

Nutrición de Plantas

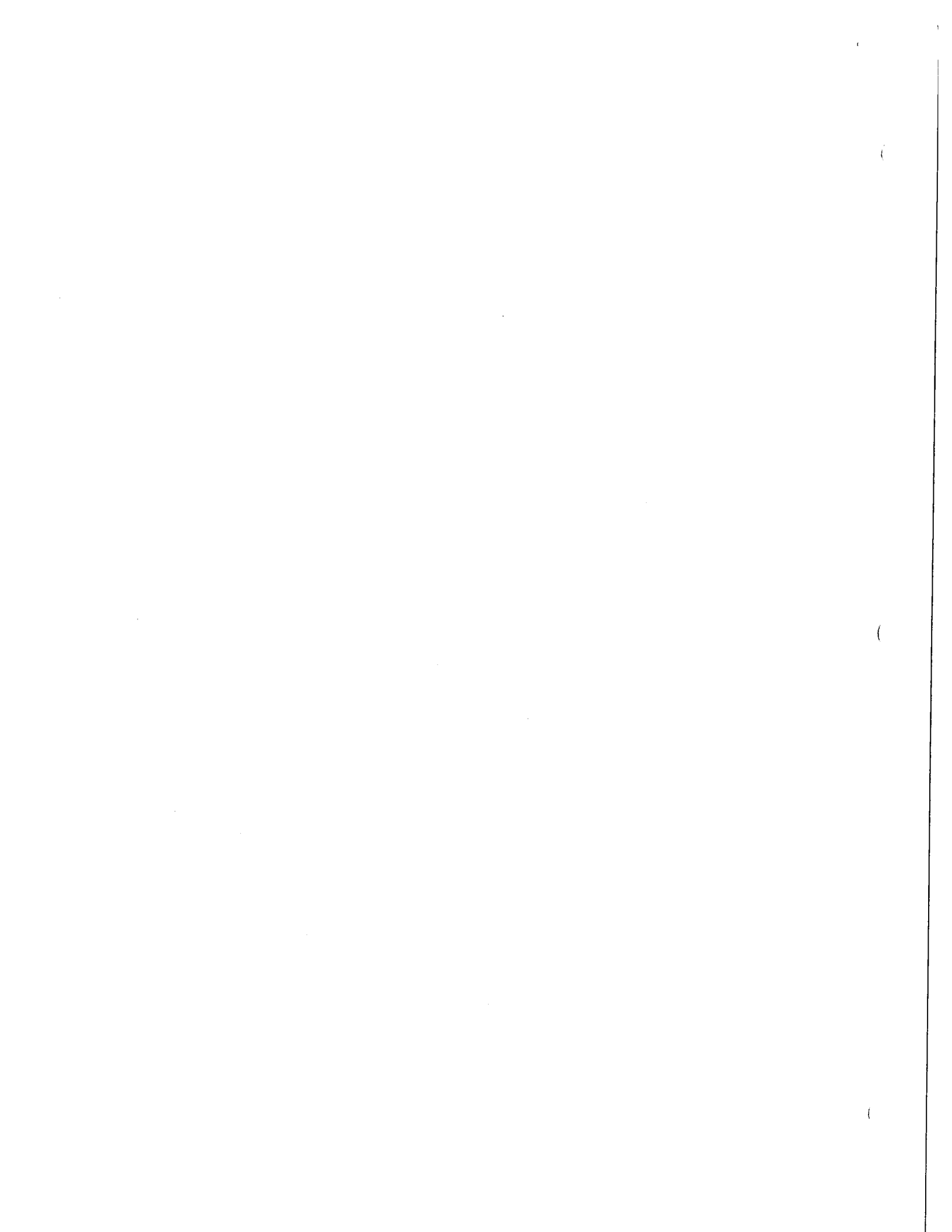
1. Requerimientos nutricionales en pastos tropicales. Salinas, J.G.
2. Adaptación de plantas a toxicidades de aluminio y manganeso en suelos ácidos. Salinas, J.G.
3. Relaciones suelo-planta que afectan las diferencias entre especies y variedades para tolerar baja disponibilidad de fósforo en el suelo. Salinas, J.G. y P.A. Sánchez.
4. Una reseña de la nutrición de elementos menores en leguminosas forrajeras tropicales en el norte de Australia. Bruce, R.C.
5. Respuesta diferencial de ocho gramíneas forrajeras a estrés de Al y P en un oxisol de Carimagua, Colombia. Salinas, J.G. y Delgadillo, G.
6. Métodos analíticos para suelos ácidos y plantas. Salinas, J.G. y García, R.

CONTENIDO

REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES EN PASTOS TROPICALES

José G. Salinas.

1. INTRODUCCION
2. DIAGNOSTICO Y CARACTERIZACION DE LOS REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES EN PASTOS TROPICALES.
 - 2.1. Determinación de los Requerimientos Nutricionales.
 - 2.2. Niveles Críticos Nutricionales.
 - 2.3. Interacciones de Nutrientes.
 - 2.4. Síntomas Visuales de Deficiencia Nutricional.
3. REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DE PASTOS TROPICALES.
4. EFECTOS DE LA TOXICIDAD DE ALUMINIO Y MANGANESO EN EL DESARROLLO DE PASTOS TROPICALES.
 - 4.1. Toxicidad de Aluminio.
 - 4.2. Mecanismos de Tolerancia a la Toxicidad del Al.
 - 4.3. Tolerancia de Especies Forrajeras Tropicales a la toxicidad de Aluminio.
 - 4.4. Toxicidad de Manganeso.
 - 4.5. Mecanismos de Tolerancia a la Toxicidad de Manganeso.
 - 4.6. Tolerancia de Especies Forrajeras Tropicales a la Toxicidad de Manganeso.



REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES EN PASTOS TROPICALES

José G. Salinas*

1. INTRODUCCION

La reacción de las plantas forrajeras a los elementos minerales presentes en el suelo, es determinante principal de la distribución natural y de la habilidad para sobrevivir y/o producir de las especies forrajeras en ecosistemas, sean o no estos modificados por el hombre. De esta manera, es posible identificar respuestas diferenciales entre ecotipos en ambos, entre y dentro de especies forrajeras, y así, llegar a conocer el potencial productivo de las mismas que define la capacidad de adquisición y uso de nutrimentos por parte de las plantas. Tal conocimiento, es esencial para seleccionar las mejores especies para una determinada situación así como también llegar a conocer las interacciones existentes en una comunidad de plantas forrajeras.

El estado nutricional de un suelo puede considerarse como satisfactorio cuando éste suministra nutrimentos en una concentración y tasa suficientes para las necesidades de la planta forrajera en la fase de

* Jefe Sección Suelos-Nutrición Plantas, Programa de Pastos Tropicales, CIAT, Cali, Colombia.

su establecimiento. Factores del medio ambiente, suelo y planta influyen sobre este suministro adecuado y por tanto, el sistema es dinámico antes que estático. El diagnóstico inicial del estado nutricional de un suelo constituye la información básica obtenida de una evaluación del recursos tierra, la cual describe en forma general la naturaleza de los suelos, clasificación, distribución y composición química.

El objetivo principal del diagnóstico nutricional de los suelos dentro de un ecosistema o ecosistemas es determinar qué nutrimentos son limitantes en el desarrollo de la planta forrajera y qué cantidad de cada nutrimento es necesaria para eliminar la limitación, en función de la respuesta diferencial de especies forrajera. En general, N, P, K, Ca, Mg y S son los más variables en cuanto al requerimiento nutricional en diferentes suelos y especies forrajeras. Además, los requerimientos para el mantenimiento de pasturas pueden diferir de los de establecimiento y también, el estado nutricional puede cambiar con el tiempo, debido a la remoción del sistema, reciclamiento y/o a pérdidas tales como lixiviación y fijación en el suelo.

Existen varias técnicas disponibles para el estudio del diagnóstico nutricional de un suelo en relación al establecimiento de especies forrajeras. Entre ellas están el uso adecuado de los análisis de suelos y plantas, experimentos de invernadero y campo y el diagnóstico de síntomas visuales de deficiencias nutricionales.

Una secuencia lógica de eventos en un área nueva consistiría en los siguientes puntos:

1. Evaluación del Recurso Tierra en un Ecosistema.
 - a) Descripción y representación geográfica de clima, suelo y vegetación.

- b) Caracterización química de los suelos, perfiles de suelo.
 - c) Evaluación inicial del potencial productivo de los suelos.
2. Diagnóstico General del Estado Nutricional del Suelo y de la Planta Forrajera.
- a) Calibración de métodos analíticos para suelos y plantas.
 - b) Determinación de nutrimentos limitantes en el suelo.
 - c) Relaciones entre estado nutricional y factores edafológicos.
 - d) Diagnóstico de síntomas visuales de deficiencia nutricional en plantas forrajeras.
3. Estudios sobre la Adaptación y Establecimiento de Especies Forrajeras al Ecosistema.
- a) Caracterización agronómica de especies forrajeras.
 - b) Estudios de fertilización con especies promisorias.
4. Estudio sobre el Mantenimiento y Desarrollo de Pasturas en un Ecosistema.
- a) Problemas específicos de mantenimiento.
 - b) Pruebas analíticas de suelos y plantas.
 - c) Estudios de requerimientos nutricionales para mantenimiento de pasturas.
 - d) Manejo del sistema suelo-planta-animal.

El objetivo principal de este trabajo es proporcionar una información general de los aspectos inherentes a la nutrición de plantas forrajeras, enfatizando una estrategia de fertilización con insumos bajos en suelos ácidos de fertilidad nativa baja existente en América Tropical.

2. DIAGNOSTICO Y CARACTERIZACION DE LOS REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES EN PASTOS TROPICALES.

El éxito para el desarrollo y explotación de sistemas de pasturas tropicales, las cuales consideran en conjunto la trilogía suelo-planta-animal, se debe en gran parte a la adecuada provisión de aquellos nutrientes limitantes para el establecimiento y mantenimiento de gramíneas y/o leguminosas forrajeras tropicales. Los requerimientos nutricionales de pastos tropicales que se desarrollan en un suelo dado pueden ser obtenidos por una variedad de métodos tales como la experimentación directa en campo, experimentación en invernadero, caracterización química del suelo y de la planta forrajera, caracterización de síntomas foliares de deficiencia nutricional y además, la experiencia del ganadero y/o de los extensionistas (Smith 1978).

Es importante remarcar que el banco de datos que ha sido acumulado en zonas templadas sobre aspectos nutricionales, que incluyen el diagnóstico nutricional por medio de una caracterización analítica de suelos y plantas, no está disponible en el caso de las regiones tropicales. De aquí, las correlaciones esenciales entre pruebas analíticas de suelos y plantas versus la respuesta de plantas forrajeras son generalmente muy pocas. De esta manera, esa falta de información en los trópicos, determina la necesidad de que la investigación en la caracterización de los requerimientos nutricionales en pastos tropicales tenga un enfoque prioritario.

2.1. Determinación de los Requerimientos Nutricionales.

La base para el uso de niveles nutricionales en

plantas forrajeras, con el fin de un diagnóstico del estado nutricional, es la relación que existe entre el rendimiento y las concentraciones de nutrimentos en la planta. La composición mineral de una planta forrajera es relativa al análisis químico del tejido forrajero. De aquí, los tipos de análisis de la planta a realizarse y la manera en que ellos son interpretados depende sobre todo del propósito por el cual los análisis son realizados. Muy a menudo, estos objetivos no son claramente definidos antes de embarcarse en un programa de investigación. Smith (1978) indica que entre los objetivos que determinan la caracterización nutricional de plantas forrajeras están:

- a. Diagnostico simple de la deficiencia de un nutrimento.
- b. Diagnostico de la toxicidad mineral.
- c. Guía para la corrección de deficiencia(s) nutricional(es).
- d. Medio eficiente para mantener la fertilidad del suelo en base a la extracción de nutrimentos para las plantas forrajeras.
- e. Establecer la recomendación de una fertilización.
- f. Predecir el potencial productivo de una pastura.

Es menester indicar que todos estos objetivos no son respondidos por el análisis químico de la planta. Además debe tenerse en cuenta que en la mayoría de los casos, un análisis simple del tejido vegetal, indica solamente que un nutrimento en particular esta limitando al momento del muestreo. De esta manera, además del análisis cuantitativo, deben considerarse los siguientes aspectos para la interpretación y satisfacer los objeti

vos mencionados anteriormente.

1. Como un nutrimento dado viene a ser deficiente.
2. Que se debería hacer para eliminar esa deficiencia.
3. Tipo de respuesta a obtener luego de corregir la deficiencia.
4. Presencia de otra limitación nutricional al corregir la deficiencia.
5. Epoca esperada para la manifestación de una deficiencia nutricional.

Además de cumplir todos estos requisitos en la ca racterización de los requerimientos nutricionales, es importante la selección del parámetro apropiado de res puesta para relacionarlo con la concentración de nutri mentos. En general, la mayoría de la investigación en regiones tropicales considera la producción de materia seca como el parámetro mas apropiado. Sin embargo, en muchas circunstancias, otros parámetros vienen a ser mas importantes que el rendimiento de materia seca per se. Por ejemplo, en algunos casos para medir la calidad del forraje tales como nivel de proteína, composición de aminoácidos, fibra cruda, digestibilidad del forraje, etc, la producción de materia seca es de importancia secundaria. Por otra parte, otros parámetros rela tivos a la estabilidad de una pastura y factores que afectan la producción animal asumen importancia prima ria. Asi se tienen por ejemplo, la composición botáni ca para un balance entre gramínea y leguminosa, produ cción animal, calidad de la pastura, contenido de nutri mentos en el forraje en relación a los requerimientos nutricionales del animal y los efectos secundarios de la fertilización del suelo sobre la nutrición del ani-

mal (Rees y Minson, 1977). Básicamente, muy poca investigación se ha realizado en los trópicos sobre los requerimientos nutricionales de los forrajes tropicales en relación a los parámetros complejos señalados anteriormente.

2.2. Niveles Críticos Nutricionales.

Como resultado de la respuesta diferencial entre especies y variedades, surgió durante los últimos años la filosofía de insumos mínimos en fertilización. Este enfoque no debe ser interpretado como la eliminación total de una fertilización, pero sí como una alternativa que reduce los niveles de fertilizantes y enmiendas en función del requerimiento nutricional de una especie dada. De aquí, es más conveniente referirse a insumos críticos de fertilización puesto que un insumo mínimo o máximo de fertilización será determinado por el requerimiento nutricional crítico de una especie dada en función de su rendimiento. Consecuentemente, el desarrollo de fórmulas que definan baja o alta fertilización dependerá específicamente si el requerimiento crítico nutricional de una especie dada al ser traducido en cantidad de fertilizante es baja o alta para obtener un rendimiento adecuado. Esta situación se extiende al caso de elementos tóxicos (Al y Mn) refiriéndose a requerimientos críticos de tolerancia.

En síntesis, el criterio anterior enfatiza la determinación previa de concentraciones críticas nutricionales externas (suelo) e internas (planta) al ser una técnica ampliamente usada al presente. De aquí la definición de una concentración crítica nutricional tanto externa como interna implica en la mayoría de los esquemas de diagnóstico aquella concentración que por debajo de ella la producción declina significativamente (Ulrich, 1952,

Ritchey , 1979). Este criterio exige un buen estimado del rendimiento y una cuantificación de la dosis mínima de fertilizantes al nivel crítico del nutrimento en el suelo y en la planta (especie).

Las técnicas disponibles de diagramas de dispersión (Figura 1.) y el uso de modelos discontinuos (Figura 2, 3 y 4) desarrollados por Cate y Nelson (1971), son herramientas convenientes para la interpretación de concentraciones críticas nutricionales externas e internas así como también la estimación de dosis mínimas de fertilizantes, necesarias para un rendimiento adecuado. En base a esta caracterización nutricional es posible distinguir grupos dentro el germoplasma de gramíneas y leguminosas con requerimientos críticos nutricionales bajos y altos.

Varios factores deben ser considerados en la determinación de las concentraciones críticas nutricionales, puesto que estas influyen definitivamente en dicha concentración. Entre las más importantes se citan: 1) Edad del tejido; 2) Tipo de tejido y 3) Diferencias entre especies y ecotipos dentro una especie. Respecto al primer factor, variaciones en la movilidad y retranslocación de nutrimentos dentro la planta resultan en diferencias acentuadas de la concentración de nutrimentos en los tejidos de diferente edad. Por ejemplo, Ca y B son generalmente considerados menos móviles en la mayoría de las especies, mientras que N, P, K y Na son rápidamente reciclados de los tejidos viejos a los jóvenes. La movilidad del Mg, S, Fe, Zn y Mn ocupan una posición intermedia entre estos extremos de movilidad de nutrimentos (Crafts y Crisp, 1971). De esta manera, la restricción del suministro de los nutrimentos menos móviles es rápidamente reflejada en la concentración de e-

Los nutrientes y en los síntomas foliares de deficiencia en los tejidos jóvenes. En el caso de los nutrientes móviles, la rapidez de la presencia de una deficiencia dependerá de la tasa de translocación y de la cantidad transportada de los tejidos viejos a los jóvenes.

Smith (1978) indica que existen dos enfoques para considerar el efecto de la edad del tejido sobre la concentración crítica nutricional en el tejido de plantas forrajeras. El primero, una uniformización rígida sobre un estado particular de desarrollo de la planta en el cual la planta integra debería ser muestreada y analizada. Aunque este método de muestreo resulta en una pérdida de la sensibilidad debido a la mezcla de diferente tipo y edad de tejido vegetal, investigadores con experiencia en el manejo de este tipo de muestras han encontrado un medio adecuado para diagnosis nutricional. Sin embargo, este método no es recomendable para especies arbustivas tales como *Leucaena leucocephala*, *Stylosanthes scabra*, *Desmodium gyroides*, *Desmodium ovalifolium*, etc.

El otro enfoque es relativo a la selección de tejido vegetal de la misma edad fisiológica y es el método recomendado para especies arbustivas como las mencionadas anteriormente y rastreras tales como *Centrosema pubescens*, *Pueraria phaseoloides*, *Macroptilium atropurpureum*, etc y especies forrajeras que están bajo pastoreo continuo donde plantas enteras pueden no encontrarse para muestreo. El tipo de tejido influye en la caracterización del nutriente bajo estudio, de esta manera, los tejidos jóvenes generalmente son empleados para los nutrientes menos móviles y tejidos más viejos para los nutrientes más móviles.

Especies y ecotipos dentro de especies forrajeras presenta una variabilidad amplia tanto en sus requerimientos nutricionales así como en sus habilidades para absorber y acumular elementos minerales (Andrew et al, 1971, 1977). El Cuadro 1. resume algunos datos sobre concentraciones críticas internas de ciertos nutrimentos y la variabilidad que existe entre especies.

Los trabajos de Andrew y Robins (1969), confirman la existencia de niveles críticos internos. Ellos de terminaron las concentraciones críticas de fósforo en la parte aérea de varias especies de pastos tropicales, las cuales fueron correlacionadas con máximos rendimien tos. Este porcentaje de fósforo en la parte aérea de la planta, sobre el cual no hubo respuesta posterior de crecimiento, fue considerado como nivel crítico interno de fósforo. Algunos resultados (Cuadro 2) muestran que especies leguminosas forrajeras tales como *Stylosanthes humilis* y *Centrosema pubescens* tienen un nivel crí tico interno más bajo que especies tales como *Glycine weightii* y *Medicago sativa*. Las primeras dos especies son nativas de regiones con suelos bajos en fósforo dis ponible y otros nutrimentos.

La misma observación fue hecha con gramíneas forra jeras. Gramíneas tales como *Andropogon gayanus*, *Brachia* *ria decumbes* y *Melinis minutiflora* tienen bajos niveles críticos y son muy comunes en suelos ácidos con baja disponibilidad de fósforo, mientras *Chloris gayana* y *Pas* *pallum dilatatum* tienen un nivel crítico interno más al to.

Existe también evidencia cuantitativa entre espe cies y ecotipos dentro una especie en relación a niveles críticos externos de fósforo (en el suelo). Si el fós foro disponible en el suelo que produce entre 60-80% del rendimiento máximo, es considerado como el "reque-

rimiento externo de fósforo", entonces existe diferen
cias significativas entre especies. El Cuadro 3, mues
tra diferencias en este requerimiento externo de P en-
tre leguminosas y gramíneas.

2.3 Interacciones de Nutrimentos.

La importancia de garantizar que un nutriente en estudio es el factor limitante en la producción de una especie forrajera, no debe ser sobreenfatizada, puesto que muchas veces en forma simultánea otros nutrientes pueden limitar dicha productividad. Bajo estas circuns
tancias, la interacción de nutrientes constituye un as
pecto de importancia en el diagnóstico de los requeri
mientos nutricionales.

Swanson (1963) ha sugerido un modelo alterno base
do en la "Ley del Mínimo" de Liebig, el cual puede ser considerado para la interpretación de interacciones en
tre nutrientes. Este modelo (figura 5) postula una respuesta lineal para el principal elemento, la que se detiene repentinamente cuando otro factor nutricional se hace limitante, pero que recupera su ascenso lineal cuando se corrige dicha limitación. Eventualmente, el rendimiento de una planta es limitado por la capacidad genética de la planta cuando todos los factores exter
nos limitantes son eliminados.

La interacción entre nutrientes se presenta de diferentes maneras a través de los resultados experimen
tales. La más común ocurre cuando simultáneamente más de un nutriente contribuye a una respuesta dada (Figura 6). En estos casos, cualquier nutriente limitante afectará la respuesta de la especie forrajera a cualquier otro nutriente. En efecto, un ensayo de 3 grami
neas forrajeras (*Andropogon gayanus*, *Brachiaria decum-*

bens y *Brachiaria humidicola*) que fue establecido hace dos años fue evaluado a diferentes niveles de P y K. Los resultados presentados en la Figura 7 muestra un efecto de interacción de P y K en la respuesta de las 3 gramíneas.

Andropogon gayanus no respondió a P en ausencia de K, *Brachiaria decumbens* lo hizo hasta 50 kg P_2O_5 /ha y *Brachiaria humidicola* a 100 Kg P_2O_5 /ha. En la medida en que se incrementaron las dosis de K, todas las especies aumentaron sus rendimientos y acentuaron sus respuestas a P (Figura 7).

Andropogon gayanus se mostró como la especie más eficiente en la utilización de K aplicado, seguido por *Brachiaria decumbens* en términos de producción de materia seca por Kg de K_2O aplicado (Fig.8). La dosis de 40 Kg de K_2O /ha fue superior en todas las especies a las distintas combinaciones con P al producir los mayores incrementos en producción por unidad de fertilizante aplicado.

Los problemas de deficiencia de fósforo en suelos ácidos del trópico usualmente ocurren junto con la toxicidad de aluminio. Los dos problemas son difíciles de separar debido a la afinidad química entre ambos elementos. Consecuentemente, interacciones aluminio-fósforo tienen que ser consideradas al evaluar la tolerancia de variedades y especies a ambos problemas.

Diferencias entre especies y ecotipos entre especies forrajeras para tolerar niveles tóxicos de aluminio, han sido relacionadas con diferencias en la habilidad de las plantas para absorber y utilizar fósforo en presencia de altos niveles de aluminio (Salinas y Sánchez, 1976).

Clarkson (1967) encontró que la alta tolerancia a aluminio de *Agrostis setacea* en comparación con *Agrostis canina* y *Agrostis stolonifera* está asociada con una tolerancia a baja disponibilidad de fósforo.

Andrew y Vanden Berg (1973) hicieron observaciones similares cuando varias especies de leguminosas forrajeras fueron sometidas a varias concentraciones de aluminio en soluciones nutritivas. Algunos de sus resultados (Figura 9) muestran que *Desmodium uncinatum* y *Stylosanthes humilis* son tolerantes a niveles altos de aluminio mientras *Glycine weightii* y *Medicago sativa* son bastante sensitivas. Esto se demuestra en datos de producción de materia seca en la parte aérea de la planta. Las diferencias en materia seca de las raíces son menos espectaculares debido al engrosamiento que normalmente acompaña a la toxicidad de aluminio. Con excepción de la alfalfa, el incremento de aluminio resultó en un incremento de la tasa de absorción de fósforo. Este efecto fue más pronunciado en las dos especies tolerantes a aluminio. La mayor parte del fósforo absorbido fue acumulado externa o internamente en la raíz. Solo 2 a 16% del fósforo fue translocado a la parte aérea durante el tiempo de experimentación. Si bien el incremento de los niveles de aluminio disminuyó la tasa de translocación de fósforo, las dos especies tolerantes a aluminio promediaron 11% de translocación, mientras que las dos variedades sensitivas a aluminio promediaron 6.5%. De una manera similar, Salinas y Delgadillo (CIAT, 1979) encontraron interacciones significativas entre saturación de Al y el P disponible (Bray II) en función de la tolerancia de especies forrajeras en un Oxisol de Carimagua (Figuras 10 y 11, respectivamente).

2.4. Síntomas Visuales de Deficiencia Nutricional.

Las deficiencias nutricionales en especies forrajeras ocurren con irregularidad y son a menudo relativas a condiciones específicas del suelo, el cual en forma directa o indirecta influye en la disponibilidad de nutrimentos. En la mayoría de los casos, los síntomas visuales de deficiencia nutricional en forraje son bastante específicos y el reconocimiento de tales síntomas está mayormente en función de la experiencia del observador. Estos síntomas visibles de deficiencia pueden constituir una guía para los requerimientos de fertilización, ya que en principio, la manifestación de un síntoma está correlacionada con la modificación normal externa de la planta (Andrew, 1960). Sin embargo, muchas veces no sucede tal situación ya que una reducción en la tasa de crecimiento de las plantas sucede antes de reconocer el síntoma visual de deficiencia. Además, un diagnóstico exitoso basado en síntomas foliares, depende prioritariamente del conocimiento de las especies en consideración y de las condiciones medioambientales que afectan a la planta entera.

El desarrollo de una colección fotográfica de síntomas visuales de deficiencia nutricional, tanto en invernaderos como en condiciones de campo proporciona una ayuda muy valiosa en el diagnóstico de las deficiencias nutricionales en especies forrajeras tropicales.

Un resumen de las principales características de los síntomas visuales de deficiencia nutricional en especies forrajeras se da a continuación. Esta descripción general fue extractado del Manual en preparación en CIAT, sobre síntomas de deficiencias nutricionales en forrajes tropicales. (Salinas, *et-al*, 1.980)

Nitrógeno.

La deficiencia de nitrógeno está caracterizada por una disminución inmediata en la tasa de crecimiento y por una pérdida general de clorofila en las hojas. La clorosis se inicia en las hojas más viejas puesto que el N es translocado a los sitios de crecimiento rápido (meristemas) cuando la planta está en una condición de estrés de N, en la planta entera se manifiesta el amarillento. El nitrógeno es un constituyente principal de un gran número de compuestos indispensables en las plantas forrajeras, pero los síntomas de deficiencia son más relativos con una reducción en la síntesis de clorofila.

Fósforo.

Síntomas foliares de la deficiencia de P son más visibles en el caso de gramíneas que en leguminosas forrajeras. En el caso de gramíneas forrajeras, existe una disminución de la tasa de crecimiento y una formación y acumulación del pigmento rojo-púrpura de antocianina en las hojas ya formadas. El ápice de las hojas viejas se tornan pálidas para luego presentarse la necrosis en un estado avanzado de deficiencia de P. En el caso de las leguminosas forrajeras, la deficiencia de P se manifiesta en general con una coloración verde oscura en las hojas, las cuales aumentan ligeramente en grosor y en una forma de crecimiento más erecto que las hojas normales. En casos de una deficiencia acentuada las hojas viejas muestran pequeñas puntas necróticas de color café en las áreas intervenales. Otra característica es una defoliación acentuada en el caso de leguminosas forrajeras. Por otra parte, un efecto

directo del exceso de P en plantas forrajeras incluye la deficiencia inducida de Cu y Zn.

Potasio.

La clorosis y necrosis marginal de hojas ya formadas y posteriormente de hojas jóvenes es talvez la indicación universal de una deficiencia de K. La necrosis es precedida por una clorosis que se inicia en los ápices de las hojas y se prolonga hacia los márgenes de la lámina foliar o foliolos. En algunos casos, el síntoma de clorosis y necrosis marginal esta asociada con una clorosis intervenal de las hojas en posición baja e intermedia. El potasio es esencial para la síntesis de proteina y en caso de deficiencia, existe una acumulación de compuestos nitrogenados solubles y entre ellos esta la acumulación de diaminas que son tóxicos para las plantas y que son los responsables de la necrosis marginal del tejido, característica sintomatológica de la deficiencia de K.

Calcio.

El calcio es un nutrimento pobremente distribuido dentro la planta. Este hecho es debido en parte a un mecanismo de transporte por intercambio, el cual impide el transporte por el xilema por flujo de masas o difusión. El calcio una vez depositado en la hoja, es incorporado en compuestos relativamente insolubles, de manera que su translocación por el floema es muy poca o casi nula, aún en condiciones de un estrés acentuado de Ca. Debido a la dificultad del transporte del calcio en la planta, los síntomas de deficiencia son co-

múnmente observados en los ápices de los tejidos vegetales (hojas jóvenes y brotes meristemáticos). El síntoma visual de la deficiencia de Ca es una clorosis apical y lateral de los folíolos en hojas jóvenes y se presenta la emisión de muchos rebrotes de color amarillo a café y de crecimiento reducido. Otro síntoma característico y especialmente en gramíneas forrajeras es el enroscamiento del ápice de las hojas.

Magnesio.

Síntomas de deficiencia de Mg aparecen visualmente primero en hojas ya formadas y su manifestación es por medio de una clorosis intervenal. A medida que avanza el estrés de Mg las hojas jóvenes presentan progresivamente una clorosis en la lámina foliar y una necrosis apical. La clorosis es causada debido a que el Mg es un constituyente esencial de la molécula de clorofila. En el caso de las gramíneas forrajeras, la deficiencia de Mg se manifiesta con un listado foliar generalizado para luego asentarse la clorosis.

Azufre.

En general, la deficiencia de azufre ocurre en áreas de alta precipitación donde existe una lixiviación considerable de S, elemento que es bastante soluble en el suelo. Tanto en gramíneas como en leguminosas forrajeras, los síntomas de deficiencia de S se manifiestan en las hojas jóvenes y son muy semejantes a la deficiencia de N. Sin embargo, el azufre no es un elemento tan móvil como el N en las plantas, de tal manera que los síntomas de una deficiencia de azufre aparecen al inicio

en los tejidos más jóvenes que en los viejos como ocurre en una deficiencia inicial de N.

Zinc.

Los síntomas de deficiencia de Zn en plantas forrageras son más relativos a tipo de especie así como también a ecotipos dentro una especie dada. Sin embargo, un síntoma general de deficiencia de Zn resulta en una reducción de la altura de la planta y áreas cloróticas sobre las hojas viejas que luego se presenta en las hojas jóvenes. Esta clorosis se inicia en el ápice de la lamina foliar y avanza hacia la base de la hoja. Las hojas jóvenes se tornan cloróticas con venas verdes y presentan un ligero encrespamiento de la nervadura central a medida que avanza la deficiencia de Zn.

Cobre.

La deficiencia de Cu se manifiesta en las hojas jóvenes siguiendo una secuencia de marchitamiento inicial, clorosis y necrosis. En algunas leguminosas del género *Desmodium*, se manifiesta con una clorosis intervenal en las hojas viejas y un amarillamiento en las hojas jóvenes con los ápices de los folíolos de color rojizo.

Hierro.

La deficiencia de Fe se caracteriza por una clorosis que se acentúa desde las hojas jóvenes hacia las hojas viejas. El síntoma es un amarillamiento completo y uniforme de la lámina de las hojas o folíolos. La

La disminución de la formación de clorofila es relativa a que el Fe es requerido en su síntesis. En el caso de las gramíneas forrajeras, la deficiencia de Fe se manifiesta en fajas longitudinales alternadas de color verde y amarillo en las hojas viejas, las hojas intermedias y jóvenes son cloróticas totalmente. En un estado avanzado de deficiencia de Fe, sobreviene la necrosis del tejido que avanza del ápice hacia la base de la hoja.

Boro.

La deficiencia de B, al igual que la deficiencia de Ca, se manifiesta inicialmente en las áreas próximas a las puntas de crecimiento activo (tejido meristemático). La razón es la baja movilidad de B dentro el tejido vegetal y por tanto el síntoma característico de una deficiencia de boro es la necrosis rápida de las hojas más jóvenes y recién expandidas, así como también la muerte del tejido meristemático en los sitios de crecimiento activo (brotes). En varios casos se observa la formación anormal de hojas, aún hasta darse el caso de aparecer la formación de folíolos unidos por uno de los lados, formando una sola hoja con dos nervaduras centrales. En otros casos, existe una deformación de las hojas con pérdida de simetría.

Molibdeno.

La deficiencia de Mo en plantas forrajeras, y especialmente en leguminosas, se presenta con un amarillamiento de las hojas viejas en las cuales los bordes se tornan necróticos. Síntomas similares aparecen en ho-

jas jóvenes a medida que la deficiencia va progresando. La clorosis observada en plantas deficientes de Mo, ha sido relacionada a la acumulación de nitratos, debido a la falta de una reducción de estos, proceso esencial en el cual el Mo juega un rol importante. La intensidad de la necrosis en los bordes de las hojas ha sido correlacionada con una mayor acumulación de nitratos en las hojas adultas.

3. REQUERIMIENTOS NUTRICIONALES DE PASTOS TROPICALES

Por lo mencionado anteriormente, la adaptación ecológica de especies forrajeras a diferentes contenidos de nutrimentos en el suelo es reconocida. En plantas forrajeras, la primera división en grande es relativa a gramíneas y leguminosas. Una diferencia básica entre ambos grupos proviene de la simbiosis de las leguminosas con el *Rhizobium*. Sin embargo, dentro de cada grupo de especies pueden diferir en ciertos requerimientos nutricionales (Andrew y Fergus, 1976). Este aspecto se intensifica aún más al considerar el desarrollo de una tecnología de producción de pastos en vastas áreas con suelos ácidos e infértiles de América Tropical (CIAT, 1980). La gran mayoría de estos suelos presentan un "complejo de infertilidad natural", que comprende una deficiencia general de varios macro y microelementos, alta acidez y toxicidad de Al y/o Mn.

La principal barrera en la producción de ganado vacuno en el trópico es la falta de forraje de calidad aceptable durante el año y especialmente en la época de sequía. El problema se podría solucionar en parte mediante la introducción de leguminosas asociadas con

gramíneas nativas ó introducidas, asegurando así un forraje de mejor calidad durante todo el año y evitando la necesidad de abono nitrogenado (Spain, et al., 1979).

La investigación en el establecimiento y mantenimiento de pasto en las áreas de suelos ácidos e infertiles de América Tropical presenta aún muchas interrogantes relacionadas con el desarrollo de pastos en las inmensas sabanas y bosques tropicales. Sin embargo, se adelantan investigaciones en función de los factores básicos-suelo-planta-animal (CIAT, 1978).

En la fase de establecimiento se da prioridad a la investigación sobre la acidez y baja fertilidad de los suelos. En general, las condiciones normalmente consideradas como adversas pueden modificarse mediante aplicaciones de insumos en fertilizantes y enmiendas, pero muchas veces a causa de la distancia y falta de acceso, el costo de los insumos voluminosos es demasiado alto para permitir el uso de grandes cantidades para la modificación del suelo (Spain et al., 1979). Por lo tanto, ha sido necesario considerar el factor planta, que por su propia evolución en estos ecosistemas llegan a adaptarse a las condiciones edáficas con un mínimo de insumos. La consideración dada en el capítulo anterior constituye una fase de la investigación para la determinación de los requerimientos nutricionales de especies forrajeras en suelos ácidos e infértiles de América Tropical.

Uno de los primeros y más importantes pasos en la prueba de nuevas accesiones es la verificación de su tolerancia a la acidez. Resultados de investigación sobre esta limitación es dada en el próximo capítulo de este trabajo.

La tolerancia a bajos niveles de P. es otra prioridad de investigación en el establecimiento de gramí-

neas y leguminosas tropicales. Los requerimientos externos de P en varias especies forrajeras con el criterio de niveles críticos en el suelo están siendo evaluados.

La Figura 12. presenta los resultados de un ensayo de campo en que *P. maximum*, *A. gayanus*, *B. decumbens* y *H. rufo* respondieron fuertemente a la aplicación de P teniendo *P. maximum*, y *H. rufo* la mayor respuesta y *A. gayanus* la menor. La respuesta de *H. rufo* al K fué la más notable y sin K sus poblaciones se deterioraron notablemente. Los rendimientos de los tratamientos sin K, promediados a todos los niveles de P, alcanzaron sólo un 15% del rendimiento máximo (CIAT, 1973).

Además de trabajar con especies adaptadas al medio con un mínimo de modificación del mismo se busca la forma de aprovechar más eficientemente las cantidades mínimas de fertilizantes utilizadas. La planta tiene su máximo requerimiento, especialmente en el caso de fósforo, durante las primeras semanas después de germinar y antes de tener un sistema radicular bien desarrollado. Muchos trabajos han mostrado las ventajas de sembrar en hilera y aplicar en banda el fertilizante junto ó muy cerca a la semilla. Con un mínimo de fertilizante se alcanzan condiciones favorables para la plántula (Spain et al, 1979).

La Figura 13 muestra el efecto de la aplicación de tres dosis de P_2O_5 al voleo y en banda en tres asociaciones. La aplicación en banda parece ser especialmente ventajosa para *B. decumbens* y *P. plicatulum* y para *S. guianensis* en todas las tres asociaciones (CIAT, 1977). Otra ventaja de este método eficiente de aplicar pequeñas cantidades de fertilizantes, es la reducción en la competencia de malezas comparado con la siembra y apli

cación de fertilizante al voleo.

Respecto a la investigación sobre los requerimientos de otros nutrimentos tales como Azufre y microelemento para la fase de establecimiento, la información disponible deja mucho que desear. Todo enfatiza la necesidad de una investigación prioritaria en América Tropical en cuanto a esos nutrimentos.

En la fase de mantenimiento de pasturas, la experiencia que se tiene sobre los requerimientos nutricionales es también poca. Spain y colaboradores (1979) señalan que es una etapa mucho más difícil y costosa que la del establecimiento de pasturas, por el hecho de tener presente al animal. Otro aspecto importante del efecto de la pastura sobre la fertilidad del suelo es la determinación de la disponibilidad de nutrimentos que están acumulandose en función del sistema suelo-planta-animal, (Bryan y Evans, 1973).

La investigación de los requerimientos nutricionales en parcelas pequeñas manejadas bajo corte son de limitada utilidad para la fase de mantenimiento debido a la no presencia del animal y el reciclaje de elementos a través de éste.

La remoción de elementos del potrero bajo pastoreo no es sino el contenido de estos elementos en el animal al sacarlo. Por supuesto, las pérdidas son más grandes cuando se trata de ganado lechero que cuando es ganado de carne. Sin embargo, existe un problema de redistribución de fertilidad puesto que el animal consume de todo el potrero y deposita, en forma de heces y orina en un porcentaje limitado del área total. Elementos relativamente solubles y móviles en el suelo son fácilmente lixiviados de los sitios de concentración. Otros que son poco solubles e inmoviles en el

suelo como el fósforo, se concentran y se fijan en parte pero no se pierden del potrero. Mientras más alta la carga, menos grave el problema de redistribución porque los animales van cubriendo toda el área en un tiempo relativamente corto. Suelos arenosos generalmente requieren más fertilizante para su mantenimiento a un mismo nivel de producción que suelos más pesados debido a pérdidas por lixiviación (Spain et al., 1979)

La aplicación de fertilizantes de mantenimiento se debe hacer en una época en que el suelo tenga humedad suficiente para su crecimiento activo del pasto pero no excesiva, ya que provoca pérdida por lixiviación. La mejor época podría ser a finales ó a principios de la estación lluviosa. Si las cantidades a aplicar son muy reducidas, sería mejor hacer el mantenimiento cada dos años para reducir gastos de aplicación (Spain et al., 1979)

Está generalmente aceptado que las praderas de mayor productividad absoluta son aquellas en que se utilizan altos niveles de nitrógeno de hasta 500 Kg N/ha/año. Este tipo de praderas se basan únicamente en las gramíneas, ya que las leguminosas no persisten bajo estas condiciones. Las condiciones económicas que determinan que este tipo de sistemas (insumos máximos) sean rentables existen actualmente sólo en algunos países desarrollados. En otros países, se incluye un componente leguminoso en las praderas no sólo como fuente de nitrógeno para el ecosistema sino también como fuente de proteína para el ganado.

Se ha demostrado en la mayoría de los casos que las mezclas de gramíneas y leguminosas son en general inestables y relativamente en cortos períodos de tiem-

po uno de los dos componentes es suprimido. En general, se observa que la leguminosa es el componente suprimido debido al incremento del nitrógeno del suelo que favorece e incrementa la agresividad de la gramínea.

Análisis teóricos sugieren que las leguminosas son intrínsecamente competidoras más débiles que las gramíneas por luz, nutrimentos y agua. Esto se debe a que el mecanismo de fijación de nitrógeno necesita grandes cantidades de energía (carbohidratos) que no se encuentran disponibles para competir por luz y nutrimentos. No es sorprendente entonces que distintos trabajos hayan demostrado que para lograr persistencia de la mayoría de las leguminosas se necesitan sistemas de corte o pastoreo intensos, ya que no compiten eficientemente por luz. Sin embargo, se ha sugerido (Donald, 1963) que una mayor competitividad en el espacio aéreo puede ser, en muchos casos, el resultado de una mayor competitividad por nutrimentos que le permite producir una biomasa más importante. Esta sugerencia ha recibido una demostración experimental en estudios recientes de interferencia entre especies (King, 1971; Snaydon, 1971; Eagles, 1972). Los resultados han demostrado que en la mayoría de las situaciones la competencia por nutrimentos es más importante que la competencia por luz.

En mezclas de gramíneas y leguminosas, la relación nutritiva más estudiada es sin duda la del nitrógeno y las diferencias a este respecto son las que proporcionan no sólo una justificación para el uso de estas mezclas sino un indicio claro del potencial de compatibilidad entre ambos componentes. A pesar de las diferencias nutricionales con respecto a N, existe evidencia de que

competencia por N ocurre y es especialmente importante durante las fases de establecimiento, mientras el proceso de infección de *Rhizobium* ocurre y los nódulos se desarrollan. Leguminosas con bajo poder competitivo por N no solo crecen muy lentamente durante las fases iniciales sino que la gramínea absorbe más nitrógeno creciendo más rápidamente y suprimiendo a la leguminosa. Compatibilidad que en este caso depende de un elevado poder competitivo de la leguminosa por N.

El trabajo de Hall (1974) utilizando series de reemplazo demuestra que es posible individualizar relaciones competitivas y no competitivas (fijación atmosférica de N) para N entre gramíneas y leguminosas.

Relativamente poca información existe respecto a las relaciones nutritivas para otros elementos. Resulta obvia la importancia de individualizar mezclas de gramíneas y leguminosas con alta compatibilidad para otros elementos, no solo como forma de lograr que la compatibilidad por N se exprese sino como forma adicional de lograr mayores rendimientos en las mezclas y reducir la dependencia con respecto a adiciones de fertilizantes.

Existen numerosas referencias en la literatura a la distinta capacidad de gramíneas y leguminosas para competir por K y P. Desde los trabajos de Gray et al (1953) está establecido con relativa claridad que las leguminosas son competitivas en situaciones con baja disponibilidad de P mientras que en el caso opuesto ocurre para las gramíneas con respecto a K.

4. EFECTOS TOXICOS DE ALUMINIO Y MANGANESO EN EL DESARROLLO EN PASTOS TROPICALES

La disponibilidad del aluminio y/o manganeso en el suelo se torna mayor para las plantas, a valores de pH por debajo de 5.5. De aquí, la toxicidad de Al es uno de los prominentes factores que limita el desarrollo agrícola en la mayoría de los suelos ácidos de América Tropical. Altos niveles de saturación de Al reducen el crecimiento radicular y afectan severamente el rendimiento de los cultivos. Además del Al, el Mn constituye también otro factor limitante de la condición ácida de estos suelos, pero el grado de su toxicidad depende, además del bajo pH, de los cambios de óxido-reducción de este elemento en el suelo, proceso que esta relacionado con el drenaje de los suelos.

Durante los últimos años, se ha realizado en estos suelos una considerable investigación basada principalmente en el concepto de modificar el suelo para el desarrollo de plantas forajeras (Pearson y Hoveland, 1974; Freitas y Pratt, 1969; Bhanmik y Asthana). De aquí, la principal estrategia usada para anular los efectos limitantes del complejo ácido infertil del suelo ha sido fertilizar y encalar a niveles "óptimos" y tomar ventaja de sus efectos residuales. Además, especies forajeras han sido seleccionadas para altos rendimientos, resistencia a plagas y enfermedades con poca atención a las propiedades del suelo, debido a que el trabajo de mejoramiento y selección ha sido llevado a cabo bajo condiciones óptimas del suelo.

Una alternativa para la producción de pastos tropicales en áreas de suelos ácidos es adaptar la planta a las limitaciones específicas de fertilidad del suelo. (Spain et al., 1975; CIAT 1978). Muy poco se ha hecho en tratar de seleccionar especies y variedades "in si-

tu" considerando las condiciones adversas de suelo-planta, las cuales constituyen el factor más limitante para la producción de pastos en la América Tropical. El caso es que durante los últimos años tanto fitomejoradores, fisiólogos así como especialistas en suelos, han reconocido la existencia de diferencias entre especies forrajeras del trópico para tolerar condiciones adversas del suelo.

4.1. Toxicidad de Aluminio.

La razón por la inhabilidad de las plantas para crecer en suelos ácidos, y los efectos inhibitorios del subsuelo ácido sobre la penetración radicular, ha constituido una pregunta de interés por muchos años (Tisdale y Nelson, 1966). Aunque la presencia de Al intercambiable en suelos ácidos ha sido conocida desde comienzos de este siglo (Veitch, 1904), la idea del efecto detrimental de la acidez del suelo sobre el crecimiento de las plantas, a causa de concentraciones tóxicas de Al, fue aparentemente sugerido por Abbott y colaboradores (1913). La revisión inicial de la literatura sobre el Al en el suelo fue hecha por Ragland (1959), y la más reciente por Coleman y Thomas (1967), Adams (1974), y McLean (1976).

La mayoría de los suelos altamente meteorizados presentan bajas reservas de Ca y Mg, de manera que el Al es el catión principal en los sitios de cambio. La contribución del clima es considerada como un importante factor en el desarrollo de la acidez del suelo y la toxicidad de Al en suelos ácidos. En efecto, Kamprath y Foy (1971) remarcaron que en regiones tropicales la acidez del suelo toma lugar como resultado de la remoción de bases y un incremento de H y Al debido a la fluctuación de precipitación y evapotranspiración.

