co por las plantas. Se ha observado que la adición de Co (0,25 – 0,35 mg/kg de MS) aumenta la digestión de forrajes de baja calidad y la población de bacterias anaeróbicas en 50%. Los signos de toxicidad por Co incluyen: disminución del consumo de alimento, pérdida de peso y alteraciones en la sangre como anemia.

• **Cobre (Cu)**

Este elemento hace parte de múltiples sistemas enzimáticos en el organismo. Es importante para el crecimiento adecuado, el correcto funcionamiento de los glóbulos rojos, el desarrollo del colágeno, la producción de melanina, la reproducción y la inmunidad.

La concentración de Cu en los tejidos es de 1,15 mg/kg, en el calostro es de 0,6 mg/kg y en la leche, de 0,15 mg/kg. En la vaca, en la primera fase de la gestación, se deposita en el feto, la placenta y útero, aproximadamente 0,5 mg/d, y en los dos últimos meses, entre 1,5 y 2 mg/d (ARC, 1980). La absorción de Cu en los terneros recién nacidos es alta (70%), pero disminuye a los tres meses entre 50% y 60%, y en adultos es de solo de 1% a 5%.

En conjunto con el Mo y el S inorgánico, hace parte de sistemas enzimáticos relacionados con el metabolismo de vitaminas y nucleótidos; sin embargo, estos elementos pueden afectar la absorción de Cu. El S forma sulfito de Cu, que se precipita en el rumen, y el S y Mo forman tetratiomolibdato, que se une al Cu y lo hace insoluble; por esto, para bovinos en pastoreo es importante mantener un balance entre Cu y Mo entre 2:1 y 4:1. La cantidad de Cu que se absorbe en los forrajes es menor en los pastos que en los ensilajes y henos.

La ingestión de pasto con tierra, especialmente si la disponibilidad de forraje en la pradera es baja, puede disminuir hasta el 50% la absorción de Cu. Los modelos nutricionales no consideran esta situación, por lo que es recomendable doblar los requerimientos de Cu que describe la literatura para bovinos en pastoreo. Si los bovinos se exponen a concentraciones elevadas de Zn, Fe y P,

la absorción de Cu disminuye. Además, el agua de bebida con alta concentración de Fe produce deficiencia de Cu.

Los signos de deficiencia de Cu incluyen: pérdida de pigmentación del pelaje particularmente alrededor de los ojos, retardo en la pubertad, anestro posparto, reabsorción embrionaria, disminución de las tasas de concepción, disminución de la libido y de la espermatogénesis en toros, anemia, diarrea severa, disminución de la respuesta inmune y aumento de la susceptibilidad a las infecciones. Como el Cu interactúa con muchos minerales (Fe, Mo, S, Se, Zn), se puede presentar deficiencia cuando la concentración de estos elementos supera los siguientes valores: S (> 0,4%), Zn (> 500 ppm), Fe (> 400 ppm) y Mo (> 150 ppm), ya que afectan la absorción de Cu en el intestino (NRC, 2001).

A semejanza de lo que ocurre con el Zn, el Cu es deficiente en forrajes del género *Brachiaria*, pero a diferencia del Zn, este se almacena en el hígado. El óxido de Cu es una fuente de baja biodisponibilidad. De todos los minerales, el Cu es el que presenta mayor riesgo de intoxicación especialmente en ovejas. El exceso en la dieta produce hemólisis, ictericia, metahemoglobinemia, hemoglobinuria, necrosis y muerte.

- **Hierro (Fe)**

El Fe es un componente de la hemoglobina, molécula encargada del transporte de oxígeno y CO₂ en el organismo, de la mioglobina y de enzimas que ayudan a la respiración celular. Los requerimientos de Fe son muy bajos. La eficiencia de absorción en animales jóvenes es de 60% y baja al 2% en adultos. En animales jóvenes estabulados con consumo exclusivo de leche se puede presentar deficiencia, que produce anemia, disminución del consumo de alimento, baja tasa de crecimiento, inmunodepresión y aumento de la presencia de enfermedades y muerte (NRC, 2001).

Puesto que la mayoría de los pastos y forrajes en el trópico bajo contienen concentraciones elevadas de Fe (80 – 300 ppm) y debido a las cantidades de suelo que el bovino consume durante el pastoreo, el Fe casi nunca presenta deficiencias en bovinos en pastoreo; sin embargo, un problema que se puede presentar son los altos niveles que se hallan en el forraje o en el agua de consumo, lo cual puede afectar la absorción del Cu y Zn. La intoxicación con Fe se asocia con bajo consumo de alimento, diarrea y pérdida de peso. Las bacterias utilizan el Fe libre para su crecimiento, por lo tanto, un exceso de Fe en la dieta aumenta la susceptibilidad a las infecciones (NRC, 2001).

- **Manganeso (Mn)**

El Mn cumple un papel importante en el crecimiento y la reproducción. A medida que la concentración en la dieta aumenta, la concentración del mineral se incrementa en los tejidos reproductivos, sugiriendo una relación directa entre el Mn y la fertilidad. Este mineral hace parte de las enzimas que forman los cartílagos esqueléticos. La deficiencia ocasiona alteración del crecimiento, anomalías del esqueleto en recién nacidos y alteración de la reproducción. Cuando se suministran en exceso, el Ca y el P pueden inhibir la absorción de Mn (NRC, 2001).

Los requerimientos varían dependiendo del estado fisiológico y de producción. Por ejemplo, en crecimiento y ceba, los bovinos requieren 20 ppm en la dieta, mientras que las vacas gestantes y lactantes requieren 40 ppm. Como con el cobalto, el Mn tiene un límite amplio para su suministro. La leche contiene 0,03 mg/kg y el calostro 0,16 mg/kg.

El coeficiente de absorción es de 0,75%. La deficiencia de Mn en vacas se relaciona con anestro, calores silenciosos, bajas tasas de concepción, abortos, disminución del crecimiento, bajo peso al nacimiento y en neonatos deformidades esqueléticas, articulares y acortamiento de tendones. Los pastos del género *Brachiaria* tienen niveles adecuados de Mn (120 – 400 ppm) (NRC, 2001).

Las dietas con altos niveles de Ca, K y P aumentan la excreción de Mn en las heces; en terneros, el exceso de Fe disminuye su absorción. El máximo límite tolerable es de 1000 ppm; sin embargo, el Mn interactúa con otros minerales que pueden afectar su límite tolerable (NRC, 2001).

- **Molibdeno (Mo)**

El Mo es un componente de enzimas de la leche y los tejidos. La deficiencia es de poca ocurrencia, pero este elemento afecta la absorción de Cu y P. De hecho, la intoxicación por Mo se relaciona con una deficiencia de Cu (NRC, 2001).

Como se mencionó, el Mo y el S forman tiomolibdato, que tiene alta afinidad con el Cu y afectan su absorción. Esto se puede controlar con el aumento de la suplementación de Cu y, así mismo, la intoxicación por Cu se puede reducir con el aumento de la suplementación con Mo.

• Selenio (Se)

El Se en conjunto con la vitamina E hacen parte de los sistemas enzimáticos antioxidantes y ayudan a fortalecer el sistema inmune. La deficiencia de Se produce retención de placenta, alteración de la fertilidad, calores silenciosos y terneros débiles con baja respuesta inmune, lo que conlleva a elevadas tasas de mortalidad predestete. La concentración de Se en las plantas se relaciona estrechamente con la concentración en el suelo. Las hojas presentan entre 1,5 y 2 veces más que los tallos; en las semillas, la concentración es alta.

Muchos subproductos de la agroindustria, a excepción de los derivados de la leche, tienen alta concentración de Se. La harina de pescado tiene una concentración de más de 1 mg de Se/kg de MS, pero su eficiencia de absorción es baja. La digestibilidad aparente del Se en los forrajes y concentrados está entre 30% y 60%. La suplementación con Se aumenta su concentración en la leche, con efectos benéficos para el ternero y la salud humana. La leche tiene una concentración entre 0,01 y 0,025 mg/kg (NRC, 2001).

El exceso de Ca y S en la dieta afectan la absorción de Se. La deficiencia de Se produce la enfermedad del músculo blanco, baja inmunidad, retención de placenta, nacimiento de terneros débiles o muertos y diarrea crónica. En Colombia, existen áreas seleníferas (Magdalena medio) donde se presenta toxicidad, con signos clínicos como pérdida de peso, caída del pelaje, laminitis y deformación de las pezuñas. El Se se puede suministrar en la premezcla mineral o en forma inyectable. La FDA en los Estados Unidos limita la cantidad máxima de Se que se puede agregar, a 3 mg por animal por día (NRC, 2001).

• Yodo (I)

El I hace parte de las hormonas tiroideas (T_3 y T_4). Es importante para mantener la tasa metabólica normal. La incorporación de I en la dieta de terneros es de 0,4 mg/kg, y de 1,3 mg/d en novillas no gestantes. En el último tercio de la gestación, las vacas almacenan 1,5 mg/d, y en lactancia, entre 4 y 4,5 mg/d. La concentración en la leche está entre 30 ya 300 $\mu\text{g/L}$ y aumenta con la dieta, siendo ésta un buen indicador de la concentración en el organismo. Los niveles requeridos en la dieta son relativamente bajos (0,5 ppm) (NRC, 2001).

Los glucósidos cianogénicos de los granos de soya y el maíz afectan la absorción de I. La concentración de I en los forrajes varía ampliamente y

depende del tipo de suelo. Mientras que la deficiencia produce aumento del tamaño de la glándula tiroidea (coto) y conlleva disminución de la tasa metabólica, retardo en el crecimiento, baja producción de leche, bajo peso al destete, aumento de la susceptibilidad a las infecciones y problemas podales (NRC, 2001).

Las vacas con deficiencia de I, presentan retención de placenta y terneros que nacen ciegos, sin pelaje, prematuros o muertos.

Por otra parte, la intoxicación produce exceso de secreción nasal y ocular, salivación, tos y disminución de la producción de leche; estos signos se observan primero en terneros con el uso prolongado del I orgánico (EDDI). El exceso de I puede pasar a la leche y afectar la salud de los humanos.

- **Zinc (Zn)**

El Zn es un componente importante de sistemas enzimáticos que afectan el metabolismo de proteínas, lípidos, hormonas tiroideas y ácidos nucleicos. El Zn es importante en la espermatogénesis y el desarrollo de órganos sexuales primarios y secundarios en el macho; además, para que haya una respuesta inmune adecuada.

La concentración de Zn en la leche es de 4 mg/kg. Aproximadamente el 50% del Zn en la leche se absorbe, pero la adición de proteína de la soya reduce su absorción a la mitad. La eficiencia de absorción del Zn es del 15%. Por cada kg de aumento de peso se retienen 24 mg de Zn. Durante la gestación, el feto y el útero retienen 12 mg/d y este valor se duplica al final de la gestación (NRC, 2001).

Los depósitos de Zn en el organismo son bajos. La utilización de formas orgánicas como Zn metionina mejoran la ganancia de peso en bovinos en pastoreo. Este compuesto también se utiliza para tratar problemas podales en bovinos. La deficiencia de Zn produce retardo en el crecimiento, lesiones podales y en la piel, aumento de distocias, alteración del estro y de la respuesta inmune, y en machos, retardo en la pubertad y disminución del tamaño testicular y la libido.

Una concentración elevada de Ca y Fe en la dieta afecta la absorción de Zn y aumenta sus requerimientos; además, el Cu y el Zn son antagonistas entre

sí. En los prerrumiantes, los fitatos disminuyen su absorción. En los forrajes, los niveles de Zn son relativamente bajos (20 ppm), mientras que en los granos de cereales tienen en promedio 35 ppm. Los bovinos en pastoreo y bajo condiciones de estrés se deben suplementar con Zn.

SUPLEMENTACIÓN CON MINERALES

Para evitar excesos o deficiencias en la suplementación con minerales, primero se debe balancear la ración, teniendo en cuenta que en la suplementación con minerales debe mejorar la producción y reproducción del hato y a su vez reducir los costos de producción.

Para balancear una ración con minerales se deben seguir los siguientes pasos:

Primero, se deben conocer los requerimientos de minerales para el tipo de ganado en la explotación. Para las condiciones tropicales no se dispone de una tabla de requerimientos de minerales, por lo tanto, utilizamos como referencia las tablas de requerimientos de nutrientes para ganado de carne del National Research Council (NRC, 2000).

A pesar de que estas tablas han sido desarrolladas bajo otras condiciones, son una buena fuente de información para los propósitos de conocer y ajustar los requerimientos de minerales a las condiciones de las ganaderías tropicales.

Para el Ca y P se encuentra mayor información sobre los requerimientos que para otros minerales. En la Tabla 4.1 se presentan los requerimientos de Ca y P para bovinos en levante y ceba. En esta tabla se toman como referencia los pesos más comunes al finalizar la ceba (450, 500 y 550 kg) y el peso corporal y la ganancia diaria de peso durante estas fases. Los requerimientos de calcio y fósforo aumentan a medida que aumenta la ganancia diaria de peso, pero disminuyen a medida que el animal tiene mayor peso corporal.

Esto quiere decir que para una misma ganancia diaria de peso, los requerimientos son mayores para animales en levante que en ceba. Como es de esperar, los bovinos que se sacrifican a un mayor peso requieren mayor concentración de Ca y P en el alimento.

Tabla 4.1. Requerimientos de calcio y fósforo para levante y ceba en ganado de carne

Peso corporal al finalizar la ceba											
450 Kg				500 Kg				550 Kg			
Peso ^a (Kg)	GDP ^b (Kg.d ⁻¹)	Ca % MS ^c	P% MS	Peso (Kg)	GDP (Kg.d ⁻¹)	Ca % MS	P% MS	Peso (Kg)	GDP (Kg.d ⁻¹)	Ca % MS	P% MS
250	0,29	0,21	0,13	275	0,31	0,22	0,13	300	0,33	0,22	0,13
	0,80	0,36	0,19		0,85	0,36	0,19		0,91	0,36	0,19
	1,22	0,49	0,24		1,30	0,49	0,24		1,38	0,49	0,24
270	0,29	0,21	0,13	300	0,31	0,21	0,13	330	0,33	0,21	0,13
	0,80	0,34	0,18		0,85	0,34	0,18		0,91	0,34	0,18
	1,22	0,45	0,23		1,30	0,45	0,23		1,38	0,45	0,23
300	0,29	0,20	0,12	325	0,31	0,20	0,13	355	0,33	0,20	0,13
	0,80	0,32	0,17		0,85	0,32	0,17		0,91	0,32	0,17
	1,22	0,42	0,21		1,30	0,42	0,21		1,38	0,42	0,21
320	0,29	0,19	0,12	350	0,31	0,20	0,12	380	0,33	0,20	0,13
	0,80	0,30	0,16		0,85	0,30	0,16		0,91	0,30	0,16
	1,22	0,39	0,20		1,30	0,39	0,20		1,38	0,39	0,20
340	0,29	0,19	0,12	375	0,31	0,19	0,12	408	0,33	0,19	0,12
	0,80	0,28	0,16		0,85	0,28	0,16		0,91	0,28	0,16
	1,22	0,37	0,19		1,30	0,37	0,19		1,38	0,37	0,19
370	0,29	0,19	0,12	400	0,31	0,19	0,12	435	0,33	0,19	0,12
	0,80	0,27	0,15		0,85	0,27	0,15		0,91	0,27	0,15
	1,22	0,34	0,18		1,30	0,34	0,18		1,38	0,34	0,19

^a Peso corporal al inicio o durante el levante y la ceba

^b Ganancia diaria de peso

^c Materia seca

Fuente: Modificado de NRC. Nutrients Requirements for Beef Cattle. Update, (2000).

En la Tabla 4.2 se muestran los requerimientos de Ca y P para novillas preñadas con diferentes pesos en la madurez (peso adulto). Se toma como referencia para cada peso adulto, una ganancia diaria de peso constante durante la gestación. Los requerimientos se mantienen relativamente constantes en los primeros seis meses, pero en los últimos tres meses de la gestación, aumentan 45% para el calcio y 35% para el fósforo.

Tabla 4.2. Requerimientos de calcio y fósforo para novillas preñadas

Mes de gestación									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
450 Kg peso adulto^a									
GDP ^b , Kg. d ⁻¹	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
Peso con ayuno ^c , Kg.	280	290	300	315	325	335	345	355	365
Ca, % MS ^d	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20	0,32	0,31	0,31
P, % MS	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,23	0,23	0,22
500 Kg Peso adulto									
GDP, Kg. d ⁻¹	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36	0,36
Peso con ayuno, Kg.	310	320	330	345	355	365	375	390	400
Ca, % MS	0,23	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,32	0,31	0,30
P, % MS	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,23	0,22	0,22
550 Kg Peso Adulto									
GDP, Kg. d ⁻¹	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Peso con ayuno, Kg.	340	350	360	375	385	400	410	425	435
Ca, % MS	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,21	0,31	0,31	0,30
P, % MS	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,23	0,22	0,22
590 Kg Peso Adulto									
GDP, Kg. d ⁻¹	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43
Peso con ayuno, Kg.	365	380	390	405	420	430	445	460	470
Ca, % MS	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,31	0,30	0,30
P, % MS	0,18	0,18	0,18	0,18	0,18	0,17	0,23	0,22	0,22

^a Peso cuando la deposición de proteína es mínima y aumenta la de grasa corporal.

^b Ganancia diaria de peso.

^c Peso corporal menos el 4% de merma por ayuno.

^d Materia seca.

Fuente: Modificado de NRC. Nutrients Requirements for Beef Cattle. Update, (2000).

En la Tabla 4.3 se observan los requerimientos de Ca y P para vacas de carne en lactancia, con diferentes pesos en la madurez (peso adulto) y producción máxima de leche (pico de producción). Los requerimientos son mayores en los primeros cuatro meses después del parto, disminuyen entre el quinto y noveno mes y aumentan entre el décimo y doceavo mes después del parto, coincidiendo con el último trimestre de la gestación. Como se espera, los requerimientos son mayores en vacas que tienen mayor peso adulto y producción de leche.

Tabla 4.3. Requerimientos de calcio y fósforo para vacas de carne en lactancia

Mes después del parto ^a												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
455 Kg Peso Adulto, 4.5 Kg pico de producción^b												
Leche ^c , Kg.d ⁻¹	3,8	4,5	4,0	3,3	2,5	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ca, % MS ^d	0,24	0,25	0,23	0,22	0,20	0,19	0,15	0,15	0,15	0,24	0,24	0,24
P, % MS	0,17	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14	0,11	0,11	0,11	0,15	0,15	0,15
455 Kg Peso Adulto, 9.0 Kg pico de producción												
Leche, Kg.d ⁻¹	7,6	9,0	8,2	6,5	4,9	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ca, % MS	0,30	0,32	0,30	0,27	0,24	0,22	0,15	0,15	0,15	0,24	0,24	0,24
P, % MS	0,20	0,21	0,19	0,18	0,17	0,15	0,11	0,11	0,11	0,15	0,15	0,15
550 Kg Peso Adulto, 4.5 Kg pico de producción												
Leche, Kg.d ⁻¹	3,8	4,5	4,0	3,3	2,5	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ca, % MS	0,24	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,15	0,15	0,15	0,26	0,25	0,25
P, % MS	0,17	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14	0,12	0,12	0,12	0,16	0,16	0,16
550 Kg Peso Adulto, 9.0 Kg pico de producción												
Leche, Kg.d ⁻¹	7,6	9,0	8,2	6,5	4,9	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ca, % MS	0,29	0,31	0,29	0,26	0,24	0,22	0,15	0,15	0,15	0,26	0,25	0,25
P, % MS	0,19	0,21	0,19	0,18	0,17	0,15	0,12	0,12	0,12	0,16	0,16	0,16
635 Kg Peso Adulto, 4.5 Kg pico de producción												
Leche, Kg.d ⁻¹	3,8	4,5	4,0	3,3	2,5	1,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ca, % MS	0,23	0,25	0,23	0,21	0,20	0,19	0,16	0,16	0,16	0,27	0,26	0,26
P, % MS	0,17	0,17	0,16	0,15	0,15	0,14	0,12	0,12	0,12	0,17	0,17	0,16
635 Kg Peso Adulto, 9.0 Kg pico de producción												
Leche, Kg.d ⁻¹	7,6	9,0	8,2	6,5	4,9	3,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Ca, % MS	0,28	0,30	0,28	0,26	0,24	0,22	0,16	0,16	0,16	0,27	0,26	0,26
P, % MS	0,19	0,20	0,19	0,18	0,17	0,16	0,12	0,12	0,12	0,17	0,17	0,16

^aIncluye la lactancia y la gestación a partir del tercer mes después del parto.

^bPeso cuando la deposición de proteína es mínima y aumenta la de grasa corporal y producción máxima de leche al segundo mes después del parto.

^cPromedio de producción de leche por mes. A partir del mes séptimo la producción diaria se considera cero.

^dMateria seca.

Fuente: Modificado de NRC. Nutrients Requirements for Beef Cattle. Update, (2000).

En la Tabla 4.4 se presentan los requerimientos de los otros macro y micro-minerales, los máximos niveles tolerables para bovinos en crecimiento y ceba, y vacas en gestación y lactancia. Es de anotar que estos valores cambian con respecto al sexo, edad, raza, estado fisiológico y nivel de producción.

Para minerales como el cromo y el níquel se han encontrado respuestas positivas en la respuesta inmune y en la producción de carne y leche; sin embargo, no se incluyen en la siguiente tabla, debido a que no se han determinado los requerimientos. Las concentraciones máximas tolerables para estos dos elementos son de 1000 ppm y 50 ppm, respectivamente.

Tabla 4.4. Requerimientos de minerales para ganado de carne

Mineral	Crecimiento y Ceba	Vacas		Máximo Límite Tolerable	Impacto
		Gestación	Inicio Lactancia		
Sodio %	0,07	0,07	0,10	4,0	Prod. leche ^a
Cloro %	-----	-----	-----	4,0	Prod. leche
Magnesio %	0,10	0,12	0,20	0,40	Crecimiento
Potasio %	0,60	0,60	0,70	3,0	Reproducción
Azufre %	0,15	0,15	0,15	0,40	Crecimiento
Cobalto ppm	0,10	0,10	0,10	10,0	Crecimiento
Cobre ppm	10	10	10	100	Crecimiento
Hierro ppm	50	50	50	1000	Crecimiento
Molibdeno ppm	-----	-----	-----	6	Crecimiento
Manganeso ppm	20	40	40	1000	Reproducción
Selenio ppm	0,10	0,10	0,10	2,0	Inmunidad
Yodo ppm	0,50	0,50	0,50	50,0	Prod. leche
Zinc ppm	30	30	30	500	Inmunidad

^aProducción de Leche.

Fuente: Modificado de: NRC. Nutrients Requirements for Beef Cattle. Update, (2000).

Posteriormente, se debe realizar un análisis de la concentración foliar de minerales mayores y menores en los pastos y forrajes utilizados (ensilajes y heno), y de los subproductos de la agroindustria. La concentración y la biodisponibilidad de los minerales en los forrajes y los subproductos de la agroindustria varía ampliamente. Los niveles de minerales en un mismo tipo de forraje cambia dependiendo del estado de madurez, la fertilización, el tipo de suelo, la especie evaluada y la capacidad de extracción de la planta. La concentración en los subproductos de la agroindustria también es variable y se encuentra afectada por los métodos de procesamiento.

Debido a esto, es indispensable el análisis de los minerales contenidos en todos los alimentos, con el fin de formular un suplemento mineral que resuelva los requerimientos al menor costo posible. Para esto se debe acudir a un laboratorio de reconocida trayectoria. Para algunos minerales como el Cl, no existen técnicas de evaluación confiables.

En la Tabla 4.5 se presenta la concentración de minerales de los pastos del género *Brachiaria*, de pastos de corte, de leguminosas forrajeras y de corte, de ensilajes y de gallinaza y concentrado que se utilizan en explotaciones ganaderas del departamento del Meta.

