



INSTITUTO NACIONAL DE INVESTIGACION Y
PROMOCION AGROPECUARIA



NORTH CAROLINA STATE UNIVERSITY

CIPA XVI-ESTACION EXPERIMENTAL DE YURIMAGUAS

PROGRAMA DE SUELOS TROPICALES

YURIMAGUAS, PERU

LA ACIDEZ EN SUELOS BIEN DRENADOS DE LOS
TROPICOS COMO UNA LIMITACION PARA
LA PRODUCCION DE ALIMENTOS ^{1/}

E.J. KRAMPRATH ^{2/}

SERIE DE SEPARATAS

N° 8

LA ACIDEZ EN SUELOS BIEN DRENADOS DE LOS TROPICOS COMO
UNA LIMITACION PARA LA PRODUCCION DE ALIMENTOS ^{1/}

E. J. KRAMPRATH ^{2/}

Muchos suelos en las regiones húmedas son muy ácidos ($\text{pH} < 5$) y el crecimiento de los cultivos es limitado por la toxicidad de aluminio o manganeso o ambos. El catión intercambiable más importante en estos suelos ácidos es el aluminio.

La producción de cultivos es drásticamente reducida cuando la saturación con aluminio en los sitios de intercambio catiónico activo es mayor de 60% y tiende a ser óptimo cuando la saturación con aluminio es cero. Aunque la saturación de bases es un criterio de taxonomía de suelos no identifica suelos con problemas de acidez, porque el horizonte de diagnóstico no es el horizonte Ap.

Los suelos con problemas de toxicidad de aluminio pueden ser identificados extrayendo el aluminio con cloruro de potasio y determinando la proporción de los sitios de intercambio catiónico activo (suma de aluminio + calcio + magnesio + potasio) ocupados por aluminio. Las cantidades de cal suficientes para neutralizar el aluminio intercambiable son considerablemente menores que las cantidades requeridas para obtener un pH de 6.5. La cantidad de cal necesaria para neutralizar el aluminio puede ser estimado por la ecuación:
 $\text{meqCaCO}_3/100\text{g} = \text{meqAl intercambiable} \times 2$. El crecimiento de las raíces debajo de la capa arable que ha sido encalada puede ser mejorada por el uso de variedades tolerantes al aluminio, cuyas raíces les permitirán utilizar mejor la humedad del suelo presente debajo de la parte encalada.

Muchos suelos bien drenados en los trópicos húmedos son ácidos y contienen bajas cantidades de cationes básicas. Los primeros estudios en los cuales los suelos fueron encalados hasta cerca de la neutralidad dieron resultados

^{1/} Publicado en "Prioridades para aliviar las limitaciones de los suelos relacionadas con la producción de alimentos en los Trópicos" 1980. Patrocinado y publicado por el Instituto Internacional de Investigación de Arroz (IRRI) y la Escuela de Agricultura de la Universidad de Cornell del Estado de Nueva York, en cooperación con el Consorcio de Universidades de la Ciencia de Suelos para los Trópicos.

^{2/} Profesor Principal-Departamento de Suelos- Universidad Estatal de Carolina del Norte, Raleigh, N.C. 27695 - E.E.U.U.

variables (Pearson, 1975).

Muchos de los suelos utilizados en estos estudios preliminares tenían una alta capacidad tampón y las cantidades de cal necesarias para incrementar el pH a la neutralidad no fueron económicos. Las prácticas de encalado que convenían en zonas templadas donde predominan arcillas 2:1 no fueron aplicables a suelos altamente edafizados con arcillas 1:1 y arcillas 2:1 con Al en la intercapa.

Las ideas respecto a la acidez del suelo cambiaron bastante en la década del 50. Se encontró que el catión predominante en suelos ácidos con un pH < 5 fue el aluminio y no hidrógeno (Coleman y Thomas, 1967). Se descubrió que la acidez intercambiable que afecta el crecimiento de la planta fue la acidez extractable con una solución neutra de sal notamponada. A un pH 5.5 y más alto, los suelos contenían esencialmente aluminio no extractable con cloruro de potasio.

Estos resultados dieron lugar a un nuevo estudio de los conceptos tradicionales respecto a la saturación de bases desarrollados en suelos templados. Se encontró que los suelos con Caolinita y arcilla 2:1 con Al en la intercapa fueron esencialmente saturados al 100% con bases a un pH 5.8 a 6 ó cuando la capacidad de intercambio de cationes (CIC) fue basada sobre la suma de las bases intercambiables y de la acidez extractable con cloruro de potasio (Coleman et al, 1959).

NO se trata en esta publicación de ilustrar todos los estudios de encalado en regiones tropicales. Pearson (1975) ha hecho un reporte excelente de los estudios de encalado en los trópicos y el lector se puede referir a esa publicación para documentarse respecto a los datos de respuesta de varios cultivos. La presente publicación examina las limitaciones que provoca la acidez del suelo en la producción de cultivos en los trópicos a la luz de conceptos modernos de acidez de suelo e indica como estos conceptos pueden ser aplicados en prácticas de encalado.

PROBLEMAS DE ACIDEZ DEL SUELO EN EL TROPICO

El uso de la saturación básica como criterio en la taxonomía de suelos

La saturación de bases ha sido utilizado como criterio de clasificación a nivel de gran grupo para Inceptisoles y Oxisoles y como criterio para el orden Ultisol. Ejemplos de como se emplea la saturación de bases en clasificación de suelos son dados en el Cuadro 1. La saturación de bases de la capa arable del suelo se emplea solamente en el gran grupo Euthrothox. En todos los demás casos se emplea la saturación de bases de un horizonte subsuperficial o subsuelo. Esto significa que no se pueden formular conclusiones específicas respecto a la saturación de bases del horizonte superficial excepto para un gran grupo.

Se pueden, sin embargo, formular algunas conclusiones generales.

Los grandes grupos con el prefijo eutr tendrán generalmente menos problemas de acidez en los horizontes subsuperficiales que aquellos con los prefijos distr y hapl. En muchos casos suelos con el prefijo eutr tendrán probablemente un mejor contenido de calcio y magnesio en el horizonte superior a causa de un mejor reciclaje de nutrientes que en los demás grandes grupos. Grandes grupos con los prefijos distr y hapl tienen problemas de acidez en los horizontes inferiores que varían de ligeros a serios porque las saturaciones básicas pueden variar de 0 a 35 ó de 50 a 60%.

Se tiene que tener en cuenta que los horizontes de diagnóstico seleccionados para fines de clasificación son los que no son influenciados por las prácticas de manejo, tal como el encalado. Por eso, es necesario pedir el pH y la saturación con Al para determinar si la acidez del suelo va a ser un problema en la capa arable.