La reactividad del Al en suelos ácidos varía con la forma en la cual ocurre, disminuyendo desde la forma Al^{+3} -soluble en agua a monómeros de $OH-Al$, hasta formar polimerizadas de hidróxidos de Al. Recientemente, McLean (1976) remarcó nuevamente que el proceso hidrolítico del Al y por lo tanto su solubilidad en la solución del suelo es afectada por el pH de la solución. La secuencia de las posibles formas de Al pueden ser representadas en la siguiente progresión:

| | | | | <u>pH suelo</u> | <u>Solubilidad Al</u> | | | |
|-----------------|---|--------|-----------------------------|-----------------|-----------------------|----------|--|----------------|
| Al^{+3} | + | H_2O | $\rightarrow Al(OH)^{+2}$ | + | H^+ | 4.0- 4.5 | | |
| $Al(OH)^{+2}$ | + | H_2O | $\rightarrow Al(OH)_2^{+1}$ | + | H^+ | 4.5- 5.5 | | |
| $Al(OH)_2^{+1}$ | + | H_2O | $\rightarrow Al(OH)_3$ | + | H^+ | 5.5- 7.5 | | baja o ninguna |
| $Al(OH)_3$ | + | H_2O | $\rightarrow Al(OH)_4^{-1}$ | + | H^+ | 7.5- 9.0 | | |
| $Al(OH)_4^{-1}$ | + | H_2O | $\rightarrow Al(OH)_5^{-2}$ | + | H^+ | 9.0- 9.5 | | aumenta |
| $Al(OH)_5^{-2}$ | + | H_2O | $\rightarrow Al(OH)_6^{-3}$ | + | H^+ | 9.5-10.0 | | |

De esta secuencia puede concluirse que la solubilidad del Al es bastante baja dentro el rango de pH entre 5.5 a 7.5 donde es precipitado y permanece relativamente insoluble como $Al(OH)_3$. Por debajo de pH 5.5 y sobre pH 7.5, las concentraciones de Al aumentan rápidamente. La pregunta, que emana, es relativa a la forma tóxica de Al para las plantas. Datos presentados por Kerridge (1969) indican que el Al fue considerablemente más tóxico para las plantas a pH 4.5 que a pH 4.0 y sugirió que un producto hidrolítico de Al en vez de la forma soluble Al^{+3} sería responsable en la inhibición del crecimiento radicular. A medida que el pH aumenta de 4.0 a 4.5 la solubilidad de Al^{+3} disminuye, mientras que la forma hidrolítica $AlOH^{+2}$ au-

menta (Raupach, 1963). Consecuentemente, Moore (1973) concluyó que la forma $AlOH^{+2}$ es responsable de los efectos adversos del Al sobre el crecimiento de las plantas y específicamente sobre el crecimiento radicular. Sin embargo, la solubilidad del Al y la severidad de sus efectos tóxicos sobre las plantas son afectadas por varios factores del suelo, incluyendo pH, mineral de arcilla predominante, concentración de otros cationes y contenido de materia orgánica (McCart y Kamprath, 1965; Evans y Kamprath, 1970; McLean, 1976).

Suelos ácidos con pH debajo de 5.5 tienen una gran porción de sus cargas negativas ocupadas por Al^{+3} , el cual puede ser desplazado por otros cationes. Este Al desplazado normalmente es denominado Al intercambiable, el cual es extractado con una solución no bufferizada de KCl 1N y titulado con una base (Lin y Coleman, 1960; Bhumbra y McLean, 1965). Debido a que cantidades apreciables de Al intercambiable son tóxicas para muchas especies de plantas, ha sido sugerido que este Al puede ser neutralizado añadiendo $CaCO_3$ (cal) al suelo a una tasa equivalente de 1.5 a 2 veces el Al intercambiable (Kamprath, 1970). El porcentaje de saturación de Al relativo a la capacidad de intercambio catiónico efectivo es otra medida útil de la acidez del suelo. La saturación de Al es la relación entre el Al intercambiable extractado con una solución normal no bufferizada de KCl y la suma de bases intercambiables más el Al intercambiable. Nye y colaboradores (1961), Evans y Kamprath (1970), y Cate y Sukhai (1964) encontraron que en suelos ácidos el porcentaje de saturación de Al determina la concentración de Al en la solución del suelo. Ellos observaron que cuando la saturación de Al fue mayor del 60% una cantidad apreciable

de Al estuvo presente en la solución del suelo. Por otra parte, la relación entre pH del suelo y la saturación de Al es consistente con varias observaciones hechas en muchos suelos ácidos del trópico (Brams, 1971; Fox et al., 1962; Popenoe, 1960; Soares, et al., 1975; Abruña et al., 1974). Además, a pesar de haberse demostrado que el pH del suelo está relacionado con el crecimiento radicular (Pearson, 1975), el nivel de Al en la solución del suelo es usualmente el factor responsable por el reducido crecimiento radicular en suelos ácidos (Adams y Lund, 1966). En conclusión, el Al en la solución del suelo y el porcentaje de saturación de Al están relacionados en suelos ácidos (Evans y Kamprath, 1970; Brenes y Pearson, 1973; Gonzalez, 1976), así como también el porcentaje de saturación de Al y la respuesta de la planta (Abruña et al., 1970, 1974; Sartain y Kamprath, 1975; Salinas, 1978). De aquí, aunque la actividad química del Al en la solución del suelo es probablemente el mejor parámetro para estimar el potencial tóxico del Al de un suelo, el porcentaje de saturación de Al provee una indicación satisfactoria de la acidez del suelo y es mucho más simple su determinación.

Además, debido a los niveles bajos de bases cambiables, la alta saturación de Al juega un importante rol en estos suelos ácidos (Olmos y Camargo, 1976; Freitas y Silveria, 1977). En efecto, Lopes y Cox (1977) sugieren que en la mayoría de los casos el porcentaje de saturación de Al, debería ser considerado primero, ya que en suelos ácidos teniendo el mismo nivel de Al intercambiable pero diferente porcentaje de saturación de Al, es de esperar que la respuesta de un cultivo dado sea diferente al encalar con la misma cantidad en base a la neutralización del Al intercambiable.

finalmente, el grado de tolerancia de especies y variedades puede ser expresado en términos del porcentaje de saturación de Al de la capacidad efectiva de cationes cambiables. Consecuentemente, viene a ser necesario sólo la aplicación de cal en una cantidad suficiente como para reducir el porcentaje de saturación de Al a niveles que no afecten la producción. Con este criterio, fue desarrollada una ecuación para estimar los requerimientos de cal para compensar la tolerancia de Al de especies y variedades (Cochrane y colaboradores, 1980).

4.2. Mecanismos de Tolerancia a la Toxicidad del Aluminio.

La caracterización de especies y variedades tolerantes a Al ha sido estudiada por medio siglo (Hartwell y Pember, 1918; McLean y Gilbert, 1927; Hewitt, 1948; Aimi y Murakami, 1964; Foy y Brown, 1963; Clarkson, 1966; Adams y Pearson, 1970; Foy, 1976; Spain, 1977; Salinas, 1978). Estos estudios han usado una diversidad de especies y variedades cuyas respuestas han mostrado la evidencia de tal tolerancia diferencial.

Parece que la tolerancia a Al entre especies y variedades se debe a una adaptación genética como resultado de una selección involuntaria en suelos ácidos (Foy, 1976). La genética de la tolerancia a Al está actualmente bajo estudio (Devine et al., 1976), pero la naturaleza de la tolerancia diferencial no ha sido esclarecida al presente, debido a que los mecanismos exactos de toxicidad de Al no están todavía completamente conocidos (Foy, 1976).

Varios intentos se han hecho para explicar la causa de la tolerancia a Al por las plantas. Básicamente estos pueden ser separados en dos categorías: (1) cambios diferenciales en la morfología de la planta, y (2) cambios diferenciales en la fisiología y bioquímica de la planta (Foy, 1976; Helyar, 1978). Esta separación no implica que la tolerancia a Al resulte de cada categoría independientemente, por el contrario, el grado de tolerancia parece ser una combinación de ambas categorías, pero la segunda es a menudo referida como una consecuencia de cambios morfológicos en el sistema radicular (Jackson, 1967; Moore, 1973; Ali, 1973; Helyar, 1978).

La reducción de crecimiento, tanto en las raíces como en la parte aérea debido al Al, fue observada desde comienzos del siglo (Magistad, 1925). Sin embargo, el crecimiento radicular parece ser más afectado que la parte aérea debido a la influencia directa del Al. Jackson (1967) remarcó que los cambios morfológicos y fisiológicos de la parte aérea generalmente se manifiestan después que el crecimiento radicular ha sido afectado. Consecuentemente, los síntomas visuales de toxicidad de Al en la parte aérea pueden ser un efecto indirecto del daño radicular por el Al (de-Waard y Sutton, 1960; Rees y Sidrak, 1961; Kerridge, 1969; Ali, 1973). En efecto, la inhibición del crecimiento radicular es el efecto primario de la toxicidad de Al (Kerridge, 1969; Rhue y Grogan, 1977; Helyar, 1978; Salinas, 1978).

Raíces afectadas por el Al son ineficientes para absorber agua y nutrimentos (Fleming y Foy, 1968; Clarkson, 1969; Reid *et al.*, 1971; Lafever *et al.*, 1977; Helyar, 1978). Ha sido sugerido que el Al actúa como

un inhibidor de crecimiento de sitios específicos en las raíces en lugar de ser un veneno sistémico (Fleming y Foy, 1968). En efecto, Clarkson (1965, 1969) remarcó que el Al inhibe la división celular en los meristemas apicales resultando un sistema radicular drásticamente restringido. Es crítico recalcar que la tolerancia diferencial a Al puede estar asociada con daño morfológico radicular en áreas específicas en lugar de un daño a todo el sistema. Consecuentemente, la tasa de crecimiento durante un período de recuperación luego de un estrés de Al puede ser importante (Moore et al., 1977).

Clarkson (1965) encontró que las anomalías morfológicas de las raíces causadas por el Al pueden ser explicadas por el rol inhibitorio del Al sobre la división y extensión celular. La naturaleza de este daño fue explicada posteriormente por Sampson y colaboradores (1965) cuando establecieron que el daño del Al está asociado directamente con algunas funciones metabólicas durante la división celular. El efecto de Al en la mitosis celular y la resultante paralización de la elongación radicular fue confirmada por Clarkson y Sanderson (1969). Sobre la base de resultados bioquímicos la mitocondria y núcleo, ambos ricos en ADN, fueron sugeridos como los dos sitios celulares posibles donde el Al estaría actuando (Klimashevskii et al., 1973). Consecuentemente, una vez que el Al está dentro una célula meristemática, interfiere en la formación de ADN y el resultado neto es una inhibición del crecimiento radicular (Ali, 1973).

En base a las consideraciones arriba mencionadas, se han hecho varios intentos para explicar la tolerancia diferencial entre especies y variedades en términos de daños causados por el Al a las raíces. La habilidad

de una planta para continuar su elongación y proliferación, así como también resistir daños morfológicos en los ápices y raíces laterales, son relativos a tolerancia a Al (Foy y Brown, 1963; Adams y Lund, 1966; Reid et al., 1971; Sartain y Kamprath, 1975; Howeler y Cadavid, 1976; Moore et al., 1977; Keser et al., 1977; Helyar, 1978). Especies y variedades dentro especies difieren en el grado en el cual una concentración dada de Al interfiere con el crecimiento radicular. En general, variedades sensitivas a Al muestran una severa inhibición del crecimiento radicular mientras que variedades tolerantes son ligeramente afectadas. Consecuentemente, la habilidad diferencial del crecimiento radicular en presencia de Al es considerada una importante medida de tolerancia a Al y frecuentemente ha sido usada como un criterio para clasificar especies y variedades de acuerdo a su tolerancia a Al (Kerridge y Kronstad, 1968; Kerridge et al., 1971; Reid et al., 1971; Foy, 1974; Moore et al., 1977; Howeler y Cadavid, 1976; Rhue y Grogan, 1977; Salinas, - 1978).

Varios intentos también han sido realizados para explicar diferencias entre especies y variedades en términos de absorción y translocación de nutrimentos y Al, así como también cambios de pH extremo (Foy, 1974; Heylar, 1978). La tolerancia a Al ha sido usualmente asociada con una disminución en la absorción y translocación de elementos minerales. Entre ellos, P, Ca y Mg son los más afectados por el Al y reducciones menores en la absorción y translocación de K, Fe, Cu y Zn han sido también dados a conocer (Foy y Brown, 1963; Johnson y Jackson, 1964; Munns, 1965; Paterson, 1965; Clarkson, 1966; Lance y Pearson, 1969; Andrew y Vanden

Berg, 1973; Devine et al., 1976; Foy, 1976; Helyar, 1978; Salinas, 1978).

Una deficiencia de P en la parte aérea es tal vez el síntoma visual típico de la toxicidad de Al (Foy y Brown, 1963, 1964). El exceso de Al reduce la solubilidad de P en el medio de crecimiento y su absorción y transporte por las plantas (Kamprath y Foy, 1971). Por otra parte, un exceso de P puede precipitar el Al y eliminar su toxicidad, aumentar la absorción de P y eliminar los síntomas de deficiencias de P (Munns, 1965). Por ejemplo, los efectos tóxicos de Al fueron eliminados en plantas de algodón cuando la relación: P:Al en el medio extremo fue mayor que dos (Foy y Brown, 1963). Por lo tanto, interacciones Al-P han sido propuestas como un factor importante en el grado de toxicidad de Al para las plantas (Randall y Vose, 1963; Munns, 1965; McLead y Jackson, 1967; Foy, 1976).

Dos tipos de interacciones Al-P han sido sugeridos por Clarkson (1966). El primero ocurre al nivel de superficie celular con fijación de P por una reacción de adsorción-precipitación. El segundo ocurre dentro la célula, posiblemente dentro la mitocondria, y resulta en una marcada disminución de la tasa de fosforilación del azúcar probablemente afectando la inhibición de hexokinasa. Recientemente McCormick y Borden (1964) han mostrado a través del microscopio electrónico que un precipitado de $Al-PO_4$ ocurre en las raíces como glóbulos dispersos. La interacción ocurrió en la capa mucilaginosa a lo largo de la superficie radicular y en las regiones intercelulares de los ápices. Estos resultados confirman teorías anteriores sobre el proceso de adsorción-precipitación que toma lugar en las raíces, resultando en un reducido transporte de P a la

parte aérea. Consecuentemente, la deficiencia de P debido a la presencia de Al puede ser un resultado de la precipitación del Al y P en las raíces. De aquí, las diferencias entre especies y variedades en relación a estres de Al pueden resultar de la tasa de translocación a la cual el P "escapa" esta precipitación:

Varios investigadores informan que la tolerancia diferencial a Al entre especies y variedades ha estado asociada con una habilidad diferencial para absorber y utilizar P en presencia de Al (Jones, 1961; Foy y Brown, 1964; Foy, 1974, 1976, 1977). Además, la tolerancia a Al en ciertas especies forrajeras coincidió con una mayor eficiencia en la asimilación y transporte de P (Andrew y VandenBerg, 1973).

La literatura sobre interacciones entre Al y cationes básicos indica una tendencia casi invariable de un efecto antagónico de Al sobre ellos (Clarkson, 1971, Lee, 1971; Ali, 1973; Foy, 1974). Estres de Al resulta en la reducción de absorción de Ca y Mg de acuerdo a Johnson y Jackson (1964), Martin (1961), McLead y Jackson (1967), y Munns (1965). Una disminución en el crecimiento debido a la deficiencia de Ca causada por el Al ha sido también sugerida por Armiger y colaboradores (1968). Estos resultados sugieren que los síntomas de deficiencia de Ca observados en algunos cultivos en suelos ácidos son debidos a un efecto antagónico del Al sobre el Ca en vez de niveles bajos de Ca en tales suelos.

Este antagonismo entre el Al y Ca parece ocurrir en las raíces. Lance y Pearson (1969) indican que el efecto del Al sobre la absorción de Ca ocurre rápidamente cerca de la superficie de las raíces. Estas ob

servaciones sugirieron que la permeabilidad de las membranas celulares sería afectada por el Al. Por lo tanto, la alteración de la configuración estructural de las membranas por reemplazo de Ca por Al puede inhibir la asimilación de Ca (Lance y Pearson, 1969).

Patterson (1965) concluyó que el Al disminuye la absorción de Ca pero no parece inhibir la translocación de este elemento a la parte aérea. Los resultados obtenidos con leguminosas forrajeras por Andrew y Vandenberg (1973) sostienen la conclusión anterior. Consecuentemente, la absorción de Ca sería un mecanismo más importante que la translocación de Ca, afectando la tolerancia diferencial entre especies y variedades.

Varios investigadores indican la existencia de una interacción Al-Mg en las plantas bajo los efectos tóxicos del Al (McLead y Jackson, 1967; Kerridge, 1969; Lee, 1971). Estos investigadores concluyen que el efecto del Al resulta en una marcada inhibición de la absorción de Mg, en igual forma que la del Ca. En conclusión, las interacciones entre Al, Ca y Mg parece jugar un importante rol en la disponibilidad de estos nutrimentos para las plantas y también en la eficiencia de absorción para detectar una habilidad diferencial entre especies y variedades.

Mutua competencia entre pares de cationes para entrar en las raíces es comúnmente reportado (Moore et al., 1961, 1964; Lee, 1971). Si el Al es absorbido en una manera similar a otros cationes, competencia entre Al y otros cationes existe (Ali, 1973). Por tanto, es razonable afirmar que el sistema radicular es inhibido debido a una mayor absorción de Al dentro las células meristemáticas. Esto sugiere que especies y va

riedades difieren unas de otras en la manera como el Al es absorbido y concentrado en las células. Esto es, que especies y/o variedades tolerantes a Al tienden a excluir el Al por algún mecanismo fisiológico. A la luz de estos resultados, parece razonable indicar que un aumento del nivel de Al en el medio externo, causa un aumento en la absorción de Al. Sin embargo, la porción de Al absorbido, la cual es transportada a la parte aérea, parece ser mínima. Esto indica que la mayor parte del Al absorbido es retenido en las raíces. Especies y variedades susceptibles a Al parecen acumular elevadas cantidades de Al en sus sistemas radiculares en comparación de especies y variedades tolerantes.

En base a los factores mencionados anteriormente, se puede observar que durante los últimos años diferencias consistentes han sido encontradas entre especies y variedades para tolerar el Al. La mayoría de los resultados y discusiones han enfatizado sobre la reducción radicular y disminución de rendimientos con poca atención a los mecanismos fisiológicos en la nutrición de las plantas. Esto ha determinado que al presente todavía no se conozca exactamente la fisiología de tolerancia a Al.

4.3. Tolerancia de Especies Forrajeras Tropicales a la Toxicidad de Al.

Una estrategia para la producción de ganado de carne en América tropical, es el desarrollo de una tecnología de producción de forrajes en suelos ácidos y de baja fertilidad natural (CIAT, 1978). De aquí, dos componentes de esta estrategia resaltan en la produ-

cción de pasturas y son, el factor suelo (suelo ácido e infértil) y el factor planta (germoplasma forrajero). El principio de esta estrategia es incorporar el factor planta como participante directo en el complejo de infertilidad de los suelos ácidos de América tropical. En muchos casos, la selección de especies forrajeras para suelos ácidos de baja fertilidad natural puede resultar más económica que modificar la fertilidad del suelo ácido para establecer pasturas.

Respecto al factor suelo, durante los últimos años se ha enfatizado el estudio de la distribución geográfica y propiedades de los suelos en América tropical y un resultado de estos estudios es el mapa tentativo presentado por Sánchez y Cochrane (1979). Los Oxisoles y Ultisoles representan los órdenes más extensos, cubriendo el 56% de la superficie de América tropical en las zonas de tierras bajas (0-900 m) y zonas intermedias (900-1800 m). De esta manera, estas áreas constituyen un bloque extenso de tierra, siendo la mayoría potencialmente arable. A pesar de la favorable extensión, localización y topografía de estos suelos, el desarrollo agropecuario en estas áreas presenta ciertas limitaciones. Uno de los principales obstáculos para la producción de cultivos y/o pasturas es la baja fertilidad natural del suelo. La mayoría de los suelos del trópico americano presenta un "complejo de infertilidad", el cual identifica una deficiencia general de varios macro y micronutrientes, alta acidez y toxicidades de Al y/o Mn (Spain, 1976; Salinas, 1979a).

La toxicidad de Al es uno de los factores prominentes que limita el desarrollo agrícola en la mayoría de estos suelos. Altos niveles de saturación de Al

reducen el crecimiento radicular inhibiendo su elongación y penetración en el suelo y consecuentemente, reduciendo los sitios de absorción de agua y nutrimentos, así como también la utilización de éstos en el subsuelo (Salinas, 1979a; Gualdrón y Spain, 1979). En una segunda fase, el Al obstaculiza la translocación de varios nutrimentos a la parte aérea, los cuales se manifiestan como deficiencias nutricionales principalmente de P, Ca y Mg (Heylar, 1978; Andrew y Vanden Berg, 1973; Salinas, 1978). Todos estos efectos de Al se reflejan en un descenso de la productividad de los cultivos. Otra importante limitación en Oxisoles y Ultisoles de América tropical, es la baja disponibilidad del P nativo para el establecimiento de pastos mejorados, de manera que cantidades considerables de P deben ser añadidas para satisfacer los requerimientos de las plantas (Fenster y León, 1979). Consecuentemente esta situación causa serias limitaciones agroeconómicas debido a los altos costos de fertilizantes fosforados.

Una alternativa para la producción de forrajes en los suelos ácidos e infértiles de América tropical es adaptar la planta a estas limitaciones. En efecto, a medida que progresa la investigación sobre gramíneas y leguminosas forrajeras tropicales, es posible evaluar el grado de tolerancia de diferentes especies o ecotipos, con respecto a la toxicidad de Al y la baja disponibilidad de P en el suelo (CIAT, 1978; Spain, 1979).

Con referencia al factor planta; la evolución de las plantas forrajeras en el trópico ha sido en la mayoría de los casos el resultado de una adaptación natural al ecosistema y a la migración de especies a nuevos ambientes, en los cuales han sido sometidas a otro tipo de presiones, dando lugar a nuevas combinaciones

de caracteres (Mott y Hutton, 1979). Las presiones de selección han sido aquellas impuestas principalmente por el clima, disponibilidad de nutrimentos en el suelo y competencia de otras especies vegetales y consecuentemente, creando una variabilidad considerable en el recurso genético forrajero del trópico. Schultze-Kraft y Giacometti (1979) señalan que, debido a la amplia variabilidad del material genético existente en el trópico, no se justifica en la actualidad un esfuerzo en la hibridización del material vegetal y por el contrario, debería aumentarse la variabilidad genética en aquellos géneros promisorios mediante la recolección de germoplasma nativo en regiones con suelos ácidos e infértiles, que *per se* estaría adaptado a esas condiciones adversas. Sin embargo, bajo condiciones externas adversas, el criterio de adaptación tiene la implicación importante en cuanto se refiere a la supervivencia del material vegetal por una parte, y al potencial de producción como forraje por otra. Además, la capacidad de subsistencia de la planta forrajera al pastoreo y al corte, así como también la calidad del forraje son aspectos muy importantes, ya que al final el producto a desarrollar es una planta para pastoreo. Una vez realizada la recolección del germoplasma forrajero, la caracterización y evaluación cuantitativa del potencial de producción, bajo un rango de condiciones de elevada acidez (toxicidad de Al) y/o disponibilidad de nutrimentos en el suelo, constituyen una etapa importante en el proceso de selección de especies forrajas promisorias. De esta manera, un mejor conocimiento sobre la respuesta diferencial de especies forrajeras a las limitaciones de suelo mencionadas, puede proporcionar un significativo aporte en la utilización de

extensas áreas de América tropical, lo cual puede determinar una menor inversión en fertilizantes y cal. Esto no implicaría necesariamente la eliminación total de fertilizantes y cal, pero si puede disminuir las tasas de aplicación necesarias para obtener un establecimiento adecuado de la pastura.

Es reconocido el hecho de que algunas especies o variedades son más tolerantes que otras, pero no se conoce qué característica vegetal diferencia entre plantas tolerantes y susceptibles bajo las condiciones que se denominan "adversas". Por esta razón, en la actualidad se considera el grado de productividad de una especie o variedad como un indicador de esa "tolerancia" (Nieman y Shannon, 1976). En base a este criterio, durante la evaluación e interpretación de los resultados de este trabajo, se dió importancia particular al hecho de que especies forrajeras bajo estrés mineral pueden únicamente sobrevivir o producir. Consecuentemente, se visualiza que por lo menos existen cuatro maneras para explicar la tolerancia de estas especies forrajeras a estrés de Al y/o P: 1) La habilidad de una planta para sobrevivir en suelos ácidos infértiles; 2) La producción relativa de la planta obtenida a diferentes grados de acidez y fertilidad del suelo, comparado con la producción obtenida bajo condiciones de acidez nula (ausencia de Al) y alta fertilidad (alta dosis de P); y 4) La producción relativa de la planta, obtenida a diferentes grados de acidez y fertilidad del suelo en relación a la producción máxima obtenida. Este último criterio difiere del tercero en el sentido de que no todas las especies o variedades desarrollan su máxima productividad bajo condiciones de acidez nula y alta fertilidad.

Por otra parte, se consideró que solamente la habilidad de una gramínea forrajera para sobrevivir en suelos ácidos infértiles no tendría valor si la producción es baja, por tanto, la producción absoluta indicaría el potencial de una especie forrajera para producir en condiciones adversas del suelo. De aquí, rendimientos relativos y absolutos fueron considerados como criterios útiles para interpretar la respuesta diferencial de las gramíneas a estrés de Al y/o P en el Oxisol de Carimagua (Salinas y Delgadillo, 1980).

Considerando el rendimiento relativo, se estimó que una producción de materia seca que no excedió al 50% de su rendimiento máximo, es determinante de la condición de "supervivencia" o "producción relativa baja". Cuando el rendimiento relativo estuvo entre 50 y 80% de ese máximo, se consideró a la gramínea en condición de "producción relativa media" y finalmente, por encima del 80% del rendimiento máximo, en condición de "producción relativa alta" bajo estrés de Al y/o P. El límite inferior se fijó en un 50%, con el criterio de que la reducción del potencial de producción de una especie a un 50% o menos tiene una implicación de supervivencia y no de productividad. Criterio bastante empleado en toxicología biológica (Matsura, 1976; Liener, 1969; Lal, 1979). Finalmente, el límite superior se fijó en 80%, debido a que en la mayoría de los casos por encima de este porcentaje, la tasa de incremento en producción de materia seca por unidad de insumo aplicado (cal y/o fósforo) fue relativamente baja.

La respuesta diferencial de ocho gramíneas forrajeras es ilustrada en las Figuras 14, 15, 16. En ausencia de cal y P (92% Sat. Al y 1,6 ppm P) las gramíneas mostraron diferencias marcadas. *Brachiaria humidicola*.

682 y *Andropogon gayanus* 621 produjeron más del 50% de su rendimiento máximo, mientras el resto de las gramíneas mostraron 40% o menos de sus rendimientos máximos. El primer juego de histogramas muestra *per se* el orden de las gramíneas que ilustra la amplia diferencia entre ellas para tolerar condiciones adversas de Al y P. Cuando el nivel de P fue incrementado, pero manteniendo el mismo porcentaje de saturación de Al, todas las gramíneas aumentaron su rendimiento. *Hyparrhenia rufa* 601 y *Melinis minutiflora* 608 alcanzaron el 50% de rendimiento con el primer incremento de P y *Brachiaria decumbens* con el segundo incremento de P.

Con la adición de media tonelada de cal/ha, la mayoría de las especies mostraron un incremento en producción de materia seca (Fig. 15). Resultados similares fueron notados al añadir 1 ton cal/ha (Fig. 16). Estos resultados indican que la respuesta de las gramíneas tolerantes a Al, es principalmente relativa a requerimientos de Ca y Mg más que un efecto de encalado. Cuando la toxicidad de Al fue eliminada con la aplicación de 5 ton cal/ha (Fig. 17), las ocho gramíneas forrajeras sobrepasaron más del 50% de sus rendimientos en los niveles bajos de P. Sin embargo, cuando el fertilizante fosforado fué incrementado, la mayoría de las gramíneas mostraron una reducción en sus rendimientos, lo cual probablemente esté relacionado con algún desbalance nutricional debido a las dosis elevadas de cal y P aplicadas.

Los resultados con leguminosas forrajeras se presentan en las figuras 18, 19, 20, 21. A pesar de existir marcadas variaciones entre especies en respuesta a las aplicaciones de Cal y P, en general los resultados siguen en forma similar al de las gramíneas.

4.4. Toxicidad de Manganese

Otro de los factores limitantes para el crecimiento de las plantas forrajeras en suelos ácidos constituye la toxicidad de Mn. El efecto tóxico de Mn generalmente ocurre a pH del suelo inferior a 5.5. Sin embargo, en suelos inundados o compactados, el exceso de Mn puede limitar el crecimiento de las plantas a pH 6.0 o mayor (Siman et al., 1974). Bajo condiciones de aeración pobre, el Mn es reducido a la forma bivalente, la cual es disponible para las plantas (Foy, 1976). Consecuentemente, la toxicidad de Mn puede ocurrir a valores de pH similares a la toxicidad de Al así como también a valores de pH que son demasiado altos para que el Al sea soluble en concentraciones tóxicas. La absorción de Mn depende mayormente de la actividad de Mn bivalente en la solución del suelo y es dependiente de la presencia de Mn fácilmente reducible en el suelo (Pearson, 1975).

Contrariamente al efecto tóxico del Al en las plantas, el Mn no parece afectar directamente el sistema radicular, pero puede reducir su crecimiento indirectamente al afectar la parte aérea. Un exceso de Mn produce síntomas más definidos que el Al en la parte aérea y el grado de toxicidad está relacionado a su acumulación en la parte aérea y no en las raíces (Foy, 1976). La toxicidad de Mn está caracterizada por una clorosis marginal y una distorción de las hojas jóvenes asociada con acumulación localizada de Mn en el tejido foliar. (Foy, 1977; Vlamis et al., 1973). Una toxicidad severa de Mn ocasiona que el sistema radicular se torne café pero, usualmente, solo después que el follaje ha sido afectado. En muchos casos, clorosis intervenal ha sido observada y este efecto ha sido explicado en el sentido de que el Mn induce una deficiencia de Fe (Hewitt, 1963).

4.5. Mecanismos de Tolerancia a la Toxicidad de Manganeso.

Existen varios trabajos que indican una variabilidad en la tolerancia de especies y variedades a la toxicidad de Mn. (Foy, 1975). Sin embargo, al igual que la tolerancia a Al, dentro de cada especie existen ecotipos con mayor tolerancia que otros. Esto indica que en el estudio de adaptabilidad o tolerancia a niveles tóxicos de Mn, debería enfatizarse a nivel de ecotipo o accesión y no de especie, puesto que la susceptibilidad de una especie no significa la eliminación de ésta por el hecho de tener variedades que son tolerantes a estres de Mn. Por otra parte, una planta tolerante a toxicidad de Mn no necesariamente resulta ser tolerante a Al (Jackson, 1967). Sin embargo, existen casos que algunas plantas son tolerantes o susceptibles a ambos, Al y Mn, mientras que otras muestran tolerancias opuestas a un exceso de los dos elementos (Foy, 1976).

Respecto a los posibles mecanismos de tolerancia a Mn, algunas plantas parecen escapar de los efectos tóxicos de Mn por medio de una menor absorción, o por medio de una retención de Mn en el sistema radicular, o en otras partes de la planta, donde es física o químicamente separado de los sitios metabólicos importantes (Foy, 1976).

El desarrollo de un mecanismo de exclusión de Mn para evitar toxicidad de Mn tiene problemas inherentes debido a que determina si la planta es más tolerable a toxicidad pero más susceptible a deficiencia. Sin embargo, existe evidencia que la tolerancia a Mn está asociada algunas veces con bajas tasas de absorción de Mn (Lohnis, 1951; Vose y Randall, 1962) y grandes dife

rencias en acumulación de Mn por varias especies en la parte aérea (Jackson, 1967). Tolerancia a Mn en algunas especies ha sido atribuida a baja absorción de Mn y tal reducción se atribuye a un incremento del pH externo o a una oxidación de Mn de la forma bivalente a tetravalente en la zona de interfase raíz-suelo. Esto indica que la menor absorción de Mn y por ende una mayor tolerancia, puede atribuirse a propiedades del sistema radicular al tener un mayor poder de oxidación. Algunas plantas restringen el transporte de Mn de las raíces a la parte aérea (Ouellette and Dessureaux, 1958). Esto probablemente se debe a una deposición de exceso de Mn en los vacuolos de las células radiculares. Sin embargo, existen grandes diferencias entre especies y variedades en los niveles de Mn acumulados en la parte aérea (Helyar, 1978). Esto enfatiza el hecho de que mecanismos de tolerancia en la parte aérea también operan. Generalmente, la tolerancia diferencial en la parte aérea es explicada por una resistencia a la acumulación elevada de Mn en tejido joven (Foy, 1976).

4.6. Tolerancia de especies forrajeras Tropicales a la Toxicidad de Mn.

Existen varios trabajos de investigación que muestran una tolerancia diferencial entre especies forrajeras a la toxicidad de Mn. En general, parece que las leguminosas son más sensibles que las gramíneas (Hewitt, 1963; Lohnis, 1951). Algunas leguminosas forrajeras del trópico han recibido atención durante la última década en cuanto a la tolerancia del exceso de manganeso en el suelo y el orden relativo de esta tolerancia en 9 especies estudiadas se presenta en el cuadro 4. Souto y Doberciner (1969) encontraron resultados similares en

Brazil con un orden relativo de tolerancia siguiente: *Centrosema pubescens* > *Stylosanthes gracilis* > *Glycine javanica* > *Macroptilium atropurpureum*. De estos resultados se concluye que *centrosema pubescens* es bastante tolerante a la toxicidad del manganeso. Sin embargo, observaciones visuales en CIAT-Quilichao en una colección de ecotipos de *centrosema* parecen indicar que entre ecotipos de la misma especie existen diferencias significativas en el grado de tolerancia al Mn tóxico.

Datos de Andrew y Hegarty (1969) muestran que las deficiencias en especies forrajeras para tolerar exceso de Mn son debidas en parte a la acumulación de este elemento en la parte aérea de las plantas de manera que los niveles críticos internos de Mn varían entre especies. Algunos de los resultados (Cuadro 5) muestran que especies leguminosas forrajeras tales como *centrosema pubescens*, *Stylosanthes humilis* y *Lotononis bainesii*, que son considerados como tolerantes, presentan niveles críticos internos de Mn bastante altos (>1000 ppm-Mn) mientras que leguminosas susceptibles tales como: *Leucaena leucocephala*, *Glycine wightii*, *Macroptilium atropurpureum*, y *Medicago sativa* tienen un nivel crítico bastante bajo (<600 ppm). Generalmente, las concentraciones de Mn en las raíces son mayores que la parte aérea, sin embargo la relación de Mn (Mn en raíces a Mn en la parte aérea) varía entre especies. Por ejemplo, en *Stylosanthes humilis* las relaciones de Mn fueron superiores que las de *Macroptilium atropurpureum* a cualquier nivel externo de Mn (Andrew y Hegarty, 1969). De aquí, la primera leguminosa retuvo proporcionalmente más Mn en su sistema radicular que la segunda leguminosa. De lo

mencionado, parece que por lo menos 3 mecanismos fisiológicos, determinan que especies forrajeras sean tolerantes a la toxicidad de Mn. Primero, resistencia de la parte aérea a una cantidad dada de Mn externo (producción de materia seca), Segundo, una retención proporcionalmente alta de Mn en el sistema radicular y finalmente una reducida absorción de Mn.

5. LITERATURA CITADA

- Abbot, J.B., S.D. Conner, and H.R. Smalley. 1913. Soil acidity, nitrification and the toxicity of soluble salts of aluminum. Ind. Agr. Exp. Sta. Bul. 170.
- Abruña, F., J. Vicente-Chandler, R.W. Pearson, and S. Silva. 1970. Crop response to soil acidity factors in Ultisols and Oxisols-Tobacco. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 34: 629-635.
- Abruña, F., R.W. Pearson, and R. Perez-Escolar. 1974. Lime response of corn and beans grown on tropical Oxisols and Ultisols of Puerto Rico. pp. 261-282. In E. Bornemisza and A. Alvarado (eds.) Soil Management in Tropical America. North Carolina State University, Raleigh.
- Adams, F. 1974. Soil Solution. In E.W. Carson (ed.) The Plant Root and Its Environment. University Press of Virginia, Charlottesville. pp. 441-481.
- Adams, F., and Z.F. Lund. 1966. Effect of chemical activity of soil aluminum on cotton root penetration of acid subsoil. Soil Sci. 101: 193-198.
- Adams, F., and R.W. Pearson. 1970. Differential response of cotton and peanuts to subsoil acidity. Agron. J. 62: 9-12.
- Ali, M.E. 1973. Influence of cations on aluminum toxicity in wheat (Triticum aestivum (Vill.) Host). Ph.D. Thesis, Oregon State University, Corvallis.
- Andrew, C.S. 1960. The effect of phosphorus, potassium, and calcium on the growth, chemical composition, and systems of deficiency of white clover in a subtropical environment. Aust. J. Agric. Res. 11: 149-161.
- Andrew, C.S. 1977. The effect of sulphur on the growth, sulphur and nitrogen concentration, and critical sulphur concentrations of some tropical and temperate pasture legumes. Aust. J. Agric. Res. 28: 807-820.

- Andrew, C.S. y Robins, M.F. 1969. The effect of phosphorus on the growth, chemical composition and critical phosphorus percentages of some tropical pasture grasses. Aust. J. Agric. Res. 22: 693-703.
- Andrew, C. S. and M. P. Hegarty. 1969. Comparative response to manganese excess of eight tropical and five temperate pasture legume species. Aust. J. Agric. Res. 20: 687-696.
- Andrew, C.S. and P.J. Vanden-Berg. 1973. The influence of aluminum on phosphate adsorption by whole plants and excised roots of some pasture legumes. Aust. J. Agric. Res. 24: 341-351.
- Andrew, C.S. and I.F. Fergus. 1976. Plant nutrition and soil fertility. pp. 101-133. In Shaw, N.H. and W.W. Bryan (ed.) Tropical Pasture Research, Principles and Methods. CSIRO, Brisbane, Australia.
- Armiger, W.H., C.D. Foy, A.L. Fleming, and B.E. Caldwell. 1968. Differential tolerance of soybean varieties to an acid soil high in exchangeable aluminum. Agron. J. 60: 67-70.
- Bhumbla, D.R. and E.D. McLean. 1965. Aluminum in soils. VI. Changes in pH-dependent acidity, cation-exchange capacity, and extractable aluminum with additions of lime to acid surface soils. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 29: 370-374.
- Brams, E.A. 1971. Continuous cultivation of west African soils. Organic matter diminution and effects of applied lime and phosphorus. Plant Soil 35: 401-414.
- Brenes, E. and R.B. Pearson. 1973. Root responses of three gramineae species to soil acidity in an Oxisol and Ultisol. Soil Sci. 116: 295-302..
- Bryan, W.W. and T.R. Evans. 1973. Effects of soils, fertilizers and stocking rates on pastures and beef production on the Wallum of South-Eastern Queensland. I. Botanical composition and chemical effects on plant and soils. Aust. J. Exp. Agric. Anim. Husb. 13: 516-529.

- Cate, R.B. Jr. and L.A. Nelson. 1971. A simple statistical procedure for partitioning soil test correlation data into two classes. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 35: 658-659.
- Cate, R.B., Jr. and A.P. Sukhai. 1964. A study of aluminum in rice soils. *Soil Sci.* 98: 85-93.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. 1978. Informe Anual 1977. Programa de Ganado de Carne. CIAT, Cali, Colombia.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. 1979. Informe Anual 1978. Programa de Ganado de Carne. CIAT, Cali, Colombia.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. 1980. Informe Anual 1979. Programa de Pastos Tropicales. CIAT, Cali, Colombia. (En prensa).
- Clarkson, D.T. 1965. The effect of aluminum in some other trivalent cations on cell division in root apices of allium cepa. *Ann. Bot. (London) N.S.* 28: 309-315.
- Clarkson, D.T. 1966. Effect of aluminum on the uptake and metabolism of phosphorus by barley seedlings. *Plant Physiology* 41: 165-172.
- Clarkson, D.T. 1967. Phosphorus supply and growth rate in species of *Agrostis* L. *Jour. ecology* 55: 111-118.
- Clarkson, D.T. 1969. Metabolic aspects of aluminum toxicity and some possible mechanisms for resistance. pp. 381-397. In I.H. Rorison (ed.) *Ecological Aspects of the Mineral Nutrition of Plants*. Brit. Ecol. Soc. Symp. No.9. Blackwell Sci. Pub., Oxford.
- Clarkson, D.T. 1971. Inhibition of uptake and long distance transport of calcium by aluminum and other polyvalent cations. *J. Exp. Bot.* 22: 837-851.
- Clarkson, D.T., and J. Sanderson. 1969. The uptake of a polyvalent cation and its distribution in the root apices of allium cepa: Tracer and autoradiographic studies. *Planta* 89: 136-154.

- Cochrane, T.T., J.G. Salinas and P.A. Sánchez. 1980. An equation for liming acid mineral soils to compensate Al tolerance. *Tropical Agriculture* 59: 133-140.
- Coleman, N.T. and G.W. Thomas. 1967. The basic chemistry of soil acidity. pp. 1-41. In R.W. Pearson and F. Adams (eds.), *Soil Acidity and Liming*. Series of Agronomy No.12, American Society of Agronomy, Madison.
- Crafts, A.S. and C.E. Crisp. 1971. Phloem transport in plants. W.H. Freeman and Co., San Francisco, California.
- Devine, T.E., C.D. Foy, A.L. Fleming, C.H. Hanson, T.A. Campbell, J.E. McMurtrey III, and J.W. Schwartz. 1976. Development of alfalfa strains with differential tolerance to aluminum toxicity. *Plant Soil* 44: 73-79.
- DeWaard, P.W.F., and C.D. Sutton. 1960. Toxicity of aluminum to black pepper in Sarawak. *Nature* 188: 1129-1130.
- Donald, N. 1963. Competition among crop and pasture plants. *Adv. Agron.* 15: 1-118.
- Eagles, C.F. 1972. Competition for light and nutrients between natural populations of Dactylis glomerata. *J. Appl. Ecol.* 9: 141-151.
- Evans, C.E. and E.J. Kamprath. 1970. Lime response as related to percent Al saturation, solution Al, and organic matter content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34: 893-896.
- Fenster, W.E. y L.A. León. 1979. Manejo de la fertilización con fósforo para el establecimiento y mantenimiento de pastos mejorados en suelos ácidos e infértiles de América Tropical. p. 119-133. In L.E. Tergas y P.A. Sánchez (eds.), *Producción de Pastos en Suelos Ácidos de los Trópicos*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.
- Fleming, A.L., and C.D. Foy. 1968. Root structure reflects differential aluminum tolerance in wheat varieties. *Agron. J.* 60: 172-176.

- Fox, R.L., S.K. DeDatta, and G.D. Sherman. 1962. Phosphorus solubility and availability to plants and aluminum status of Hawaiian soils as influenced by liming. pp. 574-583. In Trans. Comm, IV and V, Int. Soc. Soil. Sci. New Zealand.
- Foy, C.D. 1974. Effects of aluminum on plant growth. pp. 602-642. In E.W. Carson (ed.) The Plant Root and Its Environment. University Press of Virginia.
- Foy, C.D. 1975. Plant adaptation to mineral stresses in problem soils (mimeographed). Paper presented at the Annual North-eastern Regional Grassland Council Meeting, Blackwater Falls, West Virginia. 15 p.
- Foy, C.D. 1976. Differential aluminum and manganese tolerances of plant species and varieties in acid soils. Ciencia e Cultura 28 (2): 150-155.
- Foy, C.D. 1977. General principles involved in screening plants for aluminum and manganese tolerance. pp. 255-267. In M.J. Wright (ed.) Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils. Cornell University, Ithaca, New York.
- Foy, C.D., and J.C. Brown. 1963. Toxic factors on acid soils. I. Characterization of aluminum toxicity in cotton. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 27: 403-407.
- Foy, C.D., and J.C. Brown. 1964. Toxic factors in acid soils. II. Differential aluminum tolerance of plant species. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 28: 27-32.
- Freitas, F.G. de, and C.O. da Silveira. 1977. Principais solos sob vegetação de cerrado e sua aptidão agrícola. pp. 155-209. In M.G. Ferri (Coord.) Simposio sobre o Cerrado. IV. Ed. Itatiaia, Lta. São Paulo, Brazil.
- Gonzalez-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. 126 pp.
- Gray, B., M. Drake, and W. Colby. 1953. Potassium competition in grass-legume associations as a function of root cation exchange capacity. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 17.

- Gualdrón, R. y J.M. Spain. 1979. Calcio y magnesio. Ocurrencia y magnitud de los problemas en suelos ácidos. VI Coloquio de Suelos, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Palmira, Colombia. 23 p.
- Hall, R.L. 1974. Analysis of the nature of interference between plants of different species. I. Concepts and extension of the DeWitt Analysis to examine effects. Aust. J. Agric. Res. 25: 739-747.
- Heylar, K.R. 1978. Effects of aluminum and manganese toxicities on legume growth. p. 207-231. In S.C. Andrew and E.J. Kamprath (eds.), Mineral Nutrition of Legumes in Tropical and Subtropical Soils. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Melbourne, Australia.
- Kamprath, E.J. and C.D. Foy. 1971. Lime-fertilizer-plant interactions in acid soils. pp. 105-151. In R.A. Olsen et al., (eds.) Fertilizer technology and use. Second edition. Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin.
- Kerridge, P.C. 1969. Aluminum toxicity in wheat (Triticum aestivum Vill., Host.), Ph.D. Thesis, Oregon State University, Corvallis.
- Kerridge, P.C., and W.E. Kronstad. 1968. Evidence of genetic resistance to aluminum toxicity in wheat (Triticum aestivum Vill., Host). Agron. J. 60: 710-711.
- Kerridge, P.C., M.D. Dawson, and P.D. Moore. 1971. Separation of degrees of aluminum tolerance in wheat. Agron. J. 63: 586-591.
- Keser, M., F.B. Neubauer, F.E. Hutchinson, and D.B. Verrill. 1977. Differential aluminum tolerance of sugar beet cultivars as evidence by anatomical structure. Agron. J. 69: 347-350.
- King, J. 1971. Competition between established and newly sown grass species. J. Br. Grassl. Soc. 26: 221-229.
- Klimashevskii, E.L. and Bereyovskii, K.K. 1973. Genetic resistance to ionic toxicity in the root zone. Soviet plant Physiology. 20: 51-54 (Eng. trans.).

- Lafever, H.N., L.G. Campbell, and C.D. Foy. 1977. Differential response of wheat cultivars to aluminum. *Agrn. J.* 69: 563-568.
- Lal, R. 1979. Erosion as a constraint to food production in the tropics. Soil Constraints Conference, IRRI, Los Baños, Filipinas.
- Lance, J.C. and R.W. Pearson. 1969. Effects of low concentration of aluminum on growth and water and nutrient uptake by cotton roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33: 95-98.
- Lee, C.R. 1971. Influence of aluminum on plant growth and mineral nutrition of potatoes. *Agron. J.* 63: 604-608.
- Liener, I.E. 1969. Introduction. p. 1-5. In I.E. Liener (ed.), *Toxic Constituents of Plant Food Stuffs*. Academic Press, New York.
- Lin, C. and N.T. Coleman. 1960. The measurement of exchangeable aluminum in soils and clays. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24: 444-446.
- Lohnis, M.P. 1951. Manganese toxicity in field and market garden crops. *Plant Soil* 3: 193-222.
- Lopes, A.S., and F.R. Cox. 1977. A survey of the fertility status of surface soils under "Cerrado" vegetation in Brazil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 41: 742-747.
- Magistad, O.C. 1925. The aluminum content of the soil solution and its relation to soil reaction and plant growth. *Soil Sci.* 20: 181-226.
- Martin, J.B. 1961. Interrelationships of calcium and aluminum in turf species used for highways. Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute, Blackburg University.
- Matsumura, F. 1976. *Toxicology of insecticides*. Plenum Press, New York. 503 p.
- McCormick, L.H. and F.Y. Borden. 1974. The occurrence of aluminum-phosphate precipitate in plant roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38: 931-934.