Comparando la concentración de minerales en los forrajes de los Llanos Orientales con los requerimientos para diferentes estados de producción, se observa que bajo estas condiciones, el Ca y el P son deficientes para el ganado de carne, en la mayoría de los casos.

Así mismo, la concentración de S de los pastos y forrajes no alcanza a llenar los requerimientos en crecimiento, ceba, gestación y producción de leche; sin embargo, es importante destacar la buena concentración de Ca, Mg y K en leguminosas como el maní forrajero, Kudzú, *Desmodium ovalifolium*, *Cratylia argentea* y el "botón de oro". Estas leguminosas, en algunos casos, no suplen las demandas de P para la producción de leche, ni de S, cobre y zinc para crecimiento, producción de leche y reproducción.

Por otra parte, los pastos pueden aportar niveles adecuados de Mg y K, para el crecimiento, producción de leche y reproducción, aunque estos elementos son deficientes en el suelo, principalmente el K, hecho que puede estar relacionado con la capacidad de extracción de estos nutrientes por la planta y por la capacidad de restitución de K, especialmente, que tienen estos suelos, gracias a la presencia de arcillas tipo 2:1 vermiculita (Dávila *et al.*, 1998).

Como se puede apreciar en los resultados de calidad foliar de la Tabla 4.5, hay una alta variación de la concentración de minerales aun dentro de un mismo forraje, demostrando el efecto que tiene la concentración de minerales en el suelo sobre la concentración de minerales en el forraje, lo cual está directamente relacionado con la localidad o sitio donde se establece la pastura o cultivo forrajero.

Entre los microminerales analizados, el Cu y Zn son deficientes en el tejido foliar; pero el Fe y Mn, se encuentran en alta concentración, especialmente este último. Trabajos realizados por Salinas (1989) con fertilización de los microminerales Cu y Zn, en gramíneas y leguminosas forrajeras en condiciones de los Llanos colombianos, demostraron que aunque la producción de forraje no se afectaba con su aplicación al suelo, sí se mejoraba su concentración foliar, lo que permitía llenar los requerimientos de los bovinos.

Tabla 4.5. Concentración de minerales de algunos pastos del género *Brachiaria*, de pastos de corte, de ensilajes, de leguminosas y de gallinaza y concentrado que se utilizan en explotaciones ganaderas del departamento del Meta

Pasto/sitio	Ca	P	Mg	K	S	Fe	Cu	Mn	Zn
	%			ppm					
<i>B. decumbens</i>									
Cumaryl	0,32	0,21	0,29	1,24	0,27	118	4	205	21
El Dorado	0,28	0,17	0,21	1,02	0,13	217	4	212	21
Restrepo	0,24	0,24	0,25	1,31	0,13	170	5	364	24
Villavicencio	0,45	0,23	0,24	1,20	0,10	78	4	250	25
<i>B. humidicola</i>									
Cumaryl	0,19	0,17	0,21	1,10	0,11	136	3	240	19
Puerto López	0,14	0,13	0,17	1,70	0,18	76	7	101	20
<i>B. Dictyoneura</i>									
Puerto López	0,14	0,12	0,20	0,90	0,13	41	3	91	18
Villavicencio	0,25	0,20	0,21	1,30	0,12	60	4	247	28
Toledo									
Cumaryl	0,35	0,18	0,26	1,25	0,16	93	6	184	23
Villavicencio	0,48	0,22	0,24	1,20	0,10	70	5	250	24
Grama nativa									
<i>Homolepis aturensis</i>									
Villavicencio	0,50	0,20	0,20	1,50	0,20	105	5	168	42
Imperial									
Piedemonte	0,35	0,19	0,28	1,02	0,15	59	4	382	47
<i>P. Phaseoloides</i>									
cv.Kudzú									
Villavicencio	0,91	0,17	0,21	1,20	0,10	275	31	700	37
<i>D. ovalifolium. cv.</i>									
Maquenque									
Villavicencio	1,13	0,18	0,19	1,0	0,09	412	26	437	29
King Grass									
Puerto López	0,29	0,22	0,16	4,46	0,20	105	4	83	21
Maralfalfa cogollo									
Piedemonte	0,20	0,30	0,20	1,71	0,12	126	6	111	20
Maralfalfa integral									
Cumaryl	0,22	0,25	0,19	1,92	0,12	121	5	76	24
<i>Cratylia argentea</i>									
Guamal	0,59	0,39	0,40	1,38	0,25	62	7	255	76
Puerto López	0,67	0,18	0,28	1,27	0,13	32	4	44	13
Ensilaje cratylia-caña									
Puerto López	0,46	0,24	0,31	1,03	0,14	111	4	208	33
Maní forrajero									
Villavicencio	1,05	0,22	0,65	0,80	0,14	125	10	114	30
Botón de oro									
Villavicencio	1,08	0,68	0,58	3,55	0,27	158	7	205	64
Ensilaje de Maíz									
Cumaryl	0,12	0,19	0,14	1,21	0,05	95	5	91	17
Puerto López	0,28	0,10	0,18	0,57	0,16	109	12	209	14
Ensilaje maíz+soya									
forrajera									
Puerto López	0,31	0,18	0,20	1,19	0,16	410	10	55	15
Gallinaza	2,72	1,94	0,78	1,70	0,57	860	51	435	345
Concentrado	1,08	1,16	0,38	1,11	0,46	500	14	126	28

Fuente: Rincón, (2006); Parra, (2004); Laredo y Cuesta, (1988); Gómez et al., (1994).

Con los resultados de la concentración mineral de los forrajes y suplementos se pueden identificar las principales deficiencias, pero también se debe considerar la disponibilidad del mineral en dicha fuente. Así un resultado de laboratorio indique que un mineral en particular no presenta deficiencias, esto no asegura que el 100% del mineral esté disponible o que existan interacciones que afecten su absorción. Algunos factores que afectan la disponibilidad del mineral son: la edad del animal, el estado previo del consumo de minerales y la fuente del mineral a suplementar. Como regla general para la interpretación de los resultados, la concentración del mineral en el forraje se debe descontar en un 50%, con el fin de tener en cuenta una baja biodisponibilidad del elemento.

Adicionalmente, es necesario analizar la concentración mineral del agua de bebida de los animales, ya que puede presentar alta concentración de sal (cloruro de Na), Fe y S que afectan la absorción de Cu y Se. En la Tabla 4.6 se presentan los niveles máximos recomendados de minerales en el agua.

Tabla 4.6. Niveles máximos recomendados de minerales en el agua de bebida para bovinos

Mineral	Máximo nivel recomendado (mg/L)
Aluminio	5,0
Arsénico	0,05
Bario	1,0
Boro	5,0
Cadmio	0,01
Calcio	1000
Cloro	1000
Cromo	0,05
Cobalto	1,0
Cianuro	0,2
Dureza (CaCO ₃)	2000
Flúor	1,2
Hierro	0,4
Plomo	0,05
Magnesio	1000
Manganeso	0,05
Nitratos	40
Sulfatos (SO ₄)	500
Yodo	1,0

Fuente: Lalman y McMurphy, OSU.

Finalmente, se debe estimar el consumo de alimento. Para bovinos en pastoreo, una forma práctica de estimar el consumo es considerar que para forrajes de baja calidad equivale a 1,5% del peso corporal; para pastos de mediana calidad, de 2,0%, y para praderas de buena calidad, del 2,5%.

RECOMENDACIONES PARA EL SUMINISTRO DE MINERALES

El nivel de sal blanca o cloruro de sodio (NaCl) en la mezcla de minerales afecta considerablemente el consumo, que se utiliza para controlar la ingesta de la sal mineralizada. Cuando se presenta bajo consumo de minerales se puede aumentar el consumo con el uso de la melaza. El consumo diario de sal mineralizada depende de la edad y peso del animal, del estado fisiológico, de la calidad de la pradera y de la época del año.

Para conocer el consumo diario de sal, es necesario mantener un registro por potrero que incluya el número de animales y la cantidad y frecuencia de suministro de sal. En cuanto al número de saladeros, debe haber al menos un saladero por cada 30 a 50 animales, con tapa para protegerlo de la lluvia y el sol, y de fácil acceso para los animales. Se deben ubicar cercanos a las fuentes de agua, donde haya abundante pasto, sombra o en las áreas de descanso y evitar áreas encharcadas o con escaso pasto.

Los saladeros se deben revisar al menos dos veces por semana y mantenerlos limpios, secos y frescos, y que tengan sal permanentemente. Un buen saladero debe mantener la sal seca, ser portátil y resistente a la actividad de los animales y a la corrosión. Lo recomendable es que sean hechos de madera, fibra de vidrio o plástico. Los saladeros en concreto funcionan bien, pero no se pueden trasladar.

El aporte de minerales es mayor cuando existe buena disponibilidad de forraje tierno en la pradera, pero disminuye en la época seca. Así mismo, el consumo, la concentración de minerales y la digestibilidad disminuyen cuando aumenta la madurez del pasto. En el caso de un suplemento proteico energético, se recomienda incluir los minerales en la mezcla. Como punto importante, se debe evitar la mezcla de minerales traza en la finca, debido al riesgo potencial de toxicidad o a errores en la mezcla.

Minerales orgánicos vs. inorgánicos

El tipo de minerales en la dieta puede afectar la eficiencia de producción y la relación costo beneficio de la suplementación. Cuando se compra una sal mineralizada es importante tener en cuenta la concentración de los minerales y su biodisponibilidad (Tabla 4.7).

Las fuentes inorgánicas se encuentran comúnmente en la naturaleza o se sintetizan de fuentes naturales, no se encuentran unidas a una molécula portadora y se suministran como una premezcla mineral. La biodisponibilidad de las fuentes de minerales como sulfatos y cloruros es mayor que la de los óxidos. Una excepción es el óxido de Mg, que tiene buena absorción (55%), pero que en los óxidos de Cu y Fe es baja (15%).

Por el contrario, las fuentes de minerales orgánicos se caracterizan por la presencia de un aminoácido o carbohidrato portador del mineral traza que se quiere suministrar. En un proceso llamado quelación, la molécula orgánica portadora se une químicamente al mineral traza de interés. Los minerales que se suplementan en forma orgánica son: Cu, Co, Zn, Mn, Fe, Mg, I y Se.

Las fuentes orgánicas tiene mayor biodisponibilidad que las fuentes inorgánicas, pero el costo de los minerales orgánicos es mayor. Cuando se van a utilizar los minerales orgánicos, se deben evaluar cuidadosamente los beneficios que se obtienen en producción (mayor ganancia de peso o producción de leche y mejor reproducción), con respecto a los costos invertidos en la suplementación. La respuesta en producción con estos minerales es variable y su uso se recomienda en casos de estrés (parto, destete o transporte), en novillas con bajo estrés nutricional, en bovinos con alto valor genético o cuando son donantes de embriones o semen. Por ejemplo, el suministro constante de Zn metionina ayuda al control de la laminitis en vacas lecheras.

Tabla 4.7. Biodisponibilidad relativa^a de minerales traza inorgánicos y orgánicos

Mineral	Sulfato	Óxido	Carbonato	Cloruro	Orgánico
Cu	100	0	-	105	130
Mg	100	58	28	-	176
Zn	100	-	60	40	159 - 206

Fuente: Stewart, (2010).

¿Cómo se identifica una deficiencia de minerales?

En los bovinos es difícil estimar una deficiencia de minerales. La mayoría de las deficiencias se relacionan con Ca, P y S, pero también con Cu, Zn y Se. Las deficiencias pueden ser primarias y secundarias.

Las primeras se producen cuando los animales se encuentran pastoreando en praderas de baja calidad nutricional y no se suplementan adecuadamente con sal mineralizada. La deficiencia secundaria se produce cuando el bovino consume minerales en exceso que son antagonistas de otros minerales. Por ejemplo, en las deficiencias de Cu, el suministro en la dieta puede ser el correcto, pero antagonistas como el hierro en exceso disminuyen su absorción.

Pasos para detectar una deficiencia de minerales

Primero se deben descartar otras causas como enfermedades, plantas tóxicas o la deficiencia de energía y proteína. En un hato, los primeros signos de deficiencia de energía y proteína son la pérdida de condición corporal y la disminución de la eficiencia reproductiva.

Después, se debe evaluar el consumo de sal mineralizada en el potrero. Para esto es recomendable llevar un registro simple de la cantidad que se suministra en cada potrero, la frecuencia de suministro y el número de animales por potrero. Con esta información se calcula el consumo diario aproximado de sal mineralizada por animal. Posteriormente, se evalúan las fuentes de minerales y la concentración de minerales traza. En la Tabla 4.8 se presentan las principales fuentes de suplementación mineral para bovinos:

Tabla 4.8. Fuentes minerales recomendadas para ganado de carne

Mineral	Fuente inorgánica	Fuente orgánica
S	Flor de Azufre	-----
Ca	Carbonato de Ca	-----
Co	Carbonato de Co	Glucoheptonato de Co
	Sulfato de Co	-----
Cu	Sulfato de Cu Cloruro de Cu tribásico	Complejo Cu - AA
		Cobre polisacárido
		Proteinato de Cu
P	Fosfato dicálcico	-----
	Fosfato monocálcico	
Fe	Sulfato ferroso heptahidratado	Complejo Fe - AA
		Fe Polisacárido
Mg	Sulfato de Mg	Mg Polisacárido
	Óxido de Mg	-----
Mn	Sulfato de Mn	Complejo Mn - AA
		Mn metionina
		Mn polisacárido
		Mn proteinato
K	Cloruro de K	-----
	Bicarbonato de K	-----
Se	Selenito de Na	Selenometionina
		Levadura alta en Se
I	Yodato de K	EDDI (etilendiaminodihidroydo)
Zn	Sulfato de Zn Óxido de Zn	Complejo Zn - AA
		Zn metionina
		Zn polisacárido
		Zn proteinato

Fuente: Wright, (2008).

Actualmente se utilizan sales mineralizadas proteinadas, las cuales contienen una fuente de nitrógeno (torta de algodón o urea), con el fin de mejorar el aporte de nitrógeno para bovinos que pastorean praderas con baja calidad nutricional y que contienen niveles de proteína por debajo del 7%, situación común en la época seca. Con el uso de estas sales, se observa un aumento en el consumo de forraje y un mejoramiento de la ganancia diaria de peso; sin embargo, para que haya una buena respuesta, es necesario que la disponibilidad de forraje en la pradera no sea limitante, caso que generalmente no se presenta en la época seca, cuando la disponibilidad y calidad de la pradera disminuyen.

En algunos casos se utilizan los bloques de urea, melaza y minerales como estrategia de suplementación para bovinos. Estos contienen una fuente de nitrógeno no proteico (urea), de carbohidratos altamente fermentables y de minerales de rápida disponibilidad para la síntesis de proteína microbiana en el rumen. Debido a la capacidad de síntesis de proteína microbiana a partir de la urea, este tipo de estrategia de suplementación es benéfica cuando los animales pastorean praderas de baja calidad nutricional o cuando se suplementan con residuos de cosecha. Con este tipo de bloques se debe verificar el consumo de minerales, ya que en algunos casos no aportan los niveles requeridos.

En los casos de sospecha de una deficiencia secundaria, es necesario realizar análisis de laboratorio, incluyendo los niveles de minerales en el agua. Se pueden tomar muestras de sangre o biopsias de hígado, pero estos análisis son costosos y se debe considerar si vale la pena realizarlos. Por último, se recomienda que se solicite ayuda a los técnicos y especialistas en nutrición animal.

Una serie de minerales que no se requieren (o se necesitan en muy pequeñas cantidades) pueden causar toxicidad en ganado de carne. En Tabla 4.9 se describen los minerales tóxicos para bovinos y los niveles máximos tolerables:

Tabla 4.9. Concentraciones máximas tolerables de minerales tóxicos para bovinos

Elemento	Concentración máxima (ppm)
Aluminio	1000
Arsénico	50 (100 para formas orgánicas)
Bromo	200
Cadmio	0.5
Flúor	40 – 100
Plomo	30
Mercurio	2
Estroncio	2000

Fuente: NRC, (1980).

CONCLUSIONES

Los bovinos en pastoreo requieren una serie de macro y microminerales para obtener niveles adecuados de producción. En los forrajes del trópico colombiano existen varios elementos limitantes como Ca, P, S, Cu y Zn, los cuales,

cuando son deficientes, afectan el crecimiento, la producción de leche, la reproducción y la salud de los animales. Existen numerosas interacciones entre minerales que afectan su disponibilidad. Los signos de deficiencia y toxicidad se describen, pero muchos de ellos no se presentan hasta que haya una deficiencia severa. Los bovinos se deben suplementar con sal mineralizada, de acuerdo con la calidad del forraje, y teniendo en cuenta edad, sexo, raza, estado fisiológico y nivel de producción.

La concentración de minerales en los forrajes varía considerablemente y depende de factores como la especie de pasto, la concentración de minerales en el suelo, el nivel de fertilización de la pradera, las condiciones climáticas y la época del año.

Generalmente, las sales mineralizadas comerciales suplen las necesidades de minerales de los bovinos, ya que existen sales regionalizadas, de acuerdo con las particularidades de suelo y forraje de cada zona ganadera del país. La efectividad de cada uno de estos productos se debe determinar por el análisis de la concentración mineral del forraje, por los suplementos que se suministren en la explotación y por el tipo de suelo de las praderas. En un programa de suplementación mineral siempre se deben evaluar la relación costo - beneficio de la utilización de estos suplementos.

BIBLIOGRAFÍA

- Agricultural Research Council. 1980. The Nutrient Requirements of Ruminant Livestock. Slough, England: Commonwealth Agricultural Bureaux.
- CSIRO. 2007. Nutrient Requirements of Domesticated Ruminants. 295 p.
- Dávila, G.; Guerrero, R. & Rojas, E. 1998. Disponibilidad de K en algunos suelos palmeros de los Llanos Orientales de Colombia. Suelos Ecuatoriales. Vol. 28. Pp.71-80.
- Gómez, S.J.; Velásquez, P. G. & Cárdenas G.D. 1994. Importancia de la nutrición mineral en bovinos de la Orinoquia colombiana. Boletín técnico No. 233. Bogotá, D.C.: Corpoica. ICA. 19 p.
- Laredo C., M.A. & Cuesta, P.A. 1988. Tabla de contenido nutricional en pastos y forrajes de Colombia. Instituto Colombiano Agropecuario. Colanta.
- Lalman, D. & McMurphy, C. Vitamin and Mineral Nutrition of Grazing Cattle. Department of Animal Science. Oklahoma Cooperative Extension Service. Division of Agricultural Resources and Natural Resources. Oklahoma State University. 16 p. [en línea]. Disponible en: <http://pods.dasnr.okstate.edu/docushare/dsweb/Get/Document-2032/E-861web.pdf> [Consultada: el 21 de octubre de 2010].
- McDowell, L.R. 1985. Nutrition of Grazing Ruminants in Warm Climates. Orlando, Academic Press. 443 p.
- National Research Council. 1980. Mineral Tolerance of Domestic Animals. Washington, D.C.: National Academy of Sciences. 577 p.
- National Research Council. 2000. Nutrients Requeriments for Beef Cattle. Update. 248 p. [en línea].
- Disponible en: http://books.nap.edu/openbook.php?record_id=9791&page=54 [Consultada: 20 de octubre de 2010].
- National Research Council. 2001. Nutrient Requirements of Dairy Cattle: Seventh Revised Edition. National Academy of Sciences. [en línea]. Disponible en: <http://www.nap.edu/catalog/9825.html> [Consultada: 18 de noviembre de 2008].
- Parra, J.L. 2004. Características tecnológicas productivas y aspectos de salud del ternero en el sistema bovino doble propósito, Piedemonte llanero. Boletín de investigación N°5. Villavicencio, Meta: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria, PRONATTA. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA. 52 p.
- Rincón, A. 2006. Factores de degradación y tecnología de recuperación de praderas. Llanos Orientales de Colombia. Boletín Técnico. Villavicencio, Meta: CORPOICA. Gobernación del Meta. 78 p.
- Salinas, J.G. 1989. Fertilización de pastos en suelos ácidos de los trópicos. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. 215 p.
- Stewart, L. 2010. Mineral Supplements for Beef Cattle Cooperative Extension. University of Georgia. 16 p.
- Vanness, S.J.; Griffin, W.A.; Bremer, V.R.; Erickson, G.E. & Klopfenstein, T.J. 2010. Relating Hydrogen Sulfide Levels to Polioencephalomalacia. Beef Cattle Report. University of Nebraska, Lincoln. Extension. [en línea]. Disponible en: <http://beef.unl.edu/beefreports/201028.shtml> [Consultada: 20 de septiembre de 2011].

- Villar, C.C; Gómez, S.J. & Pérez, B.R. 1992. Efecto del consumo de diferentes niveles de flor de azufre sobre los niveles de infestación por la garrapata *Boophilus microplus* y la ganancia de peso en animales criollos. Ibagué: XVIII Congreso nacional de Medicina Veterinaria y de Zootecnia.
- Villar, C.C. 2006. Importancia del azufre en la producción de carne vacuna y en el control de garrapatas en ganado en pastoreo en los Llanos Orientales de Colombia. [en línea]. Disponible en: <http://www.engormix.com/MA-ganaderia-carne/nutricion/articulos/importancia-azufre-produccion-carne-t973/141-p0.htm>. [Consultado: 29 de diciembre de 2010].
- Ward, M. & Lardy, G. 2005. Beef Cattle Mineral Nutrition. [en línea]. Disponible en: <http://www.ag.ndsu.edu/pubs/ansci/beef/as1287w.htm>. [Consultado: el 18 de agosto de 2010].
- Wright, C. 2008. Formulating Mineral Supplements for Beef Cows. South Dakota Extension Cooperative Service. 5 p.
- Zanton, G. & Heinrichs, J. Opportunities and Challenges of Feeding Distillers Grains to Dairy Cows. Department of Dairy and Animal Science. The Pennsylvania State University. 8 p. [en línea]. Disponible en: <http://www.das.psu.edu/research-extension/dairy/nutrition/pdf/feeding-distillers-grains-09-146.pdf> [Consultada: 20 de diciembre de 2010].

CONCENTRACIÓN DE MINERALES EN SUELOS Y FERTILIZACIÓN DE PASTOS EN LOS LLANOS ORIENTALES DE COLOMBIA

Alvaro Rincón Castillo¹

INTRODUCCIÓN

Los suelos de la Orinoquia son ácidos, con bajas concentraciones de nutrientes y altos niveles de aluminio, que inciden en la baja producción y calidad nutritiva del forraje de las praderas, y en los bajos índices productivos de las explotaciones bovinas de la región. La mayoría de las gramíneas nativas de las sabanas bien drenadas de la altillanura son de baja producción y deficiente calidad nutritiva, y constituyen el recurso alimenticio de los hatos de cría de la región (sistemas de producción extensivos); mientras que en el piedemonte predominan praderas mejoradas con gramíneas introducidas del género *Brachiaria*, dedicadas a sistemas de ceiba y doble propósito.

Los pastos que se han entregado a los productores después de varios años de investigación, se caracterizan por su adaptación a las condiciones limitantes de los suelos ácidos (Rao *et al.*, 1998; CIAT, 1984). La tolerancia al aluminio (Al) entre especies y variedades de pasto se debe a una adaptación genética, como resultado de una selección natural en suelos ácidos. Una de las principales características de adaptación de las especies forrajeras tropicales a suelos ácidos es su crecimiento y producción bajo condiciones limitantes de fósforo (P), lo cual ha permitido un gran avance en la producción ganadera de la región, con pastos poco exigentes en nutrientes. Sin embargo, bajo las

¹ J.A. Ph.D. Investigador de CORPOICA, C.I. La Libertad. arincon@corpoica.org.co

actuales circunstancias de aumento del precio de la tierra, de mayores costos de producción, de mayor exigencia de los mercados con respecto a productos de mejor calidad y del aumento progresivo de la degradación de praderas, es necesario el desarrollo de una ganadería más competitiva, en la que el concepto de uso de mínimos insumos tiene que cambiar por el uso adecuado de insumos que permitan el aumento de la capacidad de carga en las praderas y mayor producción de carne o leche por animal.