El pH del suelo, aluminio intercambiable y saturación con aluminio en los suelos

Las limitaciones más importantes de la producción de cultivos en los suelos ácidos son las toxicidades de aluminio, manganeso, hidrógeno y deficiencias de calcio (Jackson, 1967). Investigaciones en los años 50 con Ultisoles demostraron que el aluminio intercambiable extraído con cloruro de potasio es el catión predominante en suelos ácidos y que se obtienen valores mas significativos de saturación de cationes cuando la CIC se estima sobre la base de la suma de

cationes intercambiables y de aluminio intercambiable con cloruro de potasio. Las propiedades químicas de suelos ácidos fueron evaluados con el uso de los conceptos mencionados y los datos se presentan en el Cuadro 2.

El aluminio intercambiable es el catión mas importante en muchos suelos ácidos, particularmente a pH 4.5 y menos. Ocupa una proporción importante de la CIC efectiva en estos suelos ácidos. La toxicidad de aluminio es ciertamente un problema en muchos suelos tropicales.

Varios factores importantes adicionales se pueden observar en los datos del Cuadro 2. Los niveles de aluminio intercambiables son relativamente bajos (promedio de 1 a 3 meq/100g). Como se va a discutir mas tarde, esto es un factor importante cuando se consideran los requerimientos de encalado de los suelos. Otro punto es que la CIC es baja, indicando que las arcillas tienen baja actividad.

Otro factor que afecta el contenido de aluminio intercambiable de suelos ácidos es el tipo de minerales presentes. (Jue y Kamprath, 1979). La capa arable de los suelos ácidos con Caolinita y arcillas 2:1 con aluminio en la intercapa tenían, en promedio, 2.5 veces más aluminio intercambiable que lo que tienen solamente caolinita aunque el contenido de arcilla fue considerablemente menor (Cuadro 3). Los subsuelos con aluminio en las intercapas de arcilla también tenían contenidos mucho mas altos de aluminio intercambiable aunque su pH era mas alto que en los subsuelos con caolinita solamente. La presencia de arcillas con aluminio en la intercapa es la razón por la cual ciertos Ultisoles y Oxisoles contienen mayores cantidades de aluminio intercambiable que otros suelos, aunque los contenidos de arcilla y el pH del suelo sean similares.

Las concentraciones de aluminio en la solución de suelo de los suelos ácidos superficiales (pH < 5) de regiones templadas y tropicales presentaron niveles considerados como tóxicas para muchos cultivos (Cuadro 4). Las concentraciones mas altas ocurrieron en Ultisoles con textura arenosa de Carolina del Norte, que contenían arcillas 2:1 con capas intermedias de aluminio. Las concentraciones mas bajas se presentaron en un Oxisol con textura arcillosa de Brasil en el cual el mineral arcilloso fue Caolinita. La alta concentración de aluminio en la solución suelo en el Tropudult de Africa Occidental con 3% de carbono fue atribuído a los complejos orgánico-alumínicos (Jue, 1977). La

concentración de aluminio en la solución, en los suelos superficiales de Africa del Oeste, estuvo supersaturada respecto a gibsita. Se piensa que la solubilidad del aluminio esta controlada por los hidróxidos de aluminio amorfos, silicatos de aluminio amorfos y complejos orgánico-alumínicos. Las concentraciones de calcio en la solución del suelo se considerarían como adecuadas, excepto para la arena franca, si el aluminio no alcanzara niveles tóxicos.

Niveles de Manganeso en suelos ácidos

La toxicidad del manganeso es una de las limitaciones posibles de la producción de cultivos en suelos ácidos. Morris (1948) encontró que la presencia de 2ppm de manganeso soluble en agua sober una base de suelo usando una proporción 1:2 de suelo/agua fue suficiente para inducir síntomas de toxicidad de manganeso.

La concentración en la solución suelo de los suelos ácidos, depende de la cantidad de manganeso facilmente reducible en el suelo. Que un suelo tenga un bajo o alto contenido de manganeso facilmente reducible depende del tipo de material parental sobre el cual se ha formado el suelo. En Puerto Rico, los Oxisoles con textura arcillosa tenían altos contenidos (600-800ppm) de manganeso facilmente reducible mientras que los Ultisoles tenían cantidades mucho mas bajas (40-200ppm) (Pearson, 1975). Cuando las soluciones de suelo estaban a un pH 5 (pH del suelo 5.5), las concentraciones de manganeso estaban a niveles muy bajos (Pearson et al, 1977).

MEDICION E INTERPRETACION DE LA ACIDEZ DEL SUELO

Extracción con soluciones de sales neutras no tamponadas

"El experimento mas simple y probablemente el mas significativo que puede ser ejecutado sobre un suelo ácido es el de lixiviarlo con una solución de sal neutra tal como el KCL 1N" (Coleman et al, 1958). Las soluciones salinas no tamponadas como las de KCL reemplazan los cationes que son enlazados electrostáticamente a la superficie del suelo. En suelos minerales muy ácidos, el Al^{+3} es el catión mas importante enlazados a los sitios de intercambio activo, y el hidrógeno intercambiable no tiene importancia. (Coleman y Thomas, 1967). El Al^{+3} intercambiable se hidroliza para dar $Al(OH)^{+2}$, $Al(OH)_2^{+1}$ y $Al(OH)_3$, cuando el pH aumenta. Esto significa que para medir el aluminio intercambiable presente o

los sitios de intercambio activo, la solución extractora tiene que asumir el pH del sistema suelo.

Un procedimiento común para determinar la acidez intercambiable es de extraer 10g de suelo con 50ml de KCL 1N y lavarlo con otra cantidad de 50ml de KCL 1N (Lin y Coleman, 1960). El extracto es luego titulado con NaOH 0.1N al punto final de fenolftaleína. Para determinar las proporciones relativas de hidrógeno y aluminio en el extracto, se emplean dos indicadores en la titulación anaranjado de metilo y fonolftaleína. El punto final de anaranjado de metilo se sitúa cerca del pH 4. La titulación hasta el punto final de anaranjado de metilo sería la acidez atribuible al hidrógeno intercambiable y la diferencia del titulado hasta el punto final de anaranjado de metilo y el de fenolftaleína sería el componente Aluminio. La explicación es que una solución de $AlCl_3$ a la concentración de $10^{-3}M$ no tiene un pH de 4. Por eso, a no ser que los extractos de KCL tengan un pH de menos de 4, no hay esencialmente hidrógeno intercambiable presente. Los suelos minerales ácidos extraídos por el método descrito no contenían hidrógeno intercambiable (Evans y Kamprath, 1970).