- McCart, G.D. and E.J. Kamprath. 1965. Supplying Ca and Mg for cotton on sandy, low cation exchange capacity soils. *Agron. J.* 57: 404-406.
- McLean, E.D. 1976. Chemistry of soil aluminum. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.* 7: 619-636.
- McLead, L.B. and L.P. Jackson. 1967. Aluminum tolerance of two barley varieties in nutrient solution, pea, and soil culture. *Agron. Jour.* 59: 359-363.
- Moore, D.P., W.E. Kronstand and R.J. Metzger. 1977. Screening wheat for aluminum tolerance. pp. 287-295. *In* M.J. Wright (ed.), *Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils*. Cornell University, Ithaca, New York.
- Moore, D.P., L. Jacobson, and R. Overstreet. 1961. Uptake of calcium by excessing barley roots. *Plant Physiol.* 36: 53-57.
- Mott, G.O. and E.M. Hutton. 1979. Estrategias para la colección y el mejoramiento de plantas forrajeras. p. 1-4. *In* G.O. Mott y A. Jiménez (eds.), *Manual para la Colección, Preservación y Caracterización de Recursos Forrajeros Tropicales*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.
- Munns, D.N. 1965. Soil acidity and the growth of a legume. III. Interactions of lime and phosphate in growth of Medicago sativa L. in relation to aluminum toxicity and phosphate fixation. *Aust. J. Agr. Res.* 16: 757-766.
- Nieman, R.H. and M.C. Shannon. 1976. Screening plants for salinity tolerance. p. 359-367. *In* M.J. Wright (ed.), *Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils*. Cornell University, Ithaca, New York.
- Nye, P., D. Craig, N.T. Coleman and J.L. Ragland. 1961. Ion exchange equilibria involving aluminum. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 25: 14-17.
- Olmos, I.L.L. and M.N. Camargo. 1976. Ocorrência de alumínio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. *Ciencia e Cultura* 28 (2): 171-180.

- Ouellete, G.J., and L. Dessureaux. 1958. Chemical composition of alfalfa as related to degree of tolerance to manganese and aluminum. *Can. J. Plant Sci.* 38: 206-214.
- Patterson, J.W. 1965. The effect of aluminum on the absorption and translocation of calcium and other elements in young corn. Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University.
- Pearson, R.W. 1975. Soil acidity and liming in the humid tropics. Cornell Intr. Agric. Bull. No. 30. Cornell University. 66 pp.
- Popenoe, H. 1960. Some soil cation relationships in an area of shifting cultivation in the humid tropics. 7th Inter. Cong. Soil Sci. Proc. 11: 303-311.
- Ragland, J.L. 1959. Some reactions of aluminum in acid soils and their implications concerning root growth. Ph.D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh. 140 pp.
- Randall, P.J. and P.B. Vose. 1963. Effect of aluminum on uptake and translocation of phosphorus-32 by perennial ryegrass. *Plant Physiology* 38: 403-409.
- Raupach, M. 1963. Solubility of simple aluminum compounds expected in soils. II. Hydrolysis and conductance of Al^{+3} . *Aust. J. Soil Sci.* 1: 36-45.
- Rees, W.J., and G.H. Sidrak. 1961. Plant nutrition on fly ash. *Plant Soil* 8: 141-159.
- Rees, M.C., and D.J. Minsen. 1977. The influence of supplements on the voluntary intake and digestibility of feed -an alternative to fertilizer. pp. 165-178. In, Blair, G.J. (ed.) *Prospects for Improving the Efficiency of Phosphorus Utilization*. Armidale, England.
- Reid, D.A., A.L. Fleming, and C.D. Foy. 1971. A method for determining aluminum response of barley in nutrient solution in comparison to response in Al-toxic soil. *Agron. J.* 63: 600-603.
- Ritchey, K.D. 1979. Potassium fertility in Oxisols and Ultisols of the humid tropics. Cornell Int. Agric. Bull. No. 37. Cornell Univ., Ithaca, New York. 45 pp.
- Rhue, R.D., and C.O. Grogan. 1977. Screening corn for aluminum tolerance. In M.J. Wright (ed.) *Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils*. Cornell University, Ithaca, New York. pp. 297-310.

- Salinas, J.G. 1978. Differential response of some cereal and bean cultivars to Al and P stress in an Oxisol of central Brazil. Ph.D. Thesis. North Carolina State University, Raleigh, 326 pp.
- Salinas, J.G. 1979. Adaptación de plantas a toxicidas de aluminio y manganeso en suelos ácidos. Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, Colombia. 31 p.
- Salinas, J.G., J.F. Sanz y R. García. 1980. Manual de sintomatología de deficiencia y toxicidades minerales en gramíneas y leguminosas forrajeras tropicales. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Programa de Pastos Tropicales. Cali, Colombia. (En preparación).
- Sánchez, P.A. and T.T. Cochrane. 1979. Soil constraints in relation to major farming systems of tropical America. Soil constraints Conference, IRRI, Los Baños, Filipinas (In press).
- Sampson, M., D. Clarkson, and D.D. Davies. 1965. DNA synthesis in aluminum-treated roots of barley. *Science* 148: 1.476-1.477.
- Sartain, J.B., and E.J. Kamprath. 1975. Effect of liming a highly Al-saturated soil on the top and root growth and soybean nodulation. *Agron. J.* 67: 507-510.
- Siman, A., F.W. Cradock, and A.W. Hudson. 1974. The development of manganese toxicity in pasture legumes under extreme climatic conditions. *Plant Soil* 41: 129-140.
- Soarez, W.V., E. Lobato, E. Gonzalez, e G. Naderman, Jr. 1975. Encalado de los suelos del Cerrado Brasileiro. pp. 287-303. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.) Manejo de Suelos en la América Tropical. North Carolina State University, Raleigh.
- Souto, C.H., and J. Döbereiner. 1969. Manganese toxicity in tropical forage legumes. *Parq. Agropec. Bras.* 4: 129-138.
- Schultze-Kraft, R. y D.C. Giacometti. 1979. Recursos genéticos de leguminosas forrajeras para las sabanas de suelos ácidos e infértiles en América tropical, p. 59-69. In L.E. Tergas y P.A. Sánchez (eds.), Producción de Pastos en Suelos Acidos de los Trópicos. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.

- Smith, F.W. 1978. Role of plant chemistry in the diagnosis of nutrient disorders in tropical legumes. pp. 329-346. In C.S. Andrew and E.J. Kampratt (eds.) Mineral Nutrition of Legumes in Tropical and Subtropical Soils. CSIRO, Melbourne, Australia.
- Snayden, R.W. 1971. An analysis of the competition between plants of Trifolium repens L. populations collected from contrasting soils. *J. Appl. Ecol.* 7: 687-697.
- Spain, J.M. 1976. Field studies on tolerance of plant species and cultivars to acid soil conditions in Colombia. p. 213-222. In M.J. Wright (ed.), Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils. Cornell University, Ithaca, New York.
- Spain, J.M. 1977. Field studies on tolerance of plant species and cultivars to soil conditions. pp. 213-222. In M. J. Wright (ed.) Plant adaptation to mineral stress in problem soils. Cornell University, Ithaca, New York.
- Spain, J.M. 1979. Establecimiento y manejo de pastos en los Llanos Orientales de Colombia. p. 181-189. In L.E.Tergas y P.A. Sánchez (eds.), Producción de Pastos en Suelos Acidos de los Trópicos, Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.
- Spain, J.M., C.A. Francis, R.H. Howeler, and F. Calvo. 1975. Differential species and varietal tolerance to soil acidity in tropical crops and pastures. pp. 308-329. In E. Bornemisza and A. Alvarado (eds.) Soil Management in Tropical America. North Carolina State University, Raleigh.
- Spain, J.M., C. Castilla y L.H. Franco. 1979. El uso eficiente de recursos e insumos en el establecimiento y mantenimiento de pastos tropicales. pp. 65-84 In Memorias del 2° Encuentro Nacional de Zootecnia. Conferencia Nacional sobre Utilización de Recursos Forrajeros para la Producción de Ganado Bovino en Colombia, CIAT, Cali, Colombia.
- Swanson, E.R. 1963. The static theory of the firm and three laws of plant growth. *Soil Sci.* 95: 338-343.

- Tisdale, S.L. and W.L. Nelson. 1966. Soil fertility and fertilizers. The MacMillan Company, New York. pp. 427-428, 519-521.
- Ulrich, A. 1952. Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 3: 207-228.
- Veitch, F.D. 1904. Comparison of methods for the estimation of soil acidity. *J. Amer. Chem. Soc.* 10: 637.
- Vose, P.B., and P.J. Randall. 1962. Resistance to aluminum and manganese toxicities in plant related to variety and cation exchange capacity. *Nature* 196: 85-86.
- Waugh, D.L., R.B. Cate Jr., y L.A. Nelson. 1973. Métodos discontinuos para la rápida correlación, interpretación y utilización de los datos de análisis de suelos y las respuestas a los fertilizantes. Boletín Técnico No.7. Series ISFEI, North Carolina State University, Raleigh.
- Waugh, D.L., R.B. Cate Jr., L.A. Nelson y A. Manzano. 1974. Nuevos conceptos en la interpretación biológica y económica de la respuesta a los fertilizantes. In Manejo de Suelos en América Tropical. Consorcio de Universidades de Suelos Tropicales, North Carolina State University, Raleigh.

Cuadro 1. Concentraciones críticas internas de P, K y S para algunas leguminosas forrajeras tropicales (muestreadas en el estado de prefloración).

| Especie | <u>p</u> ^{a/} | <u>K</u> ^{b/} | <u>S</u> ^{c/} |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| | -----% | | |
| <i>Macroptilium atropurpureum</i> | 0,24 | 0,75 | 0,17 |
| <i>Macroptilium lathyroides</i> | 0,20 | 0,75 | 0,15 |
| <i>Stylosanthes humilis</i> | 0,17 | 0,60 | 0,14 |
| <i>Centrosema pubescens</i> | 0,16 | 0,75 | 0,14 |
| <i>Glycine wightii</i> | 0,23 | 0,80 | 0,17 |
| <i>Lotononis bainesii</i> | 0,17 | 0,90 | 0,15 |
| <i>Desmodium uncinatum</i> | 0,23 | 0,80 | 0,17 |
| <i>Desmodium intortum</i> | 0,22 | 0,72 | 0,17 |

a/ Andrew y Robins (1969a)

b/ Andrew y Robins (1969b)

c/ Andrew (1977).

Cuadro 2. Niveles críticos internos de fósforo de especies forrajeras asociadas con rendimientos máximos.

| Especie forrajera | P parte aérea |
|--------------------------------|-------------------|
| | % |
| Leguminosas: | |
| <i>Stylosanthes humilis</i> | 0,17 ¹ |
| <i>Centrosema pubescens</i> | 0,16 ¹ |
| <i>Desmodium intortum</i> | 0,22 ¹ |
| <i>Glycine wightii</i> | 0,23 ¹ |
| <i>Medicago sativa</i> | 0,25 ¹ |
| Gramíneas: | |
| <i>Melinis minutiflora</i> | 0,18 ¹ |
| <i>Panicum maximum</i> | 0,19 ¹ |
| <i>Pennisetum clandestinum</i> | 0,22 ¹ |
| <i>Chloris gayana</i> | 0,23 ¹ |
| <i>Paspalum dilatatum</i> | 0,25 ¹ |
| <i>Andropogon gayanus</i> | 0,11 ² |
| <i>Brachiaria decumbens</i> | 0,12 ² |

Fuente: ¹ Andrew y Robins (1969, 1971)

² CIAT (1978).

Cuadro 3. Niveles críticos externos de fósforo de va
rias especies forrajeras tropicales.

| Especie | P disponible en el suelo* |
|--|------------------------------|
| | ppm |
| Leguminosas: | |
| <i>Stylosanthes capitata</i> CIAT 1978 | 2,5 |
| <i>Stylosanthes capitata</i> CIAT 1019 | 3,1 |
| <i>Stylosanthes capitata</i> CIAT 1097 | 3,3 |
| <i>Stylosanthes capitata</i> CIAT 1338 | 3,6 |
| <i>Stylosanthes guianensis</i> CIAT 1200 | 2,5 |
| <i>Stylosanthes guianensis</i> CIAT 1153 | 5,5 |
| <i>Desmodium ovalifolium</i> CIAT 350 | 6,6 |
| <i>Desmodium scorpiurus</i> CIAT 3022 | 8,0 |
| <i>Desmodium gyroides</i> CIAT 3001 | 11,4 |
| <i>Zornia</i> sp. CIAT 883 | 3,4 |
| <i>Macroptilium</i> sp. CIAT 536 | 9,5 |
| Gramíneas: | |
| <i>Panicum maximum</i> | 10,0 |
| <i>Brachiaria decumbens</i> | 7,0 |
| <i>Andropogon gayanus</i> | 5,0 |

* P disponible (Bray-II) asociado con 60-80% de rendimiento máximo.

Fuente: CIAT, Informe Anual (1977-1978).

Cuadro 4. Respuesta diferencial de 9 leguminosas forrajeras tropicales a la toxicidad de Manganeso.

| Leguminosa | Coefficiente de Regresión | Rango de Tolerancia |
|----------------------------|---------------------------|---------------------|
| Centrosema pubescens | -0.0023 | 1. Tolerante |
| Stylosanthes humilis | -0.0038 | 2 |
| Lotononis bainesii | -0.0039 | 3 |
| Macroptilium lathyroides | -0.0066 | 4 |
| Leucaena leucocephala | -0.0077 | 5 |
| Desmodium uncinatum | -0.0080 | 6 |
| Medicago sativa | -0.0102 | 7 |
| Glycine javanica | -0.0128 | 8 |
| Macroptilium atropurpureum | -0.0159 | 9 Susceptible |

* Coeficientes de regresión obtenidos de la producción de materia seca de cada leguminosa en varios niveles tóxicos de manganeso.

FUENTE: Andrew y Hegarty (1969).

Cuadro 5 . Niveles críticos internos de manganeso de especies forrajeras asociados con máximo rendimiento.

| Especie forrajera | Concentración de Mn en parte aérea |
|----------------------------|---------------------------------------|
| Centrosema pubescens | ppm 1600 |
| Stylosanthes humilis | 1140 |
| Lotononis barnesii | 1320 |
| Desmodium uncinatum | 1160 |
| Macroptilium lathyroides | 840 |
| Leucaena leucocephala | 550 |
| Glycini wightii | 560 |
| Macroptilium atropurpureum | 810 |
| Medicago sativa | 380 |

FUENTE: Andrew y Hegarty (1969)

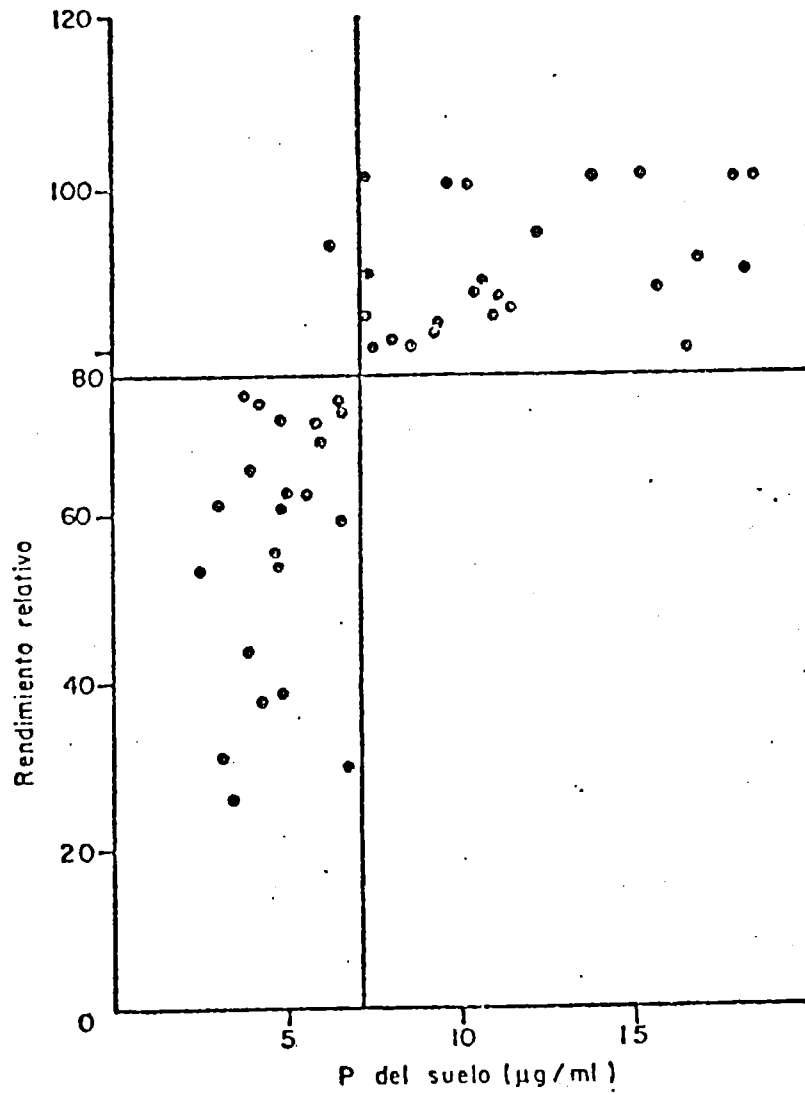


Figura 1. Diagrama de dispersión entre rendimiento relativo y fósforo en el suelo. Fuente: Waugh *et al.* (1973).

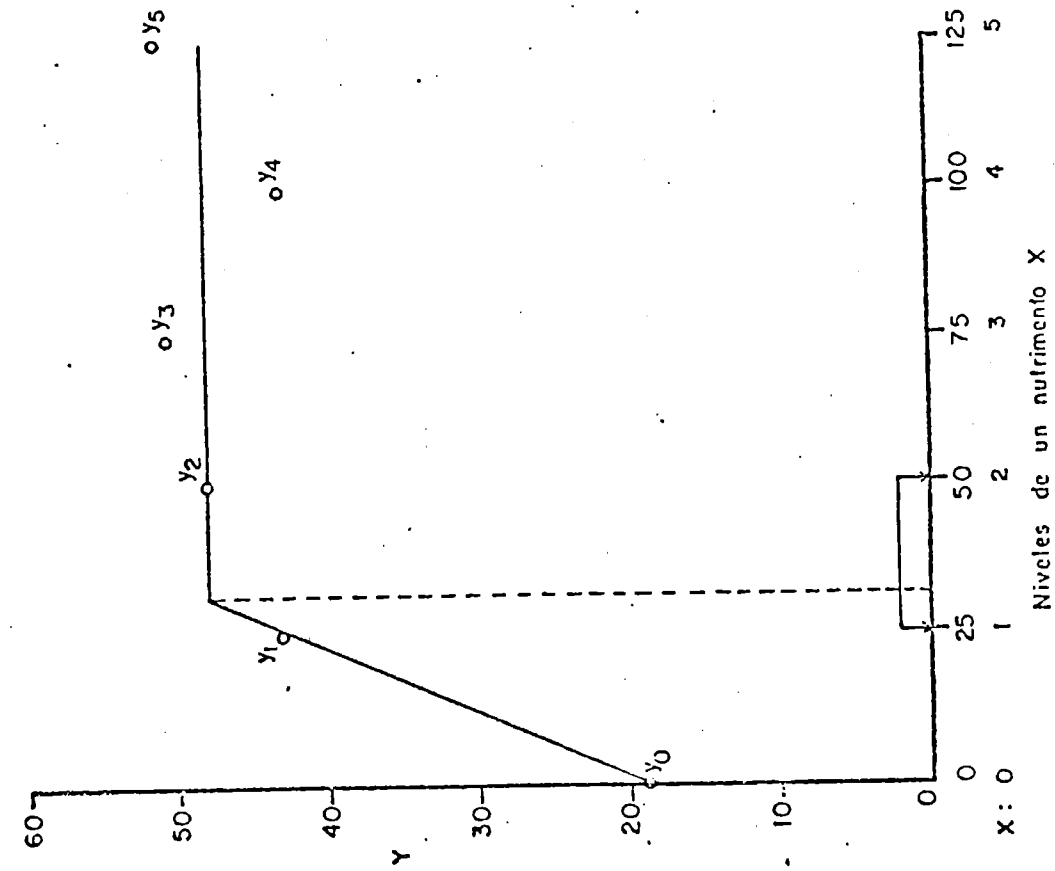


Figura 2. Representación gráfica en la cual dos puntos y_0 y y_1 determinan la pendiente.

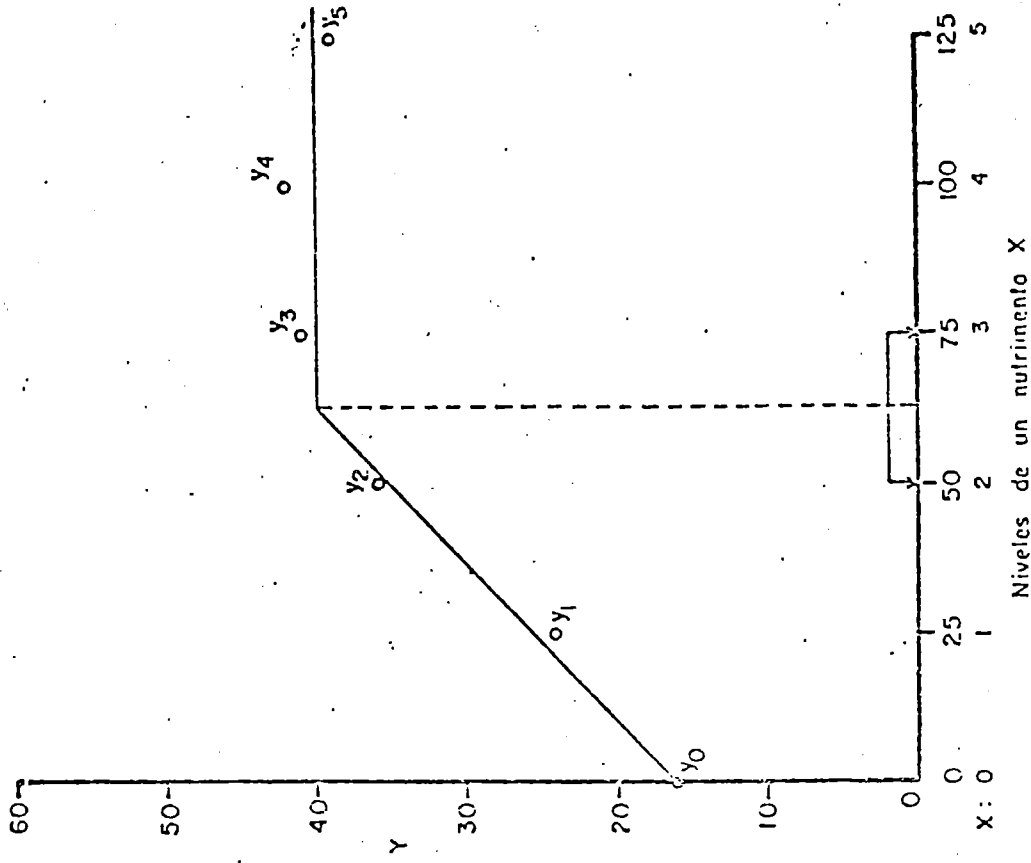


Figura 3. Representación gráfica en la cual tres puntos y_0, y_1 y y_2 determinan la pendiente.

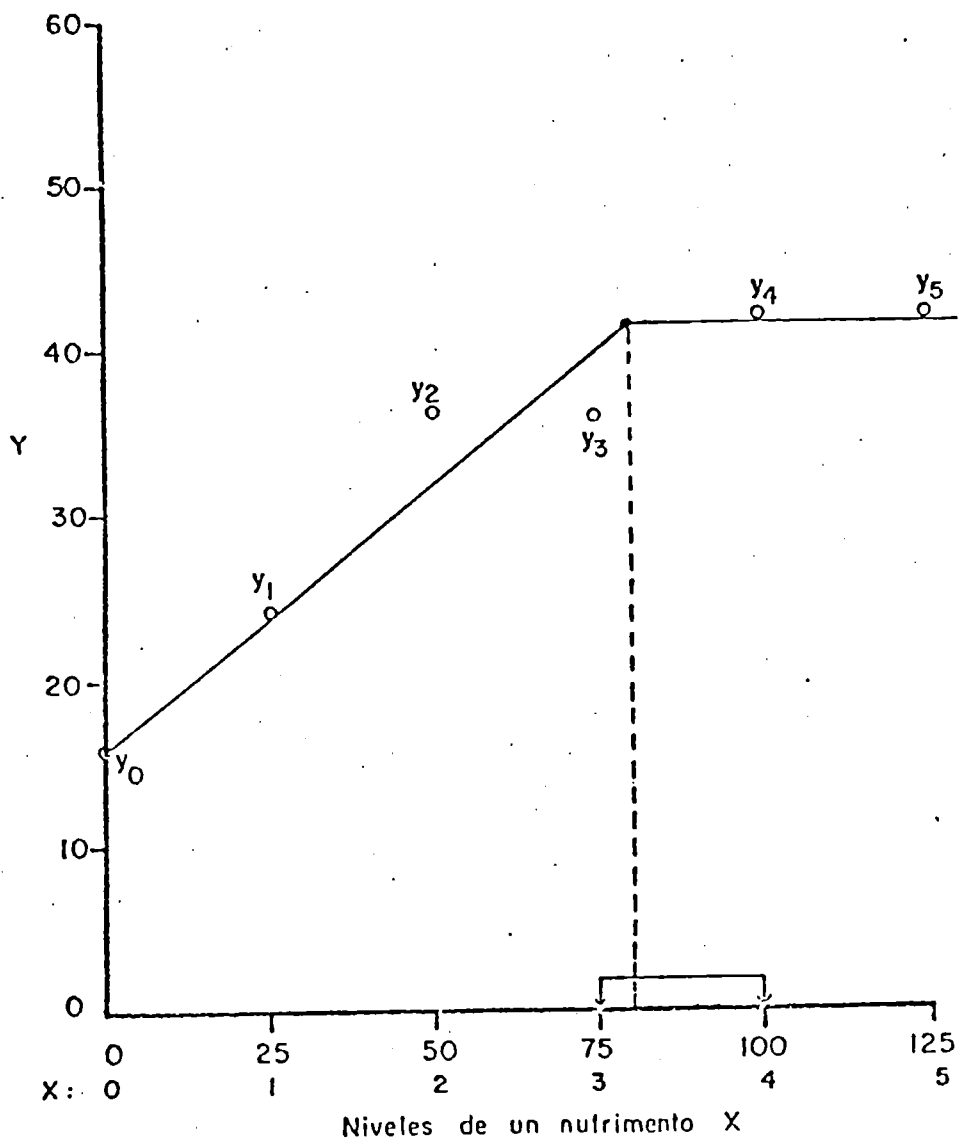


Figura 4. Representación gráfica en la cual cuatro puntos y_0, y_1, y_2, y_3 determinan la pendiente..

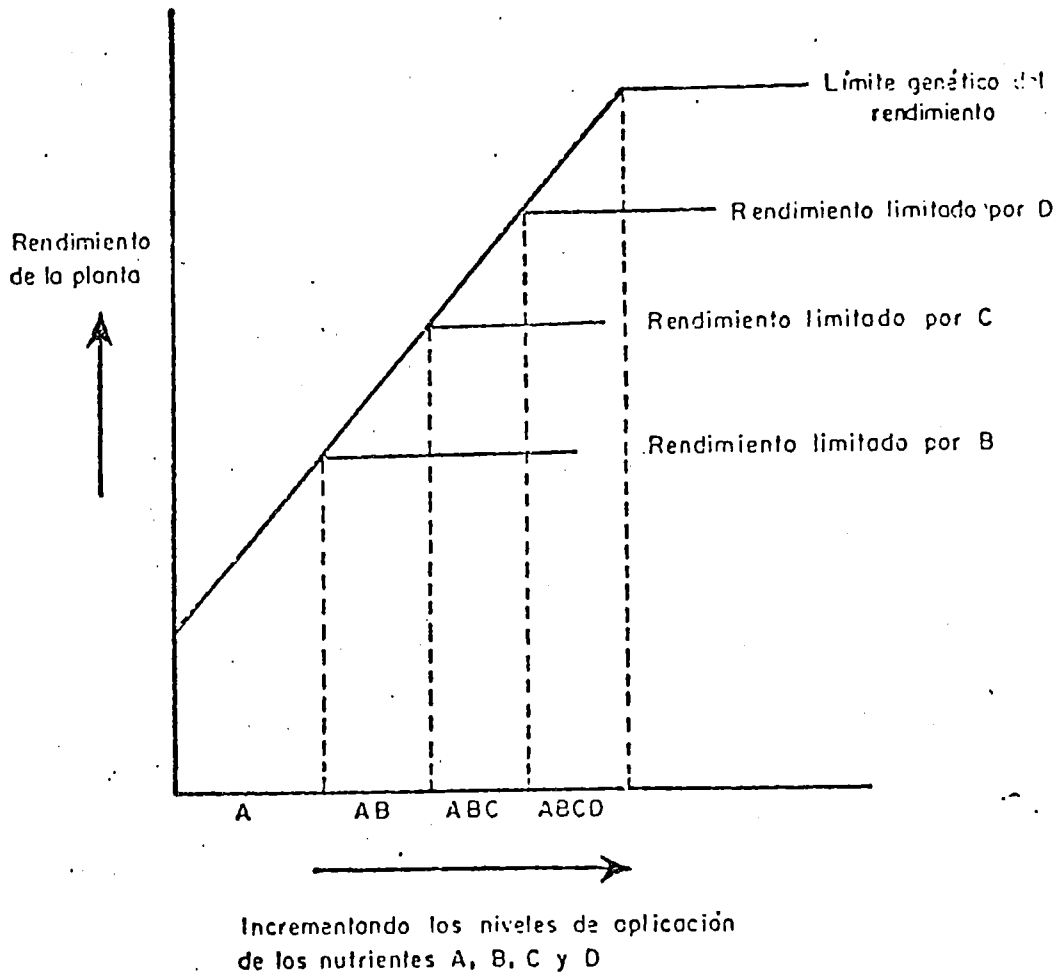


Figura 5. El modelo discontinuo rectilíneo teniendo como base la Ley del Mínimo de Liebig. Fuente: Waugh *et al.* (1974).

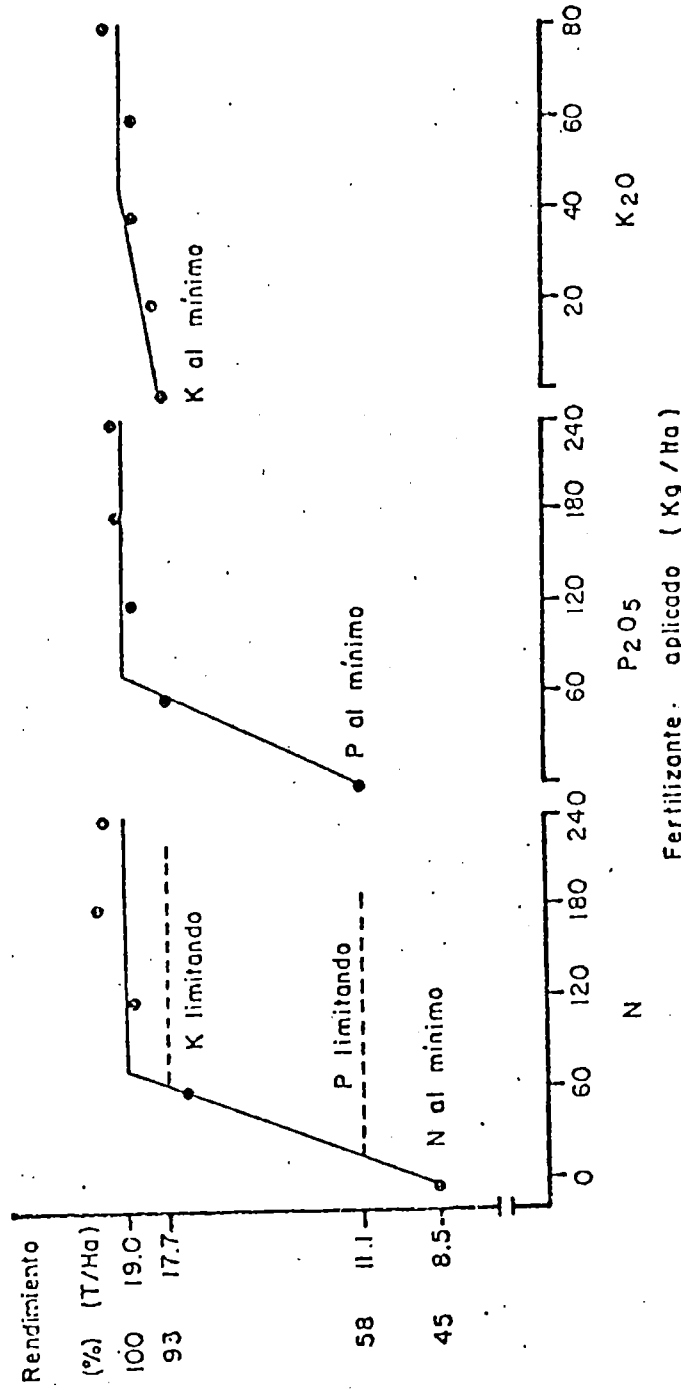


Figura 6. Interpretación de la respuesta a múltiples nutrientes, mediante una combinación de modelos discontinuos rectilíneos de nutrientes individuales.
Fuente: Waugh *et al.* (1973).

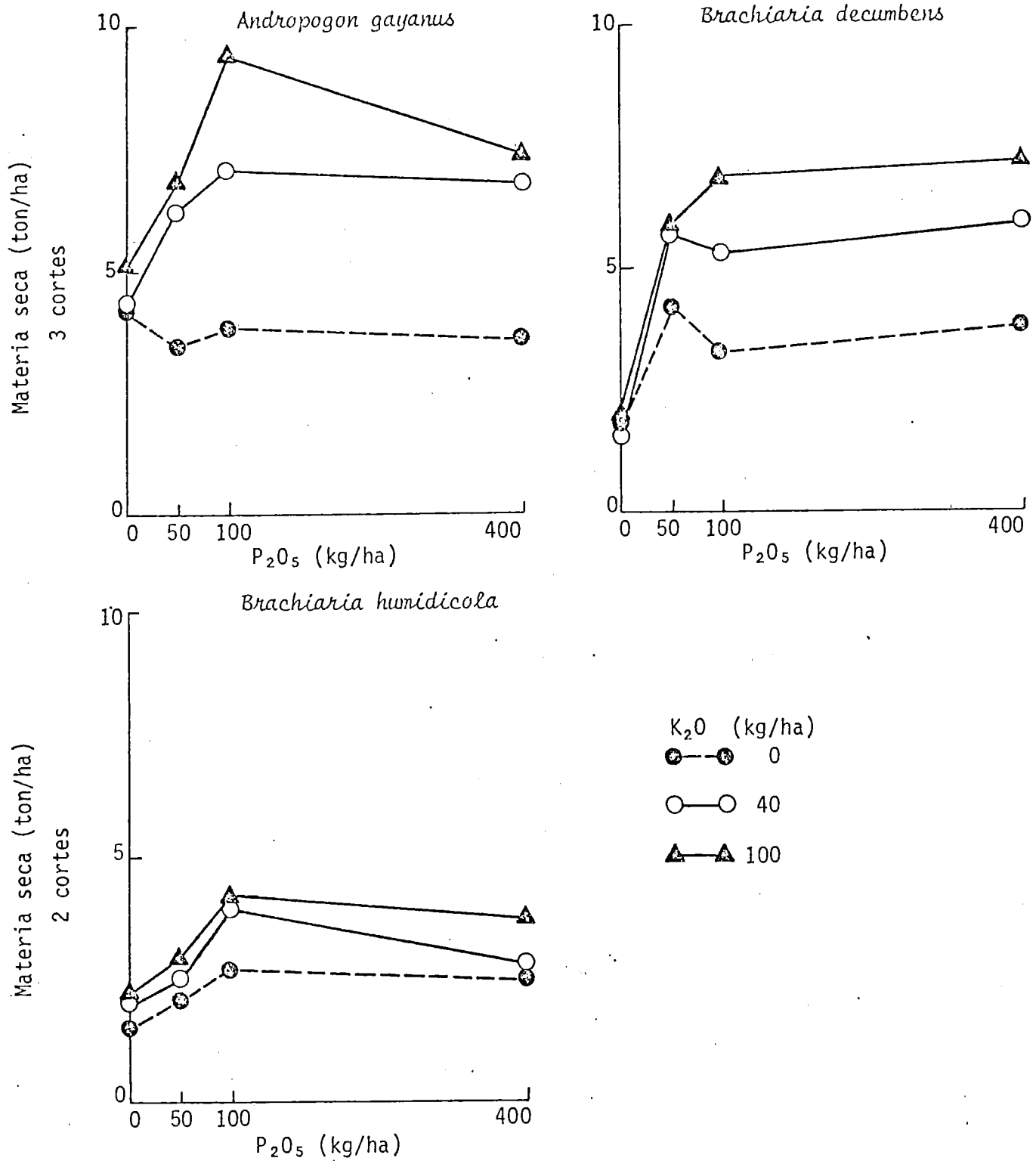


Figura 7. Respuesta de tres gramíneas forrajeras tropicales a la interacción de P y K en un Oxisol de Carimagua (CIAT, 1980).

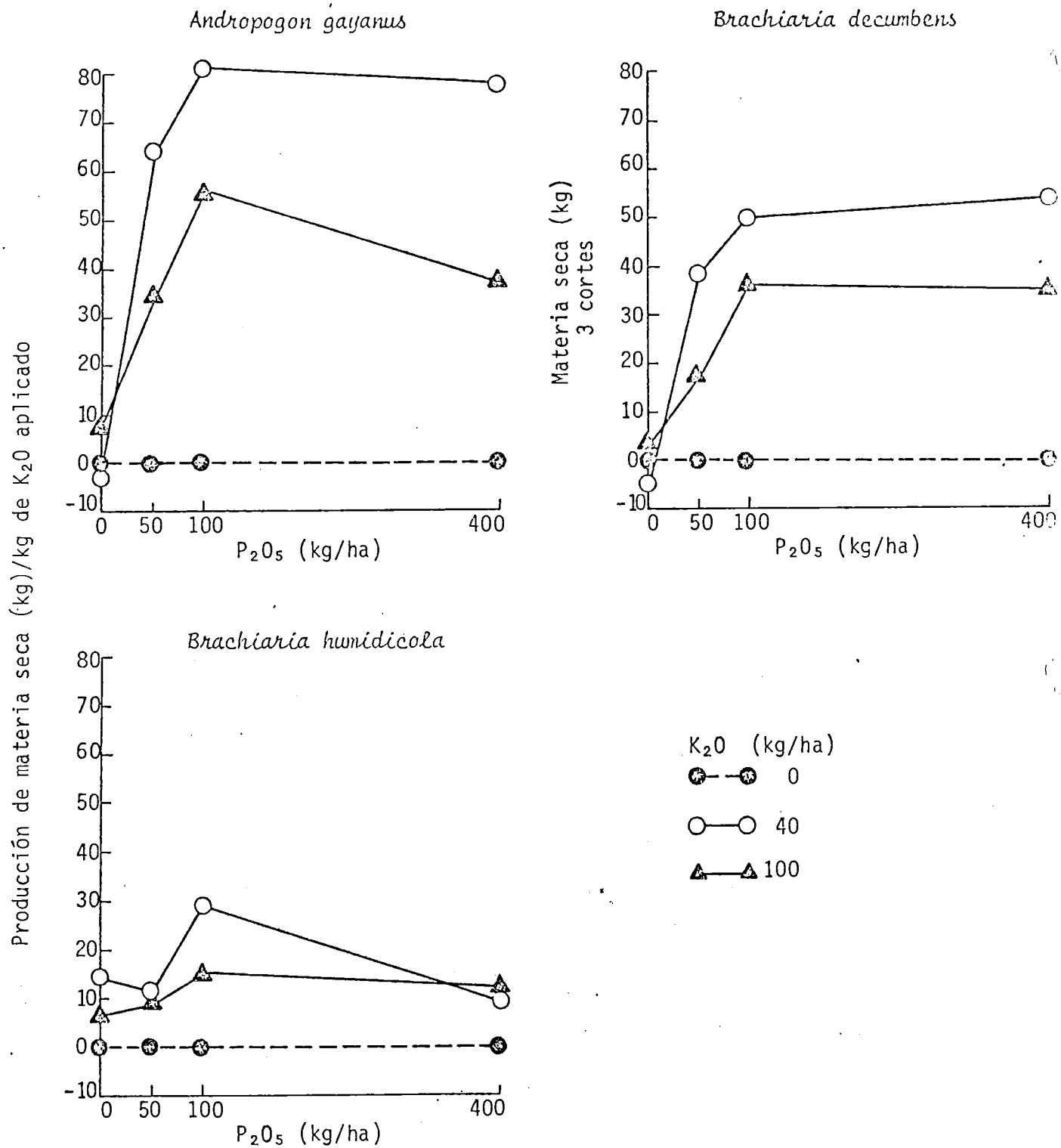


Figura 8. Eficiencia de producción de materia seca de tres gramíneas forrajeras tropicales por cada kg de K_2O aplicado a diferentes niveles de aplicación de fósforo en un Oxisol de Carimagua. Fuente: CIAT (1980).

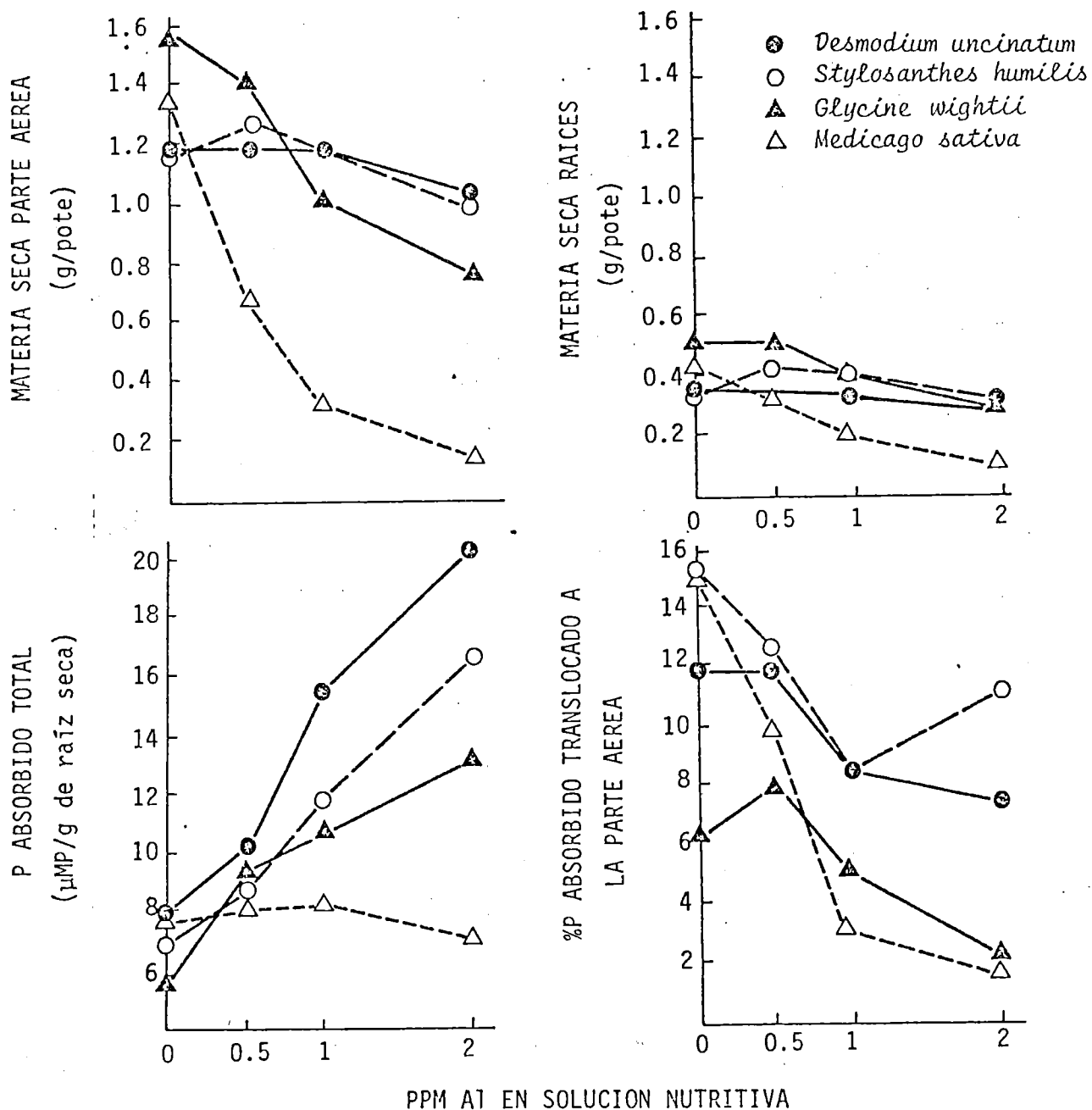


FIGURA 9. Efecto del aluminio en el crecimiento, tasa de absorción de P y tasa de translocación de P de 4 leguminosas forrajeras. Adaptado de Andrew y Vanden Berg (1973).

Page 106

106

106

106

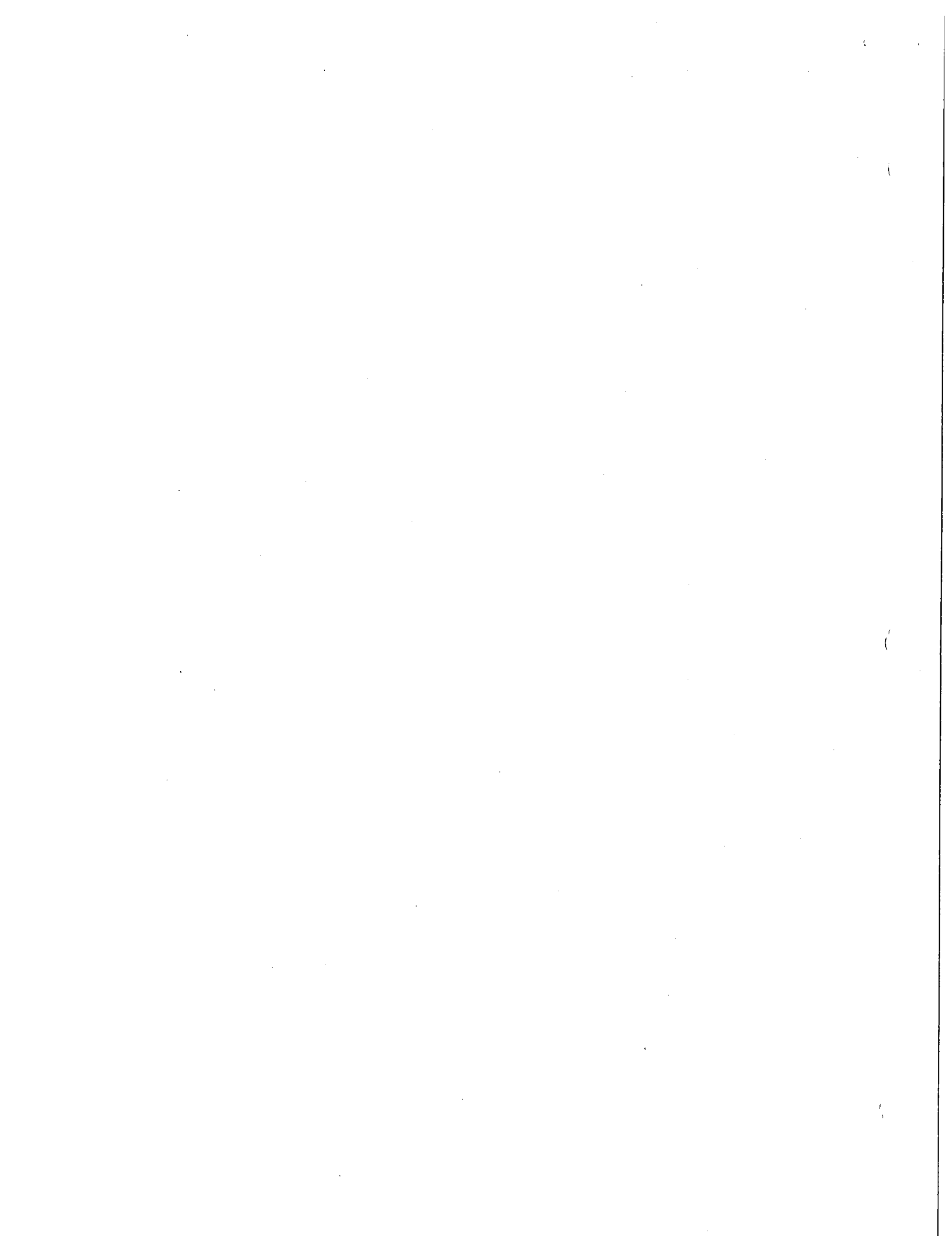
ADAPTACION DE PLANTAS A TOXICIDADES DE ALUMINIO

Y MANGANESO EN SUELOS ACIDOS^{1/}

José G. Salinas^{2/}

^{1/} Trabajo a presentarse en el Curso de Fertilidad de Suelos, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Bogotá, Junio 1.1979.