En este capítulo se da a conocer la concentración de minerales en suelos del piedemonte del Meta, del piedemonte del Casanare y de la altillanura bien drenada, que sirven de base para determinar las deficiencias nutricionales que pueden llegar a tener los pastos y los bovinos; posteriormente se presentan recomendaciones de fertilización de los pastos, con base en las concentraciones de los elementos en el suelo y en las exigencias de los pastos, respaldadas en resultados de investigación en nutrición mineral, desarrolladas en suelos ácidos de los Llanos Orientales de Colombia.

MINERALES EN SUELOS DE FINCAS GANADERAS DEL PIEDEMONTE LLANERO Y LA ALTILLANURA

Para conocer las características químicas de los suelos del piedemonte llanero y de la altillanura, en la Tabla 5.1 se presenta la información resumida de 75 fincas del piedemonte del Casanare, 95 del piedemonte del Meta y 49 de la altillanura plana. Por la gran dispersión de los datos obtenidos, no se presentan promedios de la concentración de cada mineral. En cambio, se dan a conocer valores expresados con otras medidas de tendencia central, como la "mediana" y la "moda", las cuales indican el valor que más se repite en los datos de las respectivas fincas, (Parra, 2004).

- De esta forma, se puede observar que en los suelos del piedemonte del Casanare, la materia orgánica fluctuó entre 0,9% y 4,8%, y el valor que más se presentó en las fincas fue de 1,8%, demostrando el bajo contenido de materia orgánica en estos suelos. La misma tendencia se presentó en suelos del piedemonte del Meta, aunque aquí el valor máximo encontrado fue de 5,8%, en tanto en los suelos de la altillanura, la materia orgánica estuvo entre 1,3 y 3,6%.
- El P fue uno de los minerales que más variación presentó en los suelos del piedemonte, porque el mínimo encontrado fue de $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y el valor máximo fue de $65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y $55 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, en Casanare y Meta, respectivamente.

Las deficiencias de P disponible son más notorias en los suelos de la altillanura, donde el valor que más se repitió en los análisis fue de $1 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ y el máximo encontrado fue de $3 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

- La concentración mínima de Ca en los suelos del Casanare fue de $0,15 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$; en tanto, en el piedemonte del Meta y en la altillanura fue de $0,29$ y $0,25 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente; sin embargo, los valores máximos encontrados fueron superiores en el piedemonte, alcanzando 9 y $4,23 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ en Casanare y Meta, respectivamente, mientras que en la altillanura solo fue de $1,14 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- Las concentraciones mínimas de Mg en las tres regiones, estuvieron entre $0,07$ y $0,08 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ y de potasio (K) entre $0,04$ y $0,05 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$; sin embargo, se encontraron suelos con altas concentraciones de estos minerales, especialmente en el piedemonte con $3,5$ y $1,7 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de Mg y $3,4$ y $1,2 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de K en los piedemontes del Casanare y el Meta, respectivamente.
- La concentración de S en las tres regiones presentó valores muy cercanos entre el mínimo encontrado y el que más se repitió en los análisis, llegando a solo 1 y $2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- Las mayores concentraciones de Fe se presentaron en el piedemonte del Meta y del Casanare con 592 y $491 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectivamente, pero también se presentaron fincas donde la concentración de este microelemento fue de 6 y $11 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en el mismo orden. En la altillanura, el valor máximo de Fe fue de $135 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- La concentración de B se presentó en un rango muy amplio, especialmente en el piedemonte del Casanare, donde estuvo entre $0,05$ y $0,88 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, en tanto, la concentración de B que más se repitió en los muestreos realizados fue de $0,16$, $0,22$ y $0,19 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en los piedemontes del Casanare y del Meta, y en la altillanura, respectivamente.
- Las concentraciones de Cu en los piedemontes del Meta y Casanare fueron similares y sus valores fluctuaron entre $0,2$ y $4,4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; en tanto, en la altillanura se registraron más bajas, porque estuvieron entre $0,4$ y $1,4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.
- Los máximos valores de Mn estuvieron en 53 , 96 y $70 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pero el valor que más se repitió en los muestreos fue de 3 , 12 y $2,4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en los piedemontes del Casanare y el Meta, y en la altillanura, respectivamente.

Tabla 5.1. Algunas estadísticas descriptivas de las concentraciones de minerales en los suelos de fincas ganaderas de los piedemontes del Casanare y el Meta, y de la altillanura plana. 2004

	Piedemonte del Casanare (75 fincas)					Piedemonte del Meta (95 fincas)					Altillanura (49 fincas)				
	Mediana	Moda	Mínimo	Máximo		Mediana	Moda	Mínimo	Máximo		Mediana	Moda	Mínimo	Máximo	
pH	4,7	4,7	4,1	5,6		4,5	4,5	4	5,4		4,5	4,5	4,2	4,9	
MtO (%)	1,65	1,8	0,9	4,8		2,3	2,3	0,8	5,8		2,3	2	1,3	3,6	
P (mg kg ⁻¹)	3	2	1	65		2	1	1	55		1	1	1	3	
Ac.i	1,4	0,6	0	6,3		2,2	2,1	0,2	5		2,9	3,5	0,5	4,3	
Al (cmol kg ⁻¹)	1,1	1,5	0,1	4,9		1,6	2	0,2	3,8		2,3	1,9	0,3	3,2	
Ca (cmol kg ⁻¹)	0,57	0,16	0,15	9		0,6	0,36	0,29	4,23		0,48	0,29	0,25	1,14	
Mg (cmol kg ⁻¹)	0,33	0,17	0,07	3,5		0,16	0,12	0,07	1,07		0,11	0,11	0,08	0,4	
K (cmol kg ⁻¹)	0,13	0,09	0,04	3,4		0,12	0,13	0,04	1,02		0,08	0,06	0,05	0,18	
Na (cmol kg ⁻¹)	0,2	0,2	0,15	0,31		0,07	0,07	0,03	0,3		0,1	0,1	0,04	0,21	
CIC	3,2	2,5	1,2	13,3		3,4	3,4	1,4	5,6		3,6	3,2	2	5,1	
S (mg kg ⁻¹)	3	2	1	18		3	2	1	15		3	1	1	7	
Fe (mg kg ⁻¹)	112	86	11	491		97	28	6	592		62	96	16	135	
B (mg kg ⁻¹)	0,22	0,16	0,05	0,88		0,24	0,22	0,1	0,42		0,21	0,19	0,14	0,29	
Cu (mg kg ⁻¹)	1	1,4	0,2	4,3		1,3	0,8	0,2	4,4		0,6	0,6	0,4	1,4	
Mn (mg kg ⁻¹)	13	3	0,5	53		12	12	0,7	96		3	2,4	1,2	70	
Zn (mg kg ⁻¹)	1,2	0,4	0,1	11,6		1	0,8	0,3	7,1		0,4	0,4	0,2	0,9	

Fuente: Parra, (2004), Archivo digital de análisis de suelos.

REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DE LOS PASTOS

Para la siembra de pastos en los llanos colombianos, tradicionalmente se realiza la fertilización de establecimiento con una fuente de P y Ca, como la roca fosfórica, y en otros casos se aplica cal dolomítica en dosis que no supera los 300 kg ha⁻¹. La respuesta a esta práctica es una disponibilidad aceptable de forraje durante el primer año de pastoreo, la cual decae posteriormente por una nutrición deficiente de las plantas, como consecuencia de la escasa fertilización de establecimiento y por falta de fertilización de mantenimiento. Se pueden presentar casos excepcionales en los que la fertilidad natural de los suelos permite que se mantenga una buena producción de forraje, como en las vegas de los ríos o en algunos sitios cercanos a la cordillera. La fertilización en las praderas se debe hacer con base en la disponibilidad en el suelo de los minerales esenciales para el buen desarrollo de las especies forrajeras adaptadas a condiciones de suelos ácidos. La mayor parte de los suelos de la altillanura y de las terrazas del piedemonte llanero se encuentran en un nivel bajo y medio de fertilidad, presentándose alta deficiencia de todos los nutrientes esenciales para el desarrollo de los pastos.

De acuerdo con el potencial de rendimiento de forraje y de los requerimientos nutricionales de los pastos, se han clasificado en pastos menos exigentes (*B. decumbens* cv. Amargo, *B. humidicola* cv dulce y *B. dictyoneura*

Tabla 5.2. Rangos de la concentración de minerales en los suelos para el buen desarrollo de pastos en suelos ácidos

Mineral	Pastos menos exigentes (Amargo, Dulce, Llanero)	Pastos exigentes (Toledo, Marandu, Mulato II, <i>Panicum sp</i>)
P (mg kg ⁻¹)	5 - 10	10 - 15
K (cmol kg ⁻¹)	0,10 - 0,15	0,15 - 0,20
Ca (cmol kg ⁻¹)	0,5 - 1,0	1,5 - 2,0
Mg (cmol kg ⁻¹)	0,12 - 0,20	0,3 - 0,4
S (mg kg ⁻¹)	15 - 20	20 - 25
Zn (mg kg ⁻¹)	1,0 - 1,5	1,5 - 2,0
Cu (mg kg ⁻¹)	1,0 - 2,0	2,0 - 3,0
B (mg kg ⁻¹)	0,5 - 1,0	1 - 1,5

Fuente: Adaptado de Salinas (1985); Gomes de Sousa *et al.*, (2004); Martha Júnior *et al.*, (2004); Mendes *et al.*, (2004) & Rincón (2010).

cv. Llanero), que soportan una saturación de bases entre 30% y 35%, y pastos exigentes, (*B. brizantha* cv Toledo y cv. Marandu, el híbrido de *Brachiaria* cv Mulato II y algunos *Panicum maximum* cv Mombaça, cv. Tanzania, cv. Massai), los cuales requieren de una saturación de base entre 40% y 45% (Vilela *et al.*, 1998). Estos requerimientos de fertilidad se han establecido para lograr una buena producción de forraje y para reducir los riesgos de degradación de praderas por deficiencia nutricional en los pastos (Tabla 5.2).

• Fertilización fosfatada

El P es el elemento más deficiente en los suelos ácidos de la Orinoquia colombiana, no solo por su baja concentración, sino por la capacidad de estos suelos para fijar e inmovilizar este mineral. Sin embargo, la mayoría de las especies comerciales de pastos adaptados a suelos ácidos requiere entre 10 y 20 kg de P para lograr el 80% de su máxima producción al establecimiento (CIAT, 1986). A pesar de la tolerancia de las especies forrajeras seleccionadas a bajos niveles de P disponible en el suelo, es necesario aplicar este nutrimento en la siembra y posteriormente en la fase de pastoreo. Esto se debe a que durante las fases iniciales de desarrollo, las plántulas requieren P fácilmente asimilable, que les permita iniciar sus procesos energéticos de fotosíntesis y absorción de otros nutrimentos importantes para la rápida formación y crecimiento de raíces; y en pastoreo, por la necesidad de reposición el P que sale del sistema en carne o leche.

Concentración de P disponible en los suelos de los llanos

La deficiencia de P en los suelos de los Llanos Orientales ha sido comprobada durante varios años por los análisis de suelos realizados por diferentes proyectos ejecutados en fincas de productores. La frecuencia de la concentración de P en 69 fincas muestreadas del piedemonte del Casanare, se presenta en el histograma (Figura 5.1), donde se puede apreciar que en 40 de estas fincas, la concentración de P estuvo entre 1 y 3 mg·kg⁻¹, representando el 58% de las fincas evaluadas. Sin embargo, en este departamento también hay suelos con concentraciones altas, aunque en menor proporción. En los suelos del piedemonte del Meta, de las 92 fincas evaluadas se encontró que en 59 fincas (64%) el P disponible estuvo entre 1 y 2 mg·kg⁻¹. En estas fincas también se encontró una menor proporción de suelos con concentraciones de P entre 3 y 20 mg·kg⁻¹. En la altillanura plana, el 77% de las fincas presentó valores de P entre 1 y 2 mg·kg⁻¹, y solo en un pequeño número de fincas, las concentraciones de P fueron más altas, considerándose como la región más deficitaria en este elemento, de las tres evaluadas (Parra, 2004).

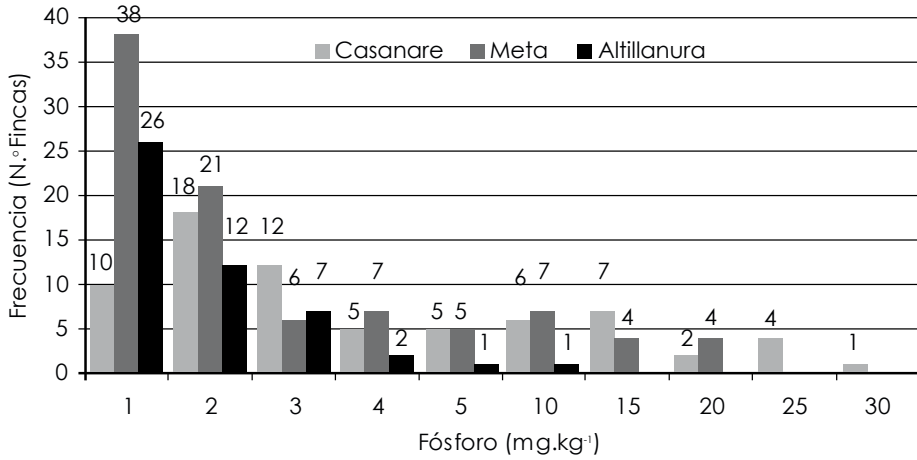


Figura 5.1. Histograma de frecuencias de la concentración de P en suelos de los piedemontes del Casanare (69 fincas) y del Meta (92 fincas), y de la alfilaranura plana (49 fincas).

Fuente: Parra, (2004); (Rincón, 2010).

La mayoría de los cultivos recuperan solamente del 10% al 30% del P en el primer año, después de la aplicación (Potash and Phosphate Institute, 1997). El porcentaje de recuperación varía ampliamente dependiendo, principalmente, de factores como las fuentes de P, tipo de suelo, de cultivo, del método de aplicación y del clima. Se realizaron estudios en Carimagua (alfilaranura colombiana), para ver la relación entre el P aplicado en un oxisol y el P que queda en la solución del suelo (Ayarza, 1991); se pudo comprobar que para alcanzar la concentración de 0,2 mg.kg⁻¹ de P, hay que aplicar más de 500 mg.kg⁻¹ (aproximadamente 1000 kg.ha⁻¹) de este elemento.

La fijación del P en las arcillas del suelo es el principal limitante que tiene este elemento para poder ser aprovechado por las plantas. El P presente en el suelo y el suministrado por los fertilizantes, fácilmente puede ser atrapado por otros elementos como el Al, formando compuestos no disponibles para las raíces de las plantas. En evaluaciones realizadas en el piedemonte del Meta, se pudo comprobar la alta fijación de P, especialmente cuando se aplicó fertilización fosfórica utilizando como fuentes escoria Thomas, superfosfato triple (SFT) y roca fosfórica, encontrándose que el P total estuvo entre 185 y 160 mg.kg⁻¹ y el P disponible fluctuó entre 5,7 y 3,3 mg.kg⁻¹ (Tabla 5.3), indicando una fijación superior al 94%. El mismo efecto se presentó cuando se fertilizó con una dosis de 20 y 40 kg.ha⁻¹ de P; sin embargo, se pudo evidenciar menor P disponible en el tratamiento donde no se aplicó.

Tabla 5.3. Concentración de P total y P disponible en un suelo ácido tratado con tres fuentes de P y con dos niveles de fertilización fosfórica en el piedemonte llanero

Variable	Fósforo (P) total (mg·kg ⁻¹)	Fósforo (P) disponible (mg·kg ⁻¹)	Fósforo (P) disponible (%)
Escorias Thomas	185 a	5,7 a	3,1
Súper fosfato triple	173 b	3,9 b	2,3
Roca fosfórica	160 b	3,3 b	2,1
Testigo (sin P)	174 b	3,2 b	1,8
Significancia	*	*	
Dosis de P (kg·ha ⁻¹)			
0	174 a	3,2 b	1,8
20	193 a	3,0 b	1,6
40	183 a	5,6 a	3,7
Significancia	ns	*	
Cv. (%)	38,1	30,4	

Nota: Promedios con letras diferentes en la misma columna difieren en forma significativa según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

La mayor concentración del P total y del P disponible se localizó en los primeros cinco cm del perfil del suelo (Tabla 5.4), demostrando la poca movilidad que tiene este elemento en el suelo. Muy poco P se pierde por lixiviación, pero la erosión es la forma como puede perderse este nutriente, ya que mantiene su lugar donde ha sido dispuesto (Potash and Phosphate Institute, 1997). Estas pérdidas son más evidentes cuando la fertilización fosfórica de los pastos se hace en forma superficial, sin hacer labranza o roturación del suelo que ha sido compactado por el pisoteo de los bovinos. El fertilizante es arrastrado por las fuertes lluvias que ocurren tradicionalmente en los llanos colombianos.

Tabla 5.4. Concentración de P total y disponible en el suelo, evaluado a tres profundidades en el piedemonte llanero

Profundidad (cm)	P total (mg·kg ⁻¹)	P disponible (mg·kg ⁻¹)	P disponible (%)
0 a 5	267 a	9,1 a	3,4
5 a 10	173 b	1,5 b	0,9
10 a 20	121 b	1,6 b	1,3
Cv. (%)	26,5	25	

Nota: promedios con letras diferentes en la misma columna difieren en forma significativa según la prueba de Tukey ($p < 0,05$)

La respuesta de los pastos a la fertilización fosfatada depende, entre otros factores, de la disponibilidad de P y de otros nutrientes en el suelo, de la especie de pasto y de las condiciones ambientales. Especies menos exigentes

como el *Brachiaria* son más eficientes en la absorción del P en ausencia de fertilización fosfatada (Gomes *et al.*, 2004). Esto pudo ser comprobado en evaluaciones de dosis crecientes de P, desde 25 hasta 100 kgP·ha⁻¹ en *B. decumbens* del piedemonte llanero, encontrándose que no se presentaron diferencias entre las dosis evaluadas, con respecto a la producción de forraje (Figura 5.2); sin embargo, es importante el incremento presentado al pasar de 800 kgMS·ha⁻¹ de biomasa, antes de aplicar los tratamientos, a un promedio de 2.200 kgMS·ha⁻¹, obtenido con las dosis aplicadas.

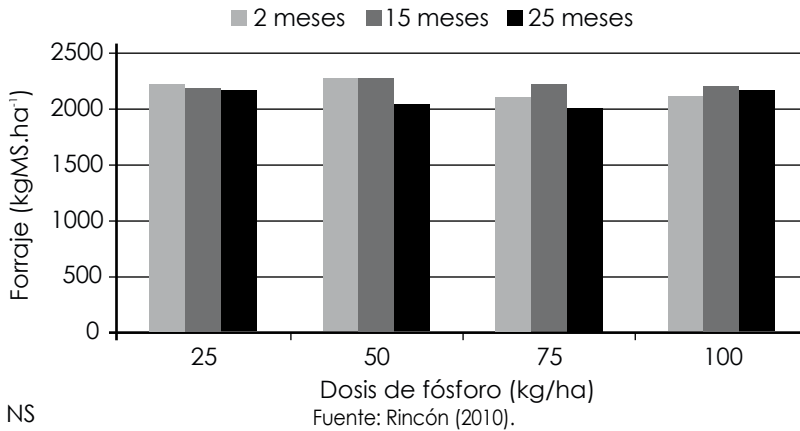


Figura 5.2. Producción de forraje de *B. decumbens* con cuatro dosis de P a los 2, 15 y 25 meses después de su aplicación en el piedemonte llanero.

La fertilización fosfatada tiene efectos positivos en el contenido foliar de este elemento en los pastos, demostrando ser una alternativa para suministrar P al bovino por medio de los forrajes de pastoreo. Evaluaciones realizadas en el piedemonte llanero demostraron que la aplicación de 20 y 40 kgP·ha⁻¹ al suelo, mejoraron las concentraciones a 0,16% y 0,19% de P en el forraje (Figura 5.3), acercándose a los requerimientos que tiene el bovino de ceba, que es de 0,23%.

Se ha establecido que las raíces de un cultivo en crecimiento contactan solamente del 1% al 3% del suelo en los primeros 15 a 20 cm del perfil del suelo. En términos prácticos, esto significa que se debe suministrar cantidades adecuadas de P al suelo, para que este pueda soportar un crecimiento óptimo del cultivo. La concentración de P en la zona radical debe ser lo suficientemente alta para asegurar su disponibilidad durante todas las etapas del crecimiento (Potash and Phosphate Institute, 1997).

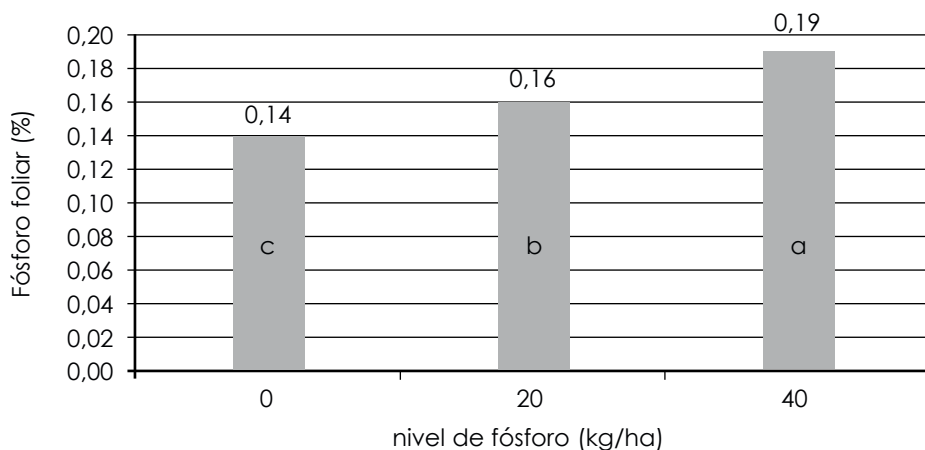


Figura 5.3. P foliar en el pasto *B. decumbens*, al aplicar 20 y 40 kg ha⁻¹ de P en el piedemonte llanero.

Nota: valores en columnas con letras diferentes, difieren en forma significativa según la prueba de Tukey ($P < 0,05$).

La concentración de P en los fertilizantes se expresa como equivalente de P_2O_5 y su disponibilidad para la planta depende del fertilizante. Para los pastos se ha considerado como apropiado la aplicación de fertilizantes de lenta disponibilidad como la roca fosfórica; sin embargo, para un buen desarrollo inicial de raíces es importante aplicar una parte del P de rápida disponibilidad.

Uno de los grandes obstáculos para la aceptación de las rocas fosfóricas como fertilizantes, ha sido la imposibilidad de predecir su efecto. En varios casos, su efectividad ha sido similar a la de fertilizantes con alta solubilidad de P, pero en otros casos, su efectividad ha sido baja (CIAT, 1986); sin embargo, por su abundancia y el menor costo se constituye en una alternativa importante de fertilización fosfórica.

Frente a este tema que presenta gran controversia, Guerrero (1982) hace los siguientes planteamientos: a nivel teórico se ha sostenido que en los suelos ácidos con alta capacidad de fijación de fosfatos, las fuentes de P de lenta solubilidad son las más efectivas, por cuanto el suministro de P es gradual a lo largo del ciclo vegetativo del cultivo, en tanto las fuentes de alta solubilidad, al permitir una liberación rápida del P, determinan una fijación intensa del mismo en un tiempo muy corto después de su aplicación. Este planteamiento, considerado casi un postulado, ha sido cuestionado y puesto en tela de juicio por los resultados obtenidos por Amézquita (1981), que trabajó con fuentes

hidrosolubles o de alta solubilidad (superfosfato triple, fosfato monoamónico y fosfato diamónico) y fuentes citrosolubles o de lenta solubilidad (roca fosfórica y calfos) aplicadas en un suelo andosólico de alta capacidad de fijación de P.

