

CAPÍTULO 1

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-

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 ORINOQUÍA

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

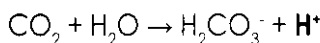
La acidificación del suelo es el proceso mediante el cual el pH disminuye, porque aumenta la concentración de hidrógeno (H^+) y la capacidad de neutralización de las bases. Aunque hay suelos naturalmente ácidos y seres vivos capaces de sobrevivir en estas condiciones, un suelo con un pH bajo puede presentar 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 cambiabile. 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:



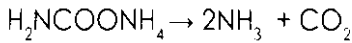
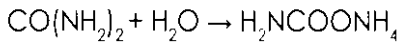
El H^+ desplaza a las bases de los sitios de intercambio del suelo.

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:



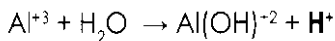
La utilización de la urea produce acidificación del suelo, aunque las reacciones iniciales permiten una elevación del pH aproximadamente a 8. En este ambiente alcalino, el carbamato de amonio se descompone rápidamente en amoniaco (NH_3) y en dióxido de carbono (CO_2):



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^+



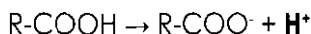
4. Intercambio de bases por H^+ en las raíces de las plantas

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

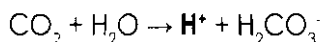
la respiración, también provoca la acidificación del suelo por la formación de ácido carbónico (Salisbury y Ross, 1992).

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

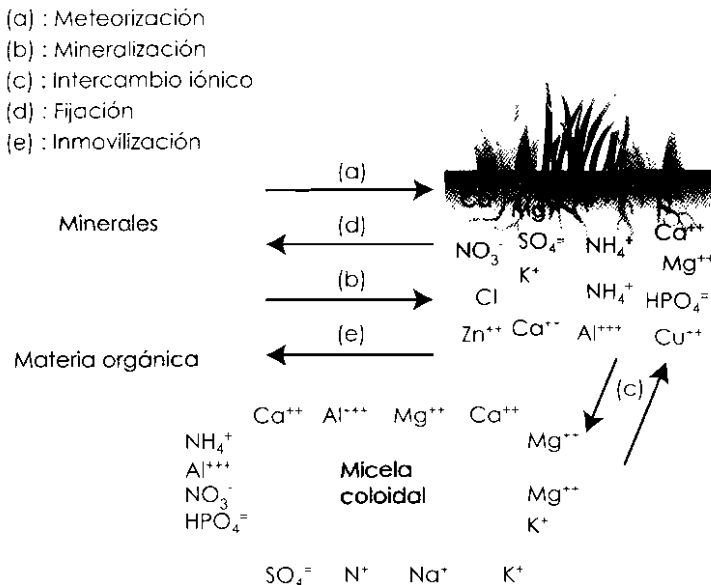


Figura 1.2. El intercambio iónico en el contexto de la relación suelo - planta (Guerrero, 1993).

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

1. Cationes cambiabiles

Los cationes tienen carga positiva y están constituidos por las bases cambiabiles importantes para la nutrición de las plantas (Ca, Mg, K y Na); de estos también forma parte la acidez cambiabie 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 intercambiabiles. 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 cmolkg^{-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).

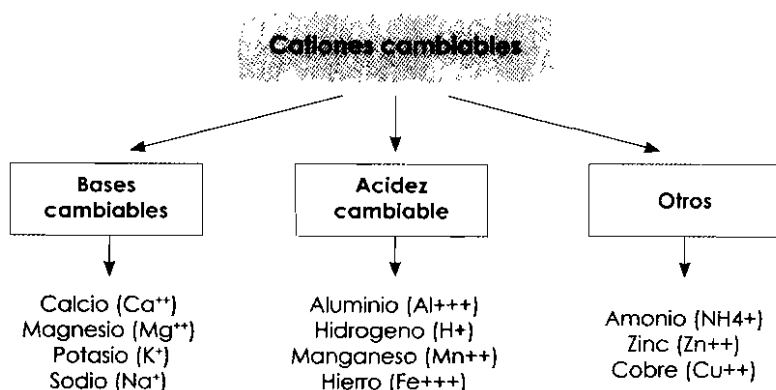


Figura 1.3. Cationes del suelo.

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.

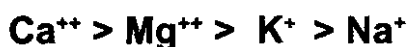
2. Secuencia de la retención catiónica

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 cmol kg^{-1} , la CICE de la montmorillonita está comprendida entre 80 y 120 cmol kg^{-1} . Ello supone que un suelo con 20% de arcilla montmorillonítica tendrá entre 16 y 24 cmol kg^{-1} de CICE por concepto de arcilla, mientras que otro suelo con el mismo 20% de arcilla, pero esta vez de tipo caolínica, tan solo tendrá entre 0,6 y 3,0 cmol 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 nutrimentos por las raíces de las plantas, o ser adsorbidos a las cargas positivas de las micelas del suelo (Figura 1.4).

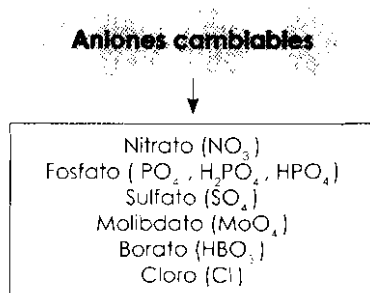


Figura 1.4. Aniones cambiables.

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. humidicola* 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.

BIBLIOTECA AGROPECUARIA
DE BOGOTÁ

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. humidicola</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:

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

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:

$$\text{Saturación de bases} = \frac{\text{Ca+Mg+K+Na} \times 100}{\text{C.I.C.E}}$$

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 cambiabiles 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 prática 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.