^{2/} Ph.D. Especialista en Suelos, CIAT.



ADAPTACION DE PLANTAS A TOXICIDADES DE AL Y MN

EN SUELOS ACIDOS

José G. Salinas

1. INTRODUCCION.-

Aproximadamente el 60% de la superficie de América Tropical está cubierta de Oxisoles y Ultisoles siendo de esta manera el bloque más extenso de tierra potencialmente arable. La extensión de esta área así como también su favorable localización y topografía constituyen un potencial para la utilización agrícola intensiva. (Kellogg y Orvedal, 1969).

A pesar de su favorable topografía y clima para la producción intensiva de cultivos y el mejoramiento logístico y social, el desarrollo agrícola en estas áreas ha estado limitado. El principal obstáculo para la producción agrícola es la baja fertilidad natural del suelo, la cual es inadecuada para sistemas de manejo primitivo y tradicional así como también para una tecnología directamente transferida de E.E.U.U. y Europa. La gran mayoría de los suelos del trópico americano presenta un "complejo de infertilidad", el cual identifica una deficiencia general de varios macro y micro elementos, alta acidez, toxicidades de Al y/o Mn, y alta retención de P.

La toxicidad de Al es uno de los prominentes factores que limita el desarrollo agrícola en la mayoría de estos suelos. Altos niveles de saturación de Al reducen el crecimiento radicular y afectan severamente el rendimiento de los cultivos. (Gonzalez, 1976). Además del Al, el Mn constituye también otro factor limitante de la condición ácida de estos suelos.

Otra importante limitación es que el suministro natural de P disponible es generalmente bastante bajo y relativamente altas cantidades de fertili-

zantes fosforado son requeridas para obtener rendimientos adecuados (Kamprath, 1977). Este último aspecto es relativo a la gran capacidad de retención de P por parte de estos suelos, lo que causa serias limitaciones agronómicas y económicas debido a los altos costos de fertilizantes fosforados.

Durante los últimos años, se ha realizado en estos suelos una considerable investigación basada principalmente en el concepto de modificar el suelo para el desarrollo de las plantas (Soares et al., 1975; Gonzalez, 1976; CPAC, 1976; Yost, 1977). De aquí, la principal estrategia usada para anular los efectos limitantes del complejo ácido infertil del suelo ha sido fertilizar y encalar a niveles "óptimos" y tomar ventaja de sus efectos residuales. Además, variedades comerciales han sido seleccionadas para altos rendimientos, resistencia a plagas y enfermedades con poca atención a las propiedades del suelo, debido a que el trabajo de mejoramiento y selección ha sido llevado a cabo bajo condiciones óptimas del suelo.

Una alternativa para la producción agrícola en estas extensas áreas de suelos ácidos es adaptar la planta a las limitaciones específicas de fertilidad del suelo. (Spain et al., 1975; Salinas, 1978). Muy poco se ha hecho en tratar de seleccionar especies y variedades "in situ" considerando las condiciones adversas de suelo-planta, las cuales constituyen el factor más limitante para la producción agrícola en la América Tropical. El caso es que recién, durante los últimos años tanto fitomejoradores, fisiólogos como especialistas en suelos, han reconocido la existencia de diferencias entre especies y variedades para tolerar condiciones adversas del suelo (Foy, 1974, 1976; Clark, 1975; Spain et al., 1975; Lorenagan y Asher, 1967; Spain, 1977; Rhue y Grogan, 1977; Salinas, 1978). Las tolerancias más importantes en especies y variedades cultivadas en suelos

ácidos son referidas a sequía, toxicidades de Al y/o Mn, y bajos niveles de P disponible. Consecuentemente, un mejor entendimiento sobre la tolerancia de especies y variedades a tales condiciones adversas del suelo, que son típicas de extensas áreas de América Tropical, puede proporcionar un significativo aporte al adaptar plantas en estas áreas, lo cual puede determinar una menor inversión en fertilizantes y cal. (Spain et al., 1975; Foy, 1975; Salinas y Sánchez, 1976; Spain, 1977; Salinas, 1978). Esto no implica la eliminación total de fertilizantes y cal, pero si puede disminuir las tasas de aplicación de fertilizantes y requerimientos de cal, necesarios para obtener rendimientos adecuados. El propósito de este trabajo es mostrar evidencia de la adaptabilidad de especies y variedades en suelos ácidos con problemas de toxicidades de Al y/o Mn, ya que estas características son componentes revelantes de la baja fertilidad natural de muchos suelos tropicales altamente meteorizados. El objetivo final es sensibilizar a los investigadores agrícolas de la América Tropical para que consideren la relación suelo-planta como un factor importante en la incorporación de estas áreas a la producción agrícola.

2. CARACTERIZACION DE LOS SUELOS.-

Durante los últimos diez años se ha enfatizado bastante el estudio de la distribución geográfica y propiedades de los suelos en América Tropical. Un resultado de estos estudios es el mapa tentativo de Ordenes de Suelo desarrollado por Sánchez e Isbell (1979) y modificado por Sánchez y Cochrane (1979). La Figura 1 muestra el mapa tentativo, y la Tabla 1 la distribución de Ordenes de Suelo en función de fajas altitudinales. Los Oxisoles representan el orden más extenso cubriendo 34% de la superficie tropical, seguidos por Ultisoles con 22%, Inceptisoles con 16%,

Alfisoles con 12%, Entisoles con 8% y pequeñas áreas de Mollisoles, Aridisoles, Vertisoles e Histosoles.

Las regiones con Oxisoles-Ultisoles de América Tropical presentan con predominio dos tipos de vegetación nativa: sabanas y bosques. La sabana total caracterizando alrededor de 300 millones de hectáreas, de las cuales la sabana central de Brasil denominada Cerrado constituye la región más extensa con 180 millones de hectáreas, seguida por los Llanos de Colombia y Venezuela. Las áreas boscosas cubren alrededor de 550 millones de hectáreas y es caracterizada principalmente por la Selva Amazónica con pequeñas áreas boscosas a lo largo del continente (Sánchez, 1977).

Las principales propiedades de Oxisoles y Ultisoles del trópico sudamericano pueden ser caracterizadas en base a varios perfiles representativos que son dados en la Tabla 2. Con pocas excepciones, la mayoría de estos suelos son profundos y bien drenados, lo cual desde el punto de vista físico, no presentan impedimento para el desarrollo radicular. Los Oxisoles, por definición, representan a los suelos con el mayor grado de meteorización con una excelente estructura granular lo cual permite el tráfico de maquinaria agrícola luego de fuertes lluvias. Por otra parte, estos suelos caracterizan las superficies de tierra que han estado estables por mucho tiempo reflejando de esta manera su antigüedad. En general, estos suelos tienen una baja capacidad de retención agua (Lopes, 1977) y además, el enraizamiento profundo es comúnmente limitado, no por barrera física sino por la toxicidad de Aluminio del subsuelo que anula la utilización de agua y nutrimentos del subsuelo, con serias implicaciones en los períodos secos durante la época lluviosa (Wolf, 1975). En contraste, los Ultisoles presentan un marcado aumento del contenido de arcilla con la profundidad (horizonte argílico). Muchos de estos suelos son arenosos en la capa

arable con susceptibilidad a una compactación por uso de maquinaria agrícola y también susceptibles a ser erosionados (Seubert *et al.*, 1977, Rodríguez, 1976). Con excepción de la baja capacidad de retención de agua de los Oxisoles y la susceptibilidad de erosión en Ultisoles arenosos, localizados principalmente en pendientes acentuadas, las propiedades físicas de estos suelos son excelentes.

Respecto a las propiedades químicas, éstas son opuestas a las propiedades físicas. Debido al estado avanzado de meteorización, tanto Oxisoles como Ultisoles están desprovistos de la mayoría de sus minerales primarios y presentan una mineralogía de arcillas dominada por kaolinita y óxidos de Fe y Al. (Weaver, 1974; Uehara y Keng, 1975). La Tabla 3 muestra las limitaciones edáficas de estos suelos en función de la extensión que cubren. Prácticamente el grado de deficiencias minerales y toxicidad de Al que presentan estos suelos los ubican dentro un "complejo de infertilidad natural". Específicamente, observando algunas propiedades químicas en la Tabla 2, estos suelos muestran valores extremadamente bajos de pH a través del perfil, contenido moderado de materia orgánica, altos niveles de Al intercambiable, bajos niveles de Ca, Mg y K, una baja capacidad de intercambio catiónico efectiva debido a la baja actividad de las arcillas y una alta proporción de saturación de aluminio en los sitios de cambio.

Un parámetro químico adicional de importancia práctica es la habilidad de estos suelos para transformar formas solubles de P en menos solubles. Bennema (1961) sugirió que estos suelos altamente meteorizados absorben grandes cantidades de P debido al estado químico de meteorización, caracterizado por los niveles altos de óxidos de Fe y Al. El fósforo reacciona con estos compuestos, y la magnitud de sus efectos depende de las propiedades químicas de estos suelos (Kamprath, 1977). El resultado de esto es

generalmente una baja en la disponibilidad de P para el crecimiento de las plantas. La determinación de P disponible en estos suelos por una variedad de soluciones extractantes da valores muy bajos con un rango que fluctúan desde trazas a 3 ppm P. (Sánchez, 1977) y en algunos casos, se requiere de equipo sensible para detectar el P disponible. (Smyth, 1976).

2.1. Toxicidad de Al.

La razón por la inhabilidad de las plantas para crecer en suelos ácidos, y los efectos inhibitorios del subsuelo ácido sobre la penetración radicular, ha constituido una pregunta de interés por muchos años (Tisdale y Nelson, 1966). Aunque la presencia de Al intercambiable en suelos ácidos ha sido conocida desde comienzos de este siglo (Veitch, 1904), la idea del efecto detrimental de la acidez del suelo sobre el crecimiento de las plantas, a causa de concentraciones tóxicas de Al, fue aparentemente sugerido por Abbott y colaboradores (1913). La revisión inicial de la literatura sobre el Al en el suelo fue hecha por Ragland (1959), y la más reciente por Coleman y Thomas (1967), Adams (1974), y McLean (1976).

La mayoría de los suelos altamente meteorizados presentan bajas reservas de Ca y Mg, de manera que el Al es el cation principal en los sitios de cambio. La contribución del clima es considerada como un importante factor en el desarrollo de la acidez del suelo y la toxicidad de Al en suelos ácidos. En efecto, Kamprath y Foy (1971) remarcaron que en regiones tropicales la acidez del suelo toma lugar como resultado de la remoción de bases y un incremento de H y Al debido a la fluctuación de precipitación y evapotranspiración.

La reactividad del Al en suelos ácidos varía con la forma en la cual ocurre, disminuyendo en orden desde la forma Al^{+3} - soluble en agua a monó-

meros de OH-Al, hasta formas polimerizadas de hidróxidos de Al. Recientemente, McLean (1976), remarcó nuevamente que el proceso hidrolítico del Al y por lo tanto su solubilidad en la solución del suelo es afectada por el pH de la solución. La secuencia de las posibles formas de Al pueden ser representada en la siguiente progresión:

| | | | | <u>pH suelo</u> | <u>Solubilidad Al</u> |
|-----------------|---|------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
| Al^{+3} | + | $H_2O \longrightarrow$ | $Al(OH)^{+2} + H^+$ | 4.0- 4.5 | |
| $Al(OH)^{+2}$ | + | $H_2O \longrightarrow$ | $Al(OH)_2^{+1} + H^+$ | 4.5- 5.5 | |
| $Al(OH)_2^{+1}$ | + | $H_2O \longrightarrow$ | $Al(OH)_3 + H^+$ | 5.5- 7.5 | |
| $Al(OH)_3$ | + | $H_2O \longrightarrow$ | $Al(OH)_4^{-} + H^+$ | 7.5- 9.0 | |
| $Al(OH)_4^{-}$ | + | $H_2O \longrightarrow$ | $Al(OH)_5^{-} + H^+$ | 9.0- 9.5 | |
| $Al(OH)_5^{-}$ | + | $H_2O \longrightarrow$ | $Al(OH)_6^{-} + H^+$ | 9.5-10.0 | |

De esta secuencia puede concluirse que la solubilidad del Al es bastante baja dentro el rango de pH entre 5.5 a 7.5 donde es precipitado y permanece relativamente insoluble como $Al(OH)_3$. Por debajo de pH 5.5 y sobre pH 7.5, las concentraciones de Al aumentan rápidamente. La pregunta, que emana, es relativa a la forma tóxica de Al para las plantas. Datos presentados por Kerridge (1969) indican que el Al fue considerablemente más tóxico para las plantas a pH 4.5 que a pH 4.0 y sugirió que un producto hidrolítico de Al en vez de la forma soluble Al^{+3} sería responsable en la inhibición del crecimiento radicular. A medida que el pH aumenta de 4.0 a 4.5 la solubilidad de Al^{+3} disminuye, mientras que la forma hidrolítica $AlOH^{+2}$ aumenta (Raupach, 1963). Consecuentemente, Moore (1974) concluyó que la forma $AlOH^{+2}$ es responsable de los efectos adversos del Al sobre el crecimiento de las plantas y específicamente sobre el crecimiento radicular. Sin embargo, la solubilidad del Al y la severidad de sus efectos

tóxicos sobre las plantas son afectadas por varios factores del suelo, incluyendo pH, mineral de arcilla predominante, concentración de otros cationes y contenido de materia orgánica (McCart y Kamprath, 1965; Evans y Kamprath, 1970; McLean, 1976).

Suelos ácidos con pH debajo de 5.5 tienen una gran porción de sus cargas negativas ocupadas por Al^{+3} el cual puede ser desplazado por otros cationes. Este Al desplazado normalmente es denominado Al intercambiable, el cual es extractado con una solución no bufferizada de KCl 1N y titulado con una base (Lin y Coleman, 1960; Bhumbia y McLean, 1965). Debido a que cantidades apreciables de Al intercambiable son tóxicas para muchas especies de plantas ha sido sugerido que este Al puede ser neutralizado añadiendo $CaCO_3$ (cal) al suelo a una tasa equivalente de 1.5 a 2 veces el Al intercambiable (Kamprath, 1970). El porcentaje de saturación de Al relativo a la capacidad de intercambio catiónico efectivo es otra medida útil de la acidez del suelo. La saturación de Al es la relación entre el Al intercambiable extractado con una solución normal no bufferizada de KCl y la suma de bases intercambiables más el Al intercambiable. Nye y colaboradores (1961), Evans y Kamprath (1970), y Cate y Sukhai (1964), encontraron que en suelos ácidos el porcentaje de saturación de Al determina la concentración de Al en la solución del suelo. Ellos observaron que cuando la saturación de Al fue mayor del 60% una cantidad apreciable de Al estuvo presente en la solución del suelo. Por otra parte, la relación entre pH del suelo y la saturación de Al es consistente con varias observaciones hechas en muchos suelos ácidos del trópico (Brams, 1971; Fox et al., 1962; Popenoe, 1960; Soares et al., 1975; Abruña et al., 1974). Además, a pesar de haberse demostrado que el pH del suelo está relacionado con el crecimiento radicular (Pearson, 1975), el nivel de Al en la solución del suelo es usualmente el factor responsable por el reducido crecimiento radicular en suelos ácidos

(Adams y Lund, 1966). En conclusión, el Al en la solución del suelo y el porcentaje de saturación de Al están relacionados en suelos ácidos (Evans y Kamprath, 1970; Brenes y Pearson, 1973; Gonzalez, 1976), así como también el porcentaje de saturación de Al y la respuesta de la planta (Abruña et al., 1970, 1974; Sartain y Kamprath, 1975; Salinas, 1978). De aquí, aunque la actividad química del Al en la solución del suelo es probablemente el mejor parámetro para estimar el potencial tóxico del Al de un suelo, el porcentaje de saturación de Al provee una indicación satisfactoria de la acidez del suelo y es mucho más simple su determinación.

Además, debido a los niveles bajos de bases cambiables, la alta saturación de Al juega un importante rol en estos suelos ácidos (Olmos y Camargo, 1976; Freitas y Silveira, 1977). En efecto, Lopes y Cox (1977) sugieren que en la mayoría de los casos el porcentaje de saturación de Al debería ser considerado primero, ya que en suelos ácidos teniendo el mismo nivel de Al intercambiable pero diferente porcentaje de saturación de Al, es de esperar que la respuesta de un cultivo dado sea diferente al encalar con la misma cantidad en base a la neutralización del Al intercambiable.

2.2. Toxicidad de Manganeso.-

Otro de los factores limitantes para el crecimiento de las plantas en suelos ácidos constituye la toxicidad de Mn. El efecto tóxico del Mn generalmente ocurre a pH del suelo inferior a 5.5. Sin embargo, en suelos inundados o compactados, el exceso de Mn puede limitar el crecimiento de las plantas a pH 6.0 o mayor (Siman et al., 1974). Bajo estas condiciones, de aireación pobre, el Mn es reducido a la forma bivalente, la cual es disponible para las plantas. (Foy, 1976). Consecuentemente, la toxicidad de Mn puede ocurrir a valores de pH similares a la toxicidad de Al así como

también a valores de pH que son demasiado altos para que el Al sea soluble en concentraciones tóxicas. La absorción de Mn depende mayormente de la actividad de Mn bivalente en la solución del suelo y es dependiente de la presencia de Mn fácilmente reducible en el suelo. (Pearson, 1975).

Contrariamente al efecto tóxico del Al en las plantas, el Mn no parece afectar directamente el sistema radicular, pero puede reducir su crecimiento indirectamente al afectar la parte aérea. Un exceso de Mn produce síntomas más definidos que el Al en la parte aérea, y el grado de toxicidad está relacionado a su acumulación en la parte aérea y no en las raíces (Foy, 1976). La toxicidad de Mn está caracterizada por una clorosis marginal y una distorsión de las hojas jóvenes asociada con acumulación localizada de Mn en el tejido foliar. (Foy, 1973; Vlamis *et al.*, 1973). Una toxicidad severa de Mn ocasiona que el sistema radicular se torne café pero, usualmente, solo después que el follaje ha sido afectado. En muchos casos, clorosis intervenal ha sido observada y este efecto ha sido explicado en el sentido de que el Mn induce una deficiencia de Fe (Hewitt, 1963).

3. MECANISMOS DE TOLERANCIA A ALUMINIO ENTRE ESPECIES Y VARIETADES.-

La caracterización de especies y variedades tolerantes a Al ha sido estudiada por medio siglo (Hartwell y Pember, 1918; McLean y Gilbert, 1927; Hewitt, 1948; Aimi y Murakami, 1964; Foy y Brown, 1963; Clarkson, 1966; Adams y Pearson, 1970; Foy, 1976; Spain, 1977; Salinas, 1978). Estos estudios han usado una diversidad de especies y variedades cuyas respuestas han mostrado la evidencia de tal tolerancia diferencial.

Parece que la tolerancia a Al entre especies y variedades se debe a una adaptación genética como resultado de una selección involuntaria en suelos ácidos (Foy, 1976). La genética de la tolerancia a Al está actual-

mente bajo estudio (Devine et al., 1976), pero la naturaleza de la tolerancia diferencial no ha sido esclarecida al presente, debido a que los mecanismos exactos de toxicidad de Al no están todavía completamente conocidos (Foy, 1976).

Varios intentos se han hecho para explicar la causa de la tolerancia a Al por las plantas. Básicamente estos pueden ser separados en dos categorías: (1) cambios diferenciales en la morfología de la planta, y (2) cambios diferenciales en la fisiología y bioquímica de la planta (Foy, 1976; Helyar, 1978). Esta separación no implica que la tolerancia a Al resulte de cada categoría independientemente, por el contrario, el grado de tolerancia parece ser una combinación de ambas categorías, pero la segunda es a menudo referida como una consecuencia de cambios morfológicos en el sistema radicular (Jackson, 1967; Moore, 1973; Ali, 1973; Helyar, 1978).

La reducción de crecimiento, tanto en las raíces como en la parte aérea debido al Al, fue observada desde comienzos del siglo (Magistad, 1925). Sin embargo, el crecimiento radicular parece ser más afectado que la parte aérea debido a la influencia directa del Al. Jackson (1967) remarcó que los cambios morfológicos y fisiológicos de la parte aérea generalmente se manifiestan después que el crecimiento radicular ha sido afectado. Consecuentemente, los síntomas visuales de toxicidad de Al en la parte aérea pueden ser un efecto indirecto del daño radicular por el Al (de-Waard y Sutton, 1960; Rees y Sidrak, 1961; Kerridge, 1969; Ali, 1973). En efecto, la inhibición del crecimiento radicular es el efecto primario de la toxicidad de Al (Kerridge, 1969; Rhue y Grogan, 1977; Helyar, 1978; Salinas, 1978).

Fleming y Foy (1968) encontraron que la tolerancia a Al en trigo está asociada primariamente con un reducido daño morfológico de las raíces laterales y de los ápices radiculares, lo cual es reflejado en una mejor habi-

lidad para continuar la elongación radicular. Resultados similares han sido obtenidos con otras especies y variedades en condiciones de suelo y solución nutritiva por varios investigadores (Kerridge, 1969; Reid et al., 1971; Kerridge et al., 1971; Moore et al., 1977; Salinas, 1978). Raíces afectadas por el Al son característicamente gruesas en apariencia con las raíces laterales cortas, gruesas y de color café. Estas raíces afectadas por el Al son ineficientes para absorber agua y nutrientes (Fleming y Foy, 1968; Clarkson, 1969; Reid et al., 1971; Lafever et al., 1977; Heylar, 1978). Ha sido sugerido que el Al actúa como un inhibidor de crecimiento de sitios específicos en las raíces en lugar de ser un veneno sistémico (Fleming y Foy, 1968). En efecto, Clarkson (1965, 1969) remarcó que el Al inhibe la división celular en los meristemas apicales resultando un sistema radicular drásticamente restringido. Es crítico recalcar que la tolerancia diferencial a Al puede estar asociada con daño morfológico radicular en áreas específicas en lugar de un daño a todo el sistema. Consecuentemente, la tasa de crecimiento durante un período de recuperación luego de un stress de Al puede ser importante (Moore et al., 1977).

Clarkson (1965) encontró que las anomalías morfológicas de las raíces causadas por el Al pueden ser explicadas por el rol inhibitorio del Al sobre la división y extensión celular. La naturaleza de este daño fue explicada posteriormente por Sampson y colaboradores (1965) cuando establecieron que el daño del Al está asociado directamente con algunas funciones metabólicas durante la división celular. El efecto de Al en la mitosis celular y la resultante paralización de la elongación radicular fue confirmada por Clarkson y Sanderson (1969). Sobre la base de resultados bioquímicos la mitocondria y núcleo, ambos ricos en ADN, fueron sugeridos como los dos sitios celulares posibles donde el Al estaría actuando (Klimashevskii et al., 1973). Consecuentemente, una vez que el Al está dentro una

célula meristemática, interfiere en la formación de ADN y el resultado neto es una inhibición del crecimiento radicular (Ali, 1973).

En base a las consideraciones arriba mencionadas, se han hecho varios intentos para explicar la tolerancia diferencial entre especies y variedades en términos de daños causados por el Al a las raíces. La habilidad de una planta para continuar su elongación y proliferación, así como también resistir daños morfológicos en los ápices y raíces laterales, son relativos a tolerancia a Al (Foy y Brown, 1964; Adams y Lund, 1966; Reid et al., 1971; Sartain y Kamprath, 1975; Howeler y Cadavid, 1976; Moore et al., 1977; Keser et al., 1977; Helyar, 1978). Especies y variedades dentro especies difieren en el grado en el cual una concentración dada de Al interfiere con el crecimiento radicular. En general, variedades sensitivas a Al muestran una severa inhibición del crecimiento radicular mientras que variedades tolerantes son ligeramente afectadas. Consecuentemente, la habilidad diferencial del crecimiento radicular en presencia de Al es considerada una importante medida de tolerancia a Al y frecuentemente ha sido usada como un criterio para clasificar especies y variedades de acuerdo a su tolerancia a Al (Kerridge y Kronstad, 1968; Kerridge et al., 1971; Reid et al., 1971; Foy, 1974; Moore et al., 1977; Howeler y Cadavid, 1976; Rhue y Grogan, 1977; Salinas, 1978).

Varios intentos también han sido realizados para explicar diferencias entre especies y variedades en términos de absorción y translocación de nutrimentos y Al, así como también cambios de pH externo (Foy, 1974; Heylar, 1978). La tolerancia a Al ha sido usualmente asociada con una disminución en la absorción y translocación de elementos minerales. Entre ellos, P, Ca y Mg son los más afectados por el Al y reducciones menores en la absorción y translocación de K, Fe, Cu y Zn han sido también dados a conocer

(Foy y Brown, 1963; Johnson y Jackson, 1964; Munns, 1965; Paterson, 1965; Clarkson, 1966; Lance y Pearson, 1969; Andrew y VandenBerg, 1973; Devine et al., 1976; Foy, 1976; Helyar, 1978; Salinas, 1978).

Una deficiencia de P en la parte aérea es tal vez el síntoma visual típico de la toxicidad de Al (Foy y Brown, 1963, 1964). El exceso de Al reduce la solubilidad de P en el medio de crecimiento y su absorción y transporte por las plantas (Kamprath y Foy, 1971). Por otra parte, un exceso de P puede precipitar el Al y eliminar su toxicidad, aumentar la absorción de P y eliminar los síntomas de deficiencias de P (Munns, 1965). Por ejemplo, los efectos tóxicos de Al fueron eliminados en plantas de algodón cuando la relación: P:Al en el medio externo fue mayor que dos (Foy y Brown, 1963). Por lo tanto, interacciones Al-P han sido propuestas como un factor importante en el grado de toxicidad de Al para las plantas (Randall y Vose, 1963; Munns, 1965; McLead y Jackson, 1967; Foy, 1976).

Dos tipos de interacciones Al-P han sido sugeridos por Clarkson (1966). El primero ocurre al nivel de superficie celular con fijación de P por una reacción de adsorción-precipitación. El segundo ocurre dentro la célula, posiblemente dentro la mitocondria, y resulta en una marcada disminución de la tasa de fosforilación del azúcar probablemente afectando la inhibición de hexokinasa. Recientemente McCormick y Borden (1974) han mostrado a través del microscopio electrónico que un precipitado de $Al-PO_4$ ocurre en las raíces como glóbulos dispersos. La interacción ocurrió en la capa musilaginosa a lo largo de la superficie radicular y en las regiones intercelulares de los ápices. Estos resultados confirman teorías anteriores sobre el proceso de adsorción-precipitación que toma lugar en las raíces, resultando en un reducido transporte de P a la parte aérea. Consecuentemente, la deficiencia de P debido a la presencia de Al puede ser un resul-

tado de la precipitación del Al y P en las raíces. De aquí, las diferencias entre especies y variedades en relación a stress de Al pueden resultar de la tasa de translocación a la cual el P "escapa" esta precipitación.

Varios investigadores informan que la tolerancia diferencial a Al entre especies y variedades ha estado asociada con una habilidad diferencial para absorber y utilizar P en presencia de Al (Jones, 1961; Foy y Brown, 1964; Foy, 1974, 1976, 1977). Además, la tolerancia a Al en ciertas especies forrajeras coincidió con una mayor eficiencia en la asimilación y transporte de P (Andrew y VandenBerg, 1973).

La literatura sobre interacciones entre Al y cationes básicos indica una tendencia casi invariable de un efecto antagónico de Al sobre ellos (Clarkson, 1971; Lee, 1971; Ali, 1973; Foy, 1974). Stress de Al resulta en la reducción de absorción de Ca y Mg de acuerdo a Johnson y Jackson (1964), Martin (1961), McLead y Jackson (1967), y Munns (1965). Una disminución en el crecimiento debido a la deficiencia de Ca causada por el Al ha sido también sugerida por Armiger y colaboradores (1968). Estos resultados sugieren que los síntomas de deficiencia de Ca observados en algunos cultivos en suelos ácidos son debidos a un efecto antagónico del Al sobre el Ca en vez de niveles bajos de Ca en tales suelos.

Este antagonismo entre el Al y Ca parece ocurrir en las raíces. Lance y Pearson (1969) indican que el efecto del Al sobre la absorción de Ca ocurre rápidamente cerca de la superficie de las raíces. Estas observaciones sugirieron que la permeabilidad de las membranas celulares sería afectada por el Al. Por lo tanto, la alteración de la configuración estructural de las membranas por reemplazo de Ca por Al puede inhibir la asimilación de Ca (Lance y Pearson, 1969).

Patterson (1965) concluyó que el Al disminuye la absorción de Ca pero no parece inhibir la translocación de este elemento a la parte aérea. Los resultados obtenidos con leguminosas forrajeras por Andrew y Vandenberg (1973) sostienen la conclusión anterior. Consecuentemente, la absorción de Ca sería un mecanismo más importante que la translocación de Ca, afectando la tolerancia diferencial entre especies y variedades.

Varios investigadores indican la existencia de una interacción Al-Mg en las plantas bajo los efectos tóxicos del Al (McLead y Jackson, 1967; Kerridge, 1969; Lee, 1971). Estos investigadores concluyen que el efecto del Al resulta en una marcada inhibición de la absorción de Mg, en igual forma que la del Ca. En conclusión, las interacciones entre Al, Ca y Mg parece jugar un importante rol en la disponibilidad de estos nutrientes para las plantas y también en la eficiencia de absorción para detectar una habilidad diferencial entre especies y variedades.

Mutua competencia entre pares de cationes para entrar en las raíces es comúnmente reportado (Moore et al., 1961, 1966; Lee, 1971). Si el Al es absorbido en una manera similar a otros cationes, competencia entre Al y otros cationes existen (Ali, 1973). Por tanto, es razonable afirmar que el sistema radicular es inhibido debido a una mayor absorción de Al dentro las células meristemáticas. Esto sugiere que especies y variedades difieren unas de otras en la manera como el Al es absorbido y concentrado en las células. Esto es, que especies y/o variedades tolerantes a Al tienden a excluir el Al por algún mecanismo fisiológico. Con respecto al transporte de Al, Villagarcía (1973) encontró que la concentración de Al en las raíces y parte aérea de variedades de papa sensitivas a Al, incrementó más acentuadamente que variedades tolerantes. A la luz de estos resultados, parece razonable indicar que un aumento del nivel de Al en el medio externo,

causa un aumento en la absorción de Al. Sin embargo, la porción de Al absorbido, la cual es transportado a la parte aérea, parece ser mínima. Esto indica que la mayor parte del Al absorbido es retenido en las raíces. Especies y variedades susceptibles a Al parecen acumular elevadas cantidades de Al en sus sistemas radiculares en comparación de especies y variedades tolerantes.

En base a los factores mencionados anteriormente, se puede observar que durante los últimos años diferencias consistentes han sido encontradas entre especies y variedades para tolerar el Al. La mayoría de los resultados y discusiones han enfatizado sobre la reducción radicular y disminución de rendimientos con poca atención a los mecanismos fisiológicos en la nutrición de las plantas. Esto ha determinado que al presente todavía no se conozca exactamente la fisiología de tolerancia a Al.

4. MECANISMOS DE TOLERANCIA A MANGANESO ENTRE ESPECIES Y VARIEDADES.-

Existen varios trabajos que indican una variabilidad en la tolerancia de especies y variedades a la toxicidad de Mn. Una reciente revisión de literatura (Foy, 1973) indica que especies como arroz y maíz son más tolerantes que soya, cebada y avena. Otro grupo de especies tolerantes a Mn son: tomate > lechuga > cebada > frijol > papa. Sin embargo, al igual que la tolerancia a Al, dentro de cada especie existen variedades con mayor tolerancia que otras. Esto indica que en el estudio de adaptabilidad o tolerancia a niveles tóxicos de Mn, debería enfatizarse a nivel de variedad y no de especie, puesto que la susceptibilidad de una especie no significa la eliminación de ésta por el hecho de tener variedades que son tolerantes a stress de Mn. Por otra parte, una planta tolerante a toxicidad de Mn no necesariamente resulta ser tolerante a Al (Jackson, 1967). Sin embargo,

existen casos que algunas plantas son tolerantes o susceptibles a ambos, Al y Mn, mientras que otras muestran tolerancias opuestas a un exceso de los dos elementos (Foy, 1976). Un ejemplo es que la variedad de trigo Atlas 66 es más tolerante a Al que la variedad de trigo Monon, pero esta última variedad es más tolerante a Mn que la variedad Atlas 66 (Foy et al., 1965).

Respecto a los posibles mecanismos de tolerancia a Mn, algunas plantas parecen escapar de los efectos tóxicos de Mn por medio de una menor absorción, o por medio de una retención de Mn en el sistema radicular o en otras partes de la planta donde es física o químicamente separado de los sitios metabólicos importantes (Foy, 1973).

El desarrollo de un mecanismo de exclusión de Mn para evitar toxicidad de Mn tiene problemas inherentes debido a que determina si la planta es más tolerante a toxicidad pero más susceptible a deficiencia. Sin embargo, existe evidencia que la tolerancia a Mn está asociada algunas veces con bajas tasas de absorción de Mn (Lohnis, 1951; Vose y Randall, 1962) y grandes diferencias en acumulación de Mn por varias especies en la parte aérea (Jackson, 1967). Tolerancia a Mn en algunas variedades de arroz ha sido atribuida a baja absorción de Mn y tal reducción se atribuye a un incremento del pH externo o a una oxidación de Mn de la forma bivalente a tetravalente en la zona de interfase raíz-suelo. Esto indica que la menor absorción de Mn y por ende una mayor tolerancia, puede atribuirse a propiedades del sistema radicular al tener un mayor poder de oxidación. Algunas plantas restringen el transporte de Mn de las raíces a la parte aérea (Ouellette and Dessureaux, 1958). Esto probablemente se debe a una deposición de exceso de Mn en los vacuolos de las células radiculares. Sin embargo, existen grandes diferencias entre especies y variedades en los niveles de Mn

acumulados en la parte aérea (Helyar, 1978). Esto enfatiza el hecho de que mecanismos de tolerancia en la parte aérea también operan. Generalmente, la tolerancia diferencial en la parte aérea es explicada por una resistencia a la acumulación elevada de Mn en tejido joven (Foy, 1976).

En resumen, la información disponible presentada en las secciones previas subrayan la importancia de dos elementos: Al y Mn, en suelos ácidos. Las condiciones adversas de su toxicidad afectan la productividad de los cultivos con serias implicaciones agro-económicas en el uso racional de ^{las} áreas. Parece que la alternativa de seleccionar y adaptar especies y variedades tolerantes a toxicidad de Al y/o Mn puede proporcionar una dimensión adicional en la solución de los problemas de los suelos ácidos del trópico americano. El principio de esta nueva estrategia es incorporar el factor planta como participante directo en el complejo de infertilidad de estos suelos. En muchos casos, adaptar plantas a suelos ácidos puede resultar más económico que modificar el suelo para desarrollar la planta. En el manejo de suelo y planta para obtener beneficios máximos, se necesita determinar los mecanismos genéticos, fisiológicos y bioquímicos, por los cuales las plantas adaptan su desarrollo a diferentes condiciones adversas del suelo. El caso de la toxicidad de Al y/o Mn constituyen ejemplos del complejo de factores adversos del suelo.

5. LITERATURA CITADA.-

- Abbot, J.B., S.D. Conner, and H.R. Smalley. 1913. Soil acidity, nitrification and the toxicity of soluble salts of aluminum. Ind. Agro. Exp. Sta. Bul. 170.
- Abruña, F., J. Vicente-Chandler, R.W. Pearson, and S. Silva. 1970. Crop response to soil acidity factors in Ultisols and Oxisols-Tobacco. Soil Sci. Soc. Amer. Proc. 34:629-635.
- Abruña, F., R.W. Pearson, and R. Perez-Escolar. 1974. Lime response of corn and beans grown on tropical Oxisols and Ultisols of Puerto Rico. pp 261-282. In E. Bornemisza and A. Alvarado (eds.) Soil Management in Tropical America. North Carolina State University, Raleigh.
- Adams, F. 1974. Soil solution. In E.W. Carson (ed.) The Plant Root and Its Environment. University Press of Virginia, Charlottesville. pp 441-481.
- Adams, F., and Z.F. Lund. 1966. Effect of chemical activity of soil aluminum on cotton root penetration of acid subsoil. Soil Sci. 101:193-198.
- Adams, F., and R.W. Pearson. 1970. Differential response of cotton and peanuts to subsoil acidity. Agron. J. 62:9-12.
- Aimi, R., and T. Murakami. 1964. Cell physiological studies on the effect of aluminum on growth of crop plants. Bull. Nat. Inst. Agric. Sci. (Tokyo) 11:331-396.
- Ali, M. E. 1973. Influence of cations on aluminum toxicity in wheat (*Triticum aestivum* (Vill.) Host). Ph.D. Thesis, Oregon State University, Corvallis.
- Andrew, C.S. and P.J. Vanden-Berg. 1973. The influence of aluminum on phosphate adsorption by whole plants and excised roots of some pasture legumes. Aust. J. Agric. Res. 24:341-351.

- Armiger, W.H., C.D. Foy, A.L. Fleming, and B.E. Caldwell. 1968. Differential tolerance of soybean varieties to an acid soil high in exchangeable aluminum. *Agron. J.* 60:67-70.
- Bennema, J. 1961. Características químicas e físicas de latossolos sob vegetação de Cerrado. pp.137-143. Primeira Reunião Brasileira do Cerrado, Sête Lagoas, Minas Gerais, Brazil.
- Bhumbla, D.R. and E.O. McLean. 1965. Aluminum in soils. VI. Changes in pH-dependent acidity, cation-exchange capacity, and extractable aluminum with additions of lime to acid surface soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 29:370-374.
- Brams, E. A. 1971. Continuous cultivation of west African soils. Organic matter diminution and effects of applied lime and phosphorus. *Plant Soil* 35:401-414.
- Brenes, E. and R.B. Pearson. 1973. Root responses of three gramineae species to soil acidity in an Oxisol and Ultisol. *Soil Sci.* 116: 295-302.
- Cate, R.B., Jr. and A.P. Sukhai. 1964. A study of aluminum in rice soils. *Soil Sci.* 98:85-93.
- Clark, R.B. 1975. Aluminum toxicity and mineral elements in corn inbreds (mimeographed). Journal article No.82-75, Ohio Agricultural Research and Development Center, Wooster. 26 pp.
- Clarkson, D.T. 1965. The effect of aluminum in some other trivalent cations on cell division in root apices of *allium cepa*. *Ann. Bot.* (London) N.S. 28:309-315.
- Clarkson, D.T. 1966. Effect of aluminum on the uptake and metabolism of phosphorus by barley seedlings. *Plant Physiology* 41:165-172.
- Clarkson, D.T., 1969. Metabolic aspects of aluminum toxicity and some possible mechanisms for resistance. pp. 381-397. In I.H. Rorison (ed.) *Ecological Aspects of the Mineral Nutrition of Plants*. Brit.

Ecol. Soc. Symp. No.9. Blackwell Sci. Pub., Oxford.

Clarkson, D.T. 1971. Inhibition of uptake and long distance transport of calcium by aluminum and other polyvalent cations. *J. Exp. Bot.* 22:837-851.

Clarkson, D.T., and J. Sanderson. 1969. The uptake of a polyvalent cation and its distribution in the root apices of *Allium cepa*: Tracer and autoradiographic studies. *Planta* 89:136-154.

Coleman, N.T. and G.W. Thomas. 1967. The basic chemistry of soil acidity. pp. 1-41. In R.W. Pearson and F. Adams (eds.), *Soil Acidity and Liming*. Series of Agronomy No.12, American Society of Agronomy, Madison.

CPAC. 1976. *Relatorio Técnico Anual*. Centro de Pesquisa Agropecuaria dos Cerrados. EMBRAPA. Brasilia, Brazil. 150 pp.

Devine, T.E., C.D. Foy, A.L. Fleming, C.H. Hanson, T.A. Campbell, J.E. McMurtrey III, and J.W. Schwartz. 1976. Development of alfalfa strains with differential tolerance to aluminum toxicity. *Plant Soil* 44:73-79.

DeWaard, P.W.F., and C.D. Sutton. 1960. Toxicity of aluminum to black pepper in Sarawak. *Nature* 188:1129-1130.

Evans, C.E. and E.J. Kamprath. 1970. Lime response as related to percent Al saturation, solution Al, and organic matter content. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34:893-896.

Fleming, A.L., and C.D. Foy. 1968. Root structure reflects differential aluminum tolerance in wheat varieties. *Agron. J.* 60:172-176.

Fox, R.L., S.K. DeDatta, and G.D. Sherman. 1962. Phosphorus solubility and availability to plants and aluminum status of Hawaiian soils as influenced by liming. pp. 574-583. In *Trans. Comm. IV and V, Int. Soc. Soil Sci*, New Zealand.

- Foy, C.D. 1974. Effects of aluminum on plant growth. pp.601-642. In E.W. Carson (ed.) The Plant Root and Its Environment. University Press of Virginia.
- Foy, C.D. 1975. Plant adaptation to mineral stresses in problem soils (mimeographed). Paper presented at the Annual Northeastern Regional Grassland Council Meeting, Blackwater Falls. West Virginia. 15 p.
- Foy, C.D. 1976. Differential aluminum and manganese tolerances of plant species and varieties in acid soils. *Ciencia e Cultura* 28(2):150-155.
- Foy, C.D. 1977. General principles involved in screening plants for aluminum and manganese tolerance. pp. 255-267. In M.J. Wright (ed.) Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils. Cornell University, Ithaca, New York.
- Foy, C.D., and J.C. Brown. 1963. Toxic factors on acid soils. I. Characterization of aluminum toxicity in cotton. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 27:403-407.
- Foy, C.D., and J.C. Brown. 1964. Toxic Factors in acid soils. II. Differential aluminum tolerance of plant species. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28:27-32.
- Foy, C.D., G.R. Burns, J.C. Brown, and A.L. Fleming. 1965. Differential Al tolerance of two wheat varieties associated with plant induced pH changes around their roots. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.* 29:64-67.
- Freitas, F.G. de, and C.O. da Silveira. 1977. Principais solos sob vegetação de cerrado e sua aptidão agrícola. pp. 155-209. In M.G. Ferri (Coord.) Simposio sobre o Cerrado. IV. Ed. Itatiaia, Lta. São Paulo, Brazil.
- Gonzalez - 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. 126 pp.

- Hartwell, B.L., and F.R. Pember. 1918. The presence of aluminum as a reason for the difference in the effect of so-called acid soil on barley and rye. *Soil Sci.* 6:259-279.
- Helyar, K.R. 1978. Effects of aluminum and manganese toxicities on legume growth. pp. 207-231. In: Andrew, C.S. and E.J. Kamprath (ed.). *Mineral Nutrition of Legumes in Tropical and Subtropical Soils*. SCIRO, Melbourne, Australia.
- Hewitt, E.J. 1963. The essential nutrient elements: Requirements and interactions in plants. pp. 137-360. In: Steward F.C. (ed.), *Plant Physiology Vol.III, Inorganic Nutrition of Plants*. Academic Press, London.
- Howeler, R.H., and L.F. Cadavid. 1976. Screening rice cultivar for tolerance to Al- toxicity in nutrient solutions as compared with a field screening method. *Agron. J.* Vol. 68:551-555.
- Jackson, W.A. 1967. Physiological effects of soil acidity. pp.43-124. In: R.W. Pearson and F. Adams (eds.), *Soil Acidity and Liming*. Series of Agronomy No.12, American Society of Agronomy, Madison.
- Johnson, R.E., and W.A. Jackson. 1964. Calcium uptake and transport by wheat seedlings as affected by aluminum. *Soil Sci. Proc. Amer. Proc.* 28:381-386.
- Jones, L.H. 1961. Aluminum uptake and toxicity in plants. *Plant Soil* 13:297-310.
- Kamprath, E.J. 1970. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34:252-254.
- Kamprath, E.J. 1977. Phosphorus fixation and availability in highly weathered soils. In M.G. Ferri (coord.) *Simposio sobre o cerrado*. IV. Ed. Itatiaia. Lta. São Paulo, Brazil. pp.333-347.

- Kamprath, E.J., and C.D. Foy. 1971. Lime-fertilizer-plant interactions in acid soils. pp.105-151. In R.A. Olsen *et al.*, (eds.) Fertilizer technology and use. Second edition. Soil Sci. Soc. Am., Madison, Wisconsin.
- Kellogg, C.E. and A.C. Orvedal. 1969. Potentially arable soils of the world and critical measures for their use. *Adv. Agron.* 21:109-170.
- Kerridge, P.C. 1969. Aluminum toxicity in wheat (*Triticum aestivum* Vill., Host.). Ph.D. Thesis, Oregon State University, Corvallis.
- Kerridge, P.C., and W.E. Kronstad. 1968. Evidence of genetic resistance to aluminum toxicity in wheat (*Triticum aestivum* Vill., Host). *Agron. J.* 60:710-711.
- Kerridge, P.C., M.D. Dawson, and P.D. Moore. 1971. Separation of degrees of aluminum tolerance in wheat. *Agron. J.* 63:586-591.
- Keser, M., F.B. Neubauer, F.E. Hutchinson, and D.B. Verrill. 1977. Differential aluminum tolerance of sugar beet cultivars as evidence by anatomical structure. *Agron. J.* 69:347-350.
- Klimashevskii, E.L. and Bereyovskii, K.K. 1973. Genetic resistance to ionic toxicity in the root zone. *Soviet plant Physiology.* 20:51-54 (Eng. trans.)
- Lafever, H.N., L.G. Campbell, and C.D. Foy. 1977. Differential response of wheat cultivars to aluminum. *Agron. J.* 69:563-568.
- Lance, J.C. and R.W. Pearson. 1969. Effects of low concentration of aluminum on growth and water and nutrient uptake by cotton roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 33:95-98.
- Lee, C.R. 1971. Influence of aluminum on plant growth and mineral nutrition of potatoes. *Agron. J.* 63:604-608.

- Lin, C. and N.T. Coleman. 1960. The measurement of exchangeable aluminum in soils and clays. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 24:444-446.
- Lohnis, M.P. 1951. Manganese toxicity in field and market garden crops. *Plant Soil* 3:193-222.
- Loneragan, J.F. and C.J. Asher. 1967. Response of plants to phosphate concentration in solution culture. II. Rate of phosphate absorption and its relation to growth. *Soil Sci.* 103:311-318.
- Lopes, A.S. 1977. Available water, phosphorus fixation, and zinc levels in Brazilian Cerrado soils in relation to their physical, chemical, and mineralogical properties. Ph.D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh.
- Lopes, A.S., and F.R. Cox. 1977. A survey of the fertility status of surface soils under "Cerrado" vegetation in Brazil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 41:742-747.
- Magistad, O.C. 1925. The aluminum content of the soil solution and its relation to soil reaction and plant growth. *Soil Sci.* 20:181-226.
- Martin, J.B. 1961. Interrelationships of calcium and aluminum in turf species used for highways. Ph.D. Thesis, Virginia Polytechnic Institute, Blackburg University.
- McCormick, L.H. and F.Y. Borden. 1974. The occurrence of aluminum-phosphate precipitate in plant roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 38:931-934.
- McCart, G.D., and E.J. Kamprath. 1965. Supplying Ca and Mg for cotton on sandy, low cation exchange capacity soils. *Agron. J.* 57:404-406.
- McLean, E.D. 1976. Chemistry of soil aluminum. *Commn. Soil Sci. Plant Anal.* 7:619-636.