Los resultados obtenidos demostraron que todas las fuentes fosfatadas disminuyeron sostenidamente su eficiencia para suministrar P a las plantas de maíz, a lo largo de cinco meses después de su aplicación. Las fuentes de mayor solubilidad mostraron una significativa mayor persistencia de su efecto a lo largo del tiempo, que las fuentes de baja solubilidad. Mientras que el fosfato monoamónico y diamónico, después de dos meses de aplicados, trabajaron con una eficiencia en el suministro de P equivalente al 90% y 82%, respectivamente, y la eficiencia de la roca fosfórica disminuyó a un 65% y la de calfos a un 30%. Al cabo de cinco meses de aplicados, el fosfato monoamónico y diamónico seguían conservando el 50% y 40% de eficiencia, en tanto que la roca fosfórica cayó a un 30 % y en el efecto del calfos, desapareció.

- **Fertilización nitrogenada**

Concentración de N disponible en suelos de los llanos

Los suelos del piedemonte del Casanare, en su mayoría, se han caracterizado por tener un 2% de materia orgánica, lo cual representa el 80% de las fincas evaluadas. En tanto, en el piedemonte del Meta, de las 92 fincas evaluadas, en 35 el contenido de materia orgánica fue de 2%; sin embargo; en esta región se encontró una mayor cantidad de fincas (59) con concentraciones superiores, los cuales fluctuaron entre 2,5 y 5% de materia orgánica. En la altillanura plana se encontró que en 41 de las 49 fincas, la materia orgánica estuvo entre 2% y 3% (Figura 5.4) (Parra, 2004 y Rincón, 2010).

Para determinar el efecto del N en la producción y calidad de los pastos en los suelos ácidos de los Llanos Orientales, se han realizado algunas evaluaciones de diferentes dosis de este elemento. La respuesta en producción de forraje de *B. decumbens* a cuatro dosis de N aplicadas (50, 100, 150 y 200 kgN·ha⁻¹), fue en aumento hasta la dosis de 150 kgN·ha⁻¹, resultando ser superior significativamente con respecto a las otras dosis evaluadas a los dos meses de realizada su aplicación. A los 15 meses después de aplicados los tratamientos de N, la respuesta fue ascendente hasta la dosis de 100 kgN·ha⁻¹, donde se obtuvo 2443 kgMS·ha⁻¹; sin embargo, en las dosis de 150 y 200 kg de N, se presentó un leve descenso a 1955 y 2163 kgMS·ha⁻¹, respectivamente (Figura 5.5). Lo anterior puede ser explicado por las pérdidas de N-NH₃ y por volatilización,

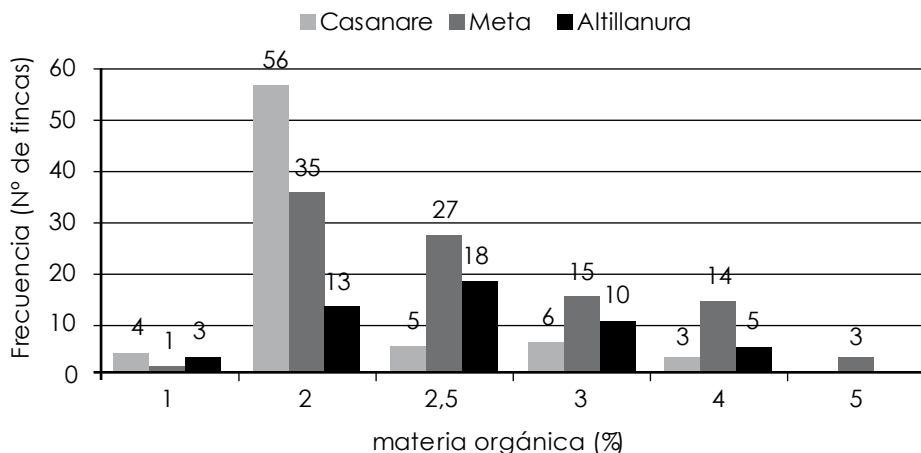


Figura 5.4. Histograma de contenido de materia orgánica en suelos de Casanare (69 fincas), piedemonte del Meta (92 fincas) y altillanura (49 fincas).

principalmente cuando se emplea la urea. Estas pérdidas son más elevadas cuando se utilizan dosis altas de este fertilizante en pastos, con aplicaciones superficiales al voleo. En condiciones favorables, las pérdidas pueden llegar al 25%, pero cuando las condiciones son desfavorables, como la elevada temperatura y la ausencia de precipitación, pueden llegar al 80% (Martha Júnior *et al.*, 2004). Sin embargo, es necesario tener en cuenta que aquellas especies adaptadas a suelos ácidos y con baja concentración de nutrientes, por naturaleza presentan baja respuesta a la fertilización nitrogenada, como lo mencionan Alvim *et al.*, (1990) y Rao *et al.*, (1998).

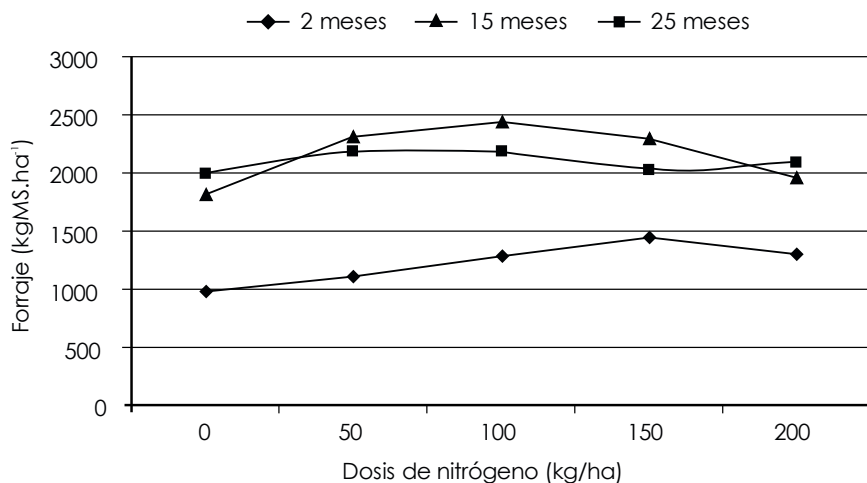


Figura 5.5. Producción de forraje de *B. decumbens* con cinco dosis de N, a los 2, 15 y 25 meses de aplicado, en un suelo ácido del piedemonte llanero.

Los análisis de calidad foliar realizados a los 60 días de aplicado el N, dieron como resultado un contenido de proteína superior en la dosis de 100 kgN·ha⁻¹, con un valor de 10,1%, mientras que en el testigo donde no se aplicó N, la proteína cruda fue de 8,5% (Tabla 5.15).

Otros parámetros de importancia para determinar la calidad del forraje, tienen que ver con la fibra en detergente ácido (FDA), que incluye a la hemicelulosa, cuyos valores en la dosis de 150 kgN·ha⁻¹ fue inferior (28,7 %), con respecto a los otros niveles de N evaluados. En la fibra en detergente neutro (FDN), que incluye celulosa, hemicelulosa y lignina, no se presentaron diferencias significativas en su concentración foliar, obteniéndose un promedio de 62,1%. La digestibilidad del forraje estuvo entre un rango de 55% a 65% (Tabla 5.5).

Tabla 5.5. Contenido de proteína cruda, fibra y digestibilidad (%) del *B. decumbens* con dosis de N a los dos meses de su aplicación, en el piedemonte llanero

Dosis de N	Proteína cruda	Materia seca	FDN	FDA	Digestibilidad
0	8,5 b	29,6	60,3	32,1 a	54,9
50	9,3 ab	29,5	60,6	31,2 a	65,7
100	10,1 a	29,4	61,2	32,5 a	66,4
150	9,6 ab	29,1	61,6	28,7 b	65,1
200	9,4 ab	27,6	62,1	32,2 a	65,1
Significancia	*	ns	ns	*	ns
Cv. (%)	9,8	7,9	3,1	6,3	4,1

Promedios con letras diferentes en la misma columna, difieren en forma significativa, según la prueba de Tukey (P<0.05).

En evaluaciones realizadas en un pasto con mayor potencial de producción, pero más exigente en nutrientes del suelo, como es el *Brachiaria brizantha* cv. Toledo, se encontró que la producción de biomasa fue superior a los 30 días de aplicado en N, a favor de las dosis de 150 y 200 kgN·ha⁻¹, con unos rendimientos de 1597 y 1575 kgMS·ha⁻¹, respectivamente (Figura 5.6), en tanto, la menor producción se obtuvo donde no se aplicó N, con 640 kgMS·ha⁻¹. A los 75 días, la producción de forraje no presentó diferencias en las dosis de 50, 100, 150 y 200 kgN·ha⁻¹, con un promedio de 1567 kgMS·ha⁻¹; sin embargo, si se presentaron diferencias (P< 0,01) con respecto al testigo donde no se aplicó N, obteniéndose 1296 kgMS·ha⁻¹. En la producción de forraje, 90 días después de aplicadas las dosis de N, no se apreciaron diferencias en todos los tratamientos evaluados, obteniéndose con un promedio de 1725 kgMS·ha⁻¹.

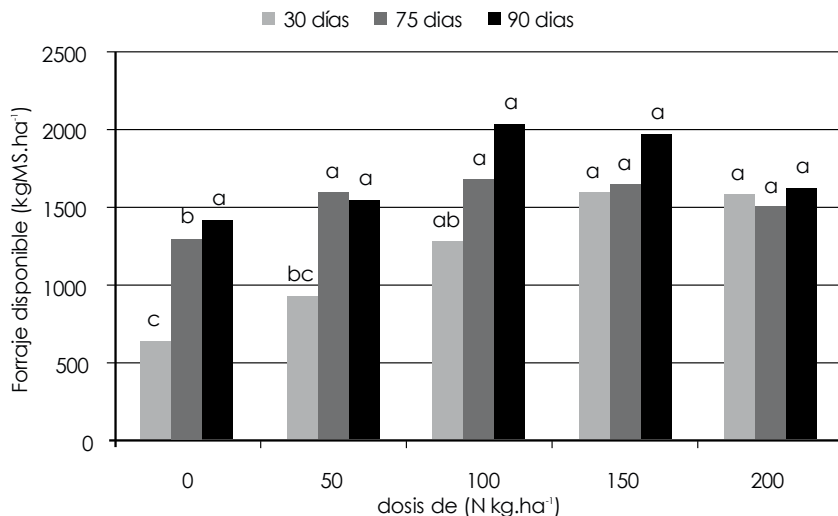


Figura 5.6. Producción de forraje de pasto Toledo con cinco dosis de N a los 30, 75 y 90 días después de su aplicación, en un suelo ácido del piedemonte llanero.

Del N que se aplica al suelo como fertilizante, solo de 40% a 70% se recupera por las plantas. En suelos arenosos y regiones muy lluviosas, la recuperación puede ser aún menor, por el lavado que ocurre en estas condiciones. Una solución parcial a este problema es la producción de fertilizantes de liberación controlada por medio de un recubrimiento, como ocurre con la urea recubierta con S.

Para hacer fertilización nitrogenada en las praderas hay que tener en cuenta tres aspectos: la presencia de materia orgánica en el suelo, el contenido de proteína en las hojas de los pastos y la producción de forraje durante el año. El aporte de N a los suelos ácidos de la Orinoquia colombiana es bajo, considerando que estos suelos tienen menos de 3% de materia orgánica. Un suelo con un 2% de materia orgánica aporta 40 kg de N.ha.año⁻¹, con una densidad aparente del suelo de 1 g.cc⁻¹.

• Fertilización con Ca, Mg y K

Concentración de Ca, Mg y K disponible en los suelos de los llanos

En el piedemonte del Casanare, 65% de las fincas evaluadas presentó una concentración de Ca entre 0,5 y 0,8 cmol.kg⁻¹. Sin embargo, es importante tener en cuenta que 15 fincas, de las 69 evaluadas, presentaron entre 1,8 y 5 cmol.kg⁻¹ de Ca. La misma tendencia se observó en las fincas del piedemonte

del Meta, ya que en 65 fincas (70%) de las 92 muestreadas, el rango estuvo entre 0,5 y 0,8 cmol.kg^{-1} , pero no se presentaron suelos con altas concentraciones, como los obtenidos en las fincas de Casanare. En la altillanura, las fincas con baja presencia de Ca alcanzó el 85%, confirmandose como una región con grandes limitaciones de este elemento en el suelo (Figura 5.7).

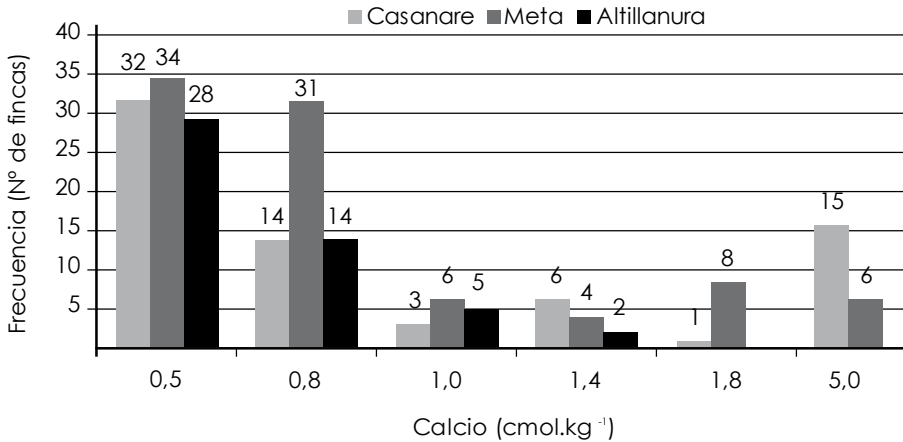


Figura 5.7. Histograma de la concentración de Ca en suelos de los piedemontes del Casanare (69 fincas) y del Meta (92 fincas), y en la altillanura (49 fincas) (Parra, 2004 y Rincón, 2010).

Los suelos del piedemonte del Casanare se caracterizan por tener concentraciones de Mg superiores a 0,3 cmol.kg^{-1} en 60% de las fincas evaluadas, llegando a presentarse valores altos de 2 y 3 cmol.kg^{-1} . En 40% de las fincas se obtuvo entre 0,1 y 0,2 cmol.kg^{-1} de Mg. En el piedemonte del Meta la proporción de fincas con concentraciones de Mg menores a 0,2 cmol.kg^{-1} fue de 63%, sin embargo, allí se presentó una buena cantidad de suelos con una rango entre 0,25 y 0,5 cmol.kg^{-1} .

Lo contrario sucedió en las fincas de la altillanura, donde el 71% de las fincas evaluadas, la concentración de Mg estuvo entre 0,10 y 0,15 cmol.kg^{-1} , y una mínima cantidad (13 fincas) alcanzó valores entre 0,2 y 0,4 cmol.kg^{-1} (Figura 5.8).

En el piedemonte del Casanare, cerca de 70% de las fincas evaluadas presentó una concentración de K superior a 0,15 cmol.kg^{-1} y solo el 30% se puede considerar como deficitario, al presentar valores entre 0,06 y 0,10 cmol.kg^{-1} . En el piedemonte del Meta se apreció la misma tendencia, encontrándose que en 62% de las fincas evaluadas, la concentración de K fue superior a 0,15 cmol.kg^{-1} . Caso contrario sucedió en las fincas de la altillanura, porque en las 49

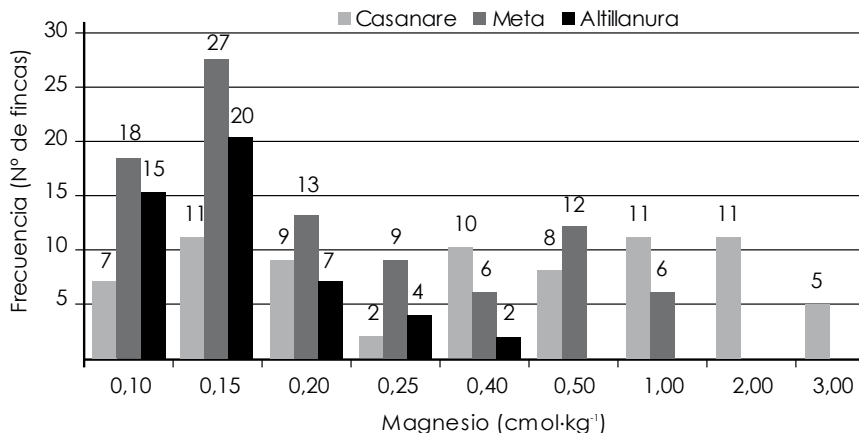


Figura 5.8. Histograma de la concentración de Mg en suelos de los piedemontes del Casanare (69 fincas) y del Meta (92 fincas), y la altillanura (49 fincas) (Parra, 2004 y Rincón, 2010).

fincas la concentración de K fue inferior a 0,2 cmol.kg⁻¹ y en el 84% de estas fincas los valores estuvieron en un rango entre 0,06 y 0,10 cmol.kg⁻¹, considerado como deficiente (Figura 5.9).

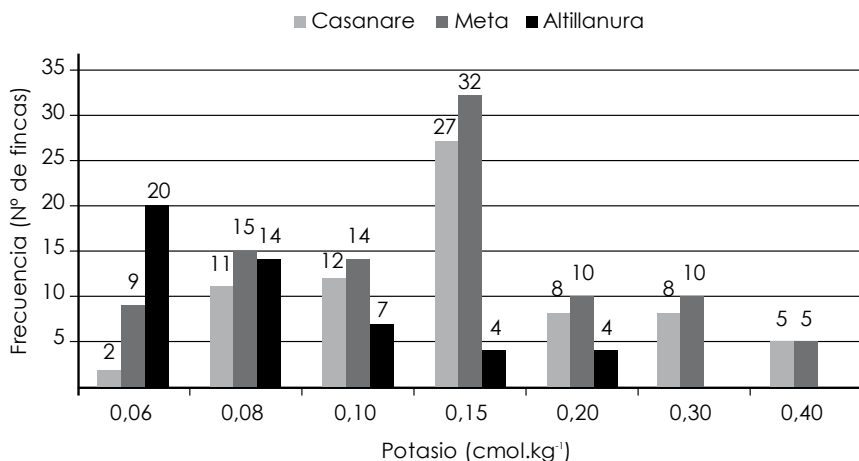


Figura 5.9. Histograma de la concentración de K en suelos de los piedemontes del Casanare (69 fincas) y del Meta (92 fincas), y de la altillanura (49 fincas) (Parra, 2004 y Rincón, 2010).

En evaluaciones realizadas en suelos ácidos del piedemonte llanero, orientadas a incrementar la saturación de bases a 25%, 30%, 35% y 40% mediante la aplicación de cal dolomítica, el Ca fue el mineral que se aplicó en mayor cantidad al suelo, (113, 176, 240, 302 kgCa·ha⁻¹). Como se puede apreciar en la Figura 5.10, estas cantidades de Ca aplicadas no se vieron reflejadas en las concentraciones de este elemento en el suelo a los cuatro meses de su aplica-

ción, al no presentarse diferencias significativas entre los tratamientos ($p>0,05$), encontrándose valores promedios de $0,6 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, sin embargo, a los 15 meses, el Ca aplicado para elevar la saturación de bases a 30%, 35% y 40% fue superior al encontrado en la menor dosis aplicada, para elevar la saturación de bases del suelo al 25%, donde el valor encontrado fue de $0,51 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$. No obstante, en todos los tratamientos aplicados se mejoró la concentración de Ca en el suelo, con respecto a la que tenía antes de aplicar los tratamientos, que era de $0,4 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, a un promedio de $0,6 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, por lo tanto, el incremento de Ca en el suelo fue de $0,2 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, que equivale a $80 \text{ kgCa}\cdot\text{ha}^{-1}$.

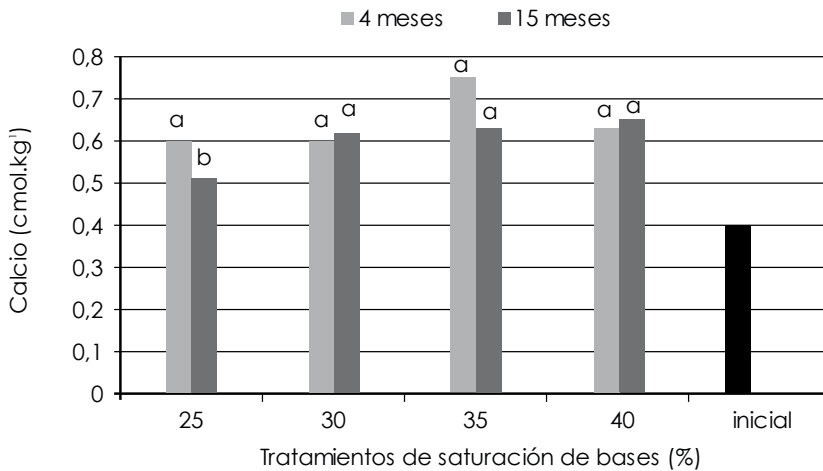


Figura 5.10. Efecto de la aplicación de enmiendas sobre la concentración de Ca en el suelo ácido, tratado para aumentar la saturación de bases a los 4 y 15 meses en el piedemonte llanero.

Nota: valores con letras iguales en columnas de igual trama, no difieren en forma significativa según la prueba de Tukey ($P < 0,05$).

Con la cal dolomítica se aplicaron 14, 22, 30 y $38 \text{ kgMg}\cdot\text{ha}^{-1}$ en los tratamientos de 25%, 30%, 35% y 40% de saturación de bases, respectivamente. Tal como sucedió con el Ca, en los primeros cuatro meses después de su aplicación, no se observaron diferencias entre los tratamientos aplicados, en cambio 15 meses después se encontró una mayor concentración en el suelo ($0,18 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$) en el tratamiento donde se aplicó la mayor cantidad de cal dolomítica para elevar la saturación de bases a 40%, siendo superior con respecto al tratamiento de 25% de saturación de bases. Con relación a la concentración de Mg inicial en el suelo, que era de $0,10 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, se encontró un mejoramiento de su disponibilidad en todos los tratamientos aplicados (Figura 5.11). Es claro que con las aplicaciones de cal dolomítica como fuentes de Ca y Mg, sus concentraciones

en el suelo mejoran, como se ha comprobado en varios trabajos de investigación realizados en suelos ácidos del Brasil, especialmente cuando se aplicó cal para elevar la saturación de bases a 60% y 80% (Cerqueira *et al.*, 2004).

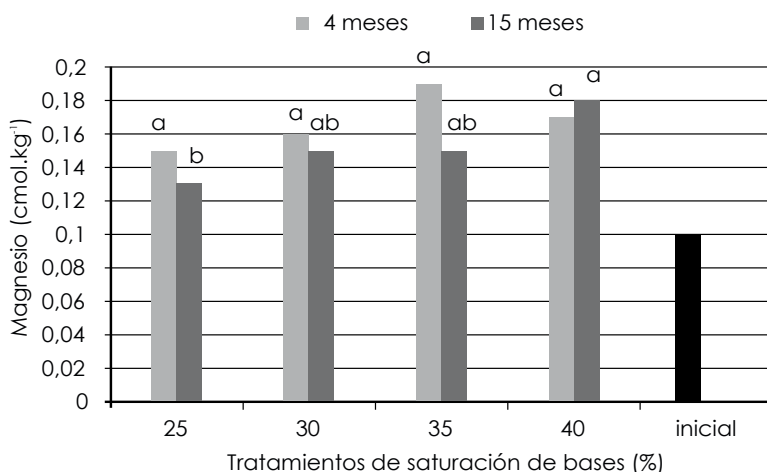


Figura 5.11. Efecto en la concentración de Mg en el suelo ácido, tratado para aumentar la saturación de bases, a los 4 y 15 meses después de aplicadas las enmiendas en el piedemonte llanero.