En un estudio detallado en el cual los suelos fueron lixiviados con un volumen importante de KCL 1N, Nache y Sharp (1976) dividieron el aluminio extractable en aluminio intercambiable y no intercambiable. Una estimación rápida del Al intercambiable fue obtenida agitando 4g de suelo con 100ml de KCL 1N por 30'. El Al cambiabile (Y) fue relacionado a los estimados del Al cambiabile (X) por la ecuación, $Y = -0.7 + 0.98X$. La correlación en el caso de esta relación fue de 0.973. Otro método para estimar el aluminio disponible pra la planta es de agitar los suelos durante 5 minutos en una solución de $CaCl_2$ 0.01M empleando una proporción suelo-solución de 1:2 (Hoyt y Webber, 1974). El aluminio extraído por este método fue correlacionado con el aluminio intercambiable extraído con NaCl2N.

La relación entre el pH del suelo y la saturación de Al

El pH del suelo está relacionado con la saturación de Al. En la Figura 1, se presenta esta relación para Ultisoles y Oxisoles en Puerto Rico. A pH 5.4, la saturación de la CIC por Al efectiva (suma de Al, Ca, Mg y K intercambiables) fue esencialmente cero; a pH 4.2 fue aproximadamente 60%.

La correlación de los rendimientos relativos con el pH del suelo sin embargo no fue tan buena. Los rendimientos relativos de maíz en cinco suelos ácidos de las Filipinas son presentados en el Cuadro 6. Sólo en el suelo ácido con una saturación relativamente alta de Al, ocurrió una fuerte disminución de rendimiento. Las respuestas al encalado en los otros suelos, que tenían una saturación de Al relativamente baja, variaban entre 10 y 22%.

Esto indica que el efecto dañino del pH en sí o de la toxicidad de manganeso en el crecimiento de maíz no fue tan importante como el de una alta saturación de Al.

Valores críticos de saturación de Al y pH para la producción de cultivos

En el uso de los parámetros de acidez del suelo para predecir la respuesta de los cultivos a la aplicación de cal, se tiene que disponer de información respecto a los valores críticos para un parámetro dado. Los niveles de saturación de Al y el pH del suelo en los cuales los rendimientos son menores de 50% y más de 90% del máximo (Cuadro 7) han sido resumidos de un grupo de datos de cierto número de estudios de encalado con varios cultivos. Los niveles críticos para el nivel de rendimiento de 90% son menores a los valores de 20 a 10% de saturación de Al para maíz y generalmente menores de 10% de saturación de Al, para soya, vainita, caña de azúcar y algodón; y los valores de pH del suelo variaron de 5.0-5.3 para maíz, 5.6 para soya y 5.3-6.0 para algodón. Los niveles críticos para rendimientos menores de 50% del máximo son: a) saturación de Al de + de 40 a 60% en la mayoría de los casos, y b) valores de pH del suelo de < 4.5 para maíz, y < 5.0 para soya y algodón.

Cuando se establecen niveles críticos, se tienen que considerar las diferencias importantes en la tolerancia de las variedades hacia Al dentro de la misma especie vegetal. Otro factor es la sensibilidad de los cultivos en rotación a la acidez del suelo. La práctica de encalado empleada tiene que proporcionar un ambiente favorable al cultivo más sensible. Para la mayoría de los cultivos, un programa de encalado tendría que reducir la saturación de Al a prácticamente cero. Esto originará generalmente un pH favorable y un aporte adecuado de calcio.

La correlación de los rendimientos relativos con el pH del suelo sin embargo no fue tan buena. Los rendimientos relativos de maíz en cinco suelos ácidos de las Filipinas son presentados en el Cuadro 6. Sólo en el suelo ácido con una saturación relativamente alta de Al, ocurrió una fuerte disminución de rendimiento. Las respuestas al encalado en los otros suelos, que tenían una saturación de Al relativamente baja, variaban entre 10 y 22%.

Esto indica que el efecto dañino del pH en sí o de la toxicidad de manganeso en el crecimiento de maíz no fue tan importante como el de una alta saturación de Al.

Valores críticos de saturación de Al y pH para la producción de cultivos

En el uso de los parámetros de acidez del suelo para predecir la respuesta de los cultivos a la aplicación de cal, se tiene que disponer de información respecto a los valores críticos para un parámetro dado. Los niveles de saturación de Al y el pH del suelo en los cuales los rendimientos son menores de 50% y más de 90% del máximo (Cuadro 7) han sido resumidos de un grupo de datos de cierto número de estudios de encalado con varios cultivos. Los niveles críticos para el nivel de rendimiento de 90% son menores a los valores de 20 a 10% de saturación de Al para maíz y generalmente menores de 10% de saturación de Al, para soya, vainita, caña de azúcar y algodón; y los valores de pH del suelo variaron de 5.0-5.3 para maíz, 5.6 para soya y 5.3-6.0 para algodón. Los niveles críticos para rendimientos menores de 50% del máximo son: a) saturación de Al de + de 40 a 60% en la mayoría de los casos, y b) valores de pH del suelo de < 4.5 para maíz, y < 5.0 para soya y algodón.

Cuando se establecen niveles críticos, se tienen que considerar las diferencias importantes en la tolerancia de las variedades hacia Al dentro de la misma especie vegetal. Otro factor es la sensibilidad de los cultivos en rotación a la acidez del suelo. La práctica de encalado empleada tiene que proporcionar un ambiente favorable al cultivo más sensible. Para la mayoría de los cultivos, un programa de encalado tendría que reducir la saturación de Al a prácticamente cero. Esto originará generalmente un pH favorable y un aporte adecuado de calcio.

La medición del manganeso como un factor tóxico en los suelos ácidos

La medición de manganeso en el suelo ha estado relacionada principalmente con la predicción de deficiencias de este elemento.

Los síntomas de toxicidad de manganeso fueron observados en leguminosas cuando los extractos de suelo-agua en la proporción 1:2 contenían más de 2ppm de Mn sobre la base de suelo (Morris, 1948).

En un estudio efectuado sobre 20 suelos ácidos a $< \text{pH } 5.1$, el manganeso extraído con una solución de CaCl_2 0.01 M dió la mejor correlación con la concentración de manganeso en cebada y alfalfa (Hoyt y Nyborg, 1971). El proceso de extracción implicaba agitar 150g suelo en 300ml de una solución de CaCl_2 0.01M empleando una proporción suelo-agua 1:2 y agitándolo por 5 minutos (Hoyt y Webber, 1974). No fueron dados valores críticos de toxicidad.