- McLead, L.B. and L.P. Jackson. 1967. Aluminum tolerance of two barley varieties in nutrient solution, pea, and soil culture. *Agron. Jour.* 59:359-363.
- Moore, D.P. 1964. Absorption of nutrient ions by plants. *Proc. fifth Ann. Fert. Conf. Pacific Northwest, Salem, Oregon.*
- Moore, D.P. 1973. Physiological effects of pH on roots. pp.135-151. In E.W. Carson (ed.) *The plant root and its environment.* Univ. Press of Virginia.
- Moore, D.P., W.E. Kronstand and R.J. Metzger. 1977. Screening wheat for aluminum tolerance. pp.287-295. In M.J. Wright (ed.), *Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils.* Cornell University, Ithaca, New York.
- Moore, D.P., L. Jacobson, and R. Overstreet. 1961. Uptake of calcium by excessing barley roots. *Plant Physiol.* 36:53-57.
- Munns, D.N. 1965. Soil acidity and the growth of a legume. III. Interactions of lime and phosphate in growth of Medicago sativa L. in relation to aluminum toxicity and phosphate fixation. *Aust. J. Agr. Res.* 16:757-766.
- Nye, P., D. Craig, N.T. Coleman and J.L. Ragland. 1961. Ion exchange equilibria involving aluminum. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 25:14-17.
- Olmos, I.L.L. and M.N. Camargo. 1976. Ocorrencia de aluminio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. *Ciencia e Cultura* 28(2):171-180.
- Ouellete, G.J., and L. Dessureaux. 1958. Chemical composition of alfalfa as related to degree of tolerance to manganese and aluminum. *Can. J. Plant Sci.* 38:206-214.
- Patterson, J.W. 1965. The effect of aluminum on the absorption and translocation of calcium and other elements in young corn. Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University.

- Pearson, R.W. 1975. Soil acidity and liming in the humid tropics. Cornell Intr. Agric. Bull. No.30. Cornell University. 66 pp.
- Popenoe, H. 1960. Some soil cation relationships in an area of shifting cultivation in the humid tropics. 7th Inter. Cong. Soil Sci. Proc. 11:303-311.
- Ragland, J.L. 1959. Some reactions of aluminum in acid soils and their implications concerning root growth. Ph.D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh. 140 pp.
- Randall, P.J. and P.B. Vose. 1963. Effect of aluminum on uptake and translocation of phosphorus-32 by perennial ryegrass. Plant Physiology 38:403-409.
- Raupach, M. 1963. Solubility of simple aluminum compounds expected in soils. II. Hydrolysis and conductance of Al^{+3} . Aust. J. Soil Sci. 1:36-45.
- Rees, W.J., and G.H. Sidrak. 1961. Plant nutrition on fly ash. Plant Soil 8:141-159.
- Reid, D.A., A.L. Fleming, and C.D. Foy. 1971. A method for determining aluminum response of barley in nutrient solution in comparison to response in Al-toxic soil. Agron. J. 63:600-603.
- Rodriguez, O. 1976. Consideraciones sobre el manejo de Ultisoles y Oxisoles en los Llanos Orientales. pp 87-128. En: Memorias IV Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo, Maturin, Venezuela.
- Rhue, R.D., and C.O. Grogan. 1977. Screening corn for aluminum tolerance. In M.J. Wright (ed.) Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils. Cornell University, Ithaca, New York. pp 297-310.
- Salinas, J.G. 1978. Differential response of some cereal and bean cultivars to Al and P stress in an Oxisol of central Brazil. Ph.D. Thesis. North Carolina State University, Raleigh. 326 pp.

- McLead, L.B. and L.P. Jackson. 1967. Aluminum tolerance of two barley varieties in nutrient solution, pea, and soil culture. *Agron. Jour.* 59:359-363.
- Moore, D.P. 1964. Absorption of nutrient ions by plants. *Proc. fifth Ann. Fert. Conf. Pacific Northwest, Salem, Oregon.*
- Moore, D.P. 1973. Physiological effects of pH on roots. pp.135-151. In E.W. Carson (ed.) *The plant root and its environment.* Univ. Press of Virginia.
- Moore, D.P., W.E. Kronstand and R.J. Metzger. 1977. Screening wheat for aluminum tolerance. pp.287-295. In M.J. Wright (ed.), *Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils.* Cornell University, Ithaca, New York.
- Moore, D.P., L. Jacobson, and R. Overstreet. 1961. Uptake of calcium by excising barley roots. *Plant Physiol.* 36:53-57.
- Munns, D.N. 1965. Soil acidity and the growth of a legume. III. Interactions of lime and phosphate in growth of Medicago sativa L. in relation to aluminum toxicity and phosphate fixation. *Aust. J. Agr. Res.* 16:757-766.
- Nye, P., D. Craig, N.T. Coleman and J.L. Ragland. 1961. Ion exchange equilibria involving aluminum. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 25:14-17.
- Olmos, I.L.L. and M.N. Camargo. 1976. Ocorrência de alumínio tóxico nos solos do Brasil, sua caracterização e distribuição. *Ciencia e Cultura* 28(2):171-180.
- Ouellete, G.J., and L. Dessureaux. 1958. Chemical composition of alfalfa as related to degree of tolerance to manganese and aluminum. *Can. J. Plant Sci.* 38:206-214.
- Patterson, J.W. 1965. The effect of aluminum on the absorption and translocation of calcium and other elements in young corn. Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University.

- Pearson, R.W. 1975. Soil acidity and liming in the humid tropics. Cornell Intr. Agric. Bull. No.30. Cornell University. 66 pp.
- Popenoe, H. 1960. Some soil cation relationships in an area of shifting cultivation in the humid tropics. 7th Inter. Cong. Soil Sci. Proc. 11:303-311.
- Ragland, J.L. 1959. Some reactions of aluminum in acid soils and their implications concerning root growth. Ph.D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh. 140 pp.
- Randall, P.J. and P.B. Vose. 1963. Effect of aluminum on uptake and translocation of phosphorus-32 by perennial ryegrass. Plant Physiology 38:403-409.
- Raupach, M. 1963. Solubility of simple aluminum compounds expected in soils. II. Hydrolysis and conductance of Al^{+3} . Aust. J. Soil Sci. 1:36-45.
- Rees, W.J., and G.H. Sidrak. 1961. Plant nutrition on fly ash. Plant Soil 8:141-159.
- Reid, D.A., A.L. Fleming, and C.D. Foy. 1971. A method for determining aluminum response of barley in nutrient solution in comparison to response in Al-toxic soil. Agron. J. 63:600-603.
- Rodriguez, O. 1976. Consideraciones sobre el manejo de Ultisoles y Oxisoles en los Llanos Orientales. pp 87-128. En: Memorias IV Congreso Venezolano de la Ciencia del Suelo, Maturin, Venezuela.
- Rhue, R.D., and C.O. Grogan. 1977. Screening corn for aluminum tolerance. In M.J. Wright (ed.) Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils. Cornell University, Ithaca, New York. pp 297-310.
- Salinas, J.G. 1978. Differential response of some cereal and bean cultivars to Al and P stress in an Oxisol of central Brazil. Ph.D. Thesis. North Carolina State University, Raleigh. 326 pp.

- Salinas, J.G., and P.A. Sanchez. 1976. Soil-plant relationships affecting varietal and species differences in tolerance to low available phosphorus. *Ciencia e Cultura* 28(2):156-168.
- Sampson, M., D. Clarkson, and D.D. Davies. 1965. DNA synthesis in aluminum-treated roots of barley. *Science* 148:1,476-1,477.
- Sanchez, P.A. and T.T. Cochrane. 1979. Soil constraints in relation to major farming systems of Tropical America. Paper to be presented at the Symposium on Soil Constraints to Food Production in the Tropics. IRRI, Los Baños, Philippines, 4-8 June, 1979. 37 pp.
- Sanchez, P.A. and R.F. Isbell. 1979. A comparison of the soils of Tropical Latin America and Tropical Australia. pp 25-54. In: P.A. Sanchez and L.E. Tergas (ed.): Pasture Production in Acid Soils of the Tropics, Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali - Colombia.
- Sanchez, P.A. 1977. Advances in the Management of Oxisols and Ultisols in Tropical South America. pp:535-566. In: Proceedings of the International Seminar on Soil Environment and Fertility Management in Intensive Agriculture. Society of Science Soil and Manure. Tokyo, Japan.
- Sartain, J.B., and E.J. Kamprath. 1975. Effect of liming a highly Al-saturated soil on the top and root growth and soybean nodulation. *Agron. J.* 67:507-510
- Siman, A., F.W. Cradock, and A.W. Hudson. 1974. The development of manganese toxicity in pasture legumes under extreme climatic conditions. *Plant Soil* 41:129-140.
- Smyth, T.J. 1976. Comparison of the effects of phosphorus, lime, and silicate applications on phosphorus sorption ion exchange, and rice growth in an Oxisol from the Cerrado of Brazil. M.S. Thesis, North Carolina State University, Raleigh. 138 pp.

- Seubert, C.E., P.A. Sanchez and C. Valverde. 1977. Effects of land clearing methods on soil properties and crop performance in an Ultisol of the Amazon Jungle of Peru. *Trop. Agric. (Trin.)* 54:307-321.
- Soarez, W.V., E. Lobato, E. Gonzalez, e G. Naderman, Jr. 1975. Encalado de los suelos del Cerrado Brasileiro. pp. 287-303. In: E. Bornemiza y A. Alvarado (eds.) *Manejo de suelos en la América Tropical*. North Carolina State University, Raleigh.
- Spain, J.M. 1977. Field Studies on Tolerance of Plant Species and Cultivars to Soil Conditions. pp. 213-222. In: M. J. Wright (ed.) *Plant adaptation to mineral stress in problem soils*. Cornell University, Ithaca, New York.
- Spain, J.M., C.A. Francis, R.H. Howeler, and F. Calvo. 1975. Differential species and varietal tolerance to soil acidity in tropical crops and pastures. pp. 308-329. In E. Bornemisza and A. Alvarado (ed.) *Soil Management in Tropical America*. North Carolina State University, Raleigh.
- Tisdale , S.L. and W.L. Nelson. 1966. *Soil Fertility and Fertilizers*. The Macmillan Company, New York. pp. 427-428, 519-521.
- Uehara, G., and J. Keng. 1975. Management implications of soil mineralogy in Latin America. pp. 351-363. In E. Bornemiza and A. Alvarado (eds.) *Soil Management in Tropical America*. North Carolina State University, Raleigh.
- Veitch, F.D. 1904. Comparison of methods for the estimation of soil acidity. *J. Amer. Chem. Soc.* 10:637.
- Villagarcia, Sven. 1973. Aluminum tolerance in the Irish potato (Solanum tuberosum) and the influence of substrate aluminum on growth and mineral nutrition of potatoes. Ph.D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh. 200 pp.

- Vose, P.B., and P.J. Randall. 1962. Resistance to aluminum and manganese toxicities in plant related to variety and cation exchange capacity. *Nature* 196: 85-86.
- Weaver, R.M. 1974. Soils of the Central Plateau of Brazil. Chemical and mineralogical properties. *Agronomy Mimeo* 74-8, Cornell University, Ithaca, New York. 45 pp.
- Wolf, J.R. 1975. Water constraints to corn production in Central Brazil. Ph.D. Thesis, Cornell University, Ithaca. 199 pp.
- Yost, R.S. 1977. Effect of rate and placement on availability and residual value of P in an Oxisol of Central Brazil. Ph.D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh. 160 pp.

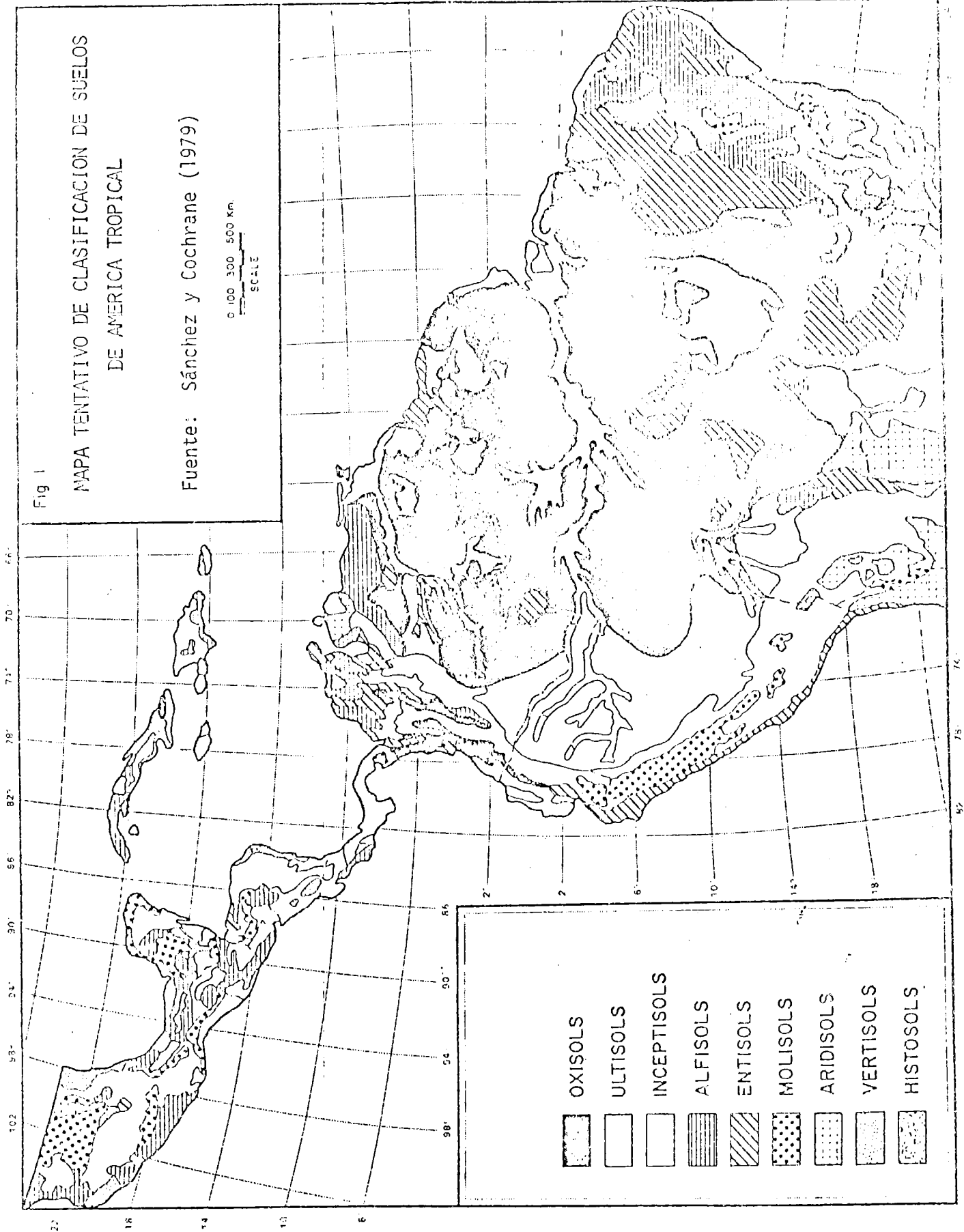


Fig 1

NAPA TENTATIVO DE CLASIFICACION DE SUELOS
DE AMERICA TROPICAL

Fuente: Sánchez y Cochrane (1979)

0 100 300 500 Km.
SCALE

- OXISOLS
- ULTISOLS
- INCEPTISOLS
- ALFISOLS
- ENTISOLS
- MOLISOLS
- ARIDISOLS
- VERTISOLS
- HISTOSOLS

TABLA 1.- DISTRIBUCION APROXIMADA DE ORDENES DE SUELO POR FAJAS ALTITUDINALES Y TEMPERATURAS
 APROXIMADAS DEL SUELO EN AMERICA TROPICAL.

| Orden de Suelo | Zona de Tierras bajas | Zona Intermedia | Zona Montañosa | Zona Altiplánica | América Tropical | % |
|--------------------|------------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------------------|------------------|----|
| | 0-900m. (isohipertérmico) | 900-1800m. (isotérmico) | 1800-3000m. (isomésico) | 3000-5000m. (isofrígido) | | |
| | ----- millones ha ----- | | | | | |
| Oxisoles | 484 | 28 | 0 | 0 | 512 | 34 |
| Ultisoles | 310 | 10 | 0 | 0 | 320 | 22 |
| Inceptisoles | 134 | 56 | 41 | 4 | 235 | 16 |
| Alfisolos | 151 | 24 | 8 | 0 | 183 | 12 |
| Entisoles | 108 | 15 | 0 | 1 | 124 | 8 |
| Mollisoles | 55 | 3 | 7 | 0 | 65 | 4 |
| Aridisoles | 23 | 0 | 0 | 7 | 30 | 2 |
| Vertisoles | 20 | 0 | 0 | 0 | 30 | 1 |
| Histisoles | 4 | 0 | 0 | 0 | 4 | - |
| Faja Total | 1289 | 136 | 56 | 12 | 1493 | |
| % América Tropical | 85 | 9 | 4 | 1 | 100 | |

Fuente: Sánchez y Cochrane (1979)

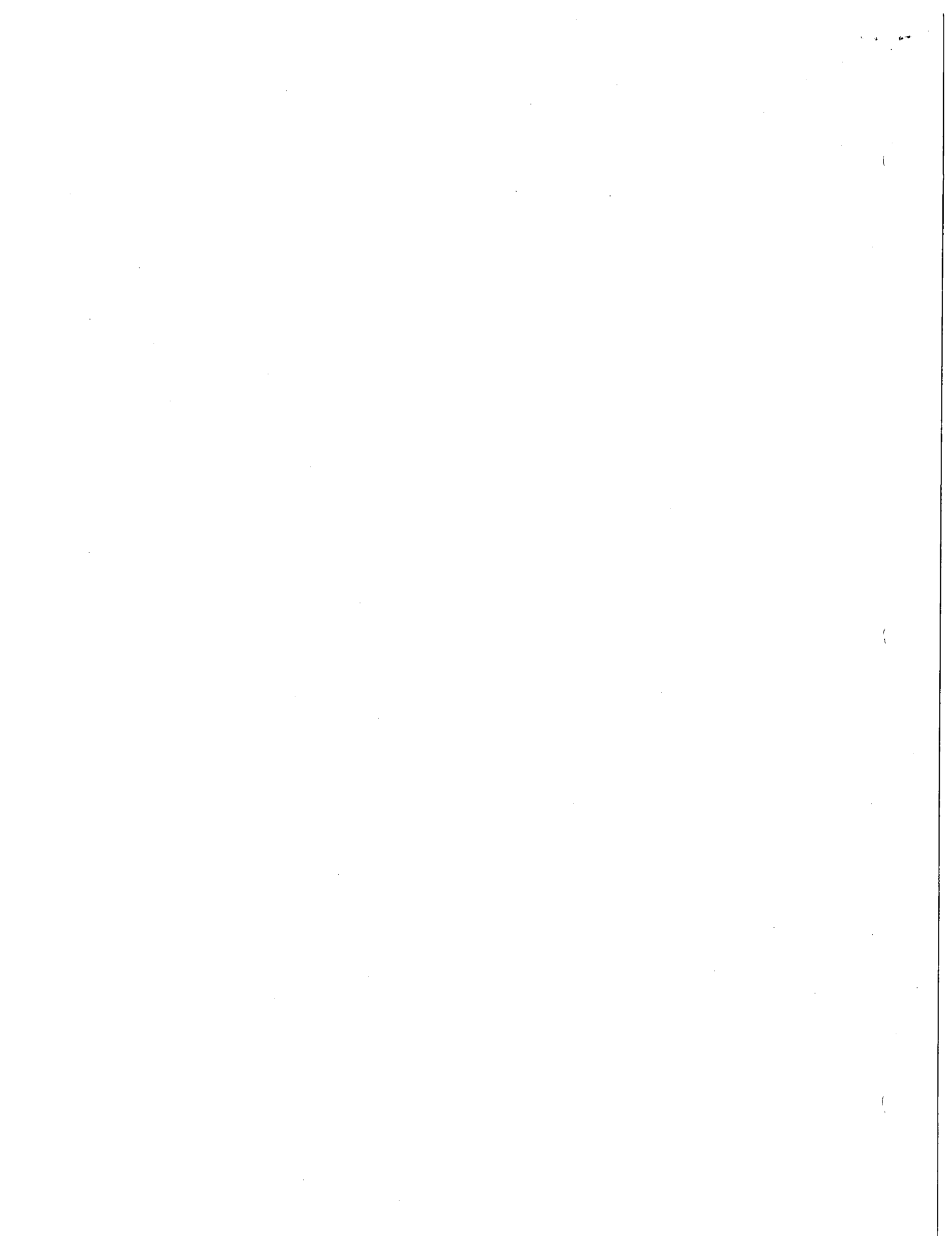
Table 2. Profile analysis of selected Oxisols and Ultisols from experiment stations.

| Horizon (cm) | Clay % | Sand % | pH (1:1H ₂ O) | Org.C % | Exchangeable cations (meq/100 g) | | | | | Al satn. % |
|--|-----------|-----------|-----------------------------|------------|-------------------------------------|-----|-----|-----|------|------------------|
| | | | | | Al | Ca | Mg | K | CEC | |
| Oxisol, Brasilia, Cerrado of Brazil. Typic Haplustox, fine, kaolinitic isohyperthermic. Dark Red Latosol Profile 1, Centro de Pesquisa Agropecuaria dos Cerrados. (Source: EPFS, 1964). | | | | | | | | | | |
| 0-10 | 45 | 36 | 4.9 | 1.8 | 1.9 | 0.4 | .10 | 2.4 | 79 | |
| 10-35 | 48 | 33 | 4.8 | 1.2 | 2.0 | 0.2 | .05 | 2.2 | 89 | |
| 35-70 | 47 | 35 | 4.9 | 0.9 | 1.6 | 0.2 | .03 | 1.8 | 88 | |
| 70-150 | 47 | 35 | 5.0 | 0.7 | 1.5 | 0.2 | .01 | 1.7 | 88 | |
| 150-260 | 42 | 39 | 4.6 | 0.3 | 0.7 | 0.2 | .02 | 0.9 | 76 | |
| Oxisol, Carimagua, Llanos Orientales of Colombia. Tropeptic Haplustox, fine clayey mixed, isohyperthermic. Profile Ca-4, Centro Nacional de Investigaciones Carimagua. (Source: Mejía 1975). | | | | | | | | | | |
| 0-20 | 37 | 6 | 4.9 | 3.1 | 2.8 | 0.2 | 0.2 | .10 | 3.4 | 82 |
| 20-51 | 39 | 5 | 5.0 | 1.5 | 2.0 | 0.1 | 0.1 | .10 | 2.3 | 85 |
| 51-82 | 40 | 5 | 4.8 | 0.8 | 1.9 | 0.1 | 0.1 | .10 | 2.2 | 84 |
| 82-117 | 40 | 5 | 5.4 | 0.6 | 1.1 | 0.1 | 0.1 | .10 | 1.6 | 69 |
| 117-132 | 48 | 5 | 5.8 | 0.4 | - | 0.2 | 0.2 | .30 | 0.8 | - |
| 132-152 | 52 | 4 | 5.9 | 0.3 | - | 0.2 | 0.2 | .30 | 0.7 | - |
| Ultisol, Josepín, Mesas Orientales de Venezuela. Oxic Paleustult, fine loamy, isohyperthermic. Maturín series Profile I. Universidad del Oriente (Source: Espinosa, 1970). | | | | | | | | | | |
| 0-28 | 24 | 69 | 4.7 | 0.9 | 0.5 | 0.5 | 0.1 | .01 | 1.1 | 43 |
| 28-65 | 29 | 61 | 4.6 | 0.6 | 0.6 | 0.4 | 0.1 | .01 | 1.1 | 54 |
| 65-95 | 37 | 53 | 4.7 | 0.3 | 0.6 | 0.4 | 0.1 | .01 | 1.1 | 50 |
| 96-220 | 40 | 51 | 4.9 | 0.4 | 0.7 | 0.4 | 0.2 | 0.1 | 1.3 | 52 |
| Ultisol, Yurimaguas, Amazon Jungle of Peru. Typic Paleudult, fine loamy, siliceous, isohyperthermic. Profile Yu-13, Estación Experimental de Yurimaguas (Source: Tyler 1975). | | | | | | | | | | |
| 0-5 | 6 | 80 | 3.8 | 1.3 | 2.0 | .84 | .37 | .20 | 3.4 | 59 |
| 5-13 | 10 | 70 | 3.7 | 0.8 | 2.6 | .05 | .03 | .01 | 2.7 | 96 |
| 13-43 | 15 | 61 | 3.9 | 0.4 | 3.1 | .05 | .03 | .03 | 3.2 | 96 |
| 43-77 | 17 | 57 | 4.0 | 0.3 | 3.1 | .03 | .02 | .02 | 3.2 | 97 |
| 77-140 | 25 | 51 | 4.1 | 0.2 | 4.5 | .03 | .01 | .03 | 4.6 | 98 |
| 140-200 | 24 | 54 | 4.4 | 0.2 | 3.8 | .06 | .03 | - | 3.9 | 96 |
| Ultisol, Pucallpa, Amazon Jungle of Peru. Aquic Paleudult, clayey, mixed, isohyperthermic. Profile Pu-2. Instituto Veterinario de Investigaciones del Trópico y Allura (Source: North Carolina State University 1973). | | | | | | | | | | |
| 0-3 | 27 | 35 | 5.2 | 6.3 | 0.2 | 4.2 | 2.1 | .52 | 7.1 | 3 |
| 3-21 | 45 | 17 | 4.3 | 1.9 | 4.0 | 2.2 | 1.2 | .40 | 7.9 | 51 |
| 21-62 | 59 | 15 | 4.2 | 1.0 | 8.7 | 0.8 | 0.9 | .32 | 10.8 | 81 |
| 62+ | 59 | 21 | 4.1 | 0.5 | 11.6 | 0.4 | 0.7 | .24 | 13.1 | 89 |

TABLA 3.- Extensión aproximada de área con limitaciones edáficas en la región de suelos ácidos infértiles. Extensión total de cada Orden en paréntesis. Signos de interrogación indican información insuficiente.

| Limitación Edáfica | Oxisoles | Ultisoles | Inceptisoles | Entisoles | Histosoles | Area Total | % del Total |
|-------------------------------|----------|-----------|--------------|-----------|------------|------------|-------------|
| | (512) | (320) | (119) | (98) | (4) | (1043) | Total |
| ----- millones ha ----- | | | | | | | |
| FISICA: | | | | | | | |
| Baja capacidad retención agua | 504 | 0 | 0 | 79 | 0 | 583 | 56 |
| Stress de agua (3 meses) | 170 | 35 | 15 | 79 | 0 | 299 | 29 |
| Erosión | 17 | 160 | 47 | 80 | 0 | 304 | 29 |
| Compactación | 0 | 160 | 0 | 9 | 0 | 169 | 16 |
| Mal drenaje | 0 | 72 | 47 | 0 | 4 | 123 | 12 |
| Laterita | 48 | 71 | 0 | 0 | 0 | 119 | 11 |
| QUIMICA: | | | | | | | |
| Deficiencia P | 512 | 320 | 83 | 83 | 4 | 1002 | 96 |
| Deficiencia N | 504 | 306 | 71 | 88 | 0 | 969 | 93 |
| Deficiencia K | 512 | 160 | 0 | 40 | 4 | 799 | 77 |
| Toxicidad Al | 409 | 256 | 18 | 73 | 0 | 756 | 72 |
| Deficiencia S | 512 | 160 | 0 | 73 | 0 | 745 | 71 |
| Deficiencia Mg | 496 | 224 | 0 | 7 | 4 | 731 | 70 |
| Deficiencia Ca | 504 | 224 | 0 | 0 | 4 | 732 | 70 |
| Retención P | 512 | 160 | 0 | 0 | 0 | 672 | 64 |
| Deficiencia Zn | 468 | 100 | 0 | 77 | 0 | 645 | 62 |
| Baja CIC | 504 | 224 | 0 | 73 | 0 | 801 | 77 |
| Deficiencia Cu | 256 | 50 | 0 | ? | 4 | 310 | 30 |
| Salinidad | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Alcalinidad | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Deficiencia Fe | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Toxicidad Mn | ? | ? | ? | 0 | 0 | ? | ? |
| Deficiencia B | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? |
| Deficiencia Mo | ? | ? | ? | ? | ? | ? | ? |

Fuente: Sánchez y Cochrane (1979)

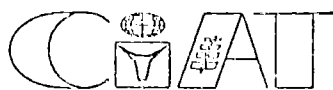


RELACIONES SUELO-PLANTA QUE AFECTAN
LAS DIFERENCIAS ENTRE ESPECIES
Y VARIETADES PARA TOLERAR BAJA
DISPONIBILIDAD DE FOSFORO EN EL SUELO

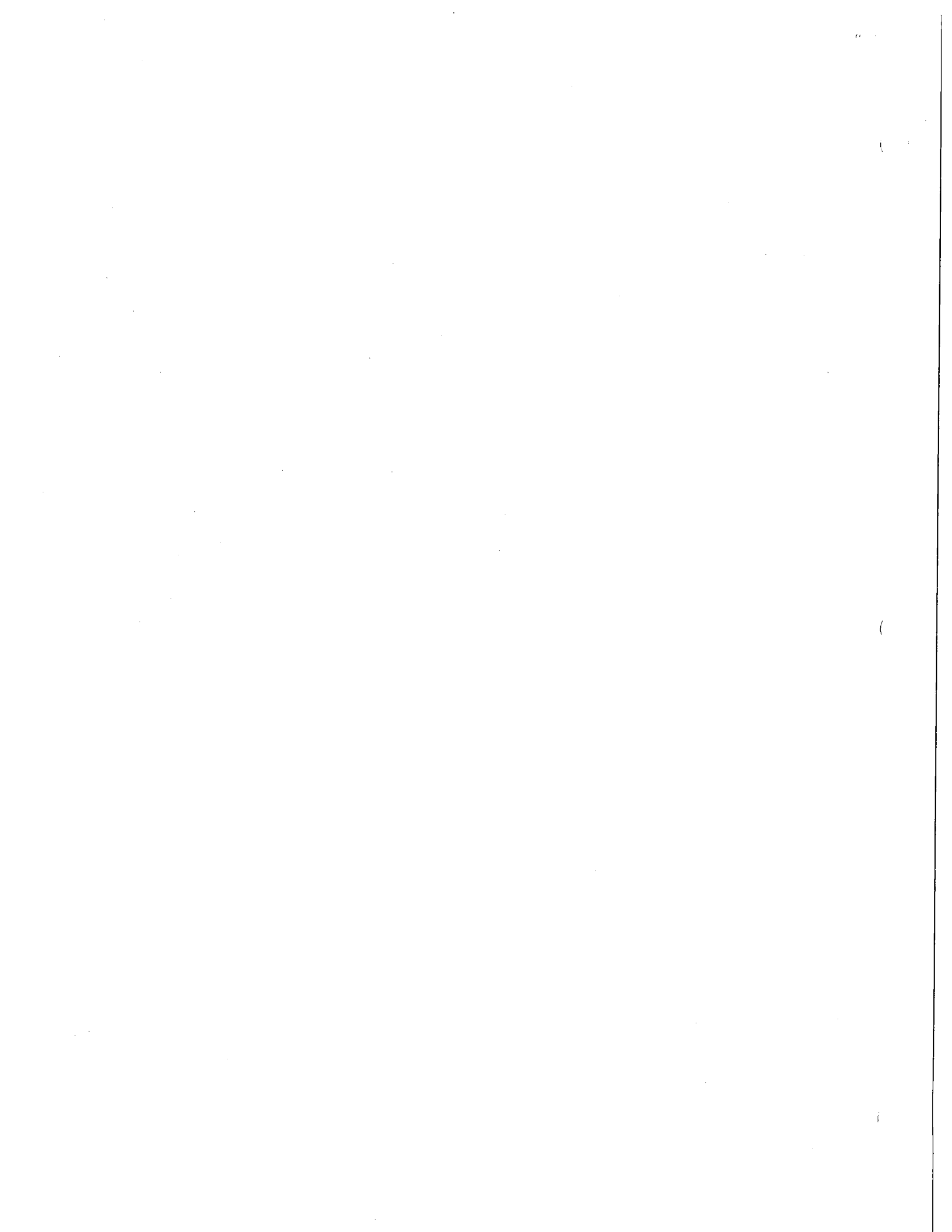
JOSE G. SALINAS

PEDRO A. SANCHEZ

1979



CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL



RELACIONES SUELO-PLANTA QUE AFECTAN LAS DIFERENCIAS ENTRE ESPECIES
Y VARIETADES PARA TOLERAR BAJA DISPONIBILIDAD DE FOSFORO
EN EL SUELO ^{1/}

José G. Salinas y Pedro A. Sánchez ^{2/}

Durante los últimos años tanto fitomejoradores, fitofisiólogos como especialistas en suelos, han reconocido la existencia de diferencias entre especies y variedades para tolerar factores adversos del suelo. Las más notables son las diferencias existentes entre variedades en cuanto a resistencia a la sequía y a elevados niveles de saturación de aluminio en el suelo. El hecho de que genes específicos hayan sido identificados como reguladores de algunos de estos factores, sugiere que la tolerancia varietal a condiciones adversas del suelo puede ser incorporada como objetivo específico en el mejoramiento de plantas. Un mejor entendimiento de las diferencias entre especies y variedades puede constituir un aporte significativo al adaptarlas en nuevas áreas, las cuales requerirán insumos más bajos en fertilizantes.

El fósforo es uno de los elementos más limitantes en la mayoría de los suelos tropicales altamente meteorizados, tales como los Oxisoles y Ultisoles, así como también en suelos derivados de cenizas volcánicas (Andepts). La alta capacidad de fijación de fósforo en estos suelos en formas no inmediatamente disponibles para las plantas, presenta varias implicaciones agronómicas y económicas. Probablemente, es correcto afirmar que esta situación es representativa de vastas áreas en la América Tropical.

Teniendo en cuenta los altos costos actuales de fertilizantes, la solución de este problema consistiría en una triple estrategia:

^{1/} Trabajo originalmente publicado en inglés en la revista brasilera Ciencia y Cultura 28(2):156-168, 1976.

^{2/} Al presente, Jefe Sección Suelos-Nutrición Plantas, Programa Pastos Tropicales del CIAT, y Coordinador Programa de Suelos Tropicales, Universidad Estatal de Carolina del Norte, respectivamente.

2.

1) Determinar los métodos más eficientes de aplicación de fósforo a través de investigaciones sobre fuentes, frecuencia, métodos de aplicación y evaluación de los efectos residuales.

2) Reducir la capacidad de fijación de fósforo de estos suelos por medio del uso de correctivos relativamente económicos, tales como cal y silicatos.

3) Seleccionar y usar especies y variedades más tolerantes y eficientes a baja disponibilidad de fósforo en el suelo.

A pesar de que las diferencias entre especies y variedades mejor estudiadas son relativas a la resistencia a sequía y a altos niveles de aluminio en el suelo, diferencias entre especies y variedades en cuanto a la utilización eficiente del fósforo, han sido reconocidas hace más de 40 años (Thomas, 1930, Lyness, 1936). Sin embargo, los autores desconocen los casos en que estos conceptos hayan sido aplicados a nivel de agricultor.

El presente trabajo constituye una revisión y actualización de conocimientos sobre la tolerancia de especies y variedades a una baja disponibilidad de fósforo en el suelo. El propósito principal es resumir el estado actual de conocimientos del tema en términos de:

- 1) La cuantificación de tales diferencias.
- 2) Los mecanismos considerados responsables por estas diferencias.
- 3) La influencia del aluminio en la tolerancia a bajos niveles de fósforo, y
- 4) La respuesta diferencial de cultivos a la fertilización fosforada.

EXISTENCIA DE RESPUESTA DIFERENCIAL ENTRE ESPECIES Y VARIEDADES A BAJOS NIVELES DE FOSFORO

Evidencias de Campo

Las diferencias entre especies cultivadas son bastante conocidas por los agricultores. En la sabana de "Campo Cerrado" del Brasil, así como también en otras regiones tropicales con suelos similares, se siembra más a menudo arroz de secano que maíz, a pesar de que el maíz tolera muchos más las sequías temporales (veránicos) que ocurren en la estación lluviosa.

Un trabajo reciente efectuado en los Llanos Orientales de Colombia en Oxisoles, muy semejantes a los de "Cerrado", nos proporciona una explicación a esta observación general. Especialistas de CIAT (1971) compararon la respuesta a aplicaciones de cal y fósforo en arroz de secano y maíz sembrados al mismo tiempo, y en parcelas adyacentes. La Figura 1, ilustra estos resultados y muestra dramáticamente que el arroz de secano no respondió al fósforo mientras que el maíz requirió 50 kg P_2O_5 /ha para obtener rendimientos en grano comparables a los de arroz.

En una reciente revisión bibliográfica sobre investigaciones de suelos en la América Tropical, Kamprath (1973) observó que las recomendaciones generales para maíz son de 100 a 150 kg P_2O_5 /ha, mientras que para el arroz de secano son de 0 a 60 kg P_2O_5 /ha. Estos datos muestran la importancia práctica de las diferencias entre especies.

Existe también evidencia cuantitativa adicional que puede ser agrupada en dos clases: diferencias entre especies o variedades en relación a niveles críticos externos de fósforo (en el suelo) y niveles críticos internos (en la planta).

Niveles Críticos Externos

La única forma de fósforo absorbido por las plantas es el ión fosfato de la solución del suelo. Un informe reciente (Fox *et al.* 1974) ha demostrado la existencia de una concentración óptima de fósforo en la solución del suelo que correlaciona con una producción adecuada y que esta concentración varía entre especies. Los resultados ilustrados en la Figura 2 muestran que especies tales como batata (*Ipomoea batatas*) son más tolerantes a bajos niveles de fósforo en la solución del suelo que lechuga (*Lactuca sativa*) mientras que maíz (*Zea mays*) y repollo (*Brassica pekinensis*) ocupan posiciones intermedias.

Si la concentración de fósforo en la solución del suelo que produce 95% del rendimiento máximo, es considerado como el "requerimiento externo de fósforo", entonces existe diferencias significativas entre especies. La Tabla 1 indica una diferencia de 10 veces en este requerimiento externo de P entre dos hortalizas similares (lechuga y repollo). Esta tabla indica además que el requerimiento externo de P para una leguminosa forrajera del género *Desmodium* fué alto durante el período de establecimiento (0.20 ppm)

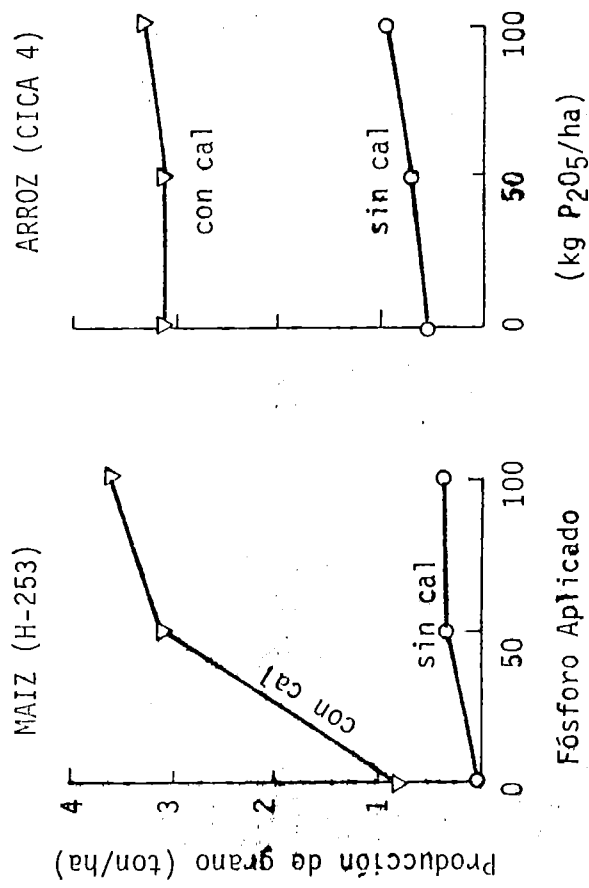


FIGURA 1. Diferencias entre maíz y arroz de secano en respuesta a aplicaciones de fósforo en un Oxisol de los Llanos Orientales de Colombia. (CIAT 1971).

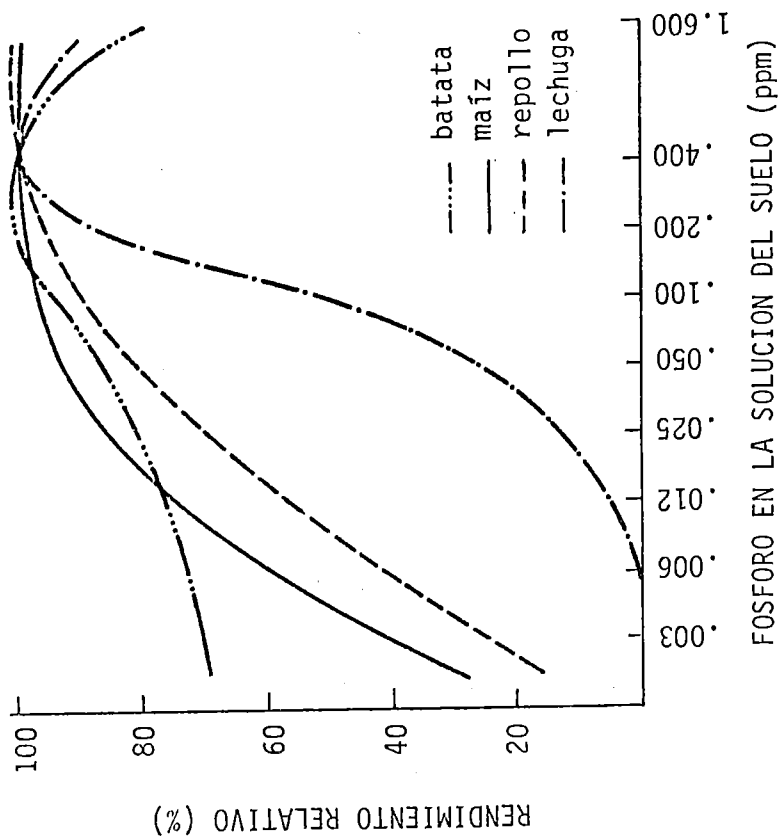


FIGURA 2. Curvas de respuesta para batata, maíz, repollo y lechuga cultivados en un suelo Latosol rojo (Eutrustox) de Hawaii. (Fox et al., 1974).

TABLA 1 — Niveles críticos externos de fósforo de varios cultivos tropicales.

| CULTIVO | FOSFORO EN LA SOLUCION DEL SUELO ASOCIADO CON UN 95% DE RENDIMIENTO MAXIMO |
|---|--|
| | ppm |
| Lechuga | 0.40 |
| Tomate | 0.25 |
| Pepino | 0.20 |
| Soya | 0.20 |
| <u>Leguminosa forrajera</u> (Desmodium aparines) | |
| establecimiento | 0.20 |
| segundo corte | 0.01 |
| Batata | 0.10 |
| 75% rendimiento máximo | 0.003 |
| Maíz | 0.60 |
| Sorgo | 0.50 |
| Repollo | 0.04 |

Fuente: Fox et al (1974) y Fox (datos no publicados).

pero disminuyó a 0.01 ppm P después del segundo corte. Esta última comparación sugiere que el suministro de fósforo a leguminosas tropicales es especialmente crítica durante el período de establecimiento en suelos bajos en este elemento.

El bajo rendimiento externo de fósforo en el caso de batata es de interés considerable. El hecho de que un 75% de su rendimiento máximo sea obtenido con niveles tan bajos como 0.003 ppm P en la solución del suelo, tiene una implicación económica importante. Desafortunadamente, existen pocos datos disponibles para otros importantes cultivos, tales como arroz, yuca, trigo, cowpea, o para muchas gramíneas y leguminosas forrajeras.

La cantidad de fertilizante fosforado necesaria para aumentar la concentración de P en la solución del suelo a niveles óptimos, varía drásticamente con el tipo de suelo debido a diferencias en su capacidad para "fijar" fósforo. La relación entre fósforo fijado y fósforo en la solución del

suelo puede ser evaluada por medio de curvas de fijación de P conocidas también como "isotermas de adsorción", desarrolladas por Fox y Kamprath (1970). Tales curvas muestran que las cantidades de P necesarias para obtener niveles óptimos en la solución del suelo alrededor de 0.2 ppm P varía considerablemente entre suelos considerados con una alta capacidad fijadora de P. Por ejemplo, un Ultisol arenoso (Podzol Vermelho Amarelo) de la selva amazónica del Perú requiere alrededor de 25 ppm de P para tener ese nivel en la solución del suelo; un Ultisol arcilloso de la misma región requiere 100 ppm P; un Oxisol arcilloso (Latosol Vermelho Amarelo) de los Llanos Orientales de Colombia requiere alrededor de 250 ppm P; un Oxisol limoso (Latosol Vermelho Amarelo) de Brasilia requiere 550 ppm P, y un Oxisol arcilloso (Latosol Vermelho Escuro) de Brasilia requiere 750 ppm P (North Carolina State University, 1973; Fox *et al.*, 1974). Estas diferencias son debidas principalmente a diferencias en comparación mineralógica y textura. La textura por sí misma tiene una influencia directa en los niveles óptimos de P en la solución del suelo. Para maíz y frijol cultivados en suelos arcillosos, el requerimiento externo de P en la solución del suelo es alrededor de 0.07 ppm P pero en suelos arenosos es alrededor de 0.2 ppm P (Baldovinos y Thomas, 1967; Fox y Kamprath, 1970). El mayor requerimiento en suelos arenosos es debido a la discontinuidad existente en la solución del suelo y a la menor difusión.

Niveles Críticos Internos

Los trabajos de Andrew y Robins (1969, 1971) en Australia, confirman la existencia de niveles críticos internos. Ellos determinaron las concentraciones críticas de fósforo en la parte aérea de varias especies de pastos tropicales, las cuales fueron correlacionadas con máximos rendimientos. Este porcentaje de fósforo en la parte aérea de la planta, sobre el cual no hubo respuesta posterior de crecimiento, fue considerado como nivel crítico interno de fósforo. Algunos de sus resultados (Tabla 2) muestran que especies leguminosas forrajeras tales como *Stylosanthes humilis* y *Centrosema pubescens* tienen un nivel crítico interno más bajo que especies tales como *Glycine weightii* y *Medicago sativa*. Las primeras dos especies son nativas de regiones con suelos bajos en fósforo disponible y otros nutrimentos.

La misma observación fue hecha con gramíneas forrajeras. Gramíneas tales como *Digitaria decumbens* y *Melinis minutiflora* tienen bajos niveles

TABLA 2 — Niveles Críticos Internos de Fósforo de especies forrajeras asociadas con rendimientos máximos en Queensland, Australia.

| ESPECIE FORRAJERA | % P EN PARTE AEREA |
|--------------------------------|--------------------|
| Leguminosas: | |
| <i>Stylosanthes humilis</i> | 0.17 |
| <i>Centrosema pubescens</i> | 0.16 |
| <i>Desmodium intortum</i> | 0.22 |
| <i>Glycine weightii</i> | 0.23 |
| <i>Medicago sativa</i> | 0.25 |
| Gramíneas: | |
| <i>Digitaria decumbens</i> | 0.16 |
| <i>Melinis minutiflora</i> | 0.18 |
| <i>Panicum maximum</i> | 0.19 |
| <i>Pennisetum clandestinum</i> | 0.22 |
| <i>Chloris gayana</i> | 0.23 |
| <i>Paspallum dilatatum</i> | 0.25 |

Fuente: Andrew y Robins (1969, 1971).

críticos y son muy comunes en suelos ácidos con baja disponibilidad de fósforo, mientras *Chloris gayana* y *Paspallum dilatatum* tienen un nivel crítico interno más alto.