Nota: valores con letras iguales en columnas de igual color, no difieren en forma significativa según la prueba de Tukey ($P < 0,05$).

Con respecto al efecto de los tratamientos de la cal dolomítica utilizada para elevar la saturación de bases, sobre la calidad foliar del pasto, se pudo comprobar que estos no ejercieron efectos significativos sobre las concentraciones de Ca y Mg en las hojas del pasto (Figura 5.12), obteniendo un promedio de 0,22% de Ca y 0,21% de Mg.

De acuerdo con los requerimientos mínimos para la ceba de ganado, según McDowell *et al.* (1994) las concentraciones de Ca y Mg en el forraje deben ser de 0,40% y 0,10%, respectivamente, y para vacas en lactación de 0,60% y 0,20% en el mismo orden; esto depende del peso del animal, de la ganancia diaria y de la producción de leche. De acuerdo con esto, se puede apreciar que el forraje de *B. decumbens* con los tratamientos para mejorar la saturación de bases del suelo, presentaron concentraciones adecuadas de Mg para llenar los requerimientos de ganado de engorde y de vacas en lactación; sin embargo, el Ca resultó ser deficitario para ambos sistemas de producción.

El Ca, aunque se encontró en mayor cantidad en el suelo como respuesta a las dosis aplicadas, su absorción por la planta presenta mayor limitación que

las otras bases, como son el Mg y el K. Generalmente, la concentración de Ca^{2+} en la solución del suelo es cerca de 10 veces superior que la de K^+ . Pero, la tasa de absorción de Ca^{2+} es generalmente menor que la de K^+ . La capacidad de absorción de Ca^{2+} por los cultivos es limitada, debido a que solamente puede ser asimilada por las "puntas" de las raíces jóvenes, en las cuales las paredes de las células de la endodermis todavía no se han suberizado. La absorción de Ca^{2+} también puede verse deprimida por la presencia competitiva de otros cationes como K^+ y NH_4^+ , Mg^{++} , que son rápidamente absorbidos por las raíces (Guerrero, 1993).

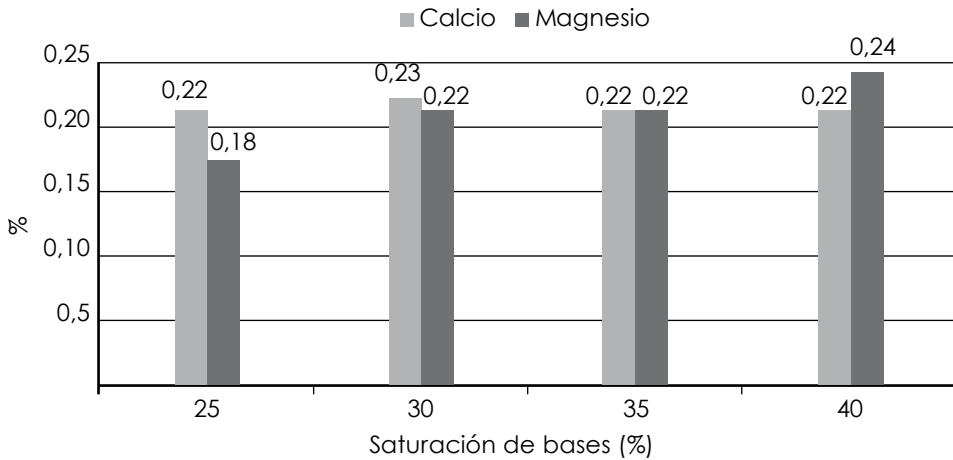


Figura 5.12. Concentración de Ca y Mg en porcentaje en las hojas de *B. decumbens*, desarrollado en suelo ácido tratado para aumentar la saturación de bases en el piedemonte llanero.

Junto con los niveles de cal dolomítica para elevar la saturación de bases, se aplicaron 100 kg de cloruro de K. Cuatro meses después de su aplicación se pudo apreciar que en el tratamiento para elevar la saturación de bases a 35%, la concentración inicial de K de $0,09 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ se aumentó a $0,19 \text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Figura 5.13). A diferencia de las otras bases analizadas, el K volvió a sus niveles iniciales en los muestreos de suelos realizados a los 15 meses después de su aplicación, constituyéndose en uno de los minerales más deficitarios para el desarrollo de cultivos.

En otro experimento donde se evaluaron dosis de 30, 60, 90 y $120 \text{ kgK}\cdot\text{ha}^{-1}$, no se presentaron diferencias entre los niveles de K evaluados, acerca de la concentración de este elemento en el suelo, pero se observó, a los 15 meses de su aplicación, una tendencia incremental en todos los tratamientos, especialmente con las dosis de 90 y $120 \text{ kgK}\cdot\text{ha}^{-1}$, obteniéndose valores de $0,13$

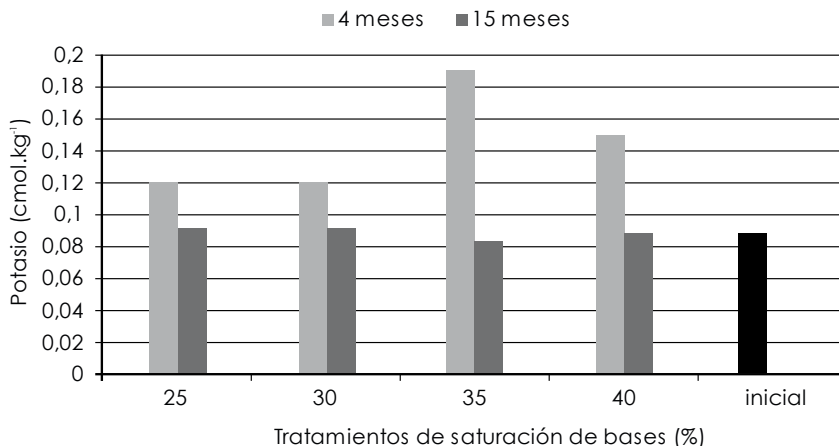


Figura 5.13. Concentración de K en el suelo tratado para aumentar la saturación de bases, a los 4 y 15 meses después de aplicadas las enmiendas en el piedemonte llanero.

cmol.kg⁻¹; sin embargo, a los 25 meses descendió a 0,1 cmol.kg⁻¹ (Figura 5.14). Salinas y García (1985) consideran que una concentración de 0,13 cmol.kg⁻¹ es un nivel alto para el desarrollo de los pastos en suelos ácidos, y 0,10 cmol.kg⁻¹ como una concentración intermedia.

De acuerdo con esto, puede decirse que a los 25 meses de aplicados los tratamientos de K al suelo, en todos los tratamientos aún se encontraban niveles adecuados para las exigencias de pastos como el *B. decumbens*.

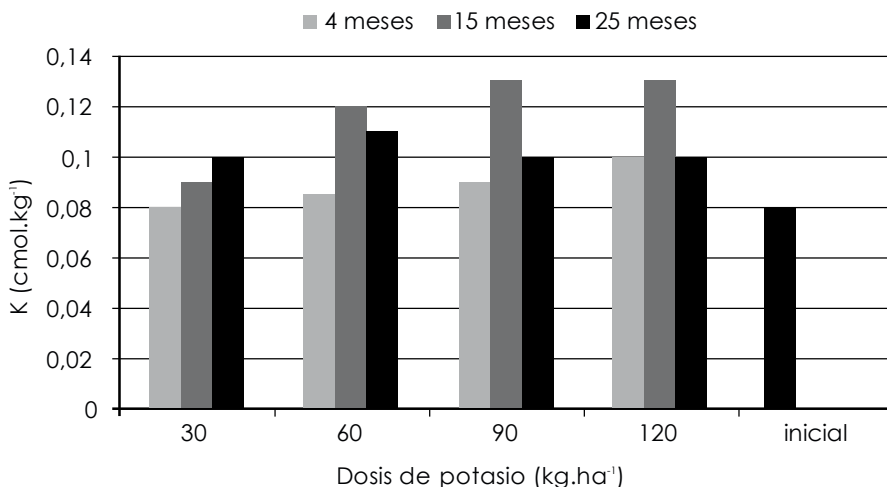


Figura 5.14. Concentración de K en el suelo a los 4, 15 y 25 meses después de su aplicación en el piedemonte llanero.

Con relación a los cuatro niveles de K aplicados al suelo, no se observaron diferencias significativas en la concentración foliar de este elemento (Figura 5.15), obteniéndose un promedio de 0,86%, el cual es suficiente para cumplir con los requerimientos del ganado de ceba; sin embargo, resulta ser algo deficiente para vacas en lactancia, que requieren 0,9% (McDowell *et al.*, 1994; NCR, 1989). Con respecto a las exigencias de K por la planta, el valor encontrado es deficiente, si se tiene en cuenta que la planta de *B. decumbens* requiere 1,2% de K (Mendes *et al.*, 2004).

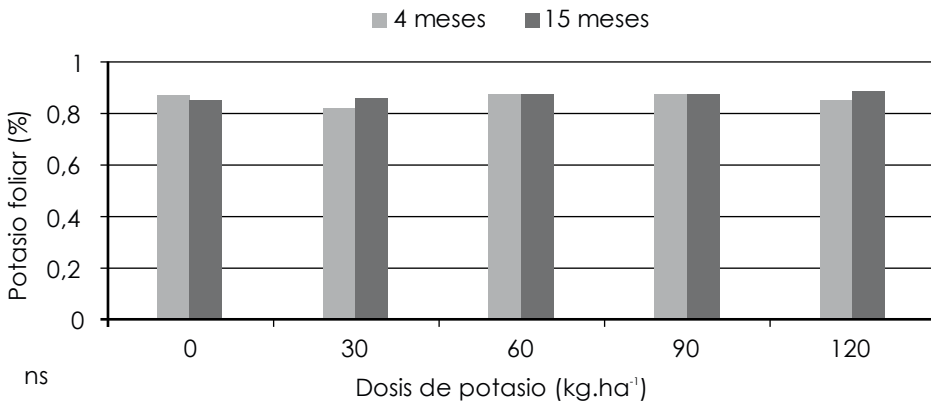


Figura 5.15. Concentración de K en las hojas de *B. decumbens* con cinco dosis de K a los 4 y 15 meses después de aplicado en el piedemonte llanero.

• Fertilización con azufre y micronutrientes

Azufre

La concentración de S en los suelos de las fincas del Casanare mostró que en 39 de las 74 fincas evaluadas fue de 3 mg.kg⁻¹. En general, se pudo observar que 90% de las fincas del Casanare, del piedemonte del Meta y de la altillanura presentaron una concentración de S menor de 6 mg.kg⁻¹. (Figura 5.16), resultando ser altamente deficiente para las exigencias de los pastos adaptados a los suelos ácidos, que es de 15 a 20 mg.kg⁻¹. Por lo tanto, el S se constituye en uno de los nutrientes más deficientes en los suelos de los llanos colombianos.

En un experimento realizado en el piedemonte del Meta, donde se evaluaron las dosis de S de 25, 50, 75 y 100 kg.ha⁻¹, utilizando como fuente yeso agrícola, no se presentaron respuestas en la producción de biomasa, con estas dosis en los tres periodos de evaluación (Figura 5.17). A los dos meses de aplicados

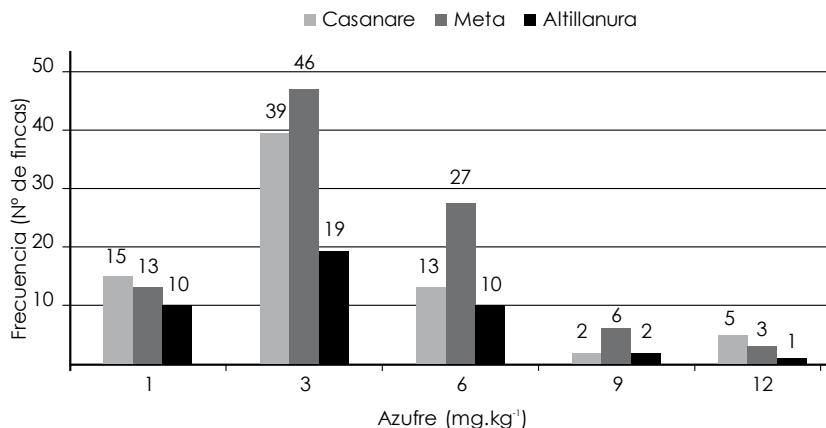


Figura 5.16. Histograma de la concentración de S en suelos del Casanare (74 fincas), del piedemonte del Meta (92 fincas) y de la altillanura (42 fincas) (Parra, 2004 y Rincón, 2010).

los tratamientos se obtuvo un promedio de 1262 kgMS·ha⁻¹; sin embargo, a los 15 meses de su aplicación la producción de forraje aumentó a un promedio de 2283 kgMS·ha⁻¹. A los 25 meses, la disponibilidad de forraje de *B. decumbens* disminuyó a un promedio de 2034 kgMS·ha⁻¹.

Como se puede apreciar, los niveles de S utilizados no ejercieron ningún efecto sobre la producción de biomasa de *B. decumbens* en este experimento, lo que permite concluir que con una dosis de 25 kgS·ha⁻¹, utilizando como fuente el yeso agrícola, es suficiente para la producción de forraje de este pasto en condiciones de suelos ácidos del piedemonte llanero.

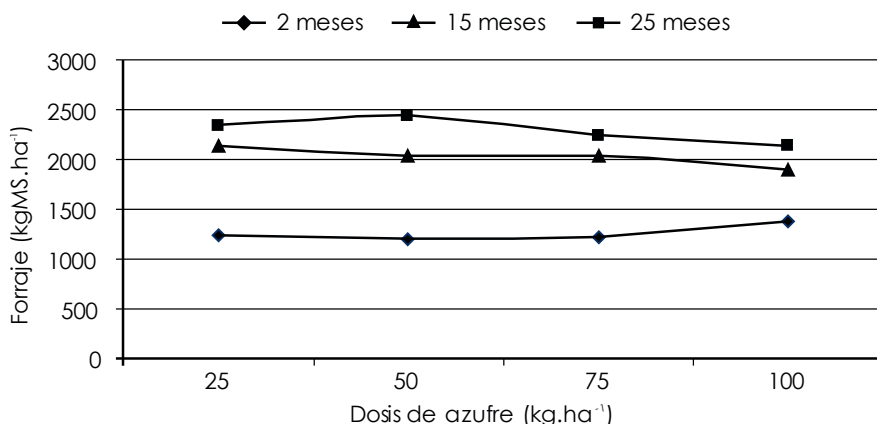


Figura 5.17. Producción de forraje de *B. decumbens* con tratamientos de S a los 2, 15 y 25 meses de su aplicación, en un suelo ácido del piedemonte llanero.

Cuatro meses después de aplicadas las dosis de S no se presentaron diferencias en la concentración de este nutriente en el suelo, con las cuatro dosis evaluadas; sin embargo, a los 15 meses de su aplicación, se pudieron comprobar diferencias significativas a favor de las dosis de 75 y 100 kgS·ha⁻¹, llegando a una concentración de 9,7 y 9,1 mg·kg⁻¹. En las evaluaciones realizadas a los 25 meses, las dosis de S aplicadas no ejercieron ningún efecto en la presencia de este elemento en el suelo, obteniéndose un promedio de 4,9 mg·kg⁻¹.

Es importante tener en cuenta que en todas las dosis de S evaluadas se aumentó su concentración en el suelo, si se compara con el valor inicial antes de aplicar los tratamientos, que era de 2 mg·kg⁻¹ (Tabla 5.6).

Tabla 5.6. Concentración de S en el suelo (mg·kg⁻¹) a los 4, 15 y 25 meses de ser aplicadas las cuatro dosis al *B. decumbens*, en el piedemonte llanero

Dosis de S (kg·ha ⁻¹)	4 meses	15 meses	25 meses
25	5,3 a	6,4 b	4,3 a
50	5,6 a	7,9 b	4,9 a
75	5,5 a	9,7 a	5,5 a
100	5,1 a	9,1 a	5,9 a
Significancia	ns	*	ns
Cv. (%)	19	14	12
Concentración inicial de S (mg·kg ⁻¹)	2		

Nota: Promedios con letras diferentes en la misma columna difieren en forma significativa según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

El S tiene un efecto residual, de tal forma que el aplicado con la fertilización puede estar disponible por varios años, por la elevada capacidad de adsorción del sulfato, especialmente en suelos con mayor contenido de arcillas (Rein y Gomes, 2004).

- **Valor nutritivo del forraje**

En este mismo experimento se encontraron bajas concentraciones de S en las hojas del *B. decumbens*, considerando que una concentración adecuada en el forraje para la alimentación de los bovinos debe estar en 0,15% para animales de ceba y en 0,20% para vacas en lactancia (McDowell *et al*, 1994). Aunque se observó una tendencia de aumento del S foliar con el incremento de la dosis de S aplicada al suelo, las diferencias observadas no fueron signi-

ficativas, (Tabla 5.7) y las concentraciones foliares estuvieron muy deficitarias para atender los requerimientos de los bovinos. Para el desarrollo de los forrajes se han establecido niveles críticos de S foliar con valores entre 0,07% y 0,11% (Santos, 1997; citado por Monteiro *et al.*, 2004).

Otros minerales también presentaron diferencias significativas en su concentración en las hojas de *B. decumbens* cuando se aplicó S y fertilización básica, como sucedió con el P con 0,17%, el K con 0,86% y el Mg con 0,19%. Sin embargo, el Ca, que es un componente del yeso agrícola, no presentó efectos en la concentración foliar del *B. decumbens*.

Tabla 5.7. Concentración de minerales (%) en las hojas de *B. decumbens*, fertilizado con dosis de S, con y sin fertilización básica, en el piedemonte llanero

Tratamiento	P	K	Ca	Mg	S
Con fert. Básica	0,17 a	0,86 a	0,19	0,19 a	0,016
Sin fert. Básica	0,12 b	0,66 b	0,19	0,15 b	0,017
Significancia	*	*	ns	*	ns
Dosis de S (kg·ha ⁻¹)					
25	0,16	0,80	0,19	0,17	0,013
50	0,14	0,73	0,19	0,17	0,014
75	0,15	0,81	0,21	0,17	0,014
100	0,14	0,75	0,19	0,18	0,015
Promedio	0,146	0,765	0,192	0,172	0,014
Significancia	ns	ns	ns	ns	ns
Cv. (%)	14,5	18,1	14,2	14,5	30,8

Nota: Promedios con letra diferentes en la misma columna difieren en forma significativa según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

Cobre y Zinc

La concentración de Cu en 65 fincas de las 72 evaluadas en Casanare fue menor de 2 mg·kg⁻¹, que corresponde a una proporción de 90%; en tanto, en 95 % de las fincas del piedemonte del Meta fue menor de 3 mg·kg⁻¹. En la altillanura plana se pudo comprobar que estos suelos son más deficitarios en este microelemento, porque 50% de las fincas evaluadas presentaron una concentración de solo 0,5 mg·kg⁻¹ de Cu (Figura 5.18).

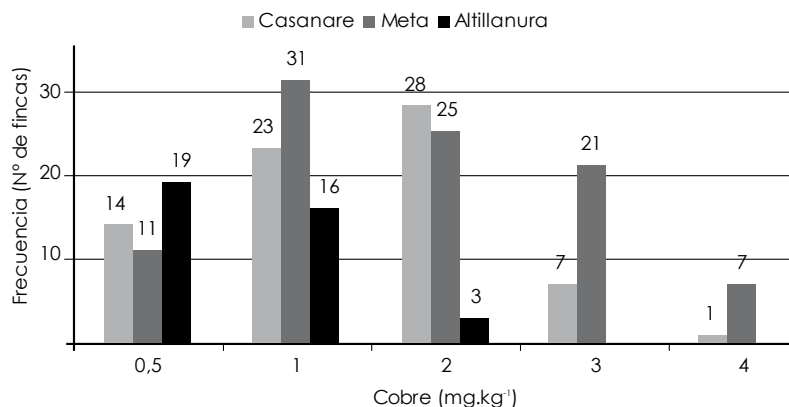


Figura 5.18. Histograma de la concentración de Cu en suelos del Casanare (72 fincas), del piedemonte del Meta (92 fincas) y de la atfillanura (49 fincas).

Fuente: (Parra, 2004 y Rincón, 2010)

En el 85% de las fincas del piedemonte del Casanare, el Zn estuvo entre 0,5 y 2 mg.kg⁻¹, siendo la región de las tres evaluadas con mayor concentración de este micronutriente. En el piedemonte del Meta, el 50% de las 92 fincas presentaron una concentración de 1 mg.kg⁻¹. En tanto, en las fincas de la atfillanura, el mayor número de fincas (24 fincas de las 38 evaluadas) presentaron valores de 0,5 mg.kg⁻¹ de Zn (Figura 5.19).

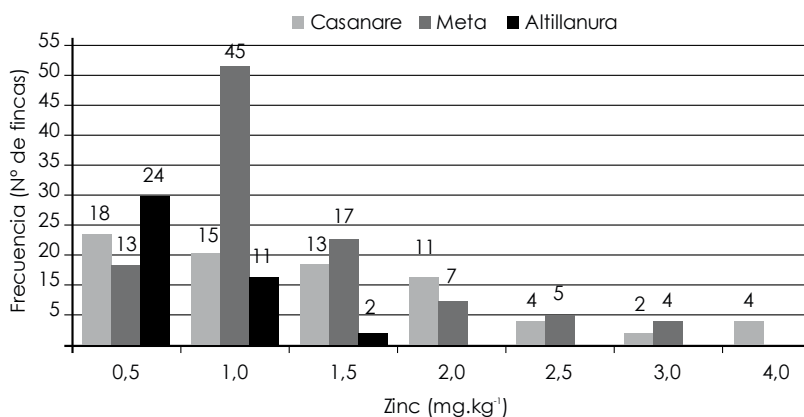


Figura 5.19. Histograma de la concentración de Zn en suelos de Casanare (67 fincas), del piedemonte del Meta (92 fincas) y de la atfillanura (49 fincas).

Fuente: (Parra, 2004 y Rincón, 2010)

Una parte de los suelos de Casanare (26 fincas) presentó concentraciones bajas de B, con 0,2 mg.kg⁻¹, pero otra, en gran parte (22 fincas), llegó a 1 mg.kg⁻¹ de B, que es considerada como adecuada para pastos menos exigentes. En el

pedemonte del Meta, la gran mayoría de los suelos (74 fincas de las 92 evaluadas) presentó concentraciones de B de 0,3 mg.kg⁻¹. En la altillanura se obtuvo un rango entre 0,1 y 0,3 mg.kg⁻¹ de B, en todas las fincas evaluadas (Figura 5.20).

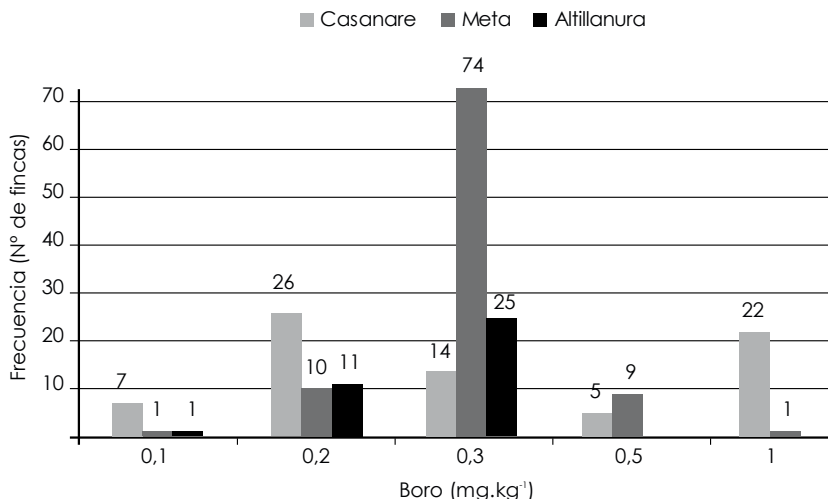


Figura 5.20. Histograma de la concentración de B en suelos del Casanare (74 fincas), del piedemonte del Meta (92 fincas) y de la altillanura (37 fincas).