TECNICAS DE MANEJO PARA SOLUCIONAR PROBLEMAS DE ACIDEZ DEL SUELO

El encalado para corregir la acidez del suelo

Control del pH del suelo

Una forma para corregir la acidez del suelo es añadir una cantidad de cal que incrementa el valor de pH hasta un nivel dado. Han sido desarrolladas varias soluciones tampones para medir la cantidad de acidez que tiene que ser neutralizada para que el suelo tenga un pH determinado. Una cantidad dada de suelo se añade a una solución tampón midiéndose la disminución de pH del tampón (solución buffer). El pH para el tampón comúnmente usado es 7 para SMP (Shoemaker et al, 1961) y Woodruff (1948) 8 para Adams y Evans (1962) y 6.6 para Mehlich (1976). Como las soluciones son tamponadas a un pH 7 a 8, no miden solamente el Al intercambiable sino también el hidrógeno asociado con los hidróxidos de Al, los óxidos hidratados de Fe y Al y con los grupos carboxílicos. Con las proporciones de suelo y de la solución tampón empleadas en los diferentes métodos, una disminución de 0.1 pH es igual a 1meq H/100g con el tampón Adams y Evans, y 0.4meq H/100g con el tampón Mehlich. Las cantidades de cal necesarias para aumentar el pH del suelo hasta 6.5 ó 7 son considerablemente mayores que las cantidades requeridas para neutralizar el Al, intercambiable (Reeve y Sumner 1970, Mendez y Kamprath, 1978).

Un problema potencial de encalar los suelos hasta un pH cerca de la neutralidad de inducir deficiencias de micronutrientes, particularmente boro, zinc y manganeso (Kamprath, 1971; Pearson, 1975). El encalado hasta pH 7

disminuyó la disponibilidad de fósforo en algunos suelos (Kamprath, 1971). Este efecto sobre el fósforo ocurre en suelos que contienen importantes cantidades de Al intercambiable (Asmarasiri y Olsen, 1973). Se presume que la formación de hidróxidos de Al recién precipitados, proporciona superficies muy reactivas para reaccionar con el fósforo de los fertilizantes.

Las proporciones de encalado basadas en el aluminio intercambiable

El uso del aluminio intercambiable como criterio para determinar las proporciones de encalado ha sido propuesto para suelos con una baja carga permanente y una carga dependiente del pH relativamente alta (Kamprath 1967, 1970; Reeve y Sumner 1970). La explicación fue que el aluminio es el factor tóxico en muchos suelos minerales ácidos, y la finalidad del encalado es la de eliminar la toxicidad del aluminio como factor limitante para el crecimiento de los cultivos.

Para determinar cuanta cal tiene que ser añadida para neutralizar el aluminio intercambiable, las proporciones de cal sobre la base del equivalente químico son añadidas como múltiplos de la cantidad de aluminio intercambiable. La cantidad de aluminio intercambiable neutralizada es determinada (Kamprath, 1970) después de que la cal ha tenido suficiente tiempo para reaccionar. Varios estudios han mostrado que debe agregarse cal en una proporción químicamente equivalente a 1.5 a 3 veces el aluminio intercambiable para neutralizar (Cuadro 8). Las cantidades mayores de cal se pueden explicar por las propiedades tampón de los suelos ácidos. El aluminio intercambiable es responsable del efecto tampón entre pH 4.0 a 5.6, mientras que el hidróxido de aluminio y los complejos orgánico-alumínicos controlan generalmente el efecto tampón a un pH de 5.6 a 7.6 (Jackson, 1963). Estudios con Ultisoles demostraron que cuando el pH fue aproximadamente 5.3, la cal reaccionó con el aluminio intercambiable y también con las fuentes de acidez dependientes de pH (Kamprath, 1970). Para neutralizar todo el aluminio, se tenía que aplicar la cal en cantidades químicamente equivalente a dos veces el Al intercambiable.

El uso de una resolución de $\text{CaCl}_2 0.02\text{M}$ también ha sido propuesto para estimar los requerimientos de cal de los suelos (Weeber et al, 1977). El número de toneladas de carbonato de calcio por acre para reducir el aluminio soluble a cero es dado por la ecuación $0.1 + 0.23$ (ppm de aluminio extraído con $\text{CaCl}_2 0.02\text{M}$). Esta correlación fue encontrada para Luvisoles grises y Solods, que

presentaban una variación de 2 a 10% de materia orgánica y de 14 a 85% de contenido de arcilla.

La acidez intercambiable extraída con cloruro de potasio, que es aluminio en la mayoría de los casos, es un criterio válido sobre el cual se pueden basar las cantidades de cal. Como regla general los meq de acidez extraíble con KCL/100 gr x 2 darán los meq CaCO_3 /100g requeridos para neutralizar la acidez. La cantidad de cal igual a 1meq CaCO_3 /100g es 1 tonelada de CaCO_3 /ha a una profundidad de 15cm.

Uso de variedades tolerantes al aluminio y manganeso

Otro método para solucionar los problemas de acidez de suelo es de seleccionar variedades resistentes hacia altas concentraciones de aluminio o manganeso o de ambos. El interés para este método ha aumentado durante la última década. Algunas especies presentan una gran diferencia varietal de tolerancia al aluminio. Variedades de trigo desarrolladas en suelos ácidos de Brasil son altamente tolerantes en comparación de variedades desarrolladas sobre suelos neutros a alcalinos (Foy et al , 1965). Diferencias similares existen con otras especies. En una reciente reunión de trabajo sobre adaptación de plantas a limitaciones de elementos minerales en suelos problemáticos, se reportó en detalle estudios de la tolerancia de plantas hacia aluminio y manganeso (Wright, 1976). (El lector puede consultar estos excelentes reportes para más detalles al respecto).

Como el encalado puede corregir las toxicidades de aluminio y manganeso en la capa arable, el mayor beneficio del uso de variedades tolerantes es el desarrollo de las raíces en el subsuelo ácido. Los efectos positivos de las raíces más profundas están relacionados principalmente con el uso de la humedad del subsuelo. En muchas regiones del trópico húmedo es común tener períodos de 1 a 2 semanas sin lluvia. Si la toxicidad debajo de la capa arable encalada reducen la profundidad de las raíces, una falta de humedad puede ocurrir y limitar los rendimientos de los cultivos.

El uso de adiciones de materia orgánica

La materia orgánica forma complejos con el aluminio y el manganeso y de esta manera hace disminuir la cantidad de aluminio y manganeso en la solución del suelo (Schnitzer y Skinner, 1963). En el caso de disponer de importantes cantidades de materia orgánica, por ejemplo, residuos de plantas

de fácil descomposición, estos podrían ser incorporados en los suelos ácidos. El material humidificado disminuirá la concentración de aluminio y el manganeso en la solución del suelo mediante la formación de complejos orgánicos. Cantidades relativamente altas de materia orgánica serían necesarias para tener algún efecto positivo en reducir las toxicidades en los suelos ácidos. Este método podría ser empleado en pequeñas fincas donde la materia orgánica o los residuos de cultivos están disponibles, donde la mano de obra es abundante y donde la cal está disponible en forma limitada y muy cara. Donde la cal está fácilmente disponible y tiene un precio razonable, se prefiere esta alternativa.