Selección Directa

El Instituto Internacional de Investigación del Arroz en Filipinas (IRRI) está conduciendo un programa relativo a seleccionar variedades de arroz tolerantes a varias condiciones adversas del suelo, incluyendo baja disponibilidad de fósforo en el suelo. A través de experimentos preliminares en invernadero (IRRI, 1971; Ponnampuruma y Castro, 1972) seguidos de experimentos de campo con dos niveles de fósforo aplicados (IRRI, 1972) han clasificado un gran grupo de variedades de acuerdo a su tolerancia a bajos niveles de fósforo en el suelo. Algunos ejemplos están ilustrados en la Tabla 3. La clasificación por grado de tolerancia está basada en la respuesta

TABLA 3 . Clasificación de variedades de arroz de acuerdo a su tolerancia a baja disponibilidad de fósforo en un Ultisol de Louisiana, Filipinas.

| TOLERANTE | MODERADAMENTE TOLERANTE | MODERADAMENTE SUSCEPTIBLE | SUSCEPTIBLE |
|------------|-------------------------|---------------------------|---------------|
| IR 4-11 | IR 5 | IR 442-2-58 | IR 579-48-1 |
| Bahagia | IR 8 | IR 1008-14-1 | IR 747B-26-3 |
| BG-79 | IR 20 | IR 1154-233-2 | IR 878B-4-220 |
| CAS-209 | IR 22 | Taichung (N) 1 | Bala |
| Engkatok | IR 24 | TKM6 | C 22 |
| Pelita I/1 | IR 661-1-70 | | Colombia 1 |
| Pelita I/2 | IR 1154-68-2 | | CP231xSL017 |
| RD 1 | CICA 4 | | ICA 10 |
| SR 26 B | Peta | | M1-48 |
| | T442-35 | | M1-273 |
| | | | OS 4 |
| | | | SML Acorni |

Fuente: IRRI (1972)

relativa a las aplicaciones de fósforo en el campo. Desafortunadamente, datos que puedan ser usados para estimar los niveles críticos internos y/o externos no fueron incluidos. Sin embargo, los resultados de este estudio sugieren que puede ser posible la selección de variedades no solo para tolerancia a baja disponibilidad de fósforo sino también para tolerancia a otros problemas del suelo, tales como deficiencia o toxicidad a hierro y a concentraciones tóxicas de compuestos reducidos. Las variedades con un espectro más amplio de resistencia a condiciones adversas al suelo son: IR 24, CAS 209, y BG 79. Las variedades Pelita I/1 y Pelita I/2 son consideradas como fuentes genéticas para tolerancia a bajos niveles de fósforo.

Este tipo de trabajo con datos analíticos adicionales puede ser conducido con varios cultivos de una manera relativamente corta y directa para obtener la información necesaria.

POSIBLES MECANISMOS FISIOLÓGICOS.

Existen cuatro mecanismos fisiológicos principales en la literatura que

intentan explicar la existencia de diferencias entre especies y variedades relativas a la tolerancia a bajos niveles de fósforo: 1) Extensión radicular, 2) Exudación radicular, 3) Presencia de *Micorriza* y 4) Tasas diferenciales de absorción y translocación de fósforo.

Extensión Radicular

A primera vista, la primera explicación es tal vez la más simple. Investigadores pioneros sugirieron que especies y variedades que tengan mayor superficie de absorción radicular pueden utilizar mejor el fósforo disponible en el suelo (Thomas, 1930, Lyness, 1936, Rabideau, et al, 1950). Sin embargo, varios años después, Freid (1953) afirmó que las diferencias entre especies o variedades con respecto a la utilización de fósforo es independiente del tamaño de las raíces o de la superficie radicular. Las ideas de Freid fueron posteriormente confirmadas por recientes resultados de Koyama y Snitwongse (1971), quienes observaron que las diferencias en la acumulación de fósforo entre dos variedades de arroz en Tailandia no fueron debido a diferencias en la extensión radicular sino debido a la eficiencia para absorber el fósforo del suelo relativo. En contraste, Singh y colaboradores (1970) observaron en la India que dos variedades de trigo con sistemas radiculares profundos y compactos, utilizaron más fósforo proveniente del superfosfato que la variedad Safed Lerma, la cual tiene un sistema radicular superficial y disperso.

La validez de la hipótesis de la extensión radicular es difícil de probar por la falta de técnicas apropiadas para medir con precisión el crecimiento de las raíces en condiciones de campo (Pearson, 1974). Sin embargo, estimaciones preliminares pueden ser obtenidas en condiciones de invernadero con una precisión aceptable.

Exudación Radicular

Comber (1922) consideró el óxido de carbono como un agente activo en la utilización de fósforo. El autor sostiene la teoría de que las raíces de algunas plantas excretan más óxido de carbono que otras, provocando diferencias de pH en la rizosfera. Una mayor acidez en la zona radicular incrementaría la concentración de fósforo en la solución del suelo y de este modo aumentar la absorción de este elemento. Sin embargo, Gerretsen (1948) observó que las raíces no tendrían un efecto tan marcado en la modificación

del pH del suelo, pero observó una mayor absorción de fósforo por plantas que crecieron en arena conteniendo fósforo en presencia de microorganismos que en ausencia de ellos. Estas observaciones implican que las raíces por sí mismas no tienen efecto en el incremento de la concentración de fósforo en el medio externo, pero las colonias de microorganismos que se desarrollan en la exudación de las raíces sí tienen efecto. Black (1968) concluyó que las observaciones de Gerretsen, representaban una sustancial modificación de la teoría original del óxido de carbono. La validez de esta hipótesis es cuestionable ya que fue estudiada solo en soluciones nutritivas y en arena. Rovira y Davey (1974) consideran tales tipos de estudios difíciles de extrapolar a las condiciones del suelo. Además, Kerr (1964) observó que es difícil determinar la contribución individual de la exudación de la raíz en la disponibilidad de nutrimentos en el suelo debido a que la exudación radicular se mezcla casi inmediatamente con otros componentes orgánicos resultantes de la actividad metabólica de los microorganismos del suelo. Esta mezcla de compuestos orgánicos puede entonces afectar la solubilidad del fósforo de una manera impredecible.

Presencia de Micorriza

McComb (1938) postuló que la presencia del hongo *Micorriza* facilita la absorción del fósforo por las plantas. Esta hipótesis fue basada en investigaciones realizadas con especies coníferas desarrolladas en suelos de baja fertilidad, donde los árboles más robustos fueron aquellos que mostraron una mayor proporción de raíces infectadas con *Micorriza*. Varios investigadores (Gerdemann, 1968, 1970; Daft y Nicolson, 1966, 1969; Holevas, 1966 y Baylis, 1967) han demostrado los efectos de la infección del hongo *Micorriza* en el crecimiento de las plantas bajo una amplia variedad de condiciones. Muchos de ellos observaron la estimulación del crecimiento de la planta, particularmente a niveles de baja disponibilidad de fósforo en el suelo. La infección de *Micorriza* aumenta la habilidad de la planta para absorber nutrimentos y acumular fósforo en las raíces (Gray y Gerdemann 1969). Las plantas infectadas con *Micorriza* fueron capaces de utilizar más eficientemente las formas menos disponibles de fósforo (Daft y Nicolson, 1966; Murdock et al, 1967). Baylis (1970) mostró que especies forestales con sistemas de raíces pobremente desarrolladas son huéspedes obligados del hongo *Micorriza* en suelos con baja disponibilidad de fósforo. Rovira y Davey (1974) indicaron que la presencia de ciertos tipos de micro-

organismos en la rizosfera entre ellos *Micorriza*, puede incrementar la cantidad de fósforo disponible para las plantas disolviendo las formas minerales menos solubles y mineralizando formas orgánicas de fósforo en el suelo. Gerdemann (1974) indicó que un mejor entendimiento del rol del hongo *Micorriza* en alterar la disponibilidad de fósforo para las plantas y su efecto en la producción de cultivos, sería de una importancia económica considerable.

Tasas de Absorción y Translocación de Fósforo

Una serie de recientes estudios ha enfocado el problema en una forma dinámica, i.e., la relación entre parámetros tales como tasas de absorción de fósforo, tasas de translocación de fósforo y tasas de crecimiento relativo (Asher y Loneragan, 1967; Clarkson, 1967; Nassery, 1970). Las tasas de absorción de fósforo (PAR) pueden ser definidas como la cantidad de fósforo tomado por la planta por unidad del peso de raíz por unidad de tiempo (e.g. ug P/g/día). Las tasas de translocación de fósforo (PTR) pueden ser definidas como la cantidad de fósforo translocado a la parte aérea por unidad de peso de raíz por unidad de tiempo. Las unidades están dadas también en ug P/g/día. Las tasas relativas de crecimiento (RGR) pueden ser definidas como el incremento en peso seco por unidad de material vegetal por unidad de tiempo (g/g/día).

Las diferencias de especies tales como aquellas dadas por Andrew y Robins (1969, 1971) pueden ser explicadas en términos de estos parámetros. Andrew y Vanden Berg (1973) encontraron que la mayor tolerancia de *Stylosanthes humilis* a baja disponibilidad de fósforo fue debida a una alta tasa de absorción de P por sus raíces en comparación con aquellas leguminosas de menor tolerancia a bajo fósforo. Dev y colaboradores (1970) usando cuatro variedades de arroz, encontraron que las diferencias varietales fueron debidas a diferentes tasas de absorción de fósforo entre variedades de arroz.

Loneragan (1968) provee una explicación a estas observaciones indicando que cuando la concentración de un nutrimento dado en la solución nutritiva es baja y constante, no se observa deficiencia del elemento, si las plantas pueden absorberlo a una tasa suficientemente rápida como para mantener un crecimiento continuo. Nye (1966) indica que la tasa de absorción de fósforo es directamente proporcional a la concentración de fósforo en la

solución del suelo cerca del sistema radicular. De este modo, es posible asumir que la tasa de absorción de P es influenciada no solo por el suministro externo de P sino también por la demanda interna de este elemento.

La tasa de absorción de fósforo parece ser un parámetro efectivo para identificar diferencias varietales o de especies para tolerar una baja disponibilidad de fósforo. Loneragan y Asher (1967) indicaron que una tasa de absorción de fósforo menor que 1 ug P por grama de raíces frescas por día limitaría el crecimiento al mínimo en cualquier especie o variedad. De esta manera, la tasa de absorción de fósforo puede ser considerada como parámetro crucial al estudiar diferencias entre especies o variedades en relación a baja disponibilidad de fósforo en el suelo.

Cuando la tasa de absorción de fósforo (PAR) es considerada junto con la tasa relativa de crecimiento (RGR), las relaciones vienen a ser más complejas. Clarkson (1967) y Rorison (1968) observaron una correlación negativa entre PAR y RGR, lo cual indica que una lenta tasa relativa de crecimiento de una especie o variedad puede facilitar la adaptación de tal especie o variedad a suelos con baja disponibilidad de fósforo. White (1972) encontró que la tasa relativa de crecimiento de *Phaseolus atropurpureus* fue menor que la de *Stylosanthes humilis* y *Desmodium intortum* mientras que la tasa de absorción de P fue mayor en las dos últimas especies que en la anterior. Nye (1966) indicó que una baja tasa relativa de crecimiento posiblemente da más tiempo para la retranslocación del fósforo de los tejidos viejos a tejidos meristemáticos, permitiendo así una utilización más eficiente del fósforo. Tales resultados sugieren que una menor demanda interna de fósforo, a medida que la planta desarrolla, puede resultar en una tasa de absorción de P reducida y estática. De este modo, la tasa de absorción de fósforo pueda que no sea constante para especies dadas. Las relaciones entre PAR y RGR, por lo tanto, podrían ser útiles para explicar las diferencias existentes entre especies o variedades en cuanto a tolerancia a baja disponibilidad de fósforo en el suelo.

Clarkson (1967) encontró que la gramínea forrajera *Agrostis setacea* creció más lentamente que *Agrostis stolonifera* a bajos niveles de fósforo. Sin embargo, *A. setacea*, fue capaz de mantener un incremento exponencial de producción de materia seca a bajos niveles de fósforo (Fig.3). Esta evidencia

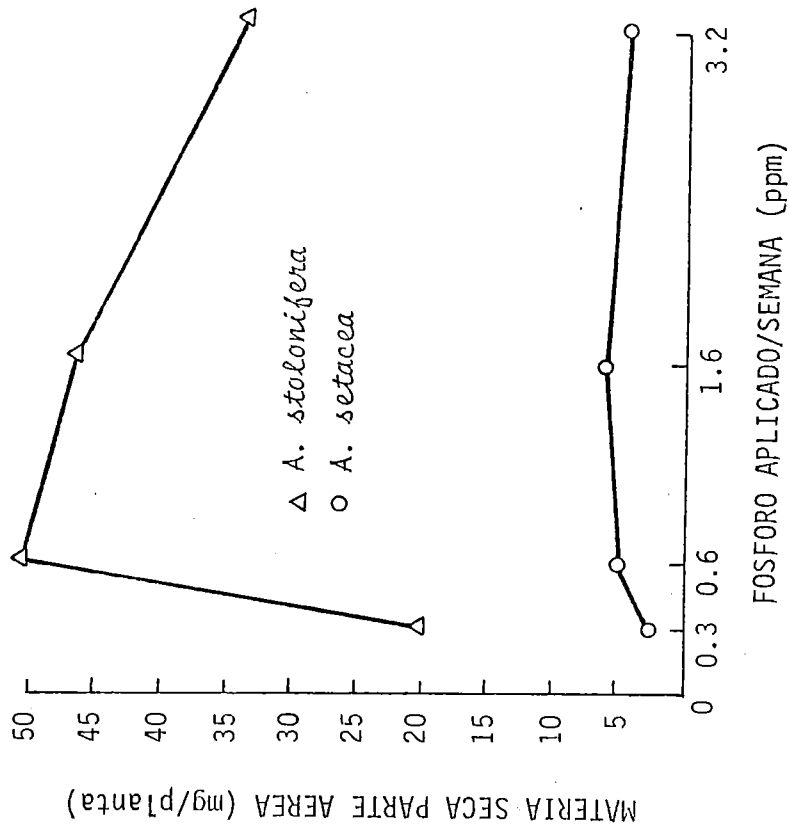


FIGURA 3. Producción de materia seca de dos especies del género *Agrostis* a diferentes niveles de fósforo (Clarkson, 1967).

sugiere que cuando el suministro de fósforo es bajo, el lento crecimiento inherente de una especie o variedad puede ser un mecanismo para tolerar bajos niveles de fósforo.

Una segunda explicación fue dada por Nassery (1970) indicando que las diferencias en crecimiento entre especies o variedades son a menudo debidas, no a diferencias en las tasas de absorción de fósforo (PAR), sino a diferencias en las tasas de translocación de fósforo (PIR); ésto es, la cantidad de fósforo transportado de las raíces a la parte aérea en relación al contenido total de fósforo de la planta (parte aérea y raíces).

Salinas (1974) trabajando con dos variedades de arroz (IR 5 y Bluebonnet 50), observó diferencias varietales en las tasas de absorción de fósforo, tal como ilustra la Fig. 4. Estos resultados sugieren que IR 5 tiene un sistema radicular más eficiente que Bluebonnet 50, desde que la máxima absorción de fósforo por Bluebonnet 50 ocurrió a una concentración de 0.2 ppm P, mientras IR 5 mostró la misma tasa de absorción de fósforo solo a una concentración de 0.05 ppm P.

Parece que las diferencias varietales son más pronunciadas durante las etapas de crecimiento inicial. Koyama y Chammeck (1971) observaron grandes diferencias de crecimiento entre dos variedades de arroz durante la etapa de macollamiento pero diferencias leves durante la etapa de floración (Figura 5). También encontraron que una concentración interna de fósforo por debajo de 0.13% durante la etapa de macollamiento fue crítica para la variedad Muey Naung 62-M, la cual mostró deficiencia de fósforo pero no para la variedad Dawk Mali 3. Los autores concluyen que la diferencia varietal fue debida a la habilidad de las plantas para absorber y translocar fósforo bajo condiciones de baja disponibilidad de fósforo en el suelo.

Interacciones Aluminio - Fósforo

Los problemas de deficiencia de fósforo en suelos ácidos del trópico usualmente ocurren junto con la toxicidad de aluminio. Los dos problemas son difíciles de separar debido a la afinidad química entre ambos elementos. Consecuentemente, interacciones aluminio-fósforo tienen que ser consideradas al evaluar la tolerancia de variedades y especies a ambos problemas.

Diferencias entre especies y variedades para tolerar niveles tóxicos de aluminio, han sido relacionadas con diferencias en la habilidad de las

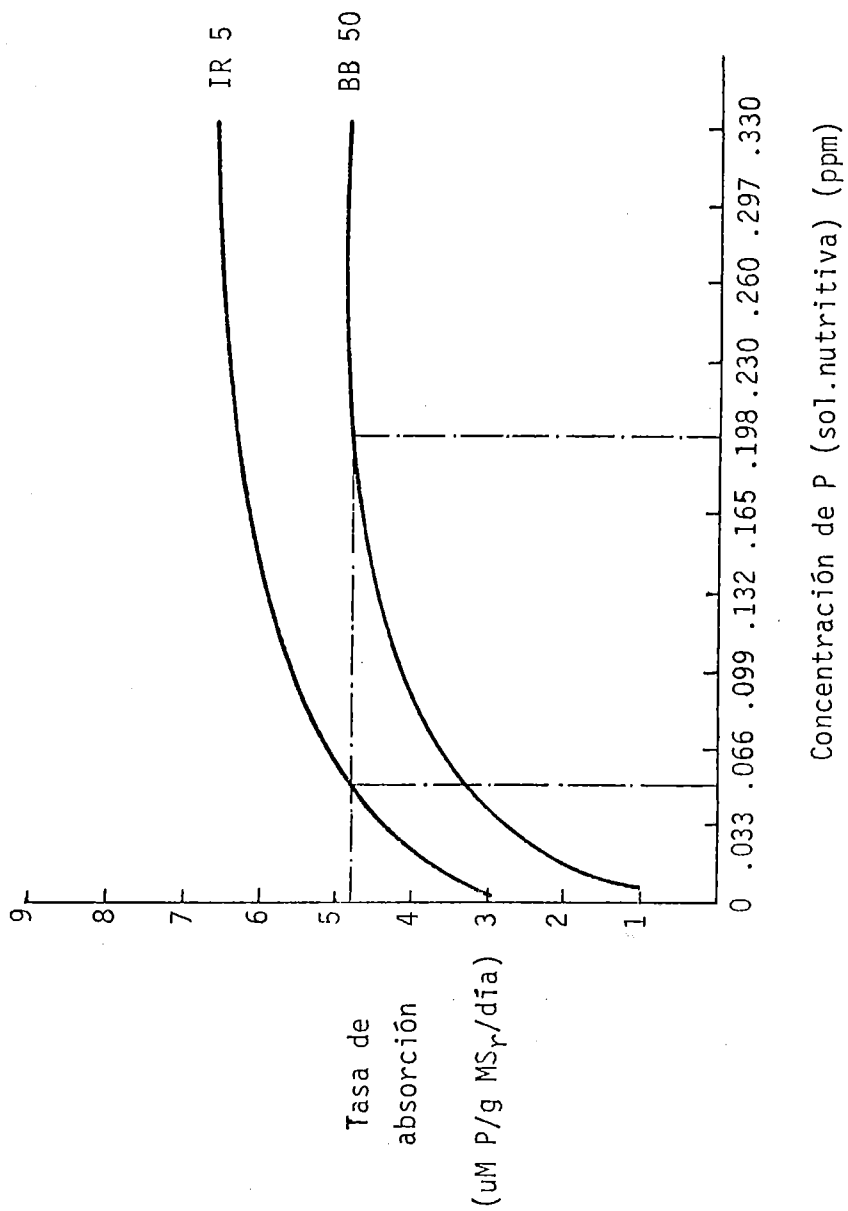


FIGURA 4. Relación entre el suministro externo de fósforo y la tasa de absorción de fósforo en dos variedades de arroz. (Salinas, 1974. Datos no publicados).

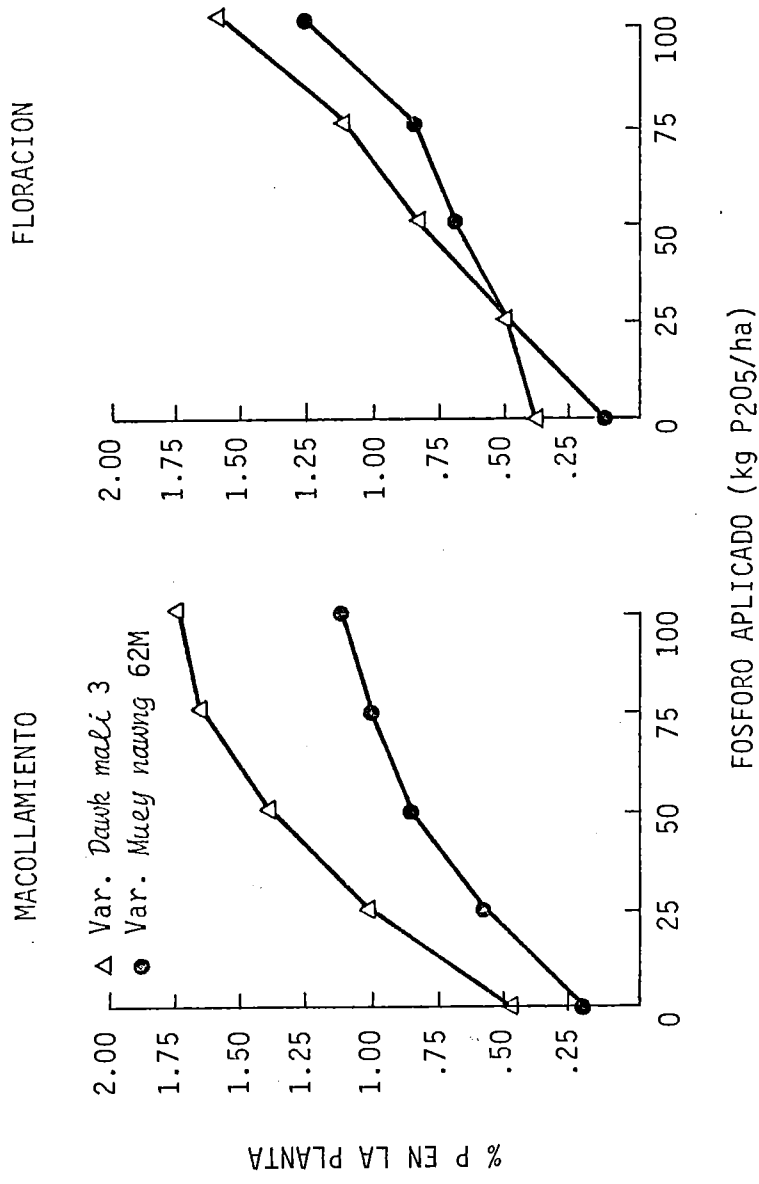


FIGURA 5. Variación del contenido de P durante el desarrollo de dos variedades de arroz a diferentes niveles de fósforo. (Koyama y Chammeek, 1971).

plantas para absorber y utilizar fósforo en presencia de altos niveles de aluminio. Ikeda (citado por Foy, 1974) indica la existencia de una estrecha correlación entre tolerancia a aluminio y tolerancia a baja disponibilidad de fósforo en variedades de trigo. Clarkson (1967) encontró que la alta tolerancia a aluminio de *Agrostis setacea* en comparación con *Agrostis canina* y *Agrostis stolonifera* está asociada con una tolerancia a baja disponibilidad de fósforo. Otsuka (1968ab) indicó que la alta tolerancia a aluminio de *Datura* comparada con tomates fue relacionada a la gran habilidad de *Datura* para absorber fósforo en presencia de aluminio.

McClellan y Chiasson (1966) encontraron que la adición de aluminio redujo la concentración de fósforo en las raíces de cebada. Ellos observaron que este efecto fue más pronunciado en las variedades más sensitivas al aluminio. Andrew y Vanden Berg (1973) hicieron observaciones similares cuando varias especies de leguminosas forrajeras fueron sometidas a varias concentraciones de aluminio en soluciones nutritivas. Algunos de sus resultados (Figura 6) muestran que *Desmodium uncinatum* y *Stylosanthes humilis* son tolerantes a niveles altos de aluminio mientras *Glycine weightii* y *Medicago sativa* son bastante sensitivas. Esto se demuestra en datos de producción de materia seca en la parte aérea de la planta. Las diferencias en materia seca de las raíces son menos espectaculares debido al engrosamiento que normalmente acompaña a la toxicidad de aluminio. Con excepción de la alfalfa, el incremento de aluminio resultó en un incremento de la tasa de adsorción de fósforo. Este efecto fue más pronunciado en las dos especies tolerantes a aluminio. La mayor parte del fósforo absorbido fue acumulado externa o internamente en la raíz. Solo 2 a 16% del fósforo fue translocado a la parte aérea durante el tiempo de experimentación. Si bien el incremento de los niveles de aluminio disminuyó la tasa de translocación de fósforo, las dos especies tolerantes a aluminio promediaron 11% de translocación, mientras que las dos variedades sensitivas a aluminio promediaron 6.5%. Resultados similares fueron obtenidos por Randall y Vose (1963) con plantas de *Lolium perenne* luego de ocho semanas de crecimiento.

Es conocido el hecho de que una absorción normal de fósforo pueda tener lugar a altos niveles de aluminio (Ragland y Coleman, 1962; Cruz et al., 1967; Weisel et al., 1970), consecuentemente, la medida de la tasa de adsorción de fósforo (PAR) no parece ser adecuada para evaluar las interacciones de fósforo-aluminio. El parámetro crítico parece ser la tasa de translocación de fósforo (PTR).

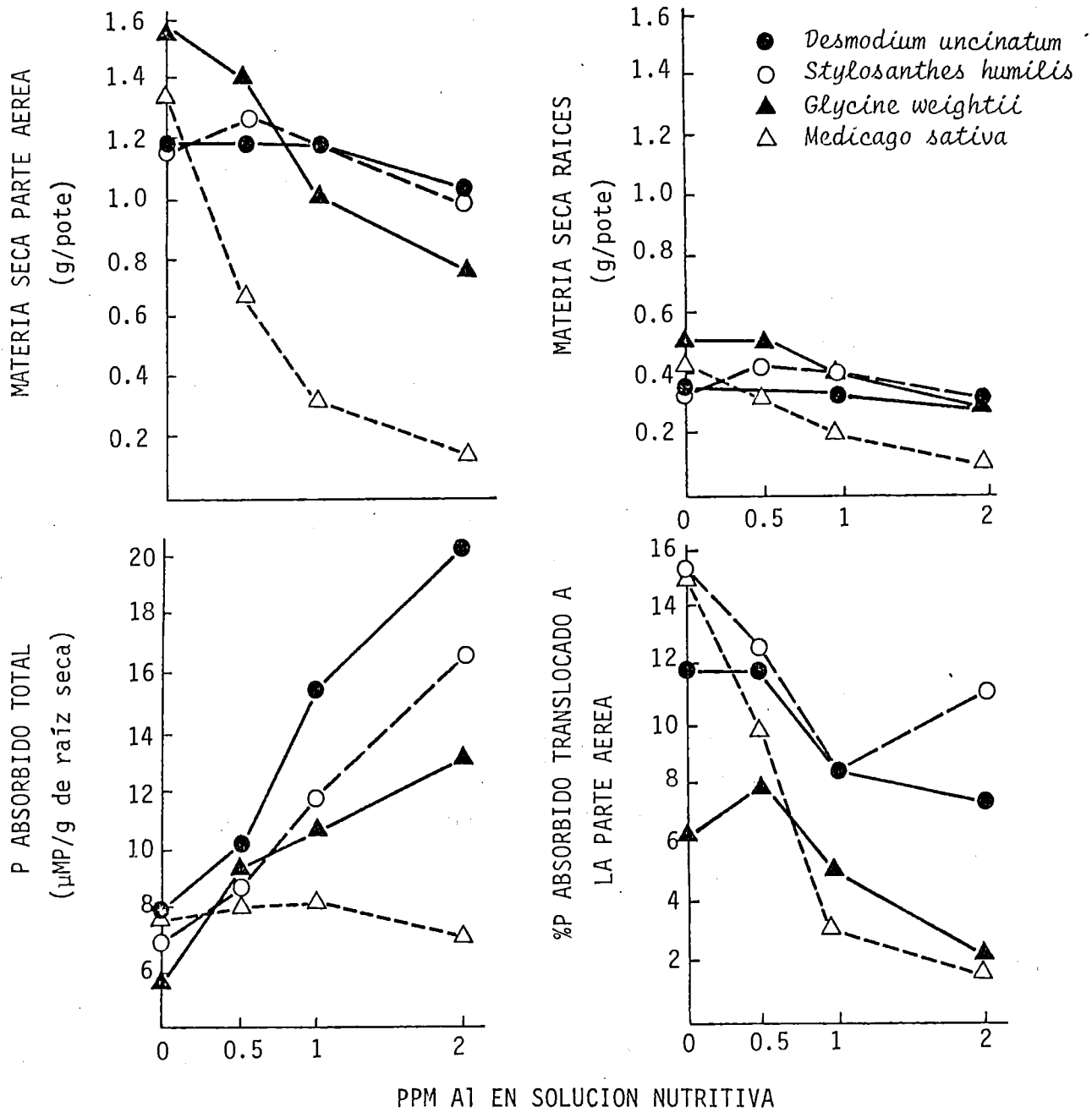


FIGURA 6. Efecto del aluminio en el crecimiento, tasa de absorción de P y tasa de translocación de P de 4 leguminosas forrajeras. Adaptado de Andrew y Vanden Berg (1973).

Wright y Donahue (1953) y McLeod y Jackson (1967) encontraron que el aluminio inactiva el fósforo primeramente dentro de las raíces, y de este modo interfiere con el metabolismo normal de fósforo en las plantas. Rasmussen (1968) usando análisis x-ray observó que el aluminio y fósforo fueron concentrados en las mismas áreas dentro las raíces y sugirieron como mecanismo la precipitación de Al y P como fosfatos de aluminio. McCormick y Borden (1972) usando técnicas fotomicrográficas mostraron que el fósforo es precipitado por altos niveles de aluminio en las paredes de las células y en la membrana citoplasmática de las células epidérmicas y corticales al emplear cebada y poplar. Consecuentemente, diferencias entre especies en relación a aluminio puede depender de la tasa a la cual el fósforo puede escapar esta precipitación siendo translocado a la parte aérea.

Hay muchos otros factores además de la translocación de fósforo que afectan las diferencias entre especies y variedades para tolerar aluminio. El lector puede referirse a los artículos de Foy y Brown (1964) y Foy (1974) para una discusión comprensiva de este objetivo.

TOLERANCIA A BAJOS NIVELES DE FOSFORO Y RESPUESTA A FERTILIZANTES

El interés de seleccionar especies y variedades las cuales presenten tolerancia a bajos niveles de fósforo disponible es disminuir la cantidad de fertilizante fosforado necesario para rendimientos adecuados. Los datos de Andrew y Robin (1969) ilustrados en la Figura 7, muestran que ésto sucede bajo condiciones de campo. La especie con el más bajo requerimiento interno de fósforo de acuerdo a la Tabla 2 (*Stylosanthes humilis*), produjo los más altos rendimientos a los niveles más bajos de suministro de fósforo.

Bajo condiciones de campo en Tailandia, Koyama y Chammek (1971) encontraron que a niveles altos de fósforo aplicados no hubo diferencias en los rendimientos de dos variedades de arroz. A niveles bajos de fósforo el rendimiento en grano de la variedad de arroz Muey Naung fue significativamente menor que el rendimiento de la variedad Dawk Mail 3. Además, las diferencias varietales fueron más pronunciadas cuando el fósforo no fue aplicado (Figura 8).

Existen algunas evidencias preliminares que indican diferencias entre especies en cuanto a la utilización de diferentes formas de fertilizantes fosforados. Deist y colaboradores (1971) encontraron que especies dicotiledoneas utilizan la roca fosfórica mejor que las especies monocotiledoneas.

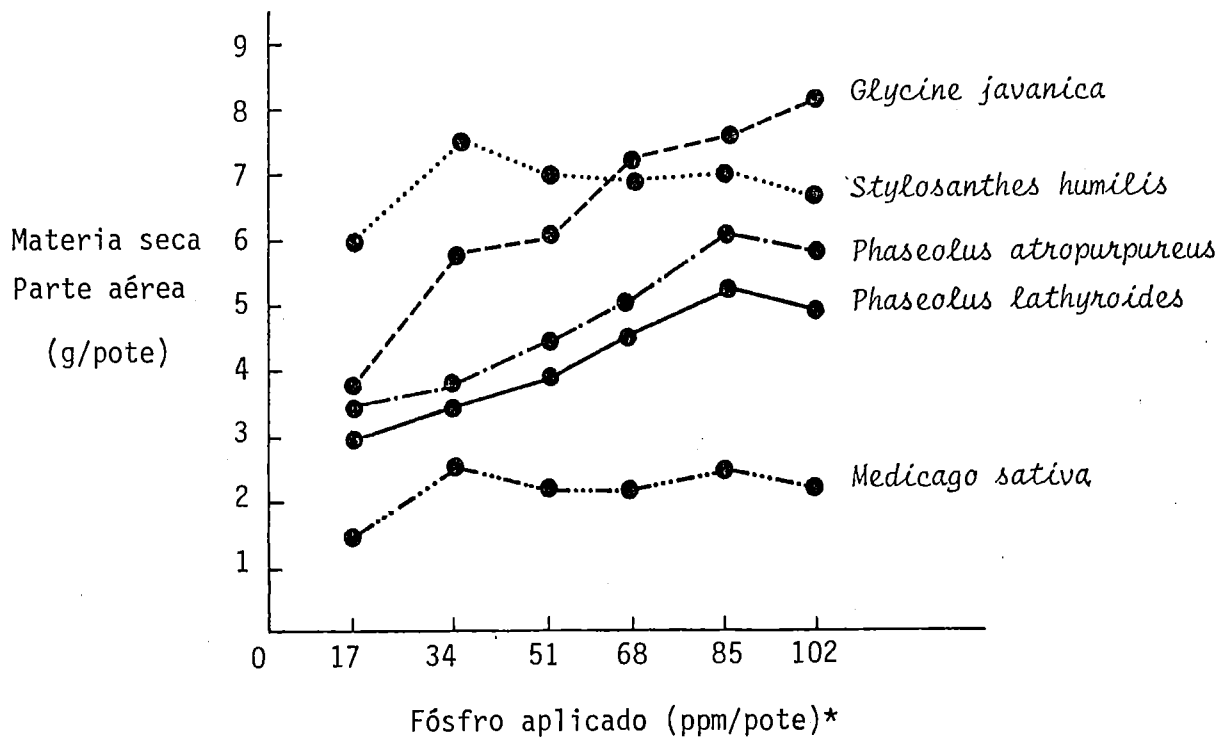


FIGURA 7. Respuesta a la aplicación de P por 5 leguminosas forrajeras (Adaptado de Andrew y Robins, 1969).

* Peso de suelo/pote = 1.8 kg.

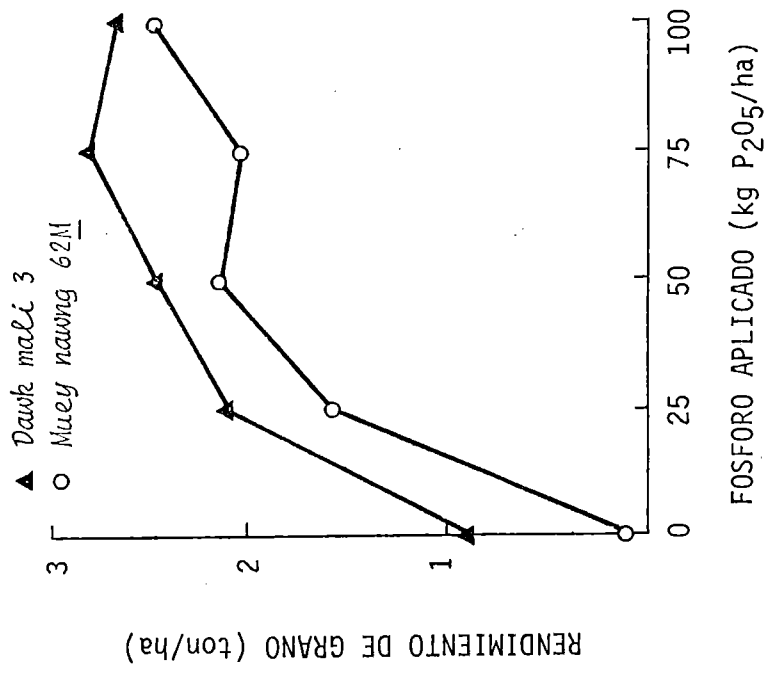


FIGURA 8. Respuesta diferencial entre dos variedades de arroz a la aplicación de fósforo en Tailandia. (Koyana y Chammeek, 1971)

Esto es probablemente debido a grandes cantidades de calcio absorbido por las dicotiledoneas. Una información disponible en la literatura sobre este tema deja mucho que desear. No hay duda de que es necesario seleccionar variedades tolerantes a bajos niveles de fósforo en el suelo y establecer bajo condiciones de campo, curvas de respuesta a aplicaciones de fósforo que puedan identificar estas diferencias en términos cuantitativos.

CONCLUSIONES

Esta revisión sugiere que el conocimiento actual del tema puede resumirse como sigue:

1. Existen diferencias entre especies y entre variedades de la misma especie para tolerar bajos niveles de fósforo disponible en el suelo.
2. La cuantificación de estas diferencias es muy limitada. En los trópicos, los datos se limitan a la investigación sobre niveles críticos externos por Fox y colaboradores (1974) en Hawaii y a niveles críticos internos de fósforo por Andrew y colaboradores en Australia. Trabajos similares deberían ser conducidos en los trópicos americanos con variedades de las más importantes especies tales como yuca, arroz, maíz, frijol, papa, soya, trigo, caña de azúcar, café, forrajes, etc.
3. Los mecanismos fisiológicos responsables en la tolerancia a bajos niveles de fósforo pueden ser mejor entendidos luego de obtener un conocimiento adecuado de los niveles críticos internos y externos de fósforo, y además de las tasas de absorción y translocación de este elemento en relación a tasas de crecimiento de las plantas. La posible influencia de otros nutrimentos y el efecto del hongo *Micorriza* deberían ser considerados.
4. Bajo condiciones de suelos ácidos, donde es difícil separar los efectos detrimentales del aluminio de aquellos de baja disponibilidad de fósforo, las diferencias en tolerancia a aluminio entre especies o variedades parece estar positivamente correlacionada con diferencias en tasas de translocación de fósforo en presencia de aluminio. La literatura sugiere la posibilidad de una doble tolerancia a ambos, aluminio y bajo fósforo. Sin embargo, es necesario investigaciones adicionales con otros cultivos.
5. La información disponible limitada sugiere que especies y/o variedades más tolerantes a bajos niveles de fósforo disponible producen rendimientos más altos a bajos niveles de fósforo aplicado que las especies y/o

variedades más sensitivas. Estos estudios deben llevarse a cabo bajo condiciones de campo para cuantificar estas ventajas en términos agronómicos y económicos.

6. La solución económica de la fertilización fosfórica en Oxisoles y Ultisoles con alta capacidad de fijación de fósforo, puede basarse en una estrategia de tres puntos: a) Selección de fuentes más económicas, métodos y frecuencias de aplicación de fósforo, b) Disminución de la capacidad de fijación de fósforo de estos suelos ácidos a través de mejoras relativamente económicas, tales como el encalado o la aplicación de silicatos, y c) Disminución de las tasas de aplicación de fósforo con el uso de variedades tolerantes a bajos niveles de fósforo, seleccionadas por fitomejoradores.

7. Diferencias varietales en tolerar niveles bajos de fósforo en el suelo, hasta ahora son el resultado de una selección involuntaria, basada en las propiedades del suelo donde las nuevas variedades fueron desarrolladas. La incorporación de este criterio como un objetivo específico de fitomejoramiento puede producir resultados muy satisfactorios en un corto período de tiempo. Una estrecha colaboración entre fitomejoradores y especialistas en suelos es indispensables.

REFERENCIAS

- Andrew, C. S., 1966. A kinetic study of phosphate absorption by excised roots of *Stylosanthes humilis*, *Phaseolus lathyroides*, *Desmodium uncinatum*, *Medicago sativa* y *Hordeum vulgare*. *Aust. Agric. Res.* 17:611-624.
- Andrew, C. S. y Robins, M. F., 1969. The effect of phosphorus on the growth and chemical composition of some tropical pasture legumes. I. Growth and critical percentages of phosphorus. *Aust. J. Agric. Res.* 20: 665-674; 1971. The effect of phosphorus on the growth, chemical composition and critical phosphorus percentages of some tropical pasture grasses. *Aust. J. Agric. Res.* 22: 693-703.
- Andrew, C. S. and Berg, P. J. Vanden, 1973. The influence of aluminum on phosphate adsorption by whole plants and excised roots of some pasture legumes. *Aust. J. Agric. Res.* 24: 341-351.
- Asher, C. J. and Loneragan, J. F., 1967. Response of plants to phosphate concentration in solution culture. I. Growth and phosphorus content. *Soil Sci.* 103: 225-233.

- Baylis, G.T., 1967. Experiments on the ecological significance of phycomycetous mycorrhizas. *New Phytol* 66: 231-243; 1970. Root hairs and phycomycetous mycorrhizas in phosphorus deficient soil. *Plant and soil* 33: 713-716.
- Baldovinos, S.F. and Thomas, G.W., 1967. The effect of soil clay on phosphorus uptake. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 31: 680-682.
- Biddiscombe, E.F. and Ozanne, P.G., 1970. The comparative rates of phosphate adsorption by eight annual pasture species. *Austr. J. Agr. Res.* 21: 33-44.
- Black, C.A., 1968. *Soil plant relationships*. pp. 597-599. John Wiley, New York.
- CIAT, 1971. *Informe Anual. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia*. pp. 119-121.
- Clarkson, D.T., 1966. Effect of aluminum on the uptake and metabolism of phosphorus by barley seedlings. *Plant physiology* 41: 165-172; 1967. Interaction between aluminum and phosphorus on root surface and cell wall material. *Plant and soil* 27: 347-356; 1967. Phosphorus supply and growth rate in species of *Agrostis* L. *Jour. ecology* 55: 111-118.
- Comber, N.M., 1922. The availability of mineral plant food, a modification of the present hypothesis. *Jour. Agr. Sci.* 12: 363-369.
- Cruz, A.D., Haag, H.P., Sarruge, J.R. and Malavolta, E., 1967. Aluminum phosphorus interaction in two varieties of wheat cultivated in nutrient solution. *An Esc. Super. Agr. Luis de Queiroz, Univ. Sao Paulo* 54: 119-129.
- Daft, M.J. and Nicolson, T.H., 1966. Effect of *Endogone mycorrhiza* on plant growth. *New Phytol* 65: 343-350; 1969. Effects of *Endogone mycorrhiza* on plant growth. II. Influence of soluble phosphate on endophyte and host in maize. *New Phytol* 68: 945-952.
- Deist, J. et al., 1971. Relative availability of rock phosphate to different plant species. *Agrochemophysica* 3: 35-40.
- Dev., G., Singh, A., Bahl, G. and Randhawa, N., 1970. Efficiency of four high yielding varieties of paddy for absorption of fertilizer phosphorus. *Symp. Radiat. Radioisotop. Soil Stud. plant Nutr.* 369-376.

- Foote, B.D. and Howell, R.W., 1964. Phosphorus tolerance and sensitivity of soybeans as related to uptake and translocation. *Plant physiology* 39: 610-613.
- Fox, R.L. and Kazar, B., 1964. Phosphorus mobilization in a calcareous soil in relation to surface properties of roots and cation uptake. *Plant and soil* 20: 319-330.
- Fox, R.L. and Kamphath, E.J., 1970. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 34: 902-906.
- Fox, R.L., Nishimoto, R.K., Thompson, J.R. and de la Peña, R.S., 1974. Comparative external phosphorus requirements of plants growing in tropical soils. *Hawaii Agr. Exp. Sta. Tech. Bull.* 1517: 5 pp.
- Foy, C.D. and Brown, J.C., 1964. Toxic factors in acid soils. II. Differential aluminum tolerance of plant species. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28: 27-32.
- Foy, C.D., 1974. Effects of aluminum on plant growth. In: E.W. Carson (Ed.): *The plant root and its environment*. pp. 601-642. University Press of Virginia.
- Freid, M., 1953. The feeding power of plants for phosphates. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 17: 357-359.
- Gerdemann, J.W., 1968. Vesicular-arbuscular mycorrhiza and plant growth. *Ann Rev. Phytopathol.* 6: 394-418.
- Gerdemann, J.W., 1970. The significance of V.A. Mycorrhiza on plant nutrition. In: R.A. Toussoun, R.V. Bega, and P.E. Nelson (Eds.) *Root diseases and soil-borne pathogens*. pp. 125-129. Berkeley, University of California Press.
- Gerdemann, J.W., 1974. Mycorrhizae. In: E.W. Carson (Ed.): *The plant root and its environment*. pp. 205-217. University Press of Virginia.
- Gerretsen, F.C., 1948. The influence of microorganisms on the phosphate intake by the plant. *Plant and soil* 1: 51-81.
- Gray, L.E. and Gerdemann, J.W. 1969. Uptake of phosphorus-32 by vesicular-arbuscular mycorrhiza. *Plant and soil* 30: 415-422.

- Goodland, R., 1971. Oligotrofismo e alumínio no Cerrado. III. *Simpósio sobre o Cerrado*, Sao Paulo, Brasil. pp. 44-60.
- Hackett, C., 1967. Ecological aspects of the nutrition of *Deschampsia flexuosa* (L.) III. Investigation of phosphorus requirements and response to aluminum in water culture and a study of growth in soil. *Jour. ecology* 55: 831-840.
- Hagen, C.E. and Hopkins, H.T., 1955. Ionic species in orthophosphate absorption by barley roots. *Plant Physiol.* 30: 193-199.
- Holevas, C.D., 1966. The effect of a vesicular-arbuscular mycorrhiza on the uptake of soil phosphorus by strawberry. *Jour. Hort. Sci.* 41: 57-64.
- International Rice Research Institute. 1971. *Annual report*. Los Baños, Philippines.
- International Rice Research Institute (IRRI). 1972. Varietal resistance to injurious soils, phosphorus deficiency. *Annual report 1972*. Los Baños, Philippines. pp. 198-200.
- Kamprath, E.J., 1973. Fósforo. En: Sánchez (Ed.): Un resumen de las investigaciones edafológicas en la América Latina Tropical. pp. 151-176. (*North Carolina Experiment Station Technical Bulletin 219* (Versión en Español)).
- Khare, N.K., Rai, M. and Pal, A., 1973. Efficiency of some legumes in utilization of phosphorus. *JNKVV Res. J. (India)* 9-11.
- Kerr, A., 1964. The influence of soil moisture on infection of peas by *Pythium ultimum*, *Aust. J. Biol. Sci.* 17: 676-685.
- Koyama, T. and Chammek, C., 1971. Soil-plant nutrition studies on tropical rice. I. Studies on the varietal differences in absorbing phosphorus from soil low in available phosphorus. *Soil Sci. plant Nutr.* 17: 115-126.
- Koyama, T. and Snitwongse, P., 1971. Soil-plant nutrition studies on tropical rice. II. Rice varietal differences in absorbing phosphorus from soil low in available phosphorus. *Soil Sci. plant Nutr.* 17: 186-194.
- Leggett, J.E., Galloway, R.A. and Gauch, H.G., 1965. Calcium activation of orthophosphate absorption by barley roots. *Plant physiology.* 40: 897-902.

- Loneragen, J.F. and Asher, C.J., 1967. Response of plants to phosphate concentration in solution culture. II. Rate of phosphate absorption and its relation to growth. *Soil Sci.* 103: 311-318.
- Loneragan, J.F., 1968. Nutrient concentration, nutrient flux, and plant growth. *Trans. 9th Congr. Soil Sci.* (Adelaide, Australia). 2: 173-182.
- Lyness, A.S., 1936. Varietal differences in the phosphorus feeding capacity of plants. *Plant physiology* 11: 665-688.
- McComb, A.L., 1938. The relation between mycorrhizae and the development and nutrient absorption of pine seedlings in a prairie nursery. *Jour. ecology* 36: 1148-1154.
- McCormick, L.H. and Borden, F.Y., 1972. Phosphate fixation by aluminum in plant roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 36: 799-802.
- McLean, A.A. and Chiasson, T.C., 1966. Differential performance of two barley varieties to varying aluminum concentration. *Canada J. soil Sci.* 46: 147-153.
- McLeod, L.B. and Jackson, L.P., 1967. Aluminum tolerance of two barley varieties in nutrient solution, pea, and soil culture. *Agron. Jour.* 59: 359-363.
- Medappa, K.C. and Dana, M.N., 1968. Influence of pH, calcium, iron, and aluminum on the uptake of radiophosphorus by cranberry plants. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 32: 381-383.
- Medappa, K.C. and Dana, M.N. 1970. Tolerance of cranberry plants to manganese, iron, and aluminum. *Jour. Amer. Soc. Hort. Sci.* 95: 107-110.
- Mengel, K., 1974. Plant ionic status. In: E.W. Carson (Ed.): *The plant root and its environment*. pp. 63-81. University Press of Virginia.
- Murdoch, C.L., Jackobs, J.A. and Gerdemann, J.W., 1967. Utilization of phosphorus sources of different availability by mycorrhizal and non-mycorrhizal maize. *Plant and soil* 27: 329-334.
- Nassery, H., 1970. Phosphate absorption by plants from habitats of different phosphate status. II. Absorption and incorporation of phosphate by intact plants. *New Phytol.* 69: 197-203.