Fuente: (Parra, 2004 y Rincón, 2010)

La aplicación de tres dosis de Borozinco al suelo no afectó la producción de forraje de *B. decumbens* en las evaluaciones realizadas a los 2, 15 y 25 meses después de su aplicación (Figura 5.21), obteniéndose un promedio de 1537, 3094 y 2733 kgMS.ha⁻¹, respectivamente. La no respuesta de las gramíneas fo-

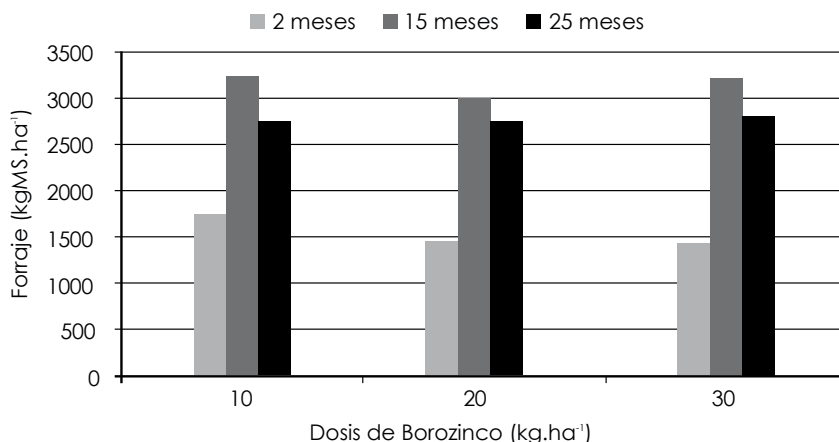


Figura 5.21. Producción de forraje de *B. decumbens* con tres dosis de Borozinco a los 2, 15 y 25 meses después de aplicadas a un suelo ácido del piedemonte llanero.

rajas a los microelementos ha sido el resultado en varias investigaciones, como lo demostró Paulino *et al.*, (1986) con los pastos *Brachiaria humidicola* y *Setaria anceps*, lo mismo obtuvo Carriel *et al.*, (1989), citado por Monteiro *et al.*, (2004), con los pastos *Brachiaria decumbens*, *Panicum maximum*, cv. Coloniao y *Melinis minutiflora*.

Valor nutritivo del forraje

En las evaluaciones realizadas a los dos meses después de aplicados los tratamientos, la aplicación al suelo de Borozinco como fuente de Cu, B y Zn, junto con la fertilización básica compuesta por 100 kg·ha⁻¹ de P₂O₅, 30 kg/ha de S, 60 kg/ha de K₂O y 60 kg·ha⁻¹ de N (Tabla 5.8), presentó efectos superiores sobre el contenido foliar de Cu, con un valor de 5,9 mg·kg⁻¹. También se presentaron diferencias significativas a favor del B, donde no se aplicó fertilización básica, al obtener 6 mg·kg⁻¹ de este elemento, frente a 5,4 mg·kg⁻¹ donde sí se aplicó fertilización básica. En el caso del contenido foliar de Zn, este elemento no presentó diferencias en la utilización o no de fertilización básica. Los resultados de las tres dosis de Borozinco aplicadas sobre la concentración foliar de Cu, Zn y B, no presentaron diferencias, obteniéndose un promedio de 5,3, 23,7 y 4,6 mg·kg⁻¹, respectivamente, a los dos meses de su aplicación al suelo.

Quince meses después de aplicados los tratamientos de Borozinco al suelo, se encontró que la concentración de Cu y Zn en las hojas de *B. decumbens* no fue afectada, ni entre los niveles de Borozinco aplicados ni entre la aplicación de fertilización básica. El B foliar fue superior (P<0,05) en los tratamientos donde no se aplicó fertilización básica, con un valor de 2,37 mg·kg⁻¹, tal como sucedió en las evaluaciones realizadas a los dos meses.

Con respecto a las dosis de Borozinco aplicadas a los 25 meses, tampoco se presentaron diferencias en el suelo; sin embargo, la concentración de Cu aumentó a 7,3 mg·kg⁻¹ y el Zn a 24 mg·kg⁻¹, mientras que el B disminuyó de 4,6 mg·kg⁻¹ a los dos meses, a 1,8 mg·kg⁻¹ a los 15 meses.

Las concentraciones de Cu, B y Zn adecuadas para el *B. decumbens* y para la alimentación de los bovinos de ceba, debe ser de 10, 10 y 30 mg·kg⁻¹, respectivamente (McDowell *et al.*, 1994; ZaBwsky, 2004), por lo tanto, estos tres microelementos resultaron ser deficitarios para los requerimientos nutricionales del ganado.

Tabla 5.8. Concentración foliar (mg kg^{-1}) de Cu, Zn y B en plantas de *B. decumbens*, a los 2 y 15 meses después de la aplicación de dosis de Borozinco al suelo, con y sin fertilización básica, en el piedemonte llanero

Tratamiento	Cobre (Cu)	Zinc (Zn)	Boro (B)
A los dos meses			
Con fertilización básica	5,9 a	22,7 a	5,4 b
Sin fertilización básica	4,8 b	24,6 a	6,0 a
Dosis de Borozinco (kg ha^{-1})			
10	5,1	22,6	4,7
20	5,6	25,1	5,0
30	5,4	25,2	4,3
Promedio	5,3	23,7	4,6
Cv. (%)	16,1	12,9	47,8
A los 15 meses			
Con fertilización básica	8,0	24,3	1,75 b
Sin fertilización básica	9,0	24,7	2,37 a
Significancia	ns	ns	*
Nivel de Borozinco (kg ha^{-1})			
10	7,0	22,7	1,5
20	7,7	24,0	2,0
30	7,2	25,7	2,0
Promedio	7,3	24,1	1,8
Significancia	ns	ns	ns
Cv. (%)	35,4	9	12,1

Con respecto a la fertilización con elementos menores, investigaciones que se realizaron en Carimagua (CIAT, 1981) demostraron que en gramíneas y leguminosas forrajeras no se obtiene efecto positivo con la aplicación de micronutrientes sobre la producción de forraje. Las aplicaciones de Zn y Cu al suelo mejoran su concentración en las gramíneas, lo cual es importante, ya que sin la aplicación de estos microelementos los niveles son inferiores a los requeridos por el animal. Por lo tanto, la fertilización de mantenimiento con Zn y Cu es importante en praderas de gramíneas puras.

• Fertilización para el establecimiento de pastos

Para la siembra de pastos en los suelos ácidos de los Llanos Orientales de Colombia se requiere aplicar los fertilizantes necesarios para suplir las deficiencias naturales de algunos nutrimentos, cuyas cantidades se deben calcular

de acuerdo con los resultados del análisis químico del suelo donde se va a establecer la pradera y en concordancia con los requerimientos nutricionales de los pastos.

Las fuentes de P, Ca, Mg y S más aconsejables son las escorias Thomas, roca fosfórica, la cal dolomítica y el yeso agrícola; estos insumos son adecuados para la fertilización de pastos por su lenta solubilidad y por sus bajos costos, en comparación con otros fertilizantes disponibles en el mercado. En explotaciones ganaderas más intensivas, con mayor número de animales por área y producción de carne y/o leche en un tiempo más corto, debe disponerse de un mayor volumen de biomasa de mejor calidad, lo cual se logra con niveles de fertilización más altos, con fuentes solubles y con aplicaciones frecuentes.

La cal dolomítica es fuente de Ca y Mg, por su parte el yeso agrícola proporciona Ca y S en forma de sulfato, que es el compuesto como la planta lo absorbe por las raíces. El yeso agrícola junto con la cal dolomítica cumple la función de reducir la saturación de aluminio en el suelo y aumentar las concentraciones de bases intercambiables (Ca, Mg, K) en el complejo de cambio del suelo. Sin embargo, la principal ventaja del yeso agrícola es el movimiento que el Ca tiene en el suelo unido al sulfato, permitiendo su mayor disponibilidad a niveles más profundos y favoreciendo el desarrollo de raíces de los pastos (Gomes *et al.*, 2001).

Para determinar los fertilizantes y las cantidades que se deben aplicar, teniendo en cuenta los resultados del análisis de suelos, en la Tabla 5.9 se presenta un listado de los principales fertilizantes en el mercado, con sus respectivas concentraciones de cada elemento. Para hacer los cálculos de los insumos, de acuerdo con la forma como viene el elemento en el fertilizante, se deben tener en cuenta las conversiones reportadas en la Tabla 5.10.

En praderas conformadas por gramínea pura es indispensable la fertilización nitrogenada. Se ha comprobado que el N es el nutriente que genera mayor respuesta en los pastos en producción y en mejoramiento de la calidad, especialmente en términos de proteína. La deficiencia de N ha sido reportada como una de las principales causas de degradación de praderas (Werner, 1986; citado por Soares *et al.* 1992; Robbins *et al.*, 1986). Las especies de *Brachiaria* tiene buen desarrollo en suelos deficientes en materia orgánica; sin embargo, el contenido de proteína cruda es bajo y en muchos casos no llena los requerimientos de los animales en pastoreo. Además, la productividad de dichas praderas disminuye debido a una reducción en el N disponible en

el suelo, por lo cual el problema podría resolverse mediante la rotación de cultivos con praderas, la fertilización con N o la introducción de leguminosas forrajeras (Robbins *et al.*, 1986).

Tabla 5.9. Concentración de minerales (%) en algunos fertilizantes comerciales

Fertilizante	N	P	K	Ca	Mg	S
Cal dolomítica	—	—	—	22 - 30	7 - 12	—
Cal agrícola	—	—	—	30	—	—
Flor de S	—	—	—	—	—	85
Yeso Agrícola	—	—	—	17 -20	—	14 - 18
Escorias Thomas (Abono Paz de Rio)	—	4	—	34	1	—
Roca fosfórica	—	8 - 13	—	20 - 30	—	—
Cloruro de K	—	—	50	—	—	—
Sulfato de K	—	—	42	—	—	18
Sulpomag	—	—	18	—	11	22
Sulcamag	—	—	—	18	9,6	9
Nitromag	21	—	—	7,8	4,2	—
Sulfato de Mg	—	—	—	—	10	13
Oxido de Mg	—	—	—	—	32	—
Urea	46	—	—	—	—	—
Fosfato diamonico (DAP)	18	20	—	—	—	—
Superfosfato triple	—	20	—	14	—	—
Kieserita	—	—	—	—	14,5	20
15-15-15	15	6,5	12,5	—	—	—
10-30-10	10	13,1	8,3	—	—	—
18-18-18	18	7,7	15	—	—	2
10-20-20	10	8,6	16,6	—	—	—

Tabla 5.10. Conversiones de las concentraciones de algunos minerales

De	A	Factor
P	P ₂ O ₅	2,29
P ₂ O ₅	P	0,43
K	K ₂ O	1,20
K ₂ O	K	0,83
Ca	CaO	1,40
CaO	Ca	0,71
Mg	MgO	1,65
MgO	Mg	0,60
S	SO ₄	2,99
SO ₄	S	0,33

Fuente: Bernal, (2003).

En la Tabla 5.11 se presentan las equivalencias para la interpretación de los análisis de suelos y establecer los valores reportados en estos análisis en la concentración del mineral respectivo por hectárea y en términos prácticos poder hacer los cálculos de fertilización.

Tabla 5.11. Equivalencia de la concentración de algunos minerales en el suelo ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$), con base en los resultados del análisis de suelos (densidad aparente: $1\text{ g}\cdot\text{cc}^{-1}$)

Concentración de minerales en el suelo	
En unidades, según análisis de suelo	En $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$
1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de P	2 kg de P
1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de S	2 kg de S
1 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de suelo de Ca	400 kg de Ca
1 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de suelo de Mg	240 kg de Mg
1 $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ de suelo de K	780 kg de K

El CIAT (1984), con base en investigaciones realizadas en suelos ácidos con germoplasma forrajero, presentó los requerimientos de las especies en cuanto a P, K, Ca, Mg y S (Tabla 5.12). Se tienen especies de gramíneas menos exigentes, como son el *B. decumbens*, *B. dictyoneura* y *B. Humidicola*, que se han adaptado a las condiciones de mínimos insumos, pero que tienen buena respuesta en rendimiento, cuando se mejoran las condiciones de fertilidad. Las gramíneas *B. brizantha* y *P. maximum* producen una mayor cantidad de biomasa de mejor calidad, pero son más exigentes en cuanto a la fertilidad del suelo. En tanto, las leguminosas forrajeras para los suelos ácidos se adaptan bien a las mismas condiciones de las gramíneas menos exigentes, pero requieren más Mg y S.

Tabla 5.12. Dosis recomendadas ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) de P, K, Ca, Mg y S para algunas especies de gramíneas y leguminosas en suelos ácidos

Especie	Fósforo (P)	Potasio (K)	Calcio (Ca)	Magnesio (Mg)	Azufre (S)
Gramíneas menos exigentes (<i>B. decumbens</i> , <i>B. humidicola</i> , <i>B. dictyoneura</i> cv. llanero)	30	30	200	20	20
Gramíneas más exigentes (<i>B. brizantha</i> , <i>Panicum maximum</i>)	40	40	400	30	30
Leguminosas: <i>S. capitata</i> cv. capica, <i>D. ovalifolium</i> cv. Maquenque, <i>P. phaseoloides</i> cv Kudzú, <i>A. pintoii</i> cv. Maní forrajero	30	30	200	30	30

Fuente: Adaptado de CIAT, (1984).

Para hacer los cálculos de la fertilización de establecimiento de praderas, se realiza un ejemplo con un pasto exigente en fertilidad del suelo, como es el pasto Toledo. En la Tabla 5.13 se presentan los resultados del análisis químico del suelo, como un valor real o como datos reportados por el laboratorio de P, Ca, Mg, S. Esta información es reportada por el laboratorio como partes por millón (ppm) o $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, en el caso de P y S, y miliequivalente en 100g de suelo ($\text{meq}\cdot 100\text{g}^{-1}$) o $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ para las bases intercambiables. Para hacer los cálculos, estos valores se transforman en concentración del mineral expresado en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$, teniendo en cuenta la información de la Tabla 5.11. Con base en los valores adecuados de minerales en los suelos, para el desarrollo de pastos exigentes (Tabla 5.14), se presentan los valores deseados, expresados en unidades del laboratorio y en $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ del respectivo mineral. La diferencia entre valor real y valor deseado es la deficiencia que tiene este suelo de cada elemento y que es necesario aplicar en fertilización de establecimiento.

Tabla 5.13. Ejemplo de la cantidad de minerales a aplicar a un suelo ácido, para cubrir las deficiencias en el suelo para el establecimiento de pasto Toledo (Densidad aparente de $1\text{ g}\cdot\text{cc}^{-1}$)

Mineral	Valor análisis de suelos		Concentración del mineral en el suelo ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)		Deficiencia ¹ ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)
	Real	Deseado	Real	Deseado	
P	$2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$15\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	4	30	26
Ca	$0,60\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	$1,5\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	240	600	360
Mg	$0,12\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	$0,3\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	29	72	43
K	$0,08\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	$0,15\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	62	117	55
S	$3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$25\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	6	50	44

¹Cantidad del elemento a aplicar

En este ejemplo se encontró que es necesario aplicar por hectárea 26 kg de P, 360 kg de Ca, 43 kg de Mg, 55 kg de K y 44 kg de S. Para determinar en forma práctica la fertilización que se debe aplicar, los cálculos se realizan usando como fuentes de P y Ca a las escorias Thomas, como fuente de Mg y Ca a la cal dolomítica, como fuente de S y Ca al yeso agrícola y como fuente de K al cloruro de K. Con base en la información de la Tabla 5.9, se estableció la concentración del mineral en las fuentes seleccionadas para hacer la fertilización. Teniendo en cuenta las dosis de cada nutriente que hay que aplicar, se obtuvo la cantidad de insumos para hacer la fertilización en el momento de la siembra del pasto (Tabla 5.14). En el caso del P, el resultado fue de $650\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de escorias Thomas, pero teniendo en consideración la alta fijación del P en estos suelos y que la mayoría de los cultivos recuperan solamente de 10% a 30% del P aplicado en el primer año después de la aplicación (Potash and Phosphate Institute, 1997), la cantidad a aplicar se aumentó al doble ($1300\text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de escorias Thomas).

Tabla 5.14. Cantidad de insumos a aplicar en la fertilización de establecimiento del pasto Toledo, en suelos ácidos

Fertilizante	Mineral	Concentración mineral en fertilizante (%)	Fertilización de establecimiento (kg ha ⁻¹ del mineral)	Cantidad de fertilizante (kg ha ⁻¹)
Escorias Thomas	P	4	26	1300
	Ca	34		
Cal dolomítica	Mg	7	43	615
	Ca	22		
Yeso agrícola	S	14	44	315
	Ca	17		
Cloruro de potasio	K	50	55	110

La cantidad de Ca a aplicar en la fertilización de establecimiento, según la Tabla 5.13, fue de 360 kg ha⁻¹; sin embargo, teniendo en consideración que las fuentes de P, Mg y S también aportan Ca, se tiene que la cantidad de Ca aplicado fue de 631 kg ha⁻¹ (Tabla 5.15); de esta forma se contribuye a aumentar la saturación de bases por el Ca adicional aplicado y puede favorecer la absorción de otros nutrientes por el desplazamiento del Al que el Ca puede hacer en el complejo de intercambio catiónico.

Tabla 5.15. Cantidad de Ca aplicado, con las diferentes fuentes utilizadas para la fertilización de establecimiento de pasto Toledo, en suelos ácidos

Fertilizante	Cant. Fertilizante (kg ha ⁻¹)	Concentración de Ca en fertilizante (%)	Ca aplicado (kg ha ⁻¹)
Con escoria Thomas	1300	34	442
Con cal dolomítica	615	22	135
Con yeso agrícola	315	17	54
Total de Ca aplicado			631

• Fertilización de mantenimiento de pastos

La fertilización de mantenimiento se debe hacer para restituir al suelo los minerales que han sido extraídos por el animal en el pastoreo y que salen del sistema en la carne o en la leche producida por los bovinos. Se ha calculado que entre 70% y 80% de los minerales que el ganado consume en el forraje,

retornan al suelo en las excretas de los animales (Debeux, *et al.*, 2004); sin embargo, estos no son bien distribuidos en todo el terreno, especialmente cuando los potreros son grandes.

Como norma general, se ha recomendado hacer la fertilización de mantenimiento a los dos años después de la siembra, con la mitad de fertilizantes aplicados en el establecimiento. Sin embargo, si se requiere obtener mayor cantidad y calidad de forraje, se debe aumentar la cantidad de fertilizante y hacer aplicaciones más frecuentes. Otra opción es aplicar fertilizantes de rápida solubilidad, cuyo efecto sobre los pastos es inmediato. Esta fertilización se aplica al voleo o en surcos con encaladora, cuando el potrero entra en descanso.

Las recomendaciones de fertilización de mantenimiento se basan en el análisis del valor nutritivo de los pastos, de la producción de forraje y del análisis de suelos, que se debe tomar cada dos años. En el suelo ocurren diversas reacciones que determinan la disponibilidad de los minerales para ser aprovechados por las plantas. En los suelos ácidos, el caso más frecuente ocurre con el P, porque este puede ser aplicado en las cantidades suficientes para suplir las deficiencias, sin embargo, la presencia de bases intercambiables como el Ca, Mg, K y especialmente el Al, hacen que se unan al P y formen compuestos insolubles no aprovechables por las plantas.

Los requerimientos de minerales están de acuerdo con el tipo de explotación que se tenga en la finca. Por ejemplo, las vacas en lactancia exigen mayor cantidad de todos los minerales, si se compara con los requerimientos del ganado de ceba. En la Tabla 5.16 se presenta la concentración de minerales en un pasto Toledo (*Brachiaria brizantha*) del piedemonte llanero, establecido en un suelo ácido.

En general, se ha encontrado que los forrajes de la Orinoquia colombiana presentan deficiencias de P, Ca, S, Cu y Zn, principalmente, en tanto, que K, Mg, Fe y Mn se encuentran con niveles foliares que llenan los requerimientos del ganado. Sin embargo, se ha encontrado que en suelos a los cuales se les ha mejorado la fertilidad, los forrajes allí producidos pueden llenar los requerimientos del ganado de ceba, incluyendo al P y al Ca. Es importante tener conocimiento de la concentración de minerales en el forraje, para tomar decisiones en fertilización de mantenimiento y en suplementación con sal mineralizada.

Tabla 5.16. Concentración de minerales de un pasto Toledo establecido en el piedemonte llanero

Mineral	Concentración foliar en pasto Toledo
P (%)	0,21
Ca (%)	0,34
Mg (%)	0,25
K (%)	0,80
S (%)	0,08
Cu (mg·kg ⁻¹)	5,2
Fe (mg·kg ⁻¹)	74,2
Zn (mg·kg ⁻¹)	23

Con base en la concentración foliar de minerales del pasto Toledo en la Tabla 5.16, se calculó la extracción de minerales del suelo que este pasto puede realizar anualmente, considerando una producción de forraje de 15.000 kg·ha⁻¹·año⁻¹. Teniendo en cuenta el retorno de estos minerales al suelo en un 80%, vía orina y heces, se realizó el cálculo de las cantidades de minerales que vuelven al suelo y las que salen del sistema en leche o carne. Como se puede apreciar en la Tabla 5.17, anualmente el pasto extrae en el forraje que es consumido por el animal, 31,5 kg·ha⁻¹ de P, del cual retorna al suelo, vía excretas, 25,2 kg·ha⁻¹, por lo tanto, del sistema estaría saliendo en carne o leche 6,3 kg·ha⁻¹. El mismo análisis se puede hacer con los otros minerales; sin embargo, esto tiene un alto componente teórico, porque hay que considerar que la distribución de las excretas en el potrero no es uniforme y que muchos de estos nutrientes se pueden perder por escorrentía, especialmente durante la época lluviosa.

Tabla 5.17. Extracción anual de minerales por el pasto Toledo, con una producción de forraje de 15.000 kg·ha⁻¹·año⁻¹

Mineral	Extracción del pasto Toledo (kg·ha ⁻¹)	Retorna al suelo (80%)	Sale del sistema (kg·ha ⁻¹)
P (%)	31,5	25,2	6,3
Ca (%)	51,0	40,8	10,2
Mg (%)	37,5	30,0	7,5
K (%)	120,0	96,0	24,0
S (%)	12,0	9,6	2,4
Cu (mg·kg ⁻¹)	0,078	0,062	0,015
Fe (mg·kg ⁻¹)	1,11	0,890	0,222
Mn (mg·kg ⁻¹)	1,83	1,46	0,36
Zn (mg·kg ⁻¹)	0,345	0,276	0,069

Las cantidades de minerales que tiene que restituirse por medio de la fertilización de mantenimiento, corresponde a lo que sale del sistema que son bajas cantidades, con excepción del potasio, elemento de mayor extracción por el pasto. La información presentada es de un caso en particular con una pradera de pasto Toledo, por lo tanto, para realizar estos cálculos es necesario considerar la especie de pasto, la cantidad de forraje producida y la concentración de minerales en las hojas, además, es importante tener en cuenta que se haya hecho una fertilización de establecimiento, de acuerdo con el análisis de suelos. En la Tabla 5.18 se presenta un ejemplo de fertilización de mantenimiento, teniendo en cuenta los minerales que salen del sistema ganadero reportados en la Tabla 5.17. Se consideró hacer esta fertilización cada dos años, sin embargo, puede hacerse cada año con la mitad de la fertilización recomendada. Esto se hizo con base en una producción de forraje de 15.000kgMS. ha⁻¹, porque si se quiere aumentar la disponibilidad de biomasa, es necesario aumentar las cantidades de fertilizantes.