INVESTIGACIONES FUTURAS

Se ha demostrado suficientemente que el requerimiento de cal para suelos ácidos altamente edafizados tendrían que basarse sobre el contenido de aluminio intercambiable. Sin embargo, se han realizado pocos estudios bien controlados para determinar el factor por el cual los equivalentes de Al intercambiable se tienen que multiplicar para dar la cantidad de cal requerida para neutralizar el aluminio. Tales estudios se tendrían que realizar con suelos que presentan una gran variedad de características químicas en la zona radicular. Se tendrían que prestar atención para determinar las características de suelo que causarían que el factor varíe. Se necesita más información respecto a la saturación crítica del Al para especies de cultivos adaptadas al ambiente tropical.

Se tienen que desarrollar métodos para identificar suelos donde la toxicidad de manganeso puede ocurrir. Poco trabajo ha sido hecho en esta área. Se necesita información respecto a los niveles críticos de manganeso en el suelo donde la toxicidad se va a presentar con cultivos importantes en regiones tropicales y las cantidades de cal necesarias para eliminar la toxicidad.

Ciertos suelos ácidos no tienen necesariamente aluminio intercambiable o niveles tóxicos de manganeso, pero son deficientes en calcio intercambiable. En estos casos, se necesita información respecto a los niveles de calcio y al nivel de pH para la producción óptima de cultivos.

En los casos en que la práctica del encalado ha sido basada en el Al intercambiable hay poca información respecto a la duración del efecto de la

aplicación de cal. Se tienen que iniciar estudios a largo plazo para medir la eficiencia en períodos largos de tiempo. La profundidad a la cual el suelo es encalado es particularmente importante en áreas donde existen períodos sin humedad de 1 a 2 semanas y donde el crecimiento de raíces en el subsuelo es limitado por la alta saturación de Al.

Cuando se emplean diferentes especies de cultivos en experimentos de encalado, deberían incluirse variedades tolerantes al aluminio. Esto es particularmente importante para determinar el efecto de la acidez sobre los rendimientos de los cultivos debajo de la zona de incorporación de cal.

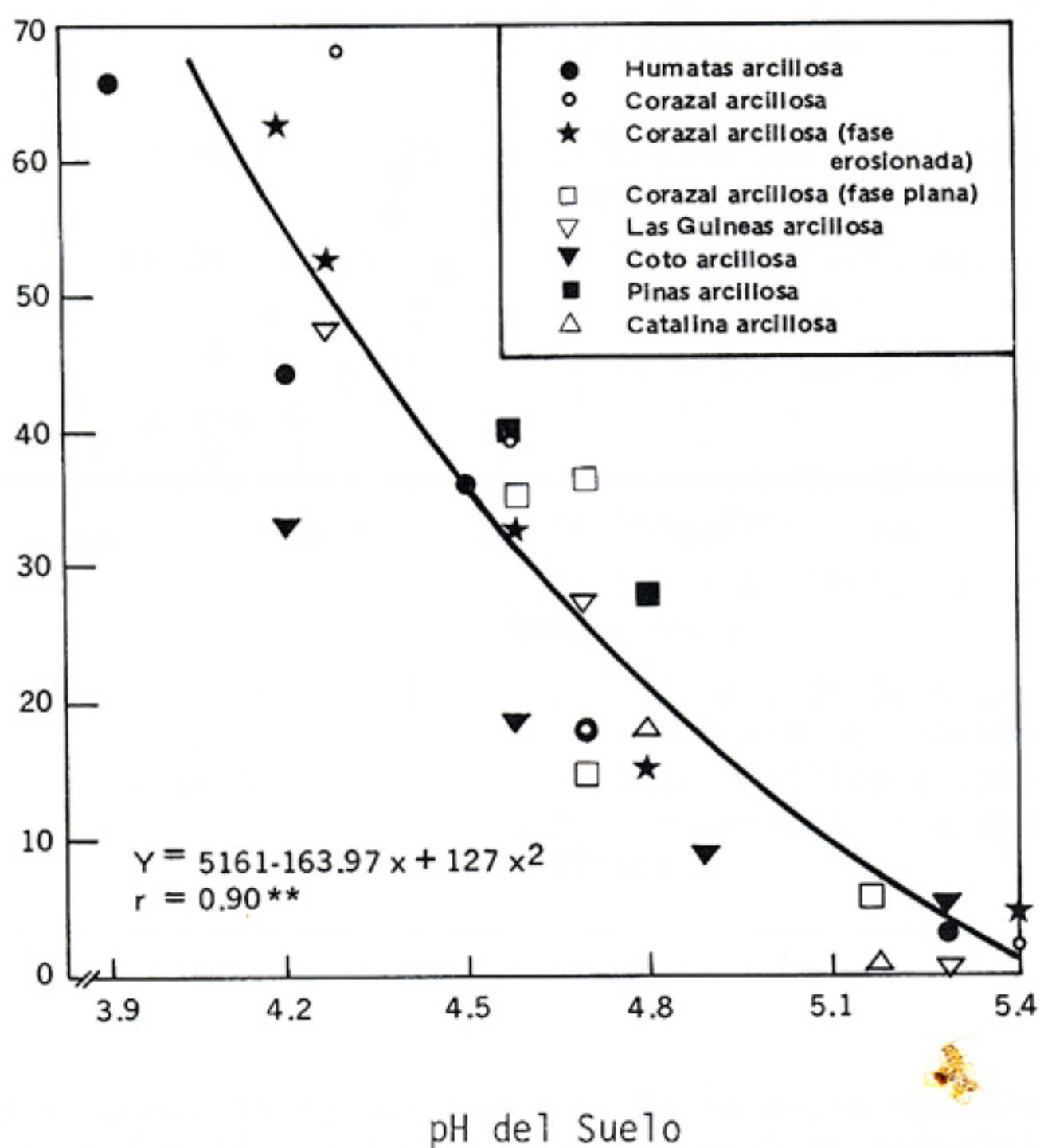


Fig. 1.- Relación entre el pH del suelo la saturación de aluminio para varios Ultisoles y Oxisoles en Puerto Rico (Abruna et al 1975).