- Noggle, J.C. and Freid, M., 1960. A kinetic analysis of phosphate absorption by excised roots of millet, barley, and alfalfa. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 24: 33-35.
- North Carolina State University, 1973. Agronomic-economic research on tropical soils. *Annual report*. pp. 12-28. Soil Science Department, N.C. State University, Raleigh, North Carolina.
- Nye, P.H., 1966. The effect on the nutrient intensity and buffering power of a soil and the absorbing power, size, and root hairs of a root on the nutrient absorption by diffusion. *Plant and soil* 25: 81-105.
- Otsuka, D.T., 1968a. Aluminum and manganese toxicities in plants. II. Effects of aluminum on growth of barley, wheat, oats, and rye seedlings. *Jour. Sci. soil manure* (Tokyo) 39: 469-474.
- Otsuka, D.T., 1968b. Aluminum and manganese toxicities in plants. III. Effects of aluminum-ion concentration and phosphorus uptake of grafted tomatoes. *Jour. Sci. soil manure* (Tokyo) 39: 475-478. Abstr. in *Soil Sci. and plant Nutr.* 15(3): 130.
- Oza, A.A., Wakhaloo, S. and Subbiah, S., 1970. Relative efficiency of different rice varieties to take up soil and fertilizer phosphorus. Symp. Radiat. Radioisotop. *Soil Stud plant Nutr. Proc.*: 377-385.
- Ozanne, P.G., Keay, J. and Biddiscombe, E.F., 1969. The comparative applied phosphate requirements of eight annual pasture species. *Aust. J. Agr. Res.* 20: 809-818.
- Pearson, R.W., 1974. Significance of rooting pattern to crop production and some problems of root research. In: E.W. Carson (Ed.): *The plant root and its environment*. pp. 247-267. University Press of Virginia.
- Ponnamperuma, F.N. and Castro, R.U., 1971. *Varietal difference in resistance to adverse soil conditions*. pp. 677-684. Rice Breeding, International Rice Research Institute, Los Baños, Philippines.
- Rabideau, G.S., Gordon, W., and Heimsch, C., 1950. The adsorption and distribution of radioactive phosphorus in two maize inbreds and their hybrid. *Amer. J. Bot.* 37: 93-99.

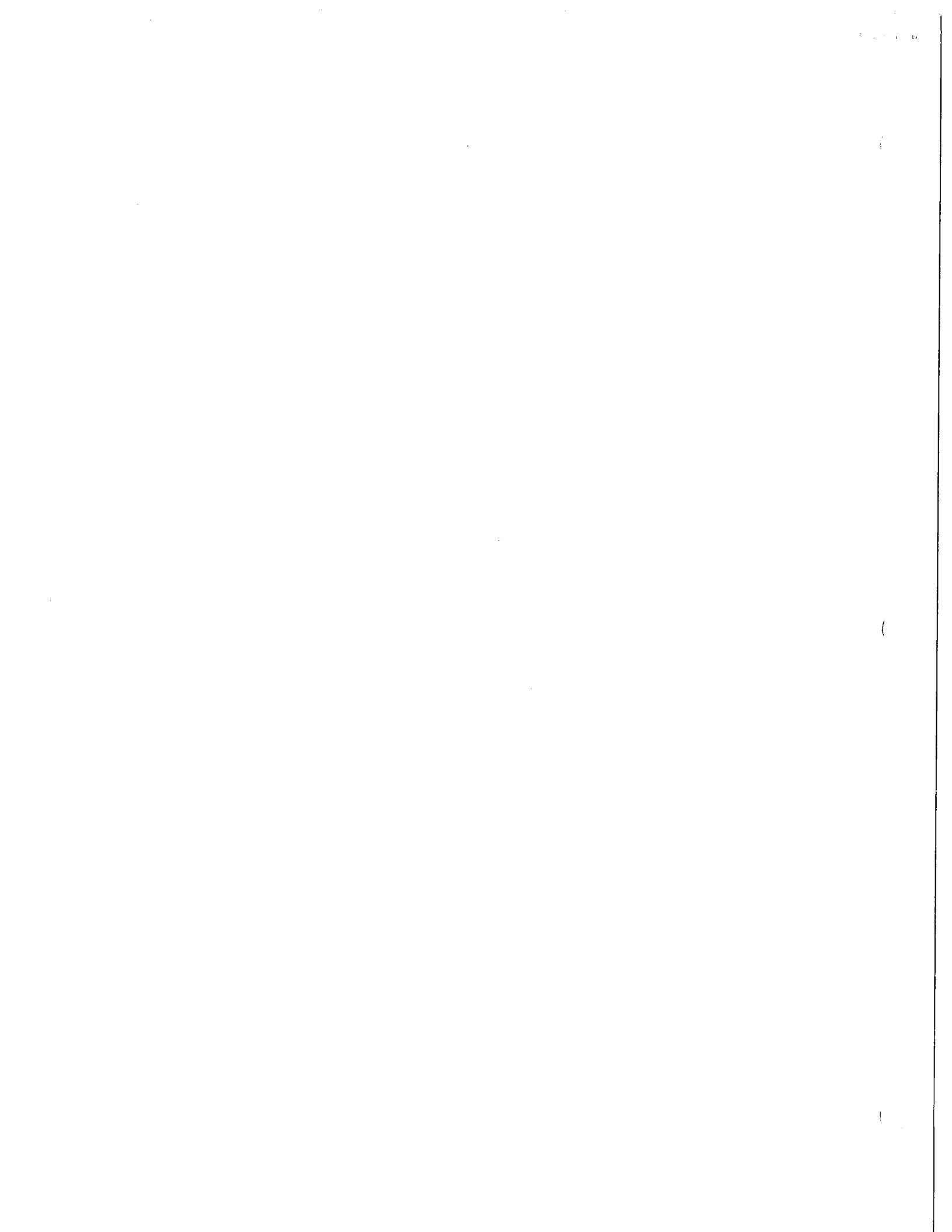
- Ragland, J.L. and Coleman, N.T., 1962. Influence of aluminum on phosphorus uptake by snapbean roots. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 26: 88-90.
- Randall, P.J. and Vose, P.B., 1963. Effect of aluminum on uptake and translocation of phosphorus-32 by perennial ryegrass. *Plant physiology* 38:403-409.
- Rasmussen, H.P., 1968. Entry and distribution of aluminum in *Zea mays*: Electron microprobe x-ray analysis. *Planta* 81: 28-37.
- Rorison, I.H., 1968. The response to phosphate of some ecologically distinct plant species. I. Growth rates and phosphorus absorption. *New Phytol.* 67: 913-923.
- Rovira, A.D. and Davey, C.B., 1974. Biology of the rhizosphere. In: E.W. Carson (Ed.): *The plant root and its environment*. pp. 153-204. University Press of Virginia.
- Salinas, J.G., 1974. A study of varietal difference between IR-5 and Bluebonnet-50 rice varieties to low available phosphorus in nutrient solution. *Unpublished report*. Soil Science Department, North Carolina State University, Raleigh, 21 pp.
- Singh, M., Oza, A. and Khanna, P., 1970. Effect of increasing plant densities of various high yielding wheat varieties having different rooting patterns on the yield and utilization of fertilizer phosphorus. *Symp. Radiat. Radioisotop. soil Stud. plant Nutr. Proc.*: 387-395.
- Thomas, W., 1930. The feeding power of plants. *Plant physiology* 5: 443-489.
- Truog, E., 1920. The utilization of phosphates by agricultural crops, including a new theory regarding the feeding power of plants. *Wisconsin Agr. Exp. St. Res. Bull.* 41: 50 pp.
- Waisel, Y., Hoffen, A. and Eshel, A., 1970. The localization of aluminum in cortex cells of bean and barley roots by x-ray microanalysis. *Plant physiology* 23: 75-79.
- Wiklander, L., 1950. Kinetics of phosphate exchange on soils. *K. Lantbruksgsk Annln.* 17: 407-424.

Wild, A., 1964. Soluble phosphate in a soil and uptake by plants. *Nature*. 203: 326-327.

Wright, K.E. and Donahue, B.A., 1953. Aluminum toxicity studies with radioactive phosphorus. *Plant physiology* 28: 674-680.

White, R.E., 1972. Studies on mineral ion absorption by plants.

I. The absorption and utilization of phosphate by *Stylosanthes humilis*, *Phaseolus atropurpureus*, and *Desmodium intortum*. *Plant and soil* 36: 427-447.



UNA RESEÑA DE LA NUTRICION DE ELEMENTOS MENORES EN LEGU-
MINOSAS FORRAJERAS TROPICALES EN EL NORTE DE AUSTRALIA

R.C. BRUCE *

R E S U M E N

Este trabajo reseña la incidencia de deficiencias de molibdeno (Mo), cobre (Cu), zinc (Zn), manganeso (Mn) y Cobalto (Co) en la nutrición de leguminosas tropicales en el Norte de Australia. Los resultados publicados de esos elementos en los suelos y las plantas se discuten particularmente desde el punto de vista de diagnosis de la deficiencia. Se presentan tasas de fertilización para la corrección de las deficiencias y las especies se agrupan en base a sus respuestas.

Se ha encontrado deficiencia de Mo en un amplio rango de suelos y materiales parentales donde crecen los pastos tropicales; las deficiencias de Cu y Zn se encuentran restringidas a los suelos muy arenosos; deficiencias de Mn no se han encontrado pero se han registrado algunos casos de toxicidad; no se ha encontrado una deficiencia de Co para el crecimiento de las plantas, pero han sido reportadas en ovejas y ganado bovino.

Se concluye que ninguna de las técnicas de diagnóstico en el suelo y en la planta en actual uso han sido correlacionadas satisfactoriamente con respuestas en el campo y se presentan varias sugerencias para futuras investigaciones.

INTRODUCCION

Las deficiencias agudas de nitrógeno (N) y fósforo (P) son casi universales en los suelos de Australia, pero también se ha demostrado que las deficiencias de elementos menores ocurren en muchas áreas. El papel importante

* Department of Primary Industries, Meiers Road, Indooroopilly, Qld. 4068

101702

de la identificación y corrección de esas deficiencias que ha jugado en el éxito de pastos introducidos ha sido reseñado por Loneragan (1970). Sin embargo, ninguna de estas reseñas hace énfasis en las leguminosas tropicales o suelos tropicales probablemente por la falta de información disponible publicada hasta ese tiempo.

Este trabajo trata de la nutrición de Mo, Cu, Zn, Mn, y Co en leguminosas tropicales en los suelos de las regiones tropicales y subtropicales de Australia. Reseña la ocurrencia de deficiencias, la diagnosis y corrección de deficiencias y la respuesta relativa de las diferentes especies.

M O L I B D E N O

Ocurrencia de la deficiencia de Molibdeno

Las primeras indicaciones sobre deficiencia de Mo en el Norte de Australia se encontraron usando leguminosas de zonas templadas en los años de 1950, ya que la evaluación de leguminosas tropicales estaba entonces en su infancia. En el Norte de New South Wales se encontraron respuestas a Mo en ensayos de macetas con trébol creciendo en suelos "krasnozems" (alfisoles) derivados de basalto (Anderson y Arnott 1953, McLachlan 1955, Swain 1959) y en suelos derivados de granito (McLachlan 1955). McLachlan (1953) evaluó cuatro suelos del territorio norte en ensayos de macetas y encontró que el trébol subterráneo respondió al Mo en dos de ellos, uno amarillo podzólico en granito y uno gravoso rojo limoso en material volcánico.

En la región subtropical de Queensland, Andrew y Bryan (1955, 1958) encontraron pequeñas respuestas a Mo con trébol en experimentos de campo en dos suelos (hidromórfico húmico y podzólico laterítico) de las tierras bajas costeras. Cassidy (1957) menciona una indicación de respuestas en el campo en el Distrito Gympie, pero la primera respuesta definitiva en el campo fue observada en 1959 con trébol blanco en el Distrito Cooran (Douglas 1962a). Esto fue confirmado por un ensayo de campo con tréboles blanco y rojo en los cuales se indicaron incrementos de cuatro veces en rendimientos (Douglas 1962b). La primera respuesta en una leguminosa tropical fue con soya perenne (*Glycine wightii*) en un suelo latosólico cerca de Pinbarren en 1961 (Luck y Douglas 1966). Registros subsecuentes de respuestas a Mo con leguminosas tropicales en ensayos de campo se presentan en el Cuadro 1.

CUADRO 1. Situaciones donde se han encontrado respuestas a Mo en experimentos de campo con leguminosas tropicales.

| Suelo | pH* | Material Parental | Leguminosa | Referencia |
|-----------------|------|---------------------|---------------|---------------------------|
| Latosol | 5.3 | filita | soya perenne | Luck y Douglas (1966) |
| solodic | 6.2 | arenas consolidadas | siratro | Truong y col. (1967) |
| krasnozem | - | - | siratro | Ostrowski (1970) |
| | | | hoja de plata | |
| krasnozem | 5.2 | basalto | soya perenne | Mears y Barkus (1970) |
| deep sand | 5.0 | arenas marinas | siratro | Teitzel y Bruce (1973) |
| xanthozem | 5.5 | diorita granular | hoja verde | Kerridge y col. (1973) |
| xanthozem | 4.9* | granito | hoja verde | Kerridge y Everett (1975) |
| | | | soya perenne | |
| xanthozem | | filita | siratro | Johansen y col. (1977) |
| | | | soya perenne | |
| | | | hoja verde | |
| | | | lotozonis | |
| red podzolic | 5.1 | filita | siratro | |
| prairie | 5.4 | andesita | siratro | |
| yellow podzolic | 5.9 | arenas consolidadas | soya perenne | |
| | | | siratro | |
| yellow podzolic | 6.4 | granito | siratro | |
| brown earth | 6.0 | - | siratro | Walker y col. (in press) |

* Suelo-agua = 1:5

** Suelo-CaCl₂ = 1:5

Estos cubren una variación amplia de suelos de acidez y de materiales parentales pero existe una preponderancia de leguminosas entre las especies en la lista que responden más al Mo (ver Sección posterior).

La respuesta al molibdeno ha sido frecuentemente dada en estudios de experimentos de macetas (Mannetje y col., 1963, Shaw y col., 1966, Roe y Jones 1966, Havilah y Mears 1968, Mears y Barkus 1970, Hall 1970, Jones y Crack 1970, Crack 1971, Kerridge y col., 1972, Tietzel y Bruce 1972a, 1972b, 1973, Jones 1973, Walter y col., (en prensa). Estos extienden un poco el rango de pH, añaden *Stylo Townsville* (*Stylosanthes humilis*), *Stylo Schofield* (*Stylosanthes guianensis* cv, Schofield) y frijol "phasey" (*Macroptilium lathyroides*) a la lista de especies e incluyen algunos suelos y materiales parentales adicionales.

En los mismos suelos donde fueron estudiados en ensayos de macetas y en el campo, las respuestas en el invernadero no fueron siempre confirmadas en el campo (e.g. Roe y Jones 1966, Jones 1973, Johansen y Col., 1977) y las razones para esto no son aparentemente fáciles. El volumen restringido de suelos en las macetas junto con las condiciones óptimas para el crecimiento de las plantas y en algunos casos el uso de especies sensitivas son explicaciones posibles para la mayor sensibilidad de ensayos en macetas. La liberación de N a través del cultivo actuaría como para reducir la dependencia de la leguminosa al N simbiótico y por lo tanto reduce la manifestación de deficiencias de Mo en el campo, por lo menos durante el primer año. El uso de productos químicos puros en el invernadero y el de materiales de grado fertilizante en el campo podría ser también un factor contribuyente, aunque Anderson (1956a) no apoya esta posibilidad. Johansen y colaboradores (1977) también sugieren que la tendencia del aumento de pH hacia abajo en el perfil del suelo tendría que ser considerado para las especies perennes de sistema radicular profundo, de modo que el Mo podría estar más disponible en el fondo si el pH aumenta.

No hay situaciones de respuesta a Mo que ocurran en el campo después de no haber sido detectada en experimentos de macetas, excepto por una declaración de Teitzel y colaboradores (1978) que en algunos suelos derivados de granito, se han obtenido respuestas a Mo en pastizales establecidos por varios años.

Molibdeno en Plantas

El Mo tiene un doble papel en la nutrición de las plantas leguminosas. Se requiere para el metabolismo de la proteína ya que está involucrado en las reacciones de reducción del nitrato con la enzima nitrato-reductasa. Además, el Mo se requiere para la fijación simbiótica de N por las bacterias *Rhizobium* en los nódulos de las raíces.

Las respuestas de las leguminosas en el campo a aplicaciones de Mo en Australia han sido invariablemente debidas al efecto del Mo en la fijación simbiótica de N. Se necesita más Mo para la fijación simbiótica de N que para el metabolismo general de la planta huésped (Anderson 1956a). En esta situación una deficiencia de N es inducida y los síntomas visuales no son distinguibles de aquellos asociados con deficiencia de N. Los nódulos de las plantas deficientes en Mo son a menudo blancos o verdes comparados con el color rosado o rojo de aquellos de las plantas no deficientes. Además usualmente hay muchos nódulos pequeños en una planta deficiente pero menos nódulos grandes en una planta normal (Anderson 1956b, Mannetje y col. 1963, Mears y Barkus 1970).

Las concentraciones de Mo en las partes superiores de las plantas han sido dadas para soya perenne (Luck y Douglas 1966, Mears y Barkus 1970), *Siratro* (Ostowasky y col. 1978) y varias especies de *Stylosanthes* (Jones 1974). Las concentraciones de Mo son generalmente menores a 1 ppm y usualmente menos de 0.5 ppm. Las concentraciones de Mo no siempre aumentan con tasas crecientes de aplicación.

Es improbable que las concentraciones de Mo en las partes superiores de las leguminosas sean una ayuda útil de diagnóstico. Vinogradova (1943) encontró que la concentración promedio de Mo de 41 análisis de semilla de leguminosas eran 5.5 ppm Mo. La concentración en la semilla depende de las condiciones bajo las cuales la planta ha crecido. Meagher y colaboradores (1952) encontraron que la deficiencia de Mo fue fácilmente demostrada en plantas crecidas de semillas, las cuales fueron producidas por plantas crecidas en soluciones nutritivas deficientes en Mo y contenían 0.05 a 0.1 ppm Mo. Por otro lado, las semillas producidas comercialmente contienen 0.5 a 5 ppm Mo y las deficiencias de este elemento no podrían siempre ser demostradas. Ellos afirman que el Mo es único entre los elementos esenciales en que las semillas

normales de algunas plantas pueden almacenar, en forma disponible, muchas veces la necesidad total de la planta para crecer a partir de esa semilla.

El análisis de la semilla de leguminosa no parece que haya sido usado como ayuda de diagnóstico. Con la amplia fluctuación en tamaño de semillas de leguminosas, la cantidad de Mo por semilla más que la concentración en la semilla, podría ser de mayor uso, Warrell (comunicación personal) encontró que la semilla de soya perenne producida en áreas deficientes en Mo en Atherton Tableland contenía 0.06 ppm Mo mientras que la semilla producida en áreas no deficientes contenían 1.5 ppm Mo.

Los nódulos de las raíces contienen concentraciones de Mo mayores que las raíces o las partes superiores (Jensen y Betty 1943). Jensen (1948) sugirió que los nódulos deberían contener una cierta concentración de Mo para una máxima eficiencia de fijación de N y propuso 4 a 8 ppm Mo para trébol subterráneo y 10 a 25 ppm Mo para alfalfa. No hay información disponible para la concentración óptima de Mo en el nódulo de las leguminosas tropicales.

Molibdeno en el Suelo

Stephen y Donald (1958) hicieron una lista de los contenidos totales de Mo de algunos Grandes Grupos de Suelos de Australia. La escala de promedios para los Grupos fueron de 2 ppm a 11 ppm Mo pero parece haber poco valor de predicción de estas cifras. Barrow y Spencer (1971) sugirieron que el contenido de Mo del material parental fue importante en determinar el estado del Mo en el suelo. Los datos de Oertel y Giles (1963) para el contenido de Mo en muestras superficiales de suelos de Queensland muestran que la mayoría de los suelos tienen valores menores que 5 ppm Mo.

El molibdato es absorbido específicamente en superficies de óxidos de hierro y aluminio y los bordes meteorizados de las partículas de arcillas. El grado de adsorción disminuye según el pH es aumentado sobre 4, el pH que corresponde al pK que es la constante de disociación del ácido molibdénico (Barrow 1978). Los suelos varían en su habilidad de adsorber molibdato de acuerdo con su pH y de la ocurrencia de sitios de adsorción. El material parental de donde los suelos se han formado y las lluvias son dos factores importantes que determinan la mineralogía de un suelo y la acidez, y por lo

tanto sus propiedades de adsorción (Barrow y Spencer 1971). La adsorción de molibdato tiene dos consecuencias en nutrición de plantas. Los iones adsorbidos están protegidos contra la lixiviación, pero por otro lado, ellos están menos disponibles para las plantas. Los suelos con propiedades fuertes de adsorción deberían ser más capaces de responder y también requerir aplicaciones más fuertes para obtener máximos rendimientos.

Barrow y Spencer (1971) usaron la cantidad de Mo adsorbido a una concentración supernadante final de 0,1 ppm, como un índice de la habilidad de adsorción de Mo por un suelo y mostraron que el estado de Mo del suelo (evaluado en ensayos de macetas) disminuyó con el incremento en la habilidad del suelo de adsorber Mo. Little y Kerridge (1978) encontraron que el mismo índice fue el método de laboratorio más promisorio en una comparación con cuatro métodos de evaluación del estado del Mo en nueve suelos de Queensland. Este índice fué mejor correlacionado con la cantidad de Mo requerido para rendimientos máximos de materia seca de leguminosas tropicales sobre un período de 5 años en experimentos de campo que el Mo en la solución del suelo, Mo total o Mo extraído con oxalato.

Una solución ácida de oxalato de amonio (Grigg 1953) ha sido el extractante más ampliamente usado en análisis de suelos para Mo. El oxalato es adsorbido específicamente y parece ser un desplazador efectivo de Mo (Barrow 1978). Barrow y Spencer (1971) y Spencer y Govaars (1974) han usado este extractante en experimentos con trébol pero la única información publicada en Australia para leguminosas tropicales o suelos tropicales es la de Little y Kerridge (1978). En su trabajo no hubo correlación entre el Mo extractable y los requerimientos de Mo. Como no se dieron datos para suelos no deficientes en Mo ningún juicio se puede hacer de la capacidad del extractante para distinguir entre deficiencia y suficiencia, lo cual es el papel usual de las pruebas de suelos.

El efecto del pH del suelo, modificando la disponibilidad de Mo está bien documentado en ambos suelos de zonas templadas o tropicales. Las condiciones ácidas conducen a baja disponibilidad y el encalamiento puede aumentar la disponibilidad hasta cierto punto que se supere la deficiencia. Sin embargo, hay algunos suelos en los cuales el Mo aparece inadecuado, a pesar de existir cambio de pH. (Kerridge y colaboradores 1972).

Formas de Fertilizante

Molibdato de sodio, molibdato de amonio, molibdato de calcio y trióxido de Mo todos han probado ser fuentes efectivas de Mo en experimentos de fertilizantes en Australia. En prácticas comerciales el Mo es aplicado como superfosfato molibdenizado, lo cual es una mezcla de superfosfato simple y trióxido de Mo. Este producto está disponible en Queensland en cuatro concentraciones de Mo: 0.02, 0.04, 0.08 Mo respectivamente, y junto con Cu y Zn al 0.03% Mo.

Han surgido algunas dudas acerca de la homogeneidad de las mezclas trióxido de Mo y superfosfato. No hay información publicada disponible en la distribución de Mo en volumen, pero Lipsett y David (1977) estudiaron la distribución de Mo en una bolsa de superfosfato molibdenizado. Encontraron que mientras la bolsa entera contenía un poco más que la cantidad garantizada, casi cerca de la mitad estaba contenida en solamente una décima parte del material, las partículas medianas y finas del fertilizante. También mostraron que el material fino se había asentado en la capa inferior de la bolsa. Esto conduciría a una distribución no uniforme en cultivos y pastizales. En parte debido a esto, Teitzel y colaboradores (1978) recomendaron asperjar una solución de molibdato de sodio (junto con sulfatos de cobre y zinc si se requería) en los pastizales.

La incorporación de Mo en la semilla recubierta ha sido sugerida como un medio para obtener una distribución aún mejor de este elemento y también por tener ventajas en suelos con altos requerimientos del elemento. En experimentos de campo 100 g Mo/ha en forma de trióxido en semillas recubiertas con roca fosfórica fue tan efectivo como una aplicación similar en el suelo para corregir deficiencias del elemento en un período de cinco años (Johansen y colaboradores 1977). Al final del primer año la nodulación, los rendimientos y la concentración de Mo en cuatro leguminosas tropicales fue similar, indiferente del método de aplicación (Kerridge y colaboradores 1973). El molibdeno de sodio no es apropiado para recubrir semillas.

Tasas de Aplicaciones

Al reseñar la experiencia con leguminosas herbáceas en el Sur de Australia, Anderson (1956a) concluyó que 90 g Mo/ha (1,3 onzas/acre) fue una tasa de aplicación completamente efectiva. Tasas más altas de 280 a 700 g Mo/ha fueron usadas en experimentos anteriores en Queensland (Andrew y Bryan 1955, 1958) pero la primera recomendación para pastos tropicales (Andrew y Bryan 1958) fue de 100 g Mo/ha (1.6 onzas/acre), lo cual estaba de acuerdo con la conclusión de Anderson. Subsecuentes recomendaciones generales para pastos han citado tasas de 100 a 200 g Mo/ha (Douglas y Luck 1964, Ostrowski 1969, Teitzel y Bruce 1972c, Cook 1978a). Una tasa de 100 g Mo/ha es ahora ampliamente aceptable; esta se suministra convenientemente con 500 kg/ha de superfosfato con 0.02% Mo o por 250 kg/ha de superfosfato con 0.04% Mo. La justificación para estas tasas puede encontrarse en los resultados citados por Luck y Douglas (1966), Kerridge (1972), Kerridge y White (1977) y Johansen y colaboradores (1977).

Una excepción a las recomendaciones anteriores fue hecha para soya perenne (Douglas y Luck 1964, Ostrowski 1969, Cook 1978a) donde tasas de 200 a 300 g Mo/ha fueron recomendadas. Estas recomendaciones parecen estar basadas en el trabajo de Luck y Douglas (1966) quienes encontraron que 230 g Mo/ha dieron rendimientos máximos de soya perenne en un suelo latosólico y Mears y Barkus (1970) quienes encontraron que 112 g Mo/ha no fueron suficientes para rendimientos máximos de soya en un suelo krasnozen. En ambos experimentos, hubo poco crecimiento en el primer año después de la siembra, de modo que las respuestas fueron para crecimiento en el segundo año después de la aplicación del fertilizante. Esto junto con el hecho que se esperaba que ambos tipos de suelos adsorbieran Mo, podría ser responsable de los requerimientos aparentemente mayores de la soya perenne. Los resultados de Johansen y colaboradores (1977) permiten una limitada comparación de la soya perenne con otras leguminosas y tienden a sostener la controversia de que la soya perenne requiere tasas mayores de Mo que otras leguminosas, pero aún muestran que 100 g Mo/ha es adecuado para soya perenne por lo menos durante dos años en un suelo que según Little y Kerridge mostró ser un fuerte adsorbedor de Mo.

Frecuencia de Aplicación

El interrogante sobre frecuencia de aplicación de Mo no ha sido satisfactoriamente resuelto. Al reseñar trabajos en condiciones templadas en Australia (Anderson 1956a) concluyó que "una simple aplicación de 2 onzas/acre permanece efectiva por muchos años", No está claro si él quiso decir 2 onzas de trióxido de Mo o Mo elemental. Tradicionalmente se ha tenido cuidado con las recomendaciones para la aplicación de Mo para evitar cantidades excesivas por los efectos conocidos del Mo en el metabolismo del Cu y el sulfato en los animales (Dick 1956). Las recomendaciones generales son volver a aplicar Mo a intervalos de 3 a 5 años (Douglas 1962b, Cassidy 1967, Ostrowski 1969, Teitzel y colaboradores 1978, Cook 1978b).

Swain (1959) trabajó en la región subtropical norte de New South Wales con un suelo rojo basáltico y encontró una respuesta a Mo en el campo, tres años después de una aplicación inicial de 70 g Mo/ha. De igual manera, Männetje y colaboradores (1963) encontraron que en un suelo parecido a sabana natural fertilizado con 110 g Mo/ha previamente por 3 a 4 años, el frijol "phasey" (Macroptilium lathyroides) y alfalfa respondieron a Mo en experimentos de macetas. Bryan y Evans (1971) fracasaron en encontrar una respuesta a Mo en pastizales tropicales pastoreados 6 a 11 años después de una aplicación inicial de 280 g Mo/ha pero como los suelos no tenían una deficiencia aguda al iniciar el experimento (Bryan 1973) este hallazgo es de una importancia dudosa.

Kerridge (1972) encontró que una aplicación inicial de 100 g Mo/ha aplicado al Desmodium intortum cv hoja verde fue completamente efectiva por 2 años en suelos derivados de material parental volcánico ácido, por 3 años en suelos derivados de basalto y por lo menos 3 años en suelos derivados de esquisto y granodiorita. Trabajos más recientes por Johansen y colaboradores (1977) han mostrado que el valor residual del Mo depende del tipo de suelo y las especies de leguminosas. En sus suelos más sensibles 100 g Mo/ha aseguraron máximos rendimientos para soya perenne por 2 años, para Desmodium intortum por 3 años y para Lotononis bainesii por lo menos 5 años. Sus datos sugieren que 100 g Mo/ha permanecen efectivos por lo menos 3 años y a menudo 5 años, excepto para las especies más sensitivas o los suelos con propiedades de adsorción elevada.

Diferencias en especies

Las diferencias entre leguminosas tropicales y su susceptibilidad a deficiencia de Mo ha sido registrada por varios investigadores (Luck y Douglas 1966, Crack 1971, Kerridge y colaboradores, 1973, Johansen y colaboradores, 1977). Basados en estos informes las especies están agrupadas a continuación como las que más responden, intermedias y las que menos responden.

Las que más responden: Soya perenne, Desmodium intortum

Intermedias: Siratro fríjol "phasey" (Macroptilium spp)

Las que menos responden: Lotononis, Stylo Townsville, Stylo Schofield, Stylo Cook (Stylosanthes guianensis cv Cook)

C O B R E

Ocurrencia de deficiencias de Cu

En el norte de Australia la primera incidencia reportada de deficiencias de Cu en pastizales establecidos, fue en leguminosas templadas en suelos de las tierras bajas costeras de Queensland (Andrew y Bryan 1955, 1958). A continuación en el Cuadro 2 se dan las respuestas con leguminosas tropicales como plantas indicadoras. Estas deficiencias han sido encontradas en suelos arenosos (arenas, pastizales arenosos y tierras amarillas) usando Siratro, Lotononis y especies del género Stylosanthes. Las respuestas a Cu en ensayos de macetas han sido reportadas por Andrew y Bryan (1955), Andrew y Thorne (1962), Russell (1966), Jones y Crack (1970), Teitzel y Bruce (1971, 1973), Jones (1973), Isbell y colaboradores (1976, y Walter y colaboradores (en prensa). El fríjol "phasey" fue usado frecuentemente como planta indicadora. La respuesta en macetas fue encontrada en algunos suelos con un alto contenido de materia orgánica (Gley humicos) y suelos solódicos pero no fue confirmado por estudios en el campo. No se han encontrado respuestas en tierras estructuradas. El acuerdo o concordancia entre respuestas en macetas y en el campo parece haber sido bueno.

CUADRO 2. Situaciones donde se han encontrado respuestas a Cu y Zn en experimentos de campo con leguminosas tropicales.

| Suelo | Material Parental | Leguminosa * | Referencia |
|--------------------|---------------------|------------------|------------------------|
| COBRE | | | |
| podzolic | granito | Siratro | Teitzel (1969) |
| | | Stylo Schofield | |
| podzolic | granito | Siratro | Teitzel y Bruce (1971) |
| deep sand | arena marina | Siratro | Teitzel y Bruce (1973) |
| deep sand | granito | Stylo Townsville | Jones (1973) |
| ground water | arenas marinas | Lotononis | Wentholt (unpubl.) |
| podzol | y de erosión sodica | | |
| yellow earth | arenas consolidadas | Stylo Cook | Winter y Jones (1977) |
| | | Stylo Oxley | |
| ZINC | | | |
| podzolic | granito | Kudzu | Teitzel y Bruce (1971) |
| deep sand | granito | Stylo Townsville | Jones (1973) |
| yellow earth | arenas fluviales | Stylo Townsville | Bishop (1974) |
| yellow earth | arenas consolidadas | Stylo Cook | Winter y Jones (1977) |
| | | Stylo Oxley | |
| red earth | arenas consolidadas | Stylo Cook | Anning (1977) |
| mottled grey earth | arenas fluviales | Stylo Verano | Hall (pers. comm.) |
| sandy duplex soil | arenas fluviales | Stylo Verano | Hall (pers. comm.) |

* Ver el Cuadro 1 para los nombres botánicos.

Cobre en plantas

Los síntomas de deficiencias de Cu en leguminosas tropicales han sido descritos por Andrew (1963), por Andrew y Pieters (1972a, 1972b, 1976a, 1976b) y por Jones y Clay (1976). Generalmente, el efecto inicial de la deficiencia de Cu es marchitamiento parcial del crecimiento joven, a veces con una pérdida de clorofila y necrosis de las hojas y partes aéreas jóvenes. Las hojuelas se encrespan hacia dentro bilateralmente según ocurre la necrosis. Teitzel (1969) encontró un número grande de vainas reducidas en parcelas de Siratro deficientes en Cu.

Andrew y Thorne (1962) compararon las respuestas a Cu de 5 leguminosas forrajeras tropicales y 5 de zonas templadas y también presentaron los contenidos de Cu de la parte aérea de la planta, las raíces y la semilla. Las concentraciones de Cu en el material seco de la planta de varias especies no varió significativamente a cualquier nivel de aplicación y la fluctuación de los niveles sobre todos los tratamientos fueron de 1.7 a 11.3 ppm Cu. Ellos concluyeron que para las leguminosas estudiadas, una concentración superior a 5 ppm fue satisfactoria, 4 a 5 ppm fue marginal y menos de 4 ppm indicó deficiencia de Cu.

Estas normas han sido encontradas útiles en la interpretación de las respuestas a rendimientos en ensayos de fertilización por un número de investigadores en Queensland (Cuadro 3).

Bajos niveles de Cu en las plantas han resultado en concentraciones bajas de Cu en el hígado y síntomas visuales de deficiencias de Cu en los animales (Gartner y colaboradores, 1968).

Cobre en el suelo

Oertel y Giles (1963) analizaron 118 suelos superficiales de Queensland y mostraron que los contenidos totales de Cu estaban mayormente por debajo de 60 ppm y frecuentemente eran 20 ppm. Esto está de acuerdo con la escala de 3 a 60 ppm Cu para promedios de algunos Grandes Grupos de Suelos, presentados por Stephens y Donald (1958). McKenzie (1966) encontró que algunos suelos de Victoria con más de 8 ppm de Cu total no eran deficientes.

CUADRO 3. Concentraciones de Cu y Zn con varias leguminosas tropicales cuando crecen bajo condiciones de deficiencia y/o suficiencia de nutrimentos.

| Especie de Pasto | Zn | | Cu | | Referencia |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------------------|
| | Deficiente | Suficiente | Deficiente | Suficiente | |
| Fríjol "phasey" | 20-15 | - | - | 11-17 | Russell (1966) |
| | - | 45-63 | - | 11-17 | Jones y Crack (1970) |
| | 15-18 | 19-24 | - | - | Crack (1971) |
| | 9-25 | 20-35 | 1-2 | 3-8 | Verrall (unpubl.) |
| | 28 | 45 | - | - | Jones y Crack (1970) |
| | 19 | 23 | - | 3-6 | Crack (1971) |
| | 20 | 43 | - | - | Jones (1973) |
| | - | 45-64 | - | 5-6 | Isbell y col. (1976) |
| | - | - | - | 3-5 | Webb (1975a) |
| | 12-16 | 35-100 | 5 | 5-9 | Webb (1975b) |
| Desmodium Hoja verde | 9 | 17-22 | - | 5 | Day (pers. comm.) |
| | - | 22-38 | - | 3-7 | Kerridge y col. (1972) |
| | - | 21-24 | - | - | Truong y col. (1967) |
| Stylo Cook | 10 | 30 | 3-4 | 7 | Winter y Jones (1977) |
| | 7 | 10-21 | - | 8 | Hall (pers. comm.) |
| Lotononis | - | 25 | - | 5 | Wentholt (unpubl.) |

Varios autores han dado los contenidos totales de Cu en los suelos del Norte de Queensland y estos se presentan en el Cuadro 4. Con la excepción de los suelos rojos neutros duplex, los cuales no fueron deficientes en Cu, todos los valores son bajos y sugieren que el Cu total podría ser de uso como diagnóstico en estudios adicionales.

CUADRO 4. Concentraciones totales de Cu y Zn en algunos suelos del Norte de Australia.

| Suelos | Escala de Valores (ppm) | | Referencias |
|------------------------|-------------------------|-------|--|
| | Cu | Zn | |
| Yellow earths | 3-5 | 3-5 | Isbell et al (1976) |
| Red earths | 4-6 | 3-6 | |
| Sands | 4-5 | 2-5 | |
| Yellow earths | 6-13 | 3-10 | Isbell and Smith (1976) |
| Red earths | 4-22 | 5-21 | |
| Grey earths | 6-11 | 3-7 | |
| Deep sands | 2-5 | 5-14 | Jones (1973) Russell (1966) Crack (1971) |
| Solodic | 9 | 7 | |
| Neutral red duplex | 33-54 | 22-58 | |
| Sandy red earth | 5 | 10 | Day (pers.comm) |
| Lateritic yellow earth | 5 | 10 | |
| Lateritic red earth | 5 | 8 | |
| Humic gley | 5 | 10 | |

El análisis de suelo DTPA de Lindsay y Norvell (Follett y Lindsay 1971) ha sido usado en Queensland por laboratorios comerciales de análisis de suelo y por el Departamento de "Primary Industries" del Estado por un gran número de años. El extractante es una solución 0.005M DTPA, 0.01M CaCl₂ y 0.1M trietanolamina, amortiguada a pH 7.3. No ha habido una calibración del método para pastos. Las experiencias sugieren que el nivel crítico es bajo, posiblemente 0.1 ppm Cu, pero esto está pobremente definido. Verrall (datos sin publicar) no encontró respuesta en rendimiento con frijol "phasey" arriba de 0.1 ppm Cu en un estudio de 15 suelos en el invernadero. Webb (1975b) creció Stylo Townsville en 9 suelos cuyos contenidos de Cu extractable con DTPA varía de 0.1 a 0.4 ppm, pero se obtuvo respuesta solamente en un suelo. Se requiere más investigación para comparar una escala de análisis de suelos como indicadores

de deficiencia de Cu para leguminosas forrajeras particularmente en suelos arenosos ácidos.

Fertilizantes de Cobre

El sulfato de Cu ha sido la fuente más comúnmente usada en experimentos de fertilizantes o en pastizales comerciales. El Cloruro de Cu ha sido usado en experimentos donde el sulfato es también un tratamiento. Las tasas recomendadas son 2 kg Cu/ha (Teitzel y Bruce 1972c, Cook 1978a). Esto puede ser suplido con 8 kg/ha de sulfato de cobre. La forma más conveniente de aplicar Cu a los pastizales es con una aplicación al voleo de superfosfato fortificado con Cu. Esto está disponible comercialmente como una mezcla de superfosfato y sulfato de cobre conteniendo 0,9% Cu. Gilkes y Sadlier (1978) mostró que ésta era una fuente disponible de Cu a pesar de la reacción que ocurre entre el sulfato de cobre y el superfosfato después de la mezcla.

Wentholt (datos sin publicar) experimentó con tasas de sulfato de cobre en lotononis y encontró mayores rendimientos con 2,2 y 0,55 kg Cu/ha que con 0,14 kg Cu/ha. En la mayoría de las cosechas, 2,2 kg fue mejor que 0,55 kg. Teitzel (1969) encontró que tasas por encima de 2,8 kg Cu/ha no fueron requeridas para Stylo Schofield. Winter y Jones (1977) encontraron que una mezcla de 1,25 kg Cu/ha y 1,13 kg Zn/ha dieron máximos rendimientos de Stylo Cook en cada uno de los dos años en un suelo deficiente en ambos, Cu y Zn. El uso de mezclas de sulfato de cobre y zinc significa que los resultados de Winter y Jones no son concluyentes respecto a la tasa de Cu, pero tomadas juntas, las tres referencias citadas anteriormente soportan la recomendación general de 2 kg Cu/ha.

El valor residual del Cu en el suelo no se entiende completamente pero parece que es considerable. Nuevas aplicaciones de Cu por Bryan y Evans (1971) seis y 11 años después de una aplicación inicial de 2 kg Cu/ha no dieron una respuesta en rendimientos en suelo deficiente en Cu. Sin embargo, Teitzel y Bruce (1973), midieron una respuesta en el invernadero con un suelo arenoso que había sido fertilizado previamente con 14 kg Cu/ha para caña de azúcar cinco años.

Las recomendaciones prevalecientes en Queensland son volver a aplicar

Cu después de 4 a 8 años (Bruce 1973, Teitzel y colaboradores 1978).

Diferencias entre especies

Andrew y Thorne (1962) mostraron que las leguminosas tropicales difieren en su tolerancia a deficiencia de Cu. Considerando sus resultados, junto con aquellos de Andrew y Bryan (1955, 1958), Walker y colaboradores (en prensa) y Wentholt (sin publicar) se han hecho los grupos siguientes:

Las que más responden: especies de Stylosantes, lotononis
Intermedias : Siratro, Centro, Indigofera spicata
Las que menos responden: Desmodium Hoja de Plata (Desmodium uncinatum)

Z I N C

Ocurrencia de deficiencia de Zn

Así como para Mo y Cu, el primer caso de deficiencia en pastizales en el norte de Australia se obtuvo con leguminosas templadas (Andrew y Bryan 1955, 1958). Respuestas subsecuentes a Zn con leguminosas tropicales en experimentos de campo se presentan en el Cuadro 2. Todos los suelos en el Cuadro 2 son arenosos y ácidos. Esto probablemente explica porque las especies de Stylosanthes son plantas indicadoras en todos menos en un caso. Considerando las respuestas en ensayos de macetas (Andrew y Bryan 1971, 1973, Jones 1973, Webb 1975b, Isbell y colaboradores 1976) añaden frijol "phasey" a la lista de especies y un suelo gley húmico y rojo neutral duplex a la lista de suelos. Ninguna tierra estructurada ha sido encontrada deficiente.

La mayoría de los experimentos de campo en la lista fueron terminados después de un año. Hall (comunicación personal) encontró que en dos experimentos (Cuadro 2) una fuerte respuesta a Zn ocurrió en la primera estación (o primera estación efectiva) después de la siembra, pero no en la segunda o tercera estación. El único otro ensayo en el Cuadro 2 que fue conducido por más de un año fue el de Winter y Jones (1977). Ellos midieron respuestas en cada uno de los dos años a una mezcla de sulfatos de Cu y Zn, pero el análisis de plantas sugiere que ambos elementos estaban aún deficientes durante el segundo año.

Mientras todos los suelos en el Cuadro 2 son ácidos, hay grandes regiones de suelos arcillosos alcalinos en el norte de Australia algunos de los cuales han mostrado ser bajos en Zn (Duncan 1967, Webb 1977). A falta de pastizales de leguminosas bien adaptadas a estos suelos (Cameron 1975), se ha realizado muy poco trabajo sobre nutrición de leguminosas en estos suelos. Se conocen algunas respuestas con soya perenne (Glycine max).

Zinc en plantas

Los síntomas de deficiencia de Zn en Desmodium intortum (cv, Hoja verde), Siratro, lotononis y soya perenne han sido descritos por Andrew y Pieters (1972a, 1972b, 1976a, 1976b) mientras que Jones y Clay (1976) describieron los síntomas para Stylo townsville. Andres y Pieters también enfatizaron la complejidad de la nutrición del Zn y advirtieron que el uso de análisis de plantas en el diagnóstico de deficiencia de Zn requiere una interpretación cuidadosa. Ciertos autores han registrado concentraciones de Zn en las leguminosas en sus experimentos y estas cifras se presentan en el Cuadro 3. Los datos no son suficientes para alcanzar conclusiones firmes pero si sugieren que menos de 20 ppm Zn es un indicador razonable de deficiencia en las plantas enumeradas.

Zinc en suelos

En los suelos superficiales de Queensland analizados por Oertel y Giles (1963) la mayoría tienen contenidos totales de Zn de menos de 100 ppm pero hubo una distribución uniforme de suelos en la escala 0 a 100 ppm. Esto en contraste con sus resultados de Cu, los cuales mostraron una ocurrencia más frecuente en suelos con contenidos menores de 20 ppm. Las tierras rojas y varios suelos podzólicos tuvieron los mas bajos contenidos. Esto está de acuerdo con los datos presentados por Stephens y Donald (1958) para el sur de Australia donde los podzoles y suelos podzólicos tuvieron los promedios menores del grupo.

Los contenidos totales de Zn del suelo tomados de varios autores se presentan en el Cuadro 4. En cuanto a los datos de Cu la mayoría de los valores son bajos y este análisis puede ser de valor diagnóstico. McKenzie (1966) usó una combinación de Zn total en el suelo y pH para separar suelos deficientes y suficientes e.j. para suelos de pH 6,5, 5 ppm Zn aproximadamente fue un valor crítico.

Un análisis de suelo con DPTA está siendo utilizado para Zn (sección en Cu) pero no hay interpretaciones basadas en el campo, Cox y Kamprath (1972) sugieren 0.5 ppm Zn como una guía general para este análisis. Verall (datos sin publicar) estudió 15 suelos ácidos en el invernadero y no encontró respuesta significativa con el frijol "phasey" al Zn cuando este elemento extraído con DPTA excedió 2 ppm. Webb (1975b) midió respuesta del Stylo townsville al Zn en 6 de 9 suelos arenosos ácidos que fluctuaban en niveles extraídos con DPTA de 0.1 a 0.4 ppm Zn, pero el extractante no distinguió entre los suelos que respondían y los que no lo hacían.

Fertilizantes de Zn

La fuente más ampliamente usada de Zn ha sido el sulfato de zinc en experimentos de fertilizantes pero el óxido de zinc y el cloruro de zinc han sido usados algunas veces. La tasa de aplicación recomendada para pastizales es aproximadamente 1.8 kg Zn/ha, lo cual es convenientemente suministrada con 8 kg de sulfato de zinc/ha (Teitzel y Bruce 1972c, Cook 1978a). Winter y Jones (1977) encontraron que una mezcla de 1.13 kg Zn/ha y 1.25 kg Cu/ha dieron máximos rendimientos de Stylo Cook en un suelo deficiente en ambos Zn y Cu. Comercialmente el Zn es aplicado en general como una mezcla de superfosfato con sulfato de zinc. En Queensland una mezcla de superfosfato y elementos menores que contiene 0.8% Zn, 1.2% Cu y 0.03% Mo es vendida comercialmente.