Tabla 5.18. Fertilización de mantenimiento cada dos años en una pradera de pasto Toledo, con una producción anual de forraje de 15.000 kgMS ha⁻¹

Mineral	Fertilización cada dos años (kg·ha ⁻¹)	Ejemplo de insumos a aplicar (kg·ha ⁻¹)
P (P ₂ O ₅)	36,5	365 kg de Escorias Thomas
Ca	20,5	
Mg	15,0	150 kg de sulfato de Mg
S	5,0	
K	48,0	100 kg de cloruro de K

Cuando se aplican fertilizantes es importante considerar la humedad del suelo para que la planta pueda absorber los nutrimentos; sin embargo, durante los periodos de alta lluviosidad, las pérdidas de minerales por lixiviación y escorrentía son significativas. Por otro lado, la fertilización al inicio de la época seca puede resultar en una baja absorción e inmovilización de nutrientes por baja disponibilidad de agua en el suelo. Al comienzo de lluvias (abril), la mineralización en el suelo se incrementa por la mayor disponibilidad de agua, después de un tiempo seco prolongado, permitiendo una mayor oferta de nutrientes a la planta, especialmente N. Por lo tanto, la época adecuada para hacer fertilización de mantenimiento es cuando las lluvias son moderadas, que tradicionalmente coincide con los meses de agosto y septiembre.

En suelos que han sufrido una compactación superficial por el pisoteo del ganado (Pinzón y Amézquita, 1987), especialmente en aquellas especies de crecimiento erecto que dejan espacios de suelo descubiertos, es necesario hacer una roturación del suelo con implementos de labranza vertical (Figura 5.22), como el renovador de praderas, que tiene un disco cortador del pasto antes del cincel, permitiendo hacer una labor de labranza sin disturbar el pasto. En caso de no tener este implemento, deberá hacerse un sobrepastoreo y utilizar la rastra sin traba. Es importante roturar el suelo compactado, para hacer la fertilización de mantenimiento, de lo contrario gran parte del fertilizante corre el riesgo de perderse por arrastre con el agua de escorrentía.



Figura 5.22. Labranza vertical con cindeles en una pradera de *B. decumbens* antes de aplicar la fertilización.

- **Fertilización nitrogenada de mantenimiento**

El N es el nutriente más importante en la producción de forraje y además determina el contenido de proteína, razón por la cual es necesario asociar las gramíneas con leguminosas o aplicar fertilizantes que contengan este elemento, considerando que a diferencia de los demás minerales, el N que retorna al sistema en la orina, se pierde en su mayoría por volatilización.

Por el bajo contenido de materia orgánica en estos suelos, se presenta una baja disponibilidad de N, afectando el contenido de proteína en los forrajes. Para dar solución a estas deficiencias, necesariamente debe hacerse un programa de fertilización que no solo mejore la calidad nutritiva, sino que también aumente la disponibilidad de forraje. A manera de ejemplo se realizan los cálculos de fertilización nitrogenada, teniendo en cuenta la disponibilidad de este nutriente en el suelo y la extracción por la planta y por los animales:

Se tiene una pradera de pasto Toledo donde la materia orgánica del suelo es de 2,5%

Contenido de N en la materia orgánica: $2,5/20 = 0,125\%$

Llevando este contenido de N a 1 hectárea, con una densidad aparente de 1 g cc^{-1} :

(Una hectárea tiene un peso de la capa arable de 20 cm, de 2.000.000 kg)

Contenido de N en 1 ha de suelo = $(2.000.000 \times 0,125)/100 = 2500 \text{ kg de N}$

De este total de N, solo está disponible para las plantas 2% anualmente:

N disponible para la planta/año = $2500 \times 0,02 = 50 \text{ kg de N}$

Una pradera de pasto Toledo que produce $15.000 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, la cual es consumida por el ganado y tiene un contenido de proteína de 9%.

Contenido de proteína en los 15.000 kg de MS = $(15.000 \times 9)/100 = 1350 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de proteína

N en 1350 kg de proteína = $1350/6,25 = 216 \text{ kg de N}$.

Los bovinos que consumen los $15.000 \text{ kg MS ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, están extrayendo $216 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ de N.

Del total del N extraído, retorna al suelo el 80%, vía excretas; sin embargo, por pérdidas ocasionadas por volatilización o lixiviación, solo retorna efectivamente al suelo el 25%:
N que retorna al suelo = $216 \times 0,25 = 54 \text{ kg de N}$.

De acuerdo con esto, el N que estaría disponible para la planta es: N que es entregado por la materia orgánica + N que retorna al suelo por reciclaje:
N disponible para la planta = $50 \text{ kg} + 54 \text{ kg} = 104 \text{ kg}$.

Para conservar la misma producción de 15.000 kg con un contenido de proteína de 9%, el pasto requiere disponer de $216 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, que es lo que el pasto extrae. Por lo tanto, es necesario hacer una fertilización nitrogenada de mantenimiento con:

N en fertilización de mantenimiento = $216 - 104 = 112 \text{ kg de N}$.

Al utilizar una fuente como urea, que tiene 46% de N, se requiere aplicar:

Fertilización con urea = $(112 \times 100)/46 = 243 \text{ kg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Estas cantidades, en la mayor parte de las veces, es necesario aumentarla, considerando que parte de este N contenido en la urea puede perderse por volatilización en forma de amoníaco o lixiviarse en forma de nitrato.

• **Uso de fuentes orgánicas y biológicas en la fertilización de pastos**

Fertilización con abono orgánico

Los abonos orgánicos están constituidos fundamentalmente por excretas de animales, de los cuales los más usados en Colombia provienen de las gallinas o pollos (gallinaza o pollinaza), de los cerdos (porquinaza) y de los bovinos (bovinaza). En el pasado, las sociedades más avanzadas aplicaron estos desechos orgánicos a los suelos para mejorar la producción de cultivos. El desarrollo de los fertilizantes inorgánicos en el siglo pasado y su empleo a escala masiva, ocasionó una disminución en el uso de los abonos orgánicos y solo hasta en épocas recientes se le ha dado atención al empleo de estas fuentes de nutrientes para los suelos (Sosa, 2002).

El estiércol ejerce un efecto favorable en el suelo por el aporte de minerales y por el gran y variado número de bacterias que posee. Estas producen transformaciones químicas no sólo en el estiércol mismo, sino además en el suelo, haciendo que muchos elementos no aprovechables por las plantas puedan ser asimilados por ellas. Además, puede aumentar la población y la actividad de algunos componentes de la fauna edáfica, como por ejemplo las lombrices (Ramírez *et al.*, 2004; Calderón y Giraldo, 1983). Sin embargo, también se han verificado contaminaciones en el suelo y en la vegetación con gérmenes patógenos (como algunas bacterias coliformes) presentes en los estiércoles (Espinosa *et al.*, 2009).

En agricultura, se han usado los fertilizantes orgánicos desde hace varios años, especialmente en países como China, sin embargo, existen limitaciones prácticas y económicas para su uso. En las plantas no existen diferencias entre las fuentes de los minerales utilizadas, debido a que son absorbidos en forma iónica, independiente del tipo de fuente, sea esta orgánica o inorgánica (Potash and Phosphate Institute, 1997). Los abonos orgánicos, como proveedores de nutrientes, son de bajo grado si se los compara con los fertilizantes de síntesis química. Parte de los elementos contenidos en los abonos orgánicos pasan a formar parte del humus, quedando almacenados en el suelo, protegidos de pérdidas por lavado.

En la Tabla 5.19 se presenta la concentración de nutrientes en la gallinaza, porquinaza y bovinaza, donde se puede apreciar la alta variación, aun den-

tro de un mismo abono orgánico, lo cual es debido básicamente al tipo de alimentación dada a los animales. Las concentraciones de nutrientes en el estiércol de aves de corral son las más altas de todos los estiércoles animales, y el uso de la gallinaza como mejoradora de suelos para cultivos agrícolas, proporcionará cantidades apreciables de todos los nutrientes de importancia para los vegetales.

Uno de estos elementos de importancia es el N, el cual se encuentra como amonio y ácido úrico que se convierte en amonio y luego en nitrato, que se puede lixiviar fácilmente sobre todo en época lluviosa (Thomsen, 2004). A diferencia de otros estiércoles, el N de la gallinaza está disponible de inmediato, existiendo el riesgo de quemar las plantas con aplicaciones en grandes cantidades. En suelos con pendientes moderadas y fuertes, es esencial incorporar el estiércol y combinar la aplicación con otras prácticas de conservación de suelos y agua para reducir la escorrentía y erosión, de esta manera se reduce la pérdida de abono por procesos erosivos (FAO, 2003).

En general, se recomienda la incorporación de los abonos orgánicos al suelo, no es conveniente hacer aplicaciones superficiales, pues las formas volátiles de los nutrientes (particularmente el N) pueden escapar a la atmósfera y no pasar al suelo. El momento de aplicación debería ser próximo a la siembra del cultivo, para disminuir la pérdida de nutrientes por volatilización o lavado.

Tabla 5.19. Concentración de nutrientes en algunos estiércoles.

Mineral	Gallinaza	Porquinaza	Bovinaza
N (%)	1,8 - 2,4	1,4 - 3,1	0,6 - 1,3
P (%)	2,2 - 3,9	2,0 - 3,0	0,1 - 0,8
Ca (%)	1,7 - 3,6	0,8 - 2,7	2,0
Mg (%)	0,8 - 1,0	0,2 - 1,2	0,51
K (%)	1,4 - 3,2	0,7 - 1,9	0,4 - 0,8
S (%)	0,26	—	—
Fe (mg·kg ⁻¹)	10.575	357	—
Cu (mg·kg ⁻¹)	69	56	—
Mn (mg·kg ⁻¹)	525	319	—
Zn (mg·kg ⁻¹)	530	285	—
B (mg·kg ⁻¹)	53	0,52	—

Fuente: datos análisis de laboratorio, Corantioquia, (2003), Muñoz, (1994).

En suelos ácidos del piedemonte llanero se realizaron evaluaciones para ver el efecto de la gallinaza sobre la producción de forraje de *B. decumbens* y se comparó con la urea como fuente de N.

Con base en el N contenido en la gallinaza, se realizaron los cálculos de las cantidades que se deben aplicar de acuerdo con las dosis de N de los tratamientos evaluados (15, 30, 45 y 60 kg·ha⁻¹); de igual forma se calcularon las cantidades de urea para los mismos tratamientos (Tabla 5.20). Como se puede apreciar, se requieren grandes cantidades de gallinaza para ser utilizada como fuente de N, comparada con una fuente química como la urea que tiene 46% de N, mientras que la gallinaza solo tiene 1,8%. De esta forma, para aportar 60 kg de N se requiere de 4,2 toneladas de gallinaza.

Tabla 5.20. Cantidad de gallinaza y de urea a aplicar, de acuerdo con los tratamientos de N propuestos

Dosis de nitrógeno (N) (kg·ha ⁻¹)	Dosis de gallinaza (kg·ha ⁻¹)	Dosis de urea (kg·ha ⁻¹)
15	1,071	32,6
30	2,143	65,2
45	3,214	97,8
60	4,286	130,4

Sin embargo, la ventaja que tiene este abono orgánico es que aporta otros nutrientes que no posee la urea; de esta forma, en una tonelada de gallinaza se está aplicando al suelo 32 kg·ha⁻¹ de N, 41 kg·ha⁻¹ de P, 96 kg·ha⁻¹ de Ca, 18 kg·ha⁻¹ de Mg, 32 kg·ha⁻¹ de K (Tabla 5.21) y microelementos en menor proporción.

Tabla 5.21. Concentración (kg·ha⁻¹) de otros nutrientes aplicados con la gallinaza, de acuerdo con las dosis de N

Dosis de gallinaza (kg·ha ⁻¹)	P	Ca	Mg	K
1.071	41,8	96,4	18,2	32,1
2.143	83,6	192,9	36,4	64,3
3.214	125,4	289,3	54,6	96,4
4.286	167,1	385,7	72,9	128,6

Como la gallinaza aporta otros nutrientes al suelo, en los tratamientos donde se utilizó urea también se aplicaron los otros nutrientes que aportó la gallinaza en la misma proporción (Tabla 5.22).

Tabla 5.22. Fertilizantes aplicados ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$) en los tratamientos donde la fuente fue la urea, para suplir los nutrientes que se aplicaron en el tratamiento con gallinaza.

N ($\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$)	Urea	SFT	Cal dolomítica	KCl
15	32,6	208,9	268,7	64,3
30	65,2	417,9	537,4	128,6
45	97,8	626,8	806,1	192,9
60	130,4	835,7	1074,9	257,1

A los dos meses de aplicados los tratamientos al suelo, utilizando como fuente la gallinaza y la urea, la producción de biomasa de *B. decumbens* fue superior significativamente en el tratamiento donde la fuente de N fue la urea (Figura 5.23), con una producción de forraje de $2871 \text{ kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$, duplicando la producción obtenida cuando la fuente utilizada fue la gallinaza, con la que se obtuvo $1409 \text{ kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$. A los 15 y 25 meses, estas diferencias en producción presentadas a los primeros dos meses, no fueron evidentes, confirmando la respuesta momentánea al utilizar como fuente de N a la urea. La producción promedio obtenida fue de 2652 y $2461 \text{ kgMS}\cdot\text{ha}^{-1}$ a los 15 y 25 meses, respectivamente.

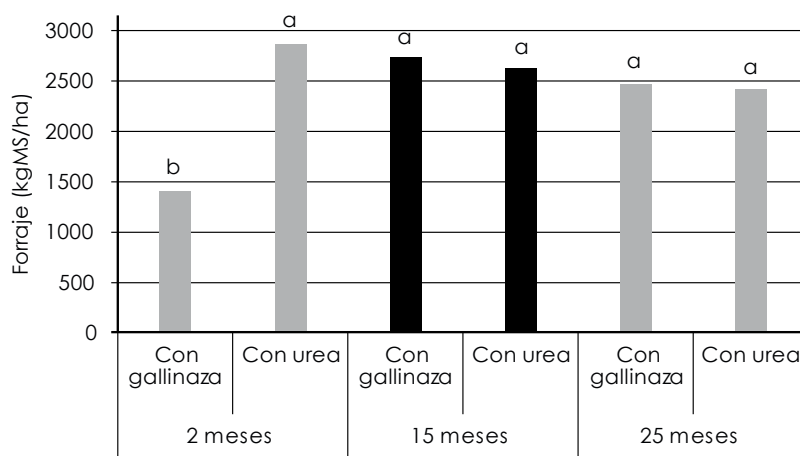


Figura 5.23. Producción de forraje de *B. decumbens* fertilizado con urea y con gallinaza a los 2, 15 y 25 meses después de su aplicación a un suelo ácido del piedemonte llanero, en época lluviosa.

Nota: valores en columnas con letras diferentes, difieren en forma significativa según la prueba de Tukey ($P < 0,05$).

La concentración de P en el suelo, por efecto de los tratamientos de N aplicados, utilizando como fuente a la gallinaza y la urea, presentó diferencias significativas a favor de la dosis de 15 y 30 kgN·ha⁻¹, con 2,3 y 2,1 mg·kg⁻¹, respectivamente. Quince meses después de su aplicación, la dosis de 30 kgN·ha⁻¹ fue superior en forma significativa, con respecto a las otras dosis evaluadas, obteniéndose un valor de 2,7 mg·kg⁻¹. A los 25 meses después de la aplicación de los tratamientos, no se presentaron diferencias entre los cuatro tratamientos evaluados, encontrándose un promedio de 1,9 mg·kg⁻¹ (Tabla 5.23).

Tabla 5.23. Concentración de P (mg·kg⁻¹) en suelo bajo cuatro niveles de N, utilizando como fuente gallinaza y urea, a los 4, 15 y 25 meses después de su aplicación a un suelo ácido del piedemonte llanero.

Dosis de nitrógeno (N) (kg·ha ⁻¹)	4 meses	15 meses	25 meses
15	2,3 a	2,0 b	1,8 a
30	2,1 a	2,7 a	2,0 a
45	1,3 b	1,9 b	1,8 a
60	1,6 ab	2,2 b	1,9 a
Cv. (%)	14,2	13,7	10,8

Nota: promedios con letra diferentes en la misma columna, difieren en forma significativa según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

El efecto benéfico de la aplicación de la gallinaza fue demostrado con el mayor contenido de P en el suelo. Aunque no se vieron efectos significativos de las dosis evaluadas en la materia orgánica del suelo, se incrementó en forma significativa el contenido de P a valores de 2,4 mg·kg⁻¹, 2,6 mg·kg⁻¹ y 2,2 mg·kg⁻¹, a los 4, 15 y 25 meses después de la aplicación de la gallinaza al suelo (Figura 5.24). Es una respuesta al contenido de P que tiene este fertilizante orgánico, representando una ventaja sobre la fuente utilizada de P, que fue el superfosfato triple, fertilizante usado como complemento a las dosis de N aplicadas, cuando se utilizó como fuente la urea. Estos resultados están de acuerdo con lo reportado por Flórez (1980) acerca de suelos andosoles con alto contenido de alofana, que se caracterizan por su alta capacidad de fijación de P, a los cuales se les aplico 30 t·ha⁻¹ de gallinaza, presentando un efecto positivo en la producción de forraje de *Panicum maximum* y una mayor disponibilidad de este elemento en el suelo. Los oxisoles presentan alta fijación de P, ocasionada por hidróxidos y óxidos de Fe y aluminio presentes en las arcillas. La aplicación de mezclas de materiales inorgánicos y orgánicos como la gallinaza, pueden ayudar a dismi-

nir la fijación de P en estos suelos, no obstante debe hacerse periódicamente, dado que la adsorción de P volvió a incrementarse, después de 10 semanas (Daza *et al.*, 2008).

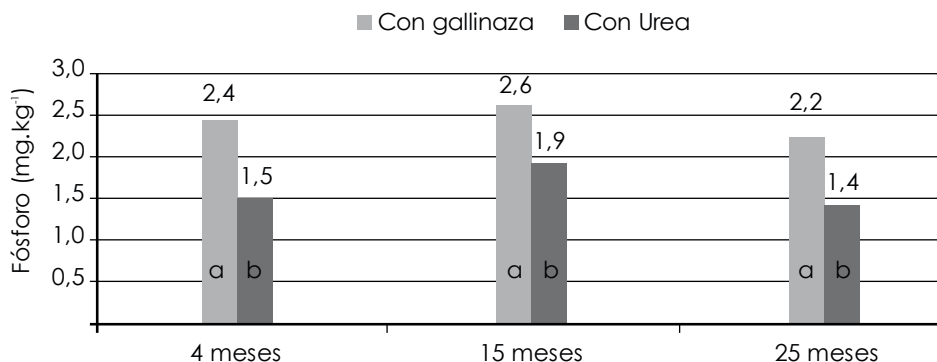


Figura 5.24. Concentración de P en suelo, bajo cuatro niveles de N, utilizando como fuente la gallinaza y la urea, en un suelo ácido del piedemonte llanero.

Nota: valores en columnas con letras diferentes, difieren en forma significativa según la prueba de Tukey ($P < 0,05$).

Valor nutritivo del forraje

Se analizó la concentración de Ca, Mg, K, S en las hojas de *B. decumbens*. No se encontraron diferencias entre los tratamientos de N evaluados, obteniéndose un promedio 0,65% de Ca, 0,31% de Mg, 0,91% de K y 0,092% de S (Tabla 5.23). De igual forma, no hubo respuesta en el valor nutritivo del forraje, con respecto a las fuentes de urea y gallinaza evaluadas. La concentración de P foliar fue afectada por el tipo de fuente utilizada, siendo superior en el tratamiento donde la fuente de N fue la gallinaza, al obtener un 0,23% de P, frente a 0,18 %, en la que la fuente fue el superfosfato triple, como complemento a la urea como fuente de N. También se presentó una mayor concentración de P cuando la dosis de N utilizada fue de 60 kg·ha⁻¹, siendo superior en forma significativa frente a las otras dosis evaluadas.

A los 25 meses de aplicados los tratamientos con cuatro niveles de N, utilizando como fuente química a la urea y como fuente orgánica a la gallinaza, no ejercieron ningún efecto sobre la calidad foliar del pasto *B. decumbens*. El mismo comportamiento se presentó con la concentración de Ca, Mg, K y S. De igual forma, el P que a los cuatro meses presentó diferencias significativas con respecto a la fuente gallinaza y a la más alta dosis utilizada, a los 25 meses ya no se presentó respuesta sobre el contenido de este elemento en las hojas del

B. decumbens, obteniéndose un promedio de 0,18%. Al comparar la concentración de minerales en las hojas del pasto, se encontró que a los 25 meses después de aplicar los tratamientos al suelo, se encontró una disminución en todos los minerales, con respecto a la evaluación realizada a los cuatro meses, (Tabla 5.24).

Tabla 5.24. Concentración de P, Ca, Mg, K y S (%) en las hojas de *B. decumbens*, de suelos fertilizados con gallinaza y urea, en cuatro niveles de N, cuatro meses después de la aplicación de los tratamientos al suelo en el piedemonte llanero

Tratamiento	Fósforo (P)	Calcio (Ca)	Magnesio (Mg)	Potasio (K)	Azufre (S)
A los cuatro meses					
Gallinaza	0,23 a	0,67	0,32	0,91	0,098
Urea	0,18 b	0,62	0,29	0,91	0,091
Significancia	*	ns	ns	ns	ns
Nivel de N (kg·ha ⁻¹)					
15	0,18 b	0,64	0,29	0,91	0,09
30	0,18 b	0,65	0,35	0,93	0,08
45	0,19 ab	0,69	0,31	0,92	0,09
60	0,22 a	0,61	0,28	0,9	0,09
Significancia	*	ns	ns	ns	ns
Promedio	0,19	0,65	0,31	0,91	0,092
Cv. (%)	14,1	9,1	15,6	3,3	13
A los 25 meses					
Gallinaza	0,19	0,58	0,26	0,82	0,079
Urea	0,18	0,6	0,24	0,83	0,076
Significancia	ns	ns	ns	ns	ns
Nivel de N (kg·ha ⁻¹)					
15	0,18	0,58	0,26	0,81	0,077
30	0,19	0,62	0,25	0,82	0,076
45	0,18	0,64	0,29	0,83	0,075
60	0,19	0,68	0,26	0,83	0,079
Significancia	ns	ns	ns	ns	ns
Promedio	0,18	0,63	0,26	0,82	0,077
Cv. (%)	13,2	8,7	12,9	10,2	23,5

Nota: promedios con letra diferentes en la misma columna, difieren en forma significativa según la prueba de Tukey ($p < 0,05$).

La proteína cruda aumentó en forma proporcional al incremento de los niveles de N aplicados, cuando la evaluación se realizó a los cuatro meses después de cumplidos los tratamientos al suelo (Figura 5.25). De un contenido de proteína cruda de 8,1%, se aumentó a 9,7% en el tratamiento donde se aplicaron 60 kg·ha⁻¹ de N. A los 25 meses, el contenido de proteína cruda en el pasto fue similar en todos los tratamientos evaluados, como respuesta al contenido similar de materia

orgánica en el suelo en los cuatro tratamientos aplicados. Ramírez *et al.*, (2004) también obtuvieron efectos significativos con la aplicación de estiércol bovino en pasto Estrella, al mejorar el contenido de proteína de 14% a 16,5%.