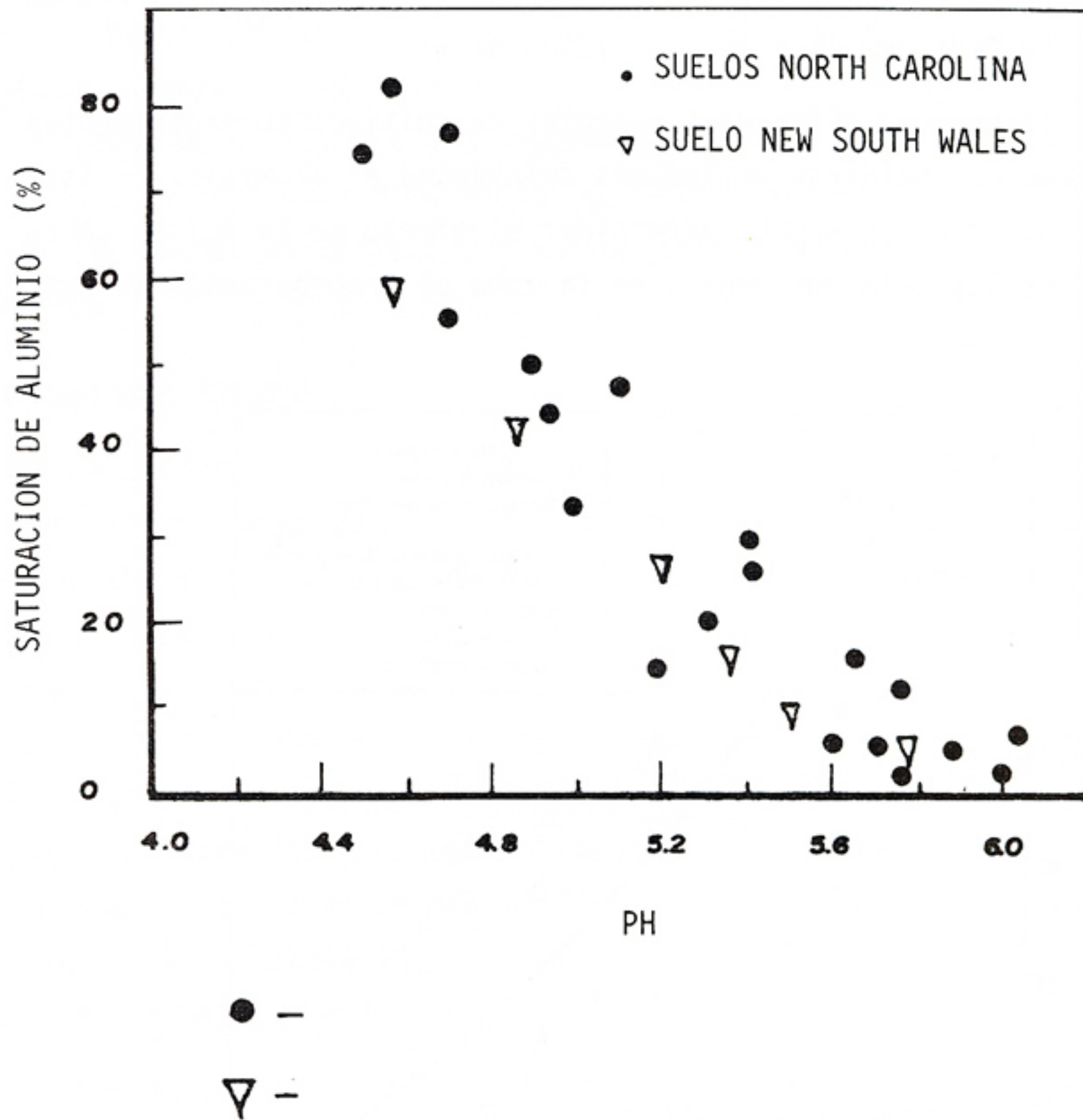


Fig. 2 Relación entre el pH y la saturación de aluminio en cuatro Ultisoles de Carolina del Norte y un Ultisol de Australia (Kamprath, 1978).

Cuadro 1. Uso de la acidez del suelo como criterio de diagnóstico en taxonomía de suelos.

Suelo	Método CIC	CRITERIOS DE DIAGNOSTICOS	
		Saturac. de bases (%)	Profundidad
Eutrochrepts	NH ₄ OAc	> 60	En alguna parte entre 25 a 70 cm
Distrochepts	NH ₄ OAc	< 60	En alguna parte entre 25 a 75 cm
Eutropepts	NH ₄ OAc	> 50	En alguna parte entre 25 a 75 cm
Distropepts	NH ₄ OAc	< 50	En alguna parte entre 25 a 75 cm
Eutrorthox	NH ₄ OAc	> 35	Epipedon y todos los subhorizontes del horizonte oxico hasta una profundidad de 1.25m
Haplorthox	NH ₄ OAc	< 35	En alguna parte del epipepon y subhorizontes del horizonte oxico hasta 1.25m
Eustrustox	NH ₄ OAc	> 50	En la mayor parte del horizonte oxico si es arcilloso.
		> 35	En la mayor parte del horizonte oxico si es franco.
Haplustox	NH ₄ OAc	< 50	En la mayor parte del horizonte oxico si es arcilloso.
		< 35	En la mayor parte del horizonte oxico si es franco.
Ultisol	Bases + acidez total medida con BaCl ₂ -T.E.A.	< 35	1.8m debajo de la superficie o hasta 1.25m debajo del límite superior del horizonte argílico o inmediatamente arriba del contacto lítico o del contacto paralítico.

Cuadro 2. Aluminio intercambiable, saturación con aluminio y pH de los suelos superficiales ácidos en regiones tropicales y templadas.

Región	Muestras	Suelos	pH	Al intercambiable (meq/100g)		Saturación con Al (%)	
				Variación	Promedio	Variación	Promedio
Australia ^a	7		4.5-5.2	0.6-3.2	1.6	32-97	72
Malasia ^b	8		3.6-4.2	0.7-12.4	3.4	34-86	61
Brasil ^c	5	Latosol rojo-amarillo	4.0-4.6	1.8-3.2	1.7	38-90	74
	3	Latosol rojo	4.1-4.2	0.7-1.9	1.2	83-90	88
Colombia ^d	26	Oxisoles	4.2-5.1	0.6-5.8	3.1	29-86	68
Panamá ^e	6	Latosoles	4.8-5.2	0.25-5.8	2.5	44-68	57
Puerto Rico ^f	5	Ultisoles	3.9-4.6	4.5-9.9	6.6	36-70	57
	3	Oxisoles	4.2-4.8	0.4-1.1	0.8	18-40	33
Africa Occidental		Ultisoles					
	21		5.1-5.4	0 -2.0	0.46	0 -43	13
	26		4.5-5.0	0.05-3.7	1.34	2 -69	41
	27		4.0-4.4	0.05-2.8	1.2	1 -67	35
Estados Unidos ^h	4	Ultisoles	4.5-4.7	0.9-4.2	2.1	54-32	72

a. Teitsei y Bruce, 1972 b. Singh y Talibudeen, 1969 c. Pratt y Alvahydo, 1966 d. Vargas, 1964

e. Méndez y Kamprath, 1978 f. Abruña et al, 1977 g. Juo, 1977 h. Kamprath, 1970

Cuadro 3. Efecto de la mineralogía en el contenido de Al intercambiable de los suelos (Datos de Juo y Kamprath, 1979).

MINERALOGIA DE ARCILLA		
Parámetros	Caolinita	Caolinita y Arcilla 2:1 con Al en la intercapa
<u>Suelos Superficiales</u>		
Promedios de aluminio extraíble con cloruro de potasio (meq/100g)	1.80	4.82
Variación de pH	3.5-4.7	4.0-4.7
Contenido promedio de arcilla (%)	31	17
<u>Subsuelos</u>		
Promedios de aluminio extraíble con cloruro de potasio (meq/100g)	1.42	3.30
Variación de pH	4.0-4.5	4.7-5.0
Contenido promedio de arcilla (%)	45	36

Cuadro 4. Calcio y Aluminio intercambiable, por ciento de saturación y concentración en la solución de suelos superficiales ácidos.

Area	Textura	pH	Intercambiable			Saturación (%)			Solución suelo (Meq/litro)		
			Ca (meq/100g)	Al (meq/100g)	(meq/100g)	Ca	Al	Al	Ca	Ca	Al
Carolina del Norte ^a (Ultisoles)	Franco	4.9	0.06	1.43	5	95	0.75	0.55			
Brasil ^b (Oxisol)	Arcilla	4.5	0.45	1.15	26	70	1.14	0.16			
Puerto Rico ^c (Ultisol)	Arcilla	4.1	0.44	5.35	6	77	3.24	0.31			
Africa Occidental ^d Paleudult	Franco arenoso	4.2	0.26	1.83	9	64	-	0.30			
Tropudult	Franco arenoso	5.2	6.80	0.02	68	0.2	-	0.23			

a Evans y Kamprath, 1979

b González, 1976

c Brenes and Pearson, 1973

d Juo, 1977

Cuadro 5. Correlación entre parámetros de acidez en suelos de Puerto Rico y el rendimiento relativo de maíz en tratamientos sin encalado comparado con tratamientos con encalado (Abruña et al, 1975).

Orden de Suelo	pH Inicial	Aluminio Intercambiable (meq/100g)	Saturación de Aluminio (%)	Rendimiento relativo (%)
Ultisol	4.3	9.9	68	10
Ultisol	3.9	6.3	66	22
Ultisol	4.2	6.9	63	18
Ultisol	4.3	4.5	47	47
Oxisol	4.6	0.9	40	61
Ultisol	4.6	5.5	35	62
Oxisol	4.2	1.1	33	85
Oxisol	4.8	0.4	18	85

Rendimiento relativo = $122.0 - 1.58$ (% saturación Al); $r = 0.97$
 Rendimiento relativo = $-222.0 + 62.1$ (pH del suelo); $r = 0.60$

Cuadro 6. Rendimiento relativo de maíz en suelos sin encalado en las Filipinas.

pH Del Suelo	Al intercambiable (meq/100g)	Saturación Al (%)	Rendimiento relativo (%)
4.4	2.5	46	49
4.8	0.9	22	90
4.7	0.8	8	87
4.7	0.7	3	80
4.8	0.2	2	78

Cuadro 7. Niveles críticos de saturación de aluminio y pH del suelo para un cierto número de cultivos.

Area	Cultivo	NIVEL CRITICO			
		<50% rend. máximo		90% rendi. máximo	
		pH	Saturación Al (%)	pH	Saturación Al (%)
Brasil ^a	Maíz	-	-	5.3-5.6	< 10
Puerto Rico ^b	Maíz	4.4	50	5.0	< 15
Estados Unidos ^c	Maíz	4.5	60	5.1	< 40
Filipinas ^d	Maíz	4.4	46	5.0	< 20
Brasil ^a	Soya	-	-	5.6	< 10
Puerto Rico	Soya	5.0	20	5.6	< 10
Estados Unidos ^c	Soya	4.9	40	5.6	< 20
Puerto Rico ^f	Caña de Azúcar	4.4	50	5.0	< 10
Estados Unidos ^c	Algodón	5.0	45	6.0	< 7
Uganda ^g	Algodón	-	-	5.3	< 0
Puerto Rico ^b	Vainitas	4.3	50	5.2	< 10

a Soares et al, 1975

b Abruña et al, 1975

c Kamprath, 1970

d Samonte y Ocampo, 1977

e Abruña et al, 1978

f Abruña y Vivente Chandler, 1976

g Fostes, 1970

Cuadro 8. Factor de encalado (meqAl/100g x factor) requerido para dar equivalentes de carbonato de calcio para reducir la saturación de Al a menos del 10%.

Area	Suelo 15cm de superficie	pH	Aluminio (meq/100g)	Saturación Al (%)	Factor	pH Final
Brasil ^a	Latosol rojo amarillo	4.0	0.7	70	3	4.9
	Latosol rojo amarillo	4.4	0.9	75	2	5.5
	Latosol rojo oscuro	4.0	1.9	86	2	5.0
Colombia ^b	Oxisol	4.3	3.5	78	2	5.3
Panama ^c	Latosol	5.1	1.2	53	1.5	5.9
	Latosol	5.0	3.0	64	1.5	6.0
Estados Unidos ^d	Ultisol	4.5	0.9	82	2.0	5.9
	Ultisol	4.7	1.0	78	2.0	6.0
	Ultisol	4.5	2.3	73	1.5	5.7
	Ultisol	4.7	4.2	54	1.5	5.6
India ^e		<5.0	-	-	2.0	5.3
Naftal ^f	Oxisol	<5.0	-	-	3.3	

a) Soares et al, 1975

b) Spain et al, 1975

c) Mendez y Kamprath, 1978

d) Kamprath, 1970

e) Pradhan y Khera, 1976

f) Reeve y Sumner, 1979

LITERATURA CITADA

- Abruña, F., y J. Vicente-Chandler. 1967. Sugarcane yields as related to acidity of a humid tropic Ultisol. *Agron. J.* 59: 330-331.
- Abruña, F., R. W. Pearson, y R. Perez-Escolar. 1975. Line response of corn and beans grown on typical Oxisols and Ultisols of Puerto Rico. Pages 261-282. En: E. Bornemisza y A. Alvarado, ed, *Soil Management in Tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Abruña, F., J. Rodriguez, Jose Badillo-Feliciano. S. Silva, y J. Vicente-Chandler. 1978. Crop response to soil acidity factors in Ultisols and Oxisols in Puerto Rico; soybeans. *J. Agric. Univer. P. R.* 62: 90-112.
- Adams, F., y C. E. Evans. 1962. A rapid method for measuring lime requirements of red-yellow podzolic soils. *Soil Science Society America, Proc.* 26: 355-357.
- Amarasiri, S. L., y S. R. Olsen. 1973. Liming as related to solubility of P and plant growth in an acid tropical soil. *Soil Science Society America, Proc.* 37: 716-721.
- Bache, B. W., y G. S. Sharp. 1976. Characterization of mobile aluminum in acid soils. *Geoderma* 15: 91-101.
- Brenes, E., y R. W. Pearson. 1973. Root response of three gramineae species to soil acidity in an Oxisol and an Ultisol. *Soil Science* 116: 295-302.
- Coleman, N. T., E. J. Kamprath, y S. B. Weed. 1958. Liming. *Adv. Agron.* 10: 475-522.
- Coleman, N. T., S. B. Weed, y R. J. McCracken. 1959. Cation exchange capacities and exchangeable cations in Piedmont soils of North Carolina. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.* 23: 146-149.
- Coleman, N. T., y G. W. Thomas. 1967. The basic chemistry of soil acidity. En: R. W. Pearson and F. Adams. Ed. *Soil acidity and liming*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Evans, C. E., y E. J. Kamprath. 1970. Lime response as related to percent Al saturation. Solution Al and organic matter content. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.* 34: 893-896.
- Foster, H. L. 1970. Liming continuously and cultivated soils in Uganda. *East Afr. Agric. For. J.* 36: 58-69.
- Foy, C. D., W. H. Armiger, L. W. Briggles, & D. A. Reed. 1965. Differential aluminum tolerance of wheat and barley varieties in acid soils *Agronomy J.* 57: 413-417.