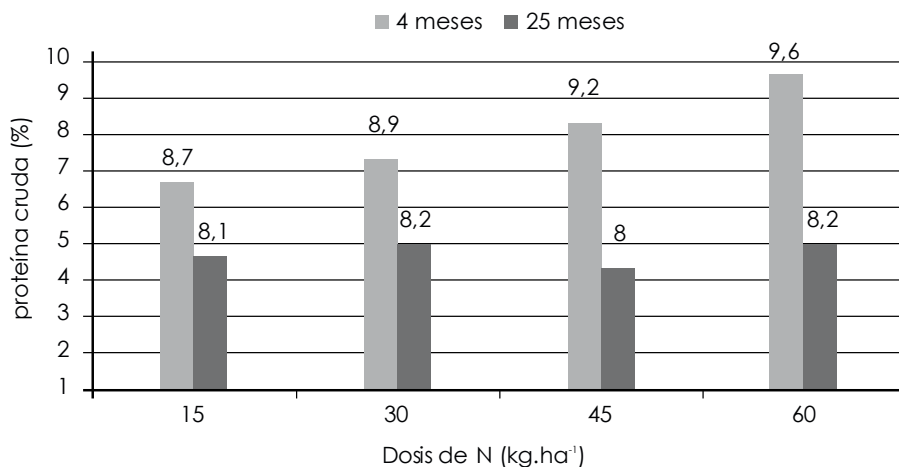


Figura 5.25. Contenido de proteína cruda (%) en hojas de *B. decumbens* con cuatro dosis de N, a los 4 y 25 meses después de su aplicación al suelo del piedemonte llanero.

Uso de las micorizas en la producción de pastos

Una micorriza es una asociación simbiótica y mutualista entre un hongo y células vivas de la raíz, sobre todo de células corticales y epidérmicas. Generalmente, los hongos solo colonizan raíces jóvenes y tiernas. Las hifas de los hongos asumen funciones de pelos radicales de la planta. Los hongos reciben nutrientes orgánicos producidos por la planta y estos contribuyen a la absorción de agua y minerales desde el suelo para beneficio de la planta. Estos nutrientes están constituidos por azúcares, aminoácidos, ácidos orgánicos, nucleótidos, enzimas, vitaminas y sustancias promotoras de crecimiento (Noda, 2009). El mayor beneficio que proporcionan las micorizas a la planta es el incremento en la absorción de iones que normalmente se difunden con lentitud hacia el interior de las raíces, especialmente el fosfato, K, nitrato y amonio. Las micorizas confieren grandes beneficios a las plantas que crecen especialmente en suelos infértiles (Salisbury y Ross, 1994). La asociación con micorizas es más común en plantas silvestres, debido a que los hongos presentes en suelos nativos las colonizan y forman micorizas.

Los géneros de hongos más importantes asociados con las raíces de las plantas son: *Aspergillus*, *Penicillium*, *Rhizopus* y *Trichoderma*. El *Aspergillus* y el

Penicillium movilizan el P y el N del suelo. El *Trichoderma* sostiene la humedad en las raíces en condiciones de sequía (Delgado, 2008).

Uno de los problemas de fertilidad más importantes que presentan algunos suelos es la poca disponibilidad de P para satisfacer las necesidades de crecimiento de los pastos. El P se considera como el elemento más limitante en los suelos ácidos, porque la mayor cantidad se encuentra fijado formando compuestos no aprovechables por las plantas, de tal forma que la concentración de P disponible se encuentra entre 1 y 3 mgkg⁻¹. Para aumentar la producción de forrajes en estos suelos, es necesario aplicar fertilizantes fosfóricos para satisfacer los requerimientos de las plantas, sembrar forrajes adaptados a altas concentraciones de Al y a bajas de P por su mayor sistema radical, utilizar micorrizas que son más eficientes en la toma de P del suelo, para aprovechamiento de la planta (Rao *et al.*, 1998). En los suelos se encuentran micorrizas nativas que pueden llegar a establecer simbiosis con las raíces de los pastos; sin embargo, existen micorrizas que pueden llegar a ser más efectivas en la absorción de nutrientes del suelo (Zárate *et al.*, 2009; Monroy, 2004).

Las micorrizas protegen las raíces contra ciertos hongos patógenos. Además, permiten ahorrar hasta un 50% del volumen de los productos químicos necesarios para el desarrollo de las plantas, reduciendo el uso de insumos y los costos, contribuyendo al desarrollo de una agricultura sostenible y ecológicamente más sana. La utilización de micorrizas es una de las técnicas biológicas empleadas en muchos cultivos; sin embargo, en los pastos aún no se ha logrado extenderla ampliamente en la producción, y los estudios han estado dirigidos a algunas leguminosas y a muy pocas gramíneas (Noda, 2009).

En el piedemonte llanero se evaluó el efecto de las micorrizas sobre la producción de forraje del pasto *B. decumbens*, encontrándose que no se presentó respuesta a su aplicación y obteniéndose un promedio de 3.236 kgMS·ha⁻¹ a los cinco meses después de su aplicación. El mismo comportamiento se observó en las evaluaciones realizadas a los 15 y 25 meses, con una producción promedio de forraje de 2.818 y 2.721 kgMS·ha⁻¹, respectivamente (Figura 5.26). Aunque no se presentaron diferencias entre el uso o no uso de las micorrizas, la producción de biomasa fue disminuyendo con el paso del tiempo.

Investigaciones realizadas por Zárate *et al.*, (2009) en el pasto *Hiparrhenia rufa*, evaluando el efecto de varias micorrizas en materas bajo condiciones de invernadero, obtuvieron respuesta positiva en la producción de biomasa aérea y radical con las micorrizas *Gigaspora margarita* y *Glomus manihotis*. De

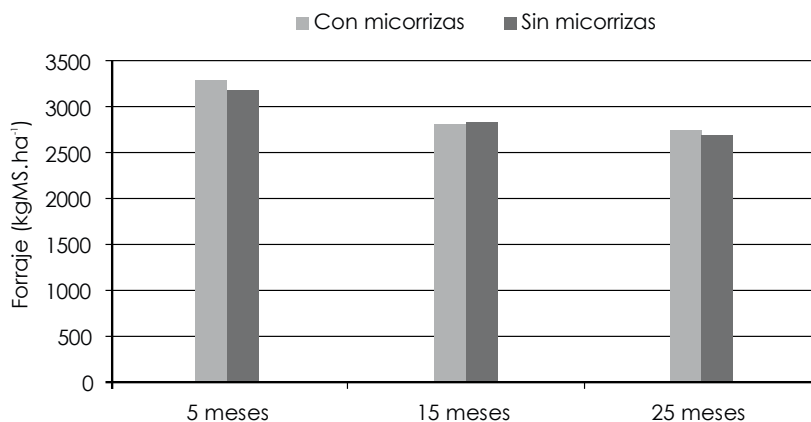


Figura 5.26. Producción de forraje de *B. decumbens*, con y sin micorrizas, a los 5, 15 y 25 meses después de su aplicación a un suelo ácido del piedemonte llanero.

igual forma, Chamizo *et al.*, (2009) evaluaron en invernadero el efecto de las micorrizas en alfalfa y encontraron respuestas significativas en la masa fresca y seca de esta planta, con incrementos de 15%, con respecto a las plantas no inoculadas con las micorrizas, en un suelo limoso.

Como se puede apreciar, la mayoría de trabajos sobre el efecto de las micorrizas en forrajes, han sido hechos bajo condiciones de invernadero, donde los diversos efectos no controlados que se pueden tener en el campo no se presentan. En las evaluaciones de este experimento realizado en condiciones de campo, con la aplicación de la micorriza en forma directa al suelo de la pradera, se pudieron presentar otros efectos que no permitieron ver respuestas de las micorrizas sobre la planta.

Uso de las *Pseudomonas* en la producción de pastos

Los géneros bacterianos más importantes para la transformación de los compuestos orgánicos e inorgánicos que favorecen la nutrición de las plantas, son: *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Azotobacter*, *Azospirillum*, *Beijerinckia*, *Nitrosomonas*, *Nitrobacter*, *Clostridium*, *Thiobacillus*, *Lactobacillus* y *Rhizobium*. Bajo el término de *Pseudomonas* se agrupa a un variado grupo de bacilos gram negativos, estrictamente aerobios. Cuando se incorporan al suelo residuos de cosecha, materiales orgánicos, enmiendas y estiércol, se agrega una gran cantidad de compuestos que contienen P. El fosfato orgánico es hidrolizado por la enzima fosfatasa que segregan los microorganismos y libera el fosfato, para que sea asimilado por la planta. La movilización del P en la naturaleza lo hacen los microorganismos, ya que participan en la disolución y transforma-

ción del elemento hasta combinaciones asimilables por las plantas y también en la fijación temporal (Delgado, 2008; Loredó *et al.*, 2004).

En los suelos de reacción ácida predominan los fosfatos insolubles de Fe y de Al. Cuando se han utilizado enmiendas cálcicas se fija el P como fosfato tricálcico. Las bacterias de los géneros *Pseudomonas*, *Achromobacter*, *Micrococcus* y *Aerobacter* solubilizan fosfatos inorgánicos en el suelo. Los hongos *Aspergillus*, *Penicillium* y *Rhizopus* solubilizan fosfatos tricálcicos y rocas fosfóricas. En suelos con alta toxicidad de Al y deficiencia de P se ha reportado la presencia de *Pseudomonas* que dan tolerancia al Al mediante la producción de citrato sintetasa en raíces de tabaco (Delhaize *et al.*, 2001); de igual forma, en otras plantas como el trigo, las *Pseudomonas* participan en la producción de otros ácidos orgánicos como el oxálico, el fumárico y las fosfatasa, facilitando la solubilidad de P y otros nutrientes (García *et al.*, 2006; Loredó *et al.*, 2004).

La mayoría de los estudios sobre la interacción de estas bacterias con las plantas se ha realizado en condiciones de laboratorio e invernadero; sin embargo, aun cuando sus efectos benéficos están documentados, la información sobre su efecto directo en campo es escasa (Loredó *et al.*, 2004).

En un experimento realizado en suelos ácidos del piedemonte llanero se evaluó el efecto de las *Pseudomonas* sobre la producción de forraje, sin presentarse una respuesta a su aplicación, obteniéndose un promedio de 3673 kgMS·ha⁻¹ cinco meses después. El mismo comportamiento se observó en las evaluaciones realizadas a los 15 y 25 meses, respectivamente, con una producción promedia de forraje de 2940 y 2776 kgMS·ha⁻¹, respectivamente (Figura 5.27).

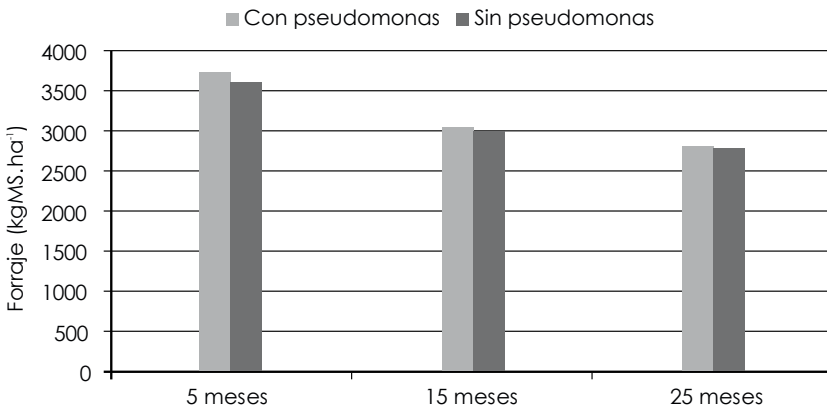


Figura 5.27. Producción de forraje de *B. decumbens* con y sin *Pseudomonas*, a los 5, 15 y 25 meses después de su aplicación a un suelo ácido del piedemonte llanero.

BIBLIOGRAFÍA

- Sosa, O. 2002. Los estiércoles y su uso como enmiendas orgánicas. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario. 4p.
- Alvim, M.J.; Botrel, M.; Verneque, R.S. & Salvati J.A. 1990. Aplicação de nitrogênio em acessos de Brachiaria. 1: Efeito sobre produção de matéria seca. Pasturas Tropicales, 12(2): 2-6.
- Amézquita, J. 1981. Persistencia del efecto fertilizante del P proveniente de fuentes de distinta solubilidad en un suelo de páramo. Tesis de grado. Facultad de Ciencias. Universidad Nacional de Bogotá. 99 p.
- Ayarza, M.A. 1991. Efecto de las propiedades químicas de los suelos ácidos en el establecimiento de las especies forrajeras. En: Establecimiento y renovación de pasturas. Eds. Lascano, C.E. & Spain, J. Red Internacional de Evaluación de Pastos Tropicales. Sexta Reunión del Comité Asesor. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT, Pp. 161-186.
- Calderón, B.J.S. & Giraldo, G.J.A. 1983. Respuesta del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) a la aplicación de gallinaza a niveles constantes de N.P.K. en la zona cafetera de Fresno, Tolima. Tesis (Ingeniero Agrónomo). Ibagué, Colombia. Universidad del Tolima. Facultad de Ingeniería Agronómica. 34 p.
- Cerqueira, P.H.; Rodrigues V.; Braga, G.J. & Ancho, P.P. 2004. Uso da calagem na recuperação e manutenção da produtividade das pastagens. Em: Fertilidade do solo para Pastagens produtivas. Anais do 21º simpósio sobre manejo das pastagens. Eds.: Silveira, C.G.; Moura, C. & Pedroso de Faria, V. Piracicaba, Brasil. Fundação de Estudos Agrários Luís de Queiroz, FEALQ. Pp. 63-100.
- Chamizo, A.R.; Ferrera, M.C.; González, C.A.; Ortiz, J.A.; Santizo, L. & Varela, A. 2009. Inoculación de alfalfa con hongos micorrízicos arbusculares y rizobacterias en dos tipos de suelo. Terra Latinoamericana 27: 197-205.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1981. Programa de pastos tropicales. Informe anual. Cali, Colombia. 88 p.
- _____. 1984. Selección y evaluación de pastos tropicales en condiciones de alta concentración de aluminio y bajo contenido de P disponible. Guía de estudio para ser usada como complemento de la unidad audiotutorial sobre el mismo tema. Cali, Colombia: Contenido Científico: Salinas J.G. & Sanz, J.I. 56 p.
- _____. 1986. Manejo de la fertilización fosfatada de pastos tropicales en los suelos ácidos de América Latina. Guía de estudio para ser usada como complemento de la unidad audiotutorial sobre el mismo tema. Cali, Colombia: Contenido Científico: Salinas J.G. & León, L.A. 56 p.
- CORANTIOQUIA (Corporación Autónoma Regional del Centro de Antioquia). 2003. Manejo y evaluación de la porquinaza mediante procesos de compostación (Cartilla técnica). Grupo multidisciplinario de estudios moleculares, GEM. Medellín: Universidad de Antioquia. 43 p.
- Daza, M.C.; Álvarez, J.G. & Camacho, J.H. 2008. Aplicación de materiales orgánicos e inorgánicos en la adsorción de P en un oxisol. Rev. bras. Eng. Agríc. Ambient. Vol.12. No.5.
- Debeux, J.C.; Santos, H.Q. & Sollenberger, L.E. 2004. Ciclagem de nutrientes: perspectivas de aumento da sustentabilidade da pastagem manejada intensivamente. Em: Fertilidade do solo para Pastagens produtivas. Anais do 21º simpósio sobre manejo das pastagens. Eds.: Silveira, C.G.; Moura, C. & Pedroso de Faria, V. Piracicaba, Brasil: Fundação de Estudos Agrários Luís de Queiroz, FEALQ. Pp. 357-400.
- Delgado, M. 2008. Los microorganismos del suelo en la nutrición vegetal. mario-delgado@orios.com.co

- Delhaize, E., Hebb, D. M. and Ryan P. R. 2001. Expression of a *Pseudomonas aeruginosa citrate* synthase gene in tobacco is not associated with either enhanced citrate accumulation or efflux. *Plant physiology (Bethesda)*, vol. 125, n° 4, pp. 2059-2067
- Espinosa, Y.; Hernández, M.J.; Barrera, T.V & Obispo, N.E. 2009. Efecto de la alimentación animal sobre la calidad microbiológica de estiércoles usados como fertilizantes. *Zootecnia Tropical*. 27 (2): 120-136.
- FAO, 2003. Uso de la gallinaza (Estiércol de aves) como abono orgánico. *Tecnologías para la agricultura*. 2 p.
- Flórez, L. 1980. Praderas artificiales en el valle de Toluca, Estado de México. *Universidad Nacional Autónoma de México. Inst. Rev.* 4(1): 67-75.
- García, F. y Díaz-Zorita, M. 2006. Nutrición y fertilización: Balances, modelos de diagnóstico e interacciones. Congreso "A Todo Trigo 2006", FCEGAC. Mar del Plata 18 y 19 de Mayo de 2006. INPOFOS Cono Sur. 10 p.
- Guerrero, R. 1993. Las propiedades químicas del suelo y su significado agronómico. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.
- Guerrero, R. 1982. Los fertilizantes químicos, propiedades y comportamiento agronómico. Bogotá, D.C.: Monómeros Colombo Venezolanos. 33 p.
- Gomes, D.M.; Vilela, L.; Lobato, & Vieira, W. 2001. Uso de gesso, calcário e adobos para pastagens no Cerrado. Planaltina, Brasil: EMBRAPA, Cerrados. 22 p.
- Loredo, C.; López, L. & Espinosa, D. 2004. Bacterias promotoras del crecimiento vegetal asociadas con gramíneas: una revisión. *Terra Latinoamericana*, 22(2): 225-239.
- McDowell, L. R.; Conrad, J.H.; Ellis, G.L. & Loosli J.K. 1994. Minerales para rumiantes en pastoreo en regiones tropicales. Departamento de ciencia animal. Centro de Agricultura Tropical. Universidad de Florida, Gainesville y Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional. 92 p.
- Martha Junior, B.; Vilela, L.; Barioni, L.G.; Gomes de Sousa, D.M, & Oliveira, A. 2004. Manejo da adubação nitrogenada em pastagens. Em: *Fertilidade do solo para pastagens produtivas. Anais do 21º simpósio sobre manejo das pastagens* Eds.: Silveira, C.G.; Moura, C. & Pedroso de Faria, V. Piracicaba, Brasil: Fundação de Estudos Agrários Luíz de Queiroz, FEALQ. Pp. 155- 215.
- Mendes, E.L.; da Silva, A.R.; Monteiro, F.A. & de Andrade, L.R. 2004. Adubação potássica em forrajes. En: *Fertilidade do solo para pastagens produtivas*. Eds.: Silveira, C.G.; de Moura, J.C. & de Faria, V.P. Anais do 21º Simposio sobre manejo das pastagens. Piracicaba, SP. Brasil: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, FEALQ. Pp. 219-278.
- Monroy, H.J. 2004. Caracterización de hongos formadores de micorrizas arbusculares (HMA) nativas, en seis coberturas de cítricos en el piedemonte del Meta. Tesis de Maestría. Bogotá, D.C. Universidad Nacional de Colombia. 143 p.
- Monteiro, F.A.; Colozza, M.T. & Werner, J.C. 2004. Enxofre e micronutrientes em pastagens. En: *Fertilidade do solo para pastagens produtivas*. Eds.: Silveira, C.G.; de Moura, J.C. & de Faria, V.P. Anais do 21º Simpósio sobre manejo da pastagens. Piracicaba, SP. Brasil: Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz, FEALQ. Pp. 219-278.
- Muñoz, R. 1994. Los abonos orgánicos y su uso en la agricultura. En: *Fertilidad de suelos, diagnóstico y control*. Ed.: Silva, F. Bogotá, D.C., Colombia: Sociedad colombiana de la ciencia del suelo. Pp. 293 – 304.
- Nutrient Requirements of Domestic Animals, NCR. 1989. *Nutrient Requirements of Dairy Cattle (Sixth edition)*. Washington D.C., USA: National Academy of Sciences – National research Council.
- Noda, Y. 2009. Las micorrizas: una alternativa de fertilización ecológica en los pastos. *Pastos y Forrajes*. Vol. 32. No. 2.

- Parra, J.L. 2004. Características tecnológicas, productivas y aspectos de salud del ternero en el sistema bovino doble propósito, piedemonte llanero. Boletín de investigación N°5. Villavicencio, Meta: Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. Programa Nacional de Transferencia de Tecnología Agropecuaria, PRONATTA. Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria, CORPOICA. 52 p.
- Paulino, V.T.; Werner, J.C.; Carriel, J.M. & Colozza, M.T. 1986. Estudos de adubação com *Brachiaria humidicola* e *Setaria anceps* cv. Kazungula em dois solos de várzea do Estado de São Paulo. *Zootecnia* 24: 181-206.
- Potash and Phosphate Institute. 1997. Manual Internacional de fertilidad de suelos. USA: Norcross, G.A. 146 p.
- Pinzón, A. & Amézquita, E. 1987. Compactación de suelos por el pisoteo de animales en pastoreo en el piedemonte amazónico de Colombia. Cali, Colombia: *Pasturas tropicales*, 12(1). Pp. 21-26.
- Ramírez, V.H.; Álzate, C.A.; Osorio, D.M.; Pineda, J.; Remires, M. & Salazar, M. 2004. Manejo ecológico de la fertilidad en suelos de ladera. *Investigaciones de Unisarc* 2(2): 1-8.
- Rao, I.M.; Kerridge, P.C. & Macedo, C.M. 1998. Requerimientos nutricionales y adaptación a los suelos ácidos de especies de *Brachiaria*. Eds.: Miles, J.W.; Mass, B.L. & do Valle, C.B. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuaria, EMBRAPA. Pp. 58-78.
- Rein, T.H. & Gomes de Sousa, D.J. 2004. Adubação com enxofre. Em: Cerrado, correção do solo e adubação. Eds.: Gomes de Sousa, D. Brasília D.F.: Embrapa Informação tecnológica. Pp. 227-282.
- Rincón, A. 2010. Efecto de la nutrición mineral de los pastos sobre el mejoramiento de la producción y calidad del forraje en el piedemonte llanero. Informe final. Bogotá, D.C., Colombia: CORPOICA-MADR. 173 p.
- Robbins, G.B.; Rickert, K.G. & Humphreys, L.R. 1986. Productivity Decline in Sown Tropical Grass Pastures with Age: The Problem and Possible Solutions. *Proceedings of the Australian Society of Animal production* 16: 319-322.
- Salinas, J.G. 1989. Fertilización de pastos en suelos ácidos de los trópicos. Cali, Colombia. Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. 215 p.
- Salinas, J.G. & García, R. 1985. Métodos químicos para el análisis de suelos ácidos y plantas forrajeras. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. Programa de Pastos Tropicales. 83 p.
- Salisbury, F.B. & Ross, C.W. 1992. Fisiología vegetal. México: Ed. Iberoamérica S.A. Pp. 319-338.
- Soares, C.V.; Monteiro, F.A. & Corsi, M. 1992. Recuperação de pastagens degradadas de *Brachiaria decumbens*. Efeito de diferentes tratamentos de fertilização e manejo. *Praderas tropicales*. Vol. 14. No. 2. Cali, Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, CIAT. Pp. 2-6.
- Sosa, O. 2002. Los estiércoles y su uso como enmiendas orgánicas. Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Rosario. 4p.
- Thomsen, I.K. 2004. Nitrogen Use Efficiency of ¹⁵N-labeled Poultry Manure. USA: *Soil Sci. Soc. Am. J.* 68: 538-544.
- Vilela, I.; Soares, W.V.; Sousa, D.M.G. & Macedo, C. 1998. Calagem e adubação para pastagens na região do Cerrado. Planaltina. Circular técnica No. 37. EMBRAPA. 16 p.
- Zabwsky, E. 2004. Micronutrientes. Em: Cerrado, correção do solo e adubação. Eds. Gomes de Sousa, D. EMBRAPA Informação tecnológica Brasília D.F. Pp. 165 - 225
- Zárate, L.M.; Sánchez, M. & Barrios, E. 2009. Respuesta de *Melinis minutiflora* a la inoculación con hongos micorrízico arbusculares en un Inceptisol de Colombia. Tesis de Maestría. Palmira, Colombia. Universidad Nacional de Colombia. Resumen. 14 p.