- Gonzales-Erico, E. 1976. Effect of depth of lime incorporation on the growth of corn in Oxisols of Central Brazil. Ph.D. thesis, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Hoyt, P. B., & M. Nyborg. 1971. Toxic metals in acid soil II. Estimation of plant-available manganese. *Soil Sci. Soc. An., Proc.* 35: 241-244.
- Hoyt, P. B., & M. D. Webber. 1974. Rapid measurement of plant available aluminum and manganese in acid Canadian soils. *Can. J. Soil Science* 54: 53-61.
- Jackson, M. L. 1963. Aluminum bonding in soils; a unifying principle in soil science. *Soil Sci. Soc. An., Proc.* 27: 1-10.
- Jackson, W. A. 1967. Physiological effects of soil acidity. En: R. W. Pearson and F. Adams, ed. *Soil acidity and liming*. American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin.
- Juo, A. S. R. 1977. Soluble and exchangeable aluminum in Ultisols and Alfisols in West Africa, *Commun. Soils Sci. Plant Anal.* 8: 17-35.
- Juo, A. S. R., & E. J. Kamprath. 1979. Copper chloride as an extractant for estimating the potentially reactive aluminum pool in acid soils. *Soil Sci. Soc. An. J.* 43: 35-38.
- Kamprath, F. J. 1967. Soil acidity and response to liming. *Int. Soil Testing Tech. Bull.* 4, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Kamprath, E. J. 1970. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci. An., Proc.* 24: 252-254.
- Kamprath, E. J. 1971. Potencial detrimental effects from liming highly weathered soils to neutrality. *Soil Crop Sci. Soc. Fla.* 31: 201-203.
- Kamprath, E. J. 1978. Lime in relation to Al toxicity in tropical soil. Pages 233-245. En: C. S. Andrew and F. J. Kamprath, ed. *Mineral nutrition of legumes in tropical and subtropical soils*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Melbourne, Australia.
- Lin, C., & N. T. Coleman. 1960. The measurement of exchangeable aluminum in soils and clays. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.* 24: 444-446.
- Mehlich, A. 1976. New buffer pH method for rapid estimation of exchangeable acidity and lime requirements of soils. *Commun. Soil Plant Anal.* 7: 637-652.
- Mendez, J., & E. J. Kamprath, 1978. Liming of latosols and the effect on P availability. *Soil Sci. Soc. Am., J.* 41: 86-88.
- Morris, H. D. 1948. The soluble manganese content of acid soils and its relation to the growth and manganese content of sweet clover and lespedeza. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.* 13: 362-371.

- Nye, P., D. Craig, N. T. Coleman, & J. L. Ragland. 1961. Ion exchange equilibrium involving aluminum. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.* 25: 14-17.
- Pearson, R. W. 1975. Soil acidity and liming in the humid tropics. *Cornell Int. Agric. Bull.* 30, Cornell University, Ithaca, New York.
- Pearson, R. W., R. Perez-Escolar, F. Abruña, Z. F. Lund, & E. J. Bremes. 1977. Comparative responses of three crop species to liming several soils of the southeastern United States and of Puerto Rico. *J. Agric., Univ. P. R.* 61: 361-382.
- Pradhan, H. R. & M. S. Khera, 1976. Lime needs of soils of Sikkim based upon exchangeable aluminum test. *Bull. Indan Soc. Soil Sci.* 11: 291-299.
- Pratt, P. F., & R. Alvahydo. 1966. Cation exchange characteristics of soils of Sao Paulo, Brazil. *IRI Res. Int. Bull.* 31.
- Reeve, N. G., & M. E. Sumner. 1970. Lime requirement of Natal Oxisols based on exchangeable aluminum. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.* 34: 595-598.
- Samonte, H. P., & A. M. Ocampo. 1977. Liming and its residual effect on corn planted soils. *Philipp. Agric.* 60: 420-430.
- Schnitzer, M., & S. I. M. Skinner. 1963. Organo-metallic interactions in soils. I. Reactions between a number of metal ions and the organic matter of a podzol Bh horizon. *Soil Sci.* 98: 197-203.
- Shoemaker, H. E., E. O. McLean, y P. F. Pratt. 1961. Buffer methods for determining lime requirement of soils with appreciable amount of extractable aluminum. *Soil Sci. Soc. Am., Proc.* 25: 274-277.
- Singh, M., & O. Talibudeen. 1969. Thermodynamic assessment of the nutrient status of rubber growing soils. *J. Rubber Res. Inst. Malays.* 21: 240-249.
- Soares, W. V., E. Lobato, E. Gonzales, & G. C. Naderman, 1975. Liming soils of the Brazilian Cerrado. Pages 283-299 in E. Bornemisza and A. Alvarado, ed. *Soil management in tropical America*. North Carolina State Univ., Raleigh, North Carolina.
- Spain, J. M., C. A. Francis, R. H. Howeler, & F. Calvo. 1975. Differential species and varietal tolerance to soil acidity in tropical crops and pastures. Pages 308-329 in E. Bornemisza and A. Alvarado, ed. *Soil management in tropical America*. North Carolina State University, Raleigh, North Carolina.
- Teitzel, J. K. & R. C. Bruce. 1972. Fertility studies of pasture soils in the wet tropical coast of Queensland. 4. Soils derived from metamorphic rocks. *Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb.* 12: 281-287.
- Vargas, E. 1964. El aluminio de cambio en suelos de los Llanos Orientales. E.E. 9 Instituto Geográfico "Agustin Codazzi", Bogota, Colombia.

- Webber, M. D., P. B. Hoyt, M. Nyborg, & D. Corneau. 1977. A comparison of lime requirement methods for acid Canadian Soils. *Can J. Soil Sci.* 57: 361-370.
- Woodruff, C. M. 1948. Testing soils for lime requirement by means of a buffered solution and the glass electrode. *Soil Sci.* 66: 53-63.
- Wright, M. J. 1976. Proceedings of workshop on plant adaptation to mineral stress in problem soils. Cornell University, Ithaca, New York. (Spec. publ.).