Muy poca experimentación ha sido realizada sobre el valor residual del Zn en el suelo pero como en el caso del Cu, se piensa que dura un tiempo considerable y las nuevas aplicaciones se recomiendan después de 4 a 8 años (Bruce 1973, Teitzel y colaboradores 1978). Bryan y Evans (1971) no encontraron respuesta a aplicaciones adicionales de Zn 6 y 11 años después de una aplicación inicial de 1.8 kg Zn/ha en Beerwah al sur de Queensland.

Diferencia entre especies

No se ha realizado una comparación directa de la capacidad de respuesta de las leguminosas tropicales al Zn. Considerando los resultados de Andrew y Bryan (1958), Rusell (1966) y Crack (1971) los dos grupos siguientes se han formado:

- Los que más responden : especies de Stylosanthes, frijol "phasey",
(Pueraria phaseoloides)
Los que menos responden : Desmodium intortum cv. Hoja verde

C O B A L T O

No se ha registrado ninguna respuesta a Co en leguminosas tropicales en Australia aunque el trébol subterráneo se conoce que responde en algunos suelos del sur de Australia (Powrie 1960). Concentraciones totales bajas en el suelo fueron encontradas por Bryan y colaboradores (1960) en un suelo laterítico podzólico (0.03 a 0.05 ppm Co) y en un suelo bajo gley húmico (0.09 a 0.10 ppm Co) en las tierras bajas costeras del sur de Queensland pero no se conoce si el contenido total de Co en el suelo es o no es un índice de la disponibilidad de Co para las plantas. El Desmodium Hoja de Plata que crece en estos suelos contiene 0.06 a 0.09 ppm Co, pero no ha habido evidencia de deficiencias de este elemento en animales en pastoreo y no ha habido respuesta a terapia de Co con carneros pastoreando en estos suelos (Bryan y colaboradores 1960, Bryan y Evans 1971). En otros lugares de las tierras bajas de Queensland, Norton y Hales (1976) han registrado deficiencias en ovejas lactantes y sus crías pastoreando en Pangola (Digitaria decumbens).

La única respuesta a terapia de Co en ganado bovino es la registrada para novillos de 2 años pastoreando un pastizal de Stylo Schofield en un suelo amarillo en el norte de Queensland (Winter y colaboradores 1977). Isbell y colaboradores (1976) llamaron la atención sobre la baja concentración de Co en esos suelos amarillos (4 a 5 ppm Co) mientras que Winter y Jones (1977) registraron concentraciones muy bajas de Co en Stylo Cook sin fertilizar (0.015 a 0.003 ppm en años sucesivos) que crecía en esos suelos. Cambios estacionales en la concentración de Co en Stylo Schofield son presentados por Winter y colaboradores (1977).

Poco se conoce acerca del estado de Co en otros suelos del norte de Australia o de la capacidad de las leguminosas tropicales para acumular Co en sus tejidos. En los experimentos de Winter y Jones (1977) las concentraciones de Co en Stylo Cook aumentaron con tasas de Co aplicadas pero las concentraciones fueron aún bajas desde el punto de vista de nutrición animal. La recolección de información de este tipo está en desventaja por la dificultad en

analizar Co pero sería relevante para la nutrición animal.

M A N G A N E S O

Aunque Mn ha sido incluido como un tratamiento en evaluar el estado de nutrimentos de los suelos en las regiones tropicales y subtropicales de Australia no se han encontrado deficiencias. Isbell y colaboradores (1976) llamaron la atención sobre el bajo contenido total de Mn del suelo (12 a 20 ppm Mn) en algunos suelos amarillos y rojos en el norte de Queensland pero una deficiencia no fue confirmada por Winter y Jones (1977) en experimentos subsiguientes de campo. Sin embargo, ellos si encontraron que el Stylo Cook que crece en ausencia de Mn contenía bajas concentraciones (12 a 21 ppm Mn).

La toxicidad de Mn es conocida en algunos suelos del norte de Australia (Fergus 1954) particularmente donde se han usado altas tasas de fertilizantes acidificadores (Siman y colaboradores 1971). Andrew y Hegarty (1969) encontraron que las leguminosas tropicales como un grupo fueron mucho más afectadas por el exceso de Mn que las leguminosas de zonas templadas. Ellos encontraron que centro, Stylo townsville y lotononis fueron relativamente tolerantes a altos niveles de Mn; fríjol "phasey", leucaena (Leucaena leucocephala) y Desmodium Hoja de Plata fueron intermedios en cuanto a tolerancia y soya perenne y siratro muchos menos tolerantes. También se presentan las concentraciones límites de toxicidad de Mn en las partes aéreas de las plantas. En su trabajo Andrew y Pieters (1970) describen los síntomas de deficiencia de Mn en todas las especies de leguminosas tropicales mencionadas arriba, excepto leucaena.

Ejemplos de toxicidad de Mn en el campo han sido dados por Diatloff y Luck (1972) con soya perenne y desmodium Hoja verde y por Philpotts (1975) con soya perenne y siratro. No hay información publicada relacionando toxicidad de Mn en leguminosas tropicales con análisis de suelos para manganeso.

FUTURAS INVESTIGACIONES

Técnicas

El número de ensayos en macetas que han sido conducidos excede en mucho al número de experimentos de campo. Las técnicas de cultivo en macetas parecen

ser mas sensitivas que la experimentación de campo en detectar deficiencia de Mo pero da resultados similares para Cu y Zn. Como la confirmación de las respuestas en macetas es requerida en el campo, el mejor uso de los ensayos en macetas parece ser en las investigaciones regionales de caracterización de fertilidad de suelos donde un gran número de suelos pueden ser evaluados en el invernadero y sus respuestas pueden ser seguidas con experimentos de campo en unos pocos sitios representativos. Otra aplicación en áreas de desarrollo de pastos podría ser re-evaluar suelos previamente caracterizados y seleccionados (o en comparar con suelos vírgenes y desarrollados) para comprobar la aparición de nuevas deficiencias previamente corregidas. Cualquier respuesta necesita confirmación en el campo pero la técnica de macetas tiene la ventaja de permitir que un gran número de sitios sean evaluados bajo condiciones comparables con nutrición como el único factor limitante. Para estos experimentos el suelo debería ser recolectado de tantos sitios como fuese práctico en área fertilizada para disminuir una distribución desigual de nutrientes en el campo y entonces tamizados y puestos en las macetas con un mínimo de secado y almacenamiento para prevenir liberación de nutrimentos particularmente N, en vista de su efecto en los requerimientos de Mo de las leguminosas.

En los experimentos de campo hay ventajas en seguir las respuestas más allá de la primera estación de crecimiento. Los datos recolectados deberían incluir: descripción y clasificación completas de suelos; análisis de fertilidad, incluyendo algunas determinaciones en el perfil (pH, conductividad) y análisis de nitrato cuando se evalúe el Mo; análisis de plantas; y alguna indicación de la profundidad de las raíces.

Mientras que la distribución de elementos menores en mezclas de fertilizantes queda por resolver por parte de los fabricantes, parece deseable evitar el uso de mezclas en experimentación, o al menos, solamente deben usarse muestras bien mezcladas cuya composición haya sido comprobada por análisis.

Diagnóstico

Para cada uno de los elementos menores hay necesidad de mayor investigación básica en cuanto a la química de suelos del Norte de Australia. Esto

es necesario para un mejor entendimiento de la disponibilidad y valor residual y también para proveer un principio unificador entre los suelos deficientes. Sin duda tal investigación ha sido restringida por la dificultad en analizar estos elementos, particularmente Mo y Co, pero algunas técnicas analíticas mejoradas están ahora disponibles (Little y Kerridge 1978).

Las interpretaciones basadas en experimentos de campo se requieren para análisis de elementos menores extraíbles. Ninguno de los análisis comunmente usados puede ser propiamente interpretado, ni han sido evaluados procedimientos alternativos. La adsorción de Mo por los suelos merece más estudio, probablemente junto con el Mo extraíble. El uso de diagnóstico de análisis de Cu total y Zn también necesita ser evaluado.

Al presente, el análisis de planta es solamente una guía general para deficiencia y se requiere algún nuevo enfoque. El análisis de semillas podría ser recompensable así como el análisis de nódulos para el Mo.

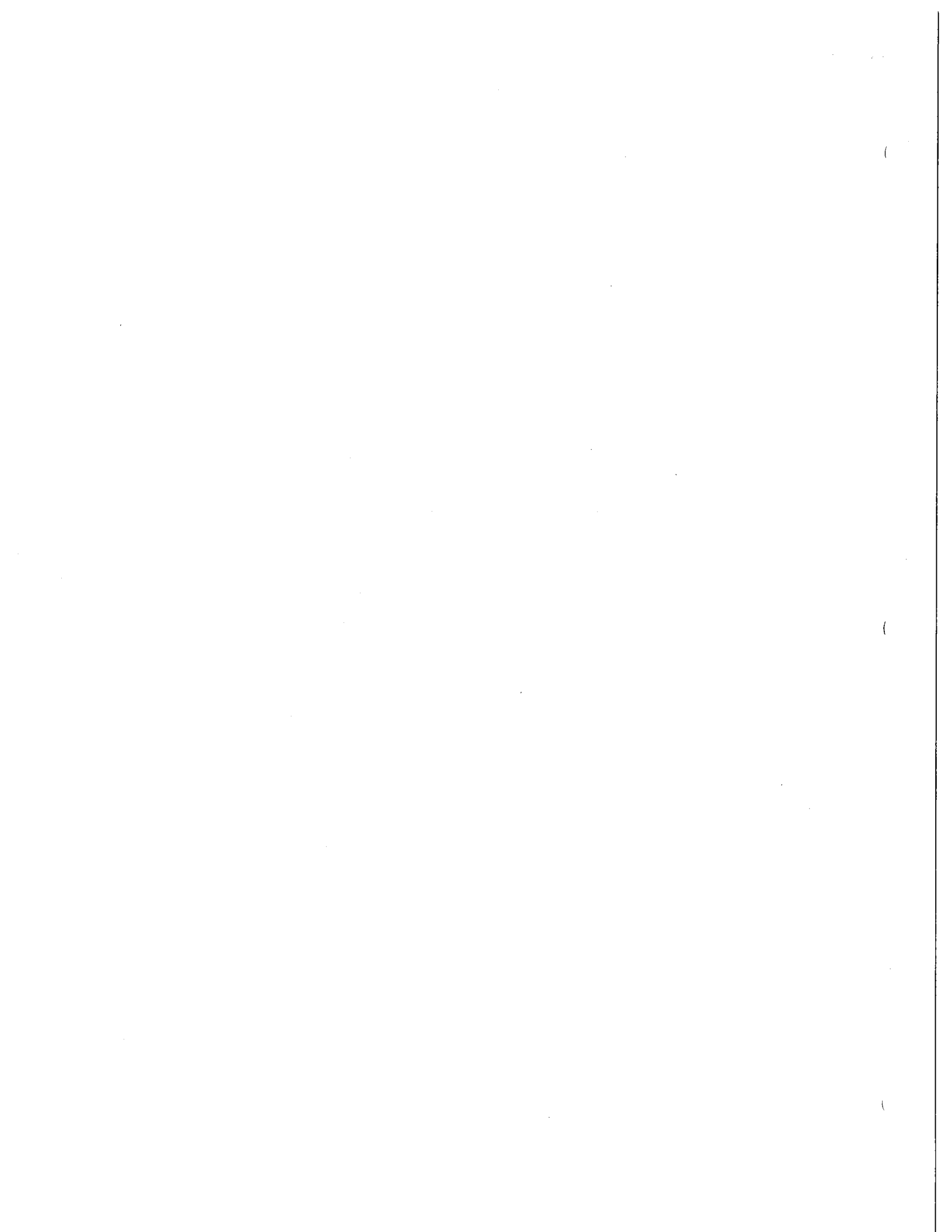
Una filosofía expresada a veces con respecto a la aplicación de elementos menores es que el diagnóstico preciso de los requerimientos nutricionales no es necesario, ya que los costos adicionales son pequeños y el uso puede ser considerado como una "medida de seguridad". El precio actual de los fertilizantes no apoya esta filosofía.

El superfosfato molibdenizado cuesta aproximadamente 7 a 20% más que el superfosfato ordinario, dependiendo del contenido de Mo. Una aplicación de 100 g Mo/ha añade aproximadamente 10% al costo del fertilizante aplicado en 250 kg/ha de superfosfato. Otra consideración es que el uso excesivo de Mo causa problemas de salud animal. El superfosfato fortificado con Cu cuesta 50% más que el superfosfato ordinario, mientras que la adición de Cu, Zn y Mo casi duplica el costo. La filosofía de "seguridad" podría ser aceptable para fertilización de establecimiento pero es extravagante y potencialmente dañina para aplicaciones regulares de fertilizantes.

REFERENCES

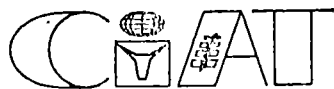
- ANDERSON, A. J. (1956a)—Molybdenum as a fertilizer. *Advances in Agronomy*, 8: 163-202.
- ANDERSON, A. J. (1956b)—Molybdenum deficiencies in legumes in Australia. *Soil Science*, 81: 173-258.
- ANDERSON, A. J., and ARNOTT, K. H. (1953)—Fertilizer studies on basaltic red loam soil from the Lismore district, New South Wales. *Australian Journal of Agricultural Research*, 4: 29-43.
- ANDREW, C. S. (1963)—Copper deficiency symptoms of some tropical and temperate pasture legumes. *Australian Journal of Agricultural Research*, 14: 654-59.
- ANDREW, C. S., and BRYAN, W. W. (1955)—Pasture studies on the coastal lowlands of subtropical Queensland. I. Introduction and initial plant nutrient studies. *Australian Journal of Agricultural Research*, 6: 265-90.
- ANDREW, C. S., and BRYAN, W. W. (1958)—Pasture studies on the coastal lowlands of subtropical Queensland III. The nutrient requirements and potentialities of *Desmodium uncinatum* and white clover on a lateritic podzolic soil. *Australian Journal of Agricultural Research*, 9: 267-85.
- ANDREW, C. S., and HEGARTY, M. P. (1959)—Comparative responses to manganese excess of eight tropical and four temperate pasture legume species. *Australian Journal of Agricultural Research*, 20: 687-96.
- ANDREW, C. S., and PETERS, W. H. J. (1970)—Manganese toxicity symptoms of one temperate and seven tropical pasture legumes. C.S.I.R.O., Australia, Division of Tropical Pastures, Technical Paper No. 4.
- ANDREW, C. S., and PIETERS, W. H. J. (1972a)—Foliar symptoms of mineral disorders in *Desmodium intortum*. C.S.I.R.O., Australia, Division of Tropical Pastures, Technical Paper No. 10.
- ANDREW, C. S., and PIETERS, W. H. J. (1972b)—Foliar symptoms of mineral disorders in *Phaseolus atropurpureus*. C.S.I.R.O., Australia, Division of Tropical Pastures, Technical Paper No. 11.
- ANDREW, C. S., and PETERS, W. H. J. (1976a)—Foliar symptoms of mineral disorders in *Lotononis bainesii*. C.S.I.R.O., Australia, Division of Tropical Agronomy, Technical Paper No. 17.
- ANDREW, C. S., and PETERS, W. H. J. (1976b)—Foliar symptoms of mineral disorders in *Glycine wightii*. C.S.I.R.O., Australia, Division of Tropical Agronomy, Technical Paper No. 18.
- ANNING, P. (1977)—A preliminary field assessment of the nutrient status of a red earth on Kabinca Station, Cape York Peninsula. Queensland Department of Primary Industries, Agriculture Branch Project Report No. P-77.
- BARROW, N. J. (1978)—Inorganic reactions of phosphorus, sulphur, and molybdenum in soil. Proceeding of Workshop on Mineral Nutrition of Tropical Legumes on Acid Tropical Soils, Brisbane, 1978 (in press).
- BARROW, N. J., and SPENCER, K. (1971)—Factors in the molybdenum and phosphorus status of soils on the Dorrigo Plateau of New South Wales. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 11: 670-76.
- BISHOP, H. G. (1974)—Pasture investigations in the sandy forest country of north-west Queensland. I. Nutritional Requirements. *Queensland Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 31: 329-36.
- BRUCE, R. C. (1973)—Fertilizer recommendations for pasture establishment and maintenance. In "Developing a property in the Southern Wallum", Department of Primary Industries, Queensland, mimeographed report.
- BRYAN, W. W. (1973)—A review of research findings concerned with pastoral development on the Wallum of south-eastern Queensland. *Tropical Grasslands*, 7: 175-94.
- BRYAN, W. W., and EVANS, T. K. (1971)—Grazing trials on the Wallum of south-eastern Queensland. 3. A nursery grazed by sheep. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 11: 633-39.
- BRYAN, W. W., THORNE, Peggy M., and ANDREW, C. S. (1960)—Cobalt status of the Wallum. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, 26: 273-75.
- CAMERON, D. G. (1975)—Regional pasture development and associated problems. III Queensland. *Tropical Grasslands*, 9: 93-100.
- CASSIDY, G. J. (1957)—Pasture improvement on the Mary Valley alluvial and coastal hillside soils. *Queensland Agricultural Journal*, 83: 297-311.
- CASSIDY, G. J. (1967)—Pastures that help dairymen to succeed. *Queensland Agricultural Journal*, 93: 650-69.
- COOK, B. G. (1978a)—Pastures for the Gympie district. Part 2. Pasture species. *Queensland Agricultural Journal*, 104: 162-73.
- COOK, B. G. (1978b)—Pastures for the Gympie district. Part 3. *Queensland Agricultural Journal*, 104: 226-31.
- COX, F. R., and KAMRATH, E. J. (1972)—Micronutrient soil tests. In "Micronutrients in Agriculture", Proceedings of a symposium held at Muscle Shoals, Alabama, April 20-22, 1971. (Soil Science Society of America, Madison, Wisconsin).
- CRACK, B. J. (1971)—Studies on some neutral red duplex soils (Dr 2.12) in north-eastern Queensland. 2. Glasshouse assessment of plant nutrient status. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 11: 336-42.
- DIATLOFF, A., and LUCK, P. E. (1972)—The effects of the interactions between seed inoculation, plugging and fertilizer on growth and nodulation of *desmodium* and glycine on two soils in S.E. Queensland. *Tropical Grasslands* 6: 33-38.
- DICK, A. T. (1956)—Molybdenum in animal nutrition. *Soil Science*, 81: 229-36.
- DOUGLAS, N. J. (1962a)—Fertilizers promote legume growth at Cooran. *Queensland Agricultural Journal*, 88: 133-35.
- DOUGLAS, N. J. (1962b)—Molybdenum and super improve Nambour clover. *Queensland Agricultural Journal*, 88: 83-85.
- DOUGLAS, N. J., and LUCK, P. E. (1964)—Farmer's guide to tropical pastures in S.E. Queensland. *Queensland Agricultural Journal*, 90: 583-94.
- DUNCAN, O. W. (1967)—Correction of zinc deficiency in maize on the Darling Downs, Queensland. *Queensland Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 24: 293-99.
- FOILETT, R. H., and LINDSAY, W. L. (1971)—Changes in DTPA extractable zinc, iron, manganese, copper in soils following fertilization. *Soil Science Society of America Proceedings*, 35: 600-02.
- FERGUS, I. F. (1954)—Manganese toxicity in an acid soil. *Queensland Journal of Agricultural Science*, 11: 15-27.
- GARTNER, R. J. W., YOUNG, J. G., and PEPPER, Patricia M. (1968)—Hepatic copper concentration of steers grazing pastures on developed wet heath land in south-eastern Queensland. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 8: 679-82.
- GILKES, R. J., and SADLER, S. B. (1978)—The availability to wheat of copper from various sources including copper superphosphate. *Australian Journal of Soil Research*, 16: 113-20.
- GRIGG, J. L. (1953)—Determination of available molybdenum in soils. *New Zealand Journal of Science and Technology*, 34A: 495-14.
- HALL, R. L. (1970)—Pasture development in the spear grass region at Westwood in the Fitzroy Basin. *Tropical Grasslands*, 4: 77-84.
- HAVILAH, E. J., and MEARS, P. T. (1968)—Plant nutrition research—beef cattle pastures of coastal northern N.S.W. *Tropical Grasslands*, 2: 84-91.
- ISELL, R. F., JONES, R. K., and GILLMAN, G. P. (1970)—Plant nutrition studies on some yellow and red earth soils in northern Cape York peninsula. I. Soils and their nutrient status. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 16: 532-41.
- ISELL, R. F., and SMITH, G. McL. (1976)—Some properties of red, yellow, and grey massive earths in north Queensland C.S.I.R.O., Australia, Division of Soils, Technical Paper No. 30.
- JENSEN, H. L. (1948)—Nitrogen fixation in Leguminous plants. VII. The nitrogen fixing activity of root nodule tissue in *Medicago* and *Trifolium*. *Proceedings of the Linnean Society of New South Wales*, 72: 265-83.
- JENSEN, H. L., and BETTY, R. C. (1943)—Nitrogen fixation in leguminous plants. III. Importance of molybdenum in symbiotic nitrogen fixation. *Proceedings of the Linnean Society of New South Wales*, 68: 1-8.
- JOHANSEN, C., KERRIDGE, P. C., LUCK, P. E., COOK, B. G., JONES, R. K. F., and OSTROWSKI, H. (1977)—The residual effect of molybdenum fertilizer on growth of tropical pasture legumes in a sub-tropical environment. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 17: 961-68.
- JONES, R. K. (1973)—Studies on some deep sandy soils in Cape York Peninsula, North Queensland. 2. Plant nutrient status. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 13: 89-97.
- JONES, R. K. (1974)—A study of the phosphorus responses of a wide range of accessions from the genus *Stylosanthes*. *Australian Journal of Agricultural Research*, 25: 847-62.
- JONES, R. K., and CLAY, H. J. (1976)—Foliar symptoms of nutrient disorders in Townsville stylo (*Stylosanthes humilis*) C.S.I.R.O. Australia, Division of Tropical Agronomy, Technical Paper No. 19.
- JONES, R. K., and CRACK, B. J. (1970)—Studies on some sodic soils in north-eastern Queensland. 2. Glasshouse assessment of plant nutrient status. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 10: 342-49.

- KERRIDGE, P. C. (1972)—Nutrition of dairy pastures in north Queensland. C.S.I.R.O., Australia, Division of Tropical Pastures, Annual Report 1971-72: 41.
- KERRIDGE, P. C., ANDREW, C. S., and MURPHY, G. G. (1972)—Plant nutrient status of soils of the Atherton Tableland, North Queensland. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 12: 618-27.
- KERRIDGE, P. C., COON, B. G., and EVERETT, M. L. (1973)—Application of molybdenum trioxide in the seed pellet for subtropical pasture legumes. *Tropical Grasslands*, 7: 229-32.
- KERRIDGE, P. C., and EVERETT, M. L. (1975)—Nutrient studies on some soils from Eungella and East Funnel Creek, Mackay hinterland, Queensland. *Tropical Grasslands*, 9: 219-28.
- KERRIDGE, P. C., and WHITE, R. E. (1977)—The residual effect of molybdenum fertilizer on a krasnozem on basalt at Maleny, south east Queensland. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 17: 669-73.
- LITTLE, I. P., and KERRIDGE, P. C. (1978)—A laboratory assessment of the molybdenum status of nine Queensland soils. *Soil Science*, 125: 102-6.
- LOSERAGAN, J. F. (1970)—The contribution of research in plant nutrition to the development of Australian pastures. Proceedings of the XI International Grassland Congress, Surfers Paradise, Australia: A13-A22.
- LUCK, P. E., and DOUGLAS, N. J. (1966)—Dairy pasture research and development in the near North Coast centred on Coeroy, Queensland. The Tropical Grassland Society of Australia, Proceedings No. 6, 35-50.
- McKENZIE, K. M. (1966)—The relation of laboratory analyses for copper, zinc, and molybdenum in some Victorian soils to the results of field trials. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 6: 170-74.
- McLACHLAN, K. D. (1953)—Phosphorus, sulphur and molybdenum deficiencies on some soils of the Northern Territory. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, 19: 197-99.
- McLACHLAN, K. D. (1955)—Phosphorus, sulphur, and molybdenum deficiencies in soils from eastern Australia in relation to nutrient supply and some characteristics of soil and climate. *Australian Journal of Agricultural Research*, 6: 673-81.
- MANNETTE, L. C., SHAW, N. H., and ELLIOT, T. W. (1963)—The residual effect of molybdenum fertilizer on improved pastures on a prairie-like soil in subtropical Queensland. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 3: 20-25.
- MEAGHER, W. R., JOHNSON, C. M., and STOUT, P. R. (1952)—Molybdenum requirement of leguminous plants supplied with fixed nitrogen. *Plant Physiology*, 27: 223-30.
- MEARS, P. T., and BARKER, B. (1970)—Response of *Glycine wightii* to molybdenized superphosphate on a krasnozem. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 10: 415-25.
- NOKTON, B. W., and HALLS, J. W. (1970)—A response of sheep to cobalt supplementation in south-eastern Queensland. *Proceedings of the Australian Society of Animal Production*, 11: 393-96.
- OERTL, A. C., and GILES, J. B. (1963)—Trace element contents of some Queensland soils. *Australian Journal of Soil Research*, 1: 215-22.
- OSTROWSKI, H. (1969)—Tropical pastures for south-east Queensland. *Queensland Agricultural Journal*, 95: 508-16.
- OSTROWSKI, H. (1970)—Molybdenized superphosphate requirement for pasture establishment on red forest soils in subtropical Queensland. Proceedings of the XI International Grassland Congress, Surfers Paradise, Australia: 121-26.
- OSTROWSKI, H., DIATOFF, A., and WILLIAMS, H. R. (1978)—Molybdenum responses of Siratro (*Macroptilium atropurpureum*) on a red volcanic soil in coastal south east Queensland. *Tropical Grasslands*, 12: 75-79.
- PHILPOTTS, Helen (1975)—The effect of lime and *Kiritrium* strain on the nodulation of *Glycine wightii* and *Macroptilium atropurpureum* on acid soils. *Tropical Grasslands*, 9: 37-44.
- POWELL, J. K. (1960)—A field response by subterranean clover to cobalt fertilizer. *Australian Journal of Science*, 23: 198-99.
- ROD, R., and JONES, R. J. (1966)—Soil fertility and pasture species investigations on soils derived from phylites in the North Devon Creek and Kin Kin areas. The Tropical Grassland Society of Australia, Proceedings No. 6, 13-22.
- RUSSELL, J. S. (1966)—Plant growth on a low calcium status sodic soil in a subtropical environment. I. Legume species-calcium carbonate, zinc, and other minor element interactions. *Australian Journal of Agricultural Research*, 17: 67-86.
- SHAW, N. H., GATES, C. T., and WILSON, J. R. (1966)—Growth and chemical composition of Townsville lucerne (*Stylosanthes humilis*) 1. Dry matter yield and nitrogen content in response to superphosphate. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 6: 150-56.
- SIMAN, A., CRABOCK, F. W., NICHOLLS, P. J., and KIRTON, H. C. (1971)—Effects of calcium carbonate and ammonium sulphate on manganese toxicity in an acid soil. *Australian Journal of Agricultural Research*, 22: 201-11.
- SPENCER, K., and GOVAARS, A. G. (1974)—An assessment of the nutrient status of soils in northern East Gippsland. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 14: 85-92.
- STEPHENS, C. G., and DONALD, C. M. (1958)—Australian soils and their responses to fertilizers. *Advances in Agronomy*, 10: 167-256.
- SWAIN, F. G. (1950)—Responses to molybdenum three years after previous application on red basaltic soils on the Far North Coast of N.S.W. *Journal of the Australian Institute of Agricultural Science*, 25: 51-54.
- TEITZEL, J. K. (1969)—Responses to phosphorus, copper and potassium on a granite loam of the wet tropical coast of Queensland. *Tropical Grasslands*, 3: 43-8.
- TEITZEL, J. K., and BRUCE, R. C. (1971)—Fertility studies of pasture soils in the wet tropical coast of Queensland. 2. Granitic soils. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 11: 77-81.
- TEITZEL, J. K., and BRUCE, R. C. (1972a)—Fertility studies of pasture soils in the wet tropical coast of Queensland. 3. Basaltic soils. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 12: 49-54.
- TEITZEL, J. K., and BRUCE, R. C. (1972b)—Fertility studies of pasture soils in the wet tropical coast of Queensland. 4. Soils derived from metamorphic rocks. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 12: 251-87.
- TEITZEL, J. K., and BRUCE, R. C. (1972c)—Pasture fertilizers for the wet tropics. *Queensland Agricultural Journal*, 98: 15-23.
- TEITZEL, J. K., and BRUCE, R. C. (1973)—Fertility studies of pasture soils in the wet tropical coast of Queensland. 6. Soils derived from beach sand. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 13: 312-18.
- TEITZEL, J. K., STANDLEY, J., and WILSON, R. J. (1978)—Maintenance fertilizer strategies for wet tropics pastures. *Queensland Agricultural Journal*, 104: 126-30.
- TRUONG, N. V., ANDREW, C. S., and SHERMAN, P. J. (1967)—Responses by Siratro (*Phaseolus atropurpureus*) and white clover (*Trifolium repens*) to nutrients on sodic soils at Beaudesert, Queensland. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 7: 232-36.
- VINOGRADOVA, Kh., G. (1943)—Presence of molybdenum in Leguminosae. *Doklady Akademii Nauk S.S.S.R.* 40: 26-9.
- WALKER, B., KERRIDGE, P. C., and WEBB, A. A. (in press)—Soil fertility studies for pastures in the Mackay wet tropical coast of central Queensland. *Tropical Grasslands* (in press).
- WEBB, A. A. (1975a)—Studies on major soils of the Forsyth Granite. 2. Glasshouse nutrient assessment. *Queensland Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 32: 37-46.
- WEBB, A. A. (1975b)—Plant nutrient status of soils of the Mayvale Land System, north Queensland. *Queensland Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 32: 19-26.
- WEBB, A. A. (1977)—Studies on the palgaid clay soils (Ug 5.2) of the Highworth Land System in central Queensland. 2. Glasshouse assessment of plant nutrient status. *Queensland Journal of Agricultural and Animal Sciences*, 34: 67-74.
- WILLIAMS, C. H., and ANDREW, C. S. (1970)—Mineral nutrition of pastures. In "Australian Grasslands". (Ed. R. M. Moore). Australian National University Press: Canberra.
- WINTER, W. H., and JONES, R. K. (1977)—Nutrient responses on a yellow earth soil in northern Cape York Peninsula. *Tropical Grasslands*, 11: 247-55.
- WINTER, W. H., SIBBERT, B. D., and KUCHEL, R. E. (1977)—Cobalt, phosphorus and copper deficiency in cattle on improved pastures in northern Cape York Peninsula. *Australian Journal of Experimental Agriculture and Animal Husbandry*, 17: 10-15.



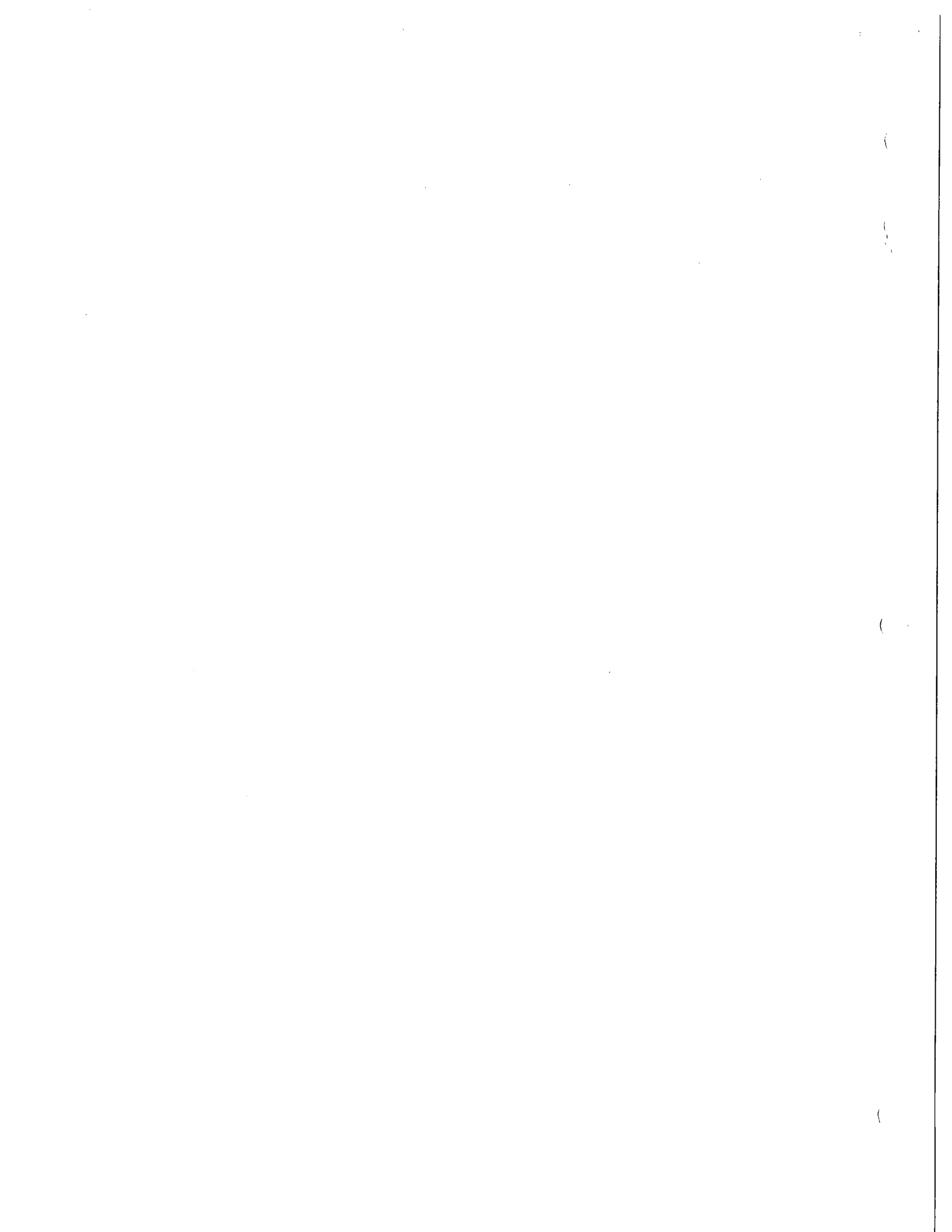
RESPUESTA DIFERENCIAL DE OCHO GRAMINEAS
FORRAJERAS A ESTRES DE AL Y P
EN UN OXISOL DE CARIMAGUA, COLOMBIA

JOSE G. SALINAS
GUIDO DELGADILLO



CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL

1980



RESPUESTA DIFERENCIAL DE OCHO GRAMINEAS FORRAJERAS A ESTRES DE
AL Y P EN UN OXISOL DE CARIMAGUA, COLOMBIA*

José G. Salinas y Guido Delgadillo**

RESUMEN

La toxicidad de Al y la deficiencia de P ocurren frecuentemente en los Oxisoles del trópico, limitando la productividad de especies forrajeras. La selección de especies tolerantes a dichas condiciones adversas debe considerarse como una alternativa para utilizar estas extensas áreas con mínimo uso de insumos. Se estudió la respuesta diferencial de ocho gramíneas forrajeras al estrés de Al y/o P en el suelo. El experimento fue establecido en 1977 en un Oxisol de Carimagua (Haplustox Típico, arcilloso, caolinítico, isohipertérmico). Para obtener una saturación de Al equivalente a 90, 85, 75 y menos de 20%, se aplicaron 0, 0,5, 1,0 y 5,0 ton cal/ha y para obtener 1,5, 3, 9 y >30 ppm de P disponible (Bray II) en el suelo, se aplicaron 0, 17, 117 y 277 kg de P/ha, como superfosfato triple. Los resultados indican que varias gramíneas forrajeras bajo condiciones minerales limitantes pueden sobrevivir y/o producir. Se consideró que solamente la habilidad de una gramínea forrajera para sobrevivir en suelos ácidos no tiene valor si la producción es baja y que la producción absoluta indica el potencial de una especie forrajera para producir en condiciones adversas. De aquí que rendimientos relativos y rendimientos absolutos fueron considerados como criterios

* Trabajo a presentarse en el VII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo, Heredia, Costa Rica, Junio 30-Julio 4, 1980

** CIAT, Programa de Pastos Tropicales, Apartado Aéreo 6713, Cali, Colombia.

útiles en la respuesta diferencial de estas gramíneas. Se estimó que una producción de materia seca que no excedió al 50% de su rendimiento máximo, es determinante de la condición de "supervivencia" o "producción relativa baja" (PRB). Cuando el rendimiento relativo estuvo entre 50 y 80% de ese máximo, se consideró a la planta en condición de "producción relativa media" (PRM) y finalmente, por encima del 80% del rendimiento máximo, en condición de "producción relativa alta" (PRA) bajo estrés de Al y/o P. El límite superior se fijó en 80%, debido a que en la mayoría de los casos por encima de este porcentaje, la tasa de incremento en producción de materia seca por unidad de insumo aplicado (cal y/o fósforo) fue relativamente baja y no significativa. Los resultados, con este criterio, muestran una respuesta diferencial de *Andropogon gayanus*, *Brachiaria humidicola*, *Brachiaria decumbens*, *Hyparrhenia rufa*, *Melinis minutiflora*, *Digitaria decumbens*, *Panicum maximum* y *Pennisetum purpureum*, a estrés de Al y/o P. La respuesta de varias gramíneas al encalado fue al primer incremento de cal (0,5 ton/ha), de donde se dedujo que la respuesta fue relativa a nutrición de calcio y que junto con el primer incremento de la fertilización fosforada (17 kg de P/ha) determinaron que varias gramíneas pasen a una condición de "producción relativa media" y "producción relativa alta".

INTRODUCCION

Una estrategia para la producción de ganado de carne en América tropical, es el desarrollo de una tecnología de producción de forrajes en suelos ácidos y de baja fertilidad natural (CIAT, 1978). De aquí, dos componentes de esta estrategia resaltan en la producción de pasturas y son, el factor suelo (suelo ácido e infértil) y el factor planta (germoplasma forrajero). El principio de esta estrategia es incorporar el factor planta como participante directo en el complejo de infertilidad de los suelos ácidos de América tropical. En muchos casos, la selección de especies forrajeras para suelos ácidos de baja fertilidad natural puede resultar más económica que modifi-

car la fertilidad del suelo ácido para establecer pasturas.

Respecto al factor suelo, durante los últimos años se ha enfatizado el estudio de la distribución geográfica y propiedades de los suelos en América tropical y un resultado de estos estudios es el mapa tentativo presentado por Sánchez y Cochrane (1979). Los Oxisoles y Ultisoles representan los órdenes más extensos, cubriendo el 56% de la superficie de América tropical en las zonas de tierras bajas (0-900 m) y zonas intermedias (900-1800 m). De esta manera, estas áreas constituyen un bloque extenso de tierra, siendo la mayoría potencialmente arable. A pesar de la favorable extensión, localización y topografía de estos suelos, el desarrollo agropecuario en estas áreas presenta ciertas limitaciones. Uno de los principales obstáculos para la producción de cultivos y/o pasturas es la baja fertilidad natural del suelo. La mayoría de los suelos del trópico americano presenta un "complejo de infertilidad", el cual identifica una deficiencia general de varios macro y micronutrientes, alta acidez y toxicidades de Al y/o Mn (Spain, 1976; Salinas, 1979a).

La toxicidad de Al es uno de los factores prominentes que limita el desarrollo agrícola en la mayoría de estos suelos. Altos niveles de saturación de Al reducen el crecimiento radicular inhibiendo su elongación y penetración en el suelo y consecuentemente, reduciendo los sitios de absorción de agua y nutrientes, así como también la utilización de éstos en el subsuelo (Salinas, 1979a; Gualdrón y Spain, 1979). En una segunda fase, el Al obstaculiza la translocación de varios nutrientes a la parte aérea, los cuales se manifiestan como deficiencias nutricionales principalmente de P, Ca y Mg (Heylar, 1978; Andrew y Vanden Berg, 1973; Salinas, 1978). Todos estos efectos de Al se reflejan en un descenso de la productividad de los cultivos. Otra importante limitación en Oxisoles y Ultisoles de América tropical, es la baja disponibilidad del P nativo para el establecimiento de pastos mejorados, de manera que cantidades considerables de P deben ser añadidas para satisfacer los requerimientos de las plantas (Fenster y León, 1979). Consecuentemente, esta situación causa se-

serias limitaciones agroeconómicas debido a los altos costos de fertilizantes fosforados.

Una alternativa para la producción de forrajes en los suelos ácidos e infértiles de América tropical es adaptar la planta a estas limitaciones. En efecto, a medida que progresa la investigación sobre gramíneas y leguminosas forrajeras tropicales, es posible evaluar el grado de tolerancia de diferentes especies o ecotipos, con respecto a la toxicidad de Al y la baja disponibilidad de P en el suelo (CIAT, 1977; Spain, 1979).

Con referencia al factor planta, la evolución de las plantas forrajeras en el trópico ha sido en la mayoría de los casos el resultado de una adaptación natural al ecosistema y a la migración de especies a nuevos ambientes, en los cuales han sido sometidas a otro tipo de presiones, dando lugar a nuevas combinaciones de caracteres (Mott y Hutton, 1979). Las presiones de selección han sido aquellas impuestas principalmente por el clima, disponibilidad de nutrimentos en el suelo y competencia de otras especies vegetales y consecuentemente, creando una variabilidad considerable en el recursos genético forrajero del trópico. Schultze-Kraft y Giacometti (1979) señalan que, debido a la amplia variabilidad del material genético existente en el trópico, no se justifica en la actualidad un esfuerzo en la hibridación del material vegetal y por el contrario, debería aumentarse la variabilidad genética en aquellos géneros promisorios mediante la recolección de germoplasma nativo en regiones con suelos ácidos e infértiles, que *per se* estaría adaptado a esas condiciones adversas. Sin embargo, bajo condiciones externas adversas, el criterio de adaptación tiene la implicación importante en cuanto se refiere a la supervivencia del material vegetal por una parte, y al potencial de producción como forraje por otra. Además, la capacidad de subsistencia de la planta forrajera al pastoreo y al corte, así como también la calidad del forraje son aspectos muy importantes, ya que al final el producto a desarrollar es una planta para pastoreo. Una vez realizada la recolección del germoplasma forrajero, la caracterización y evalua

ción cuantitativa del potencial de producción bajo un rango de condiciones de elevada acidez (toxicidad de Al) y/o disponibilidad de nutrientes en el suelo, constituyen una etapa importante en el proceso de selección de especies forrajeras promisorias. De esta manera, un mejor conocimiento sobre la respuesta diferencial de especies forrajeras a las limitaciones de suelo mencionadas, puede proporcionar un significativo aporte en la utilización de extensas áreas de América tropical, lo cual puede determinar una menor inversión en fertilizantes y cal. Esto no implicaría necesariamente la eliminación total de fertilizantes y cal, pero si puede disminuir las tasas de aplicación necesarias para obtener un establecimiento adecuado de la pastura.

Los objetivos específicos de este trabajo fueron determinar la respuesta diferencial de gramíneas forrajeras tropicales a estrés de Al y P en el Oxisol de Carimagua, Colombia y evaluar un criterio para identificar la tolerancia a estrés de Al y/o P como una parte integral de un sistema de selección de especies forrajeras a condiciones adversas del suelo.

MATERIALES Y METODOS

El sitio experimental estuvo localizado en el Centro Nacional de Investigaciones Agropecuarias ICA-CIAT en Carimagua, Colombia. Este Centro se halla situado a 4°37' latitud Norte y 71,5° longitud Oeste, a una elevación de 175 m sobre el nivel del mar. El clima predominante caracteriza a una sabana hipertérmica estacional con una temperatura media de 26°C y una precipitación anual promedio de 2000 mm, correspondiendo el régimen lluvioso entre Abril y Noviembre, con una época seca de aproximadamente 4-5 meses (ICA-CIAT, 1979; Spain, 1979).

El suelo fue clasificado como un Haplustox Típico, arcilloso, caolinítico, isohiptérmico (CIAT, 1978). Muestras de este suelo fueron tomadas del área experimental previamente a su utilización

con los propósitos de una caracterización inicial, estudios de incubación de suelo-cal, y determinación de isoterma de fijación de P. Los análisis iniciales de suelo (Cuadro 1), indicaron una alta acidez, baja capacidad de cationes cambiabiles, alto porcentaje de saturación de Al y deficiencia en P disponible. Se consideró las condiciones edáficas de acidez e infertilidad adecuadas para evaluar la respuesta de especies forrajeras a la toxicidad de Al y baja disponibilidad de P.

El estudio de incubación del suelo con diferentes dosis de cal fue conducido siguiendo el procedimiento general desarrollado por Kamprath (1970). El propósito fue medir la neutralización de Al cambiabie para obtener una saturación de Al equivalente a 90, 85, 75 y menos de 20%, respectivamente. Las dosis de cal dolomítica empleadas fueron de 0, 0,5, 1,0 y 5,0 ton/ha, respectivamente; y que fueron seleccionadas por extrapolación directa de los estudios de incubación del suelo. La isoterma de fijación de P se determinó según el método de Fox y Kamprath (1970). De esta isoterma de fijación de P fueron seleccionadas las dosis de 0, 17, 117 y 277 kg de P/ha aplicadas como superfosfato triple, para obtener una concentración de <0,01, 0,02, 0,04 y 0,08 ppm de P en la solución del suelo, respectivamente.

El diseño experimental consistió en parcelas divididas en bloques al azar con tres repeticiones, teniendo como parcela principal a la interacción de cuatro niveles de cal (0, 0,5, 1,0 y 5,0 ton de cal/ha) y cuatro niveles de P (0, 17, 117 y 277 kg de P/ha), las subparcelas consistieron de 40 especies entre gramíneas y leguminosas forrajeras del trópico. El presente trabajo muestra sólo los resultados de las gramíneas que incluyeron a: *Panicum maximum* (Guinea común), *Digitaria decumbens* (Pangola), *Melinis minutiflora* (Gordura), *Hyparrhenia rufa* (Puntero), *Andropogon gayanus* (CIAT-621), *Brachiaria humidicola* (CIAT-682), *Brachiaria decumbens* (CIAT-606), y *Pennisetum purpureum* (pasto Elefante). El tamaño de la parcela principal fue de 20 x 30 m y el de la subparcela de 2,5 x 5 m.

El área experimental cubierta con vegetación natural de sabana fue inicialmente arada a 20 cm de profundidad y la cal, de acuerdo

con los tratamientos, fue aplicada al voleo e incorporada a la profundidad de 20 cm, un mes antes de la siembra. El fertilizante fosforado fue aplicado al voleo días antes de la siembra y con el propósito de evitar desorden nutricional no atribuible a cal y P, se aplicó al voleo una fertilización básica general de N, K, S, Zn, Cu, B y Mo. Luego de la aplicación de los fertilizantes, las subparcelas fueron surcadas a 0,50 m de distancia, correspondiendo cuatro surcos por subparcela. Las especies forrajeras fueron sembradas por semilla y vegetativamente en Agosto-Septiembre de 1977, con un período de establecimiento al primer corte de aproximadamente tres meses. Se realizaron un total de cuatro cortes hasta Febrero 1979 y los resultados presentados de producción de materia seca se refieren al promedio de cuatro cortes y que corresponde a un año del establecimiento de las gramíneas.

Los dos surcos centrales de las subparcelas menos dos metros de ambos extremos fueron cosechados a una altura de corte de acuerdo al tipo de crecimiento de las especies forrajeras, gramíneas erectas a 15 cm y gramíneas rastreras a 5 cm. La producción de materia seca fue basada en el peso seco obtenido del secado de submuestras a 65°C.

Muestras de suelo fueron tomadas en el área experimental después del cuarto corte en cada subparcela. Tres submuestras por subparcela fueron tomadas a la profundidad de 0-20 cm y mezcladas para una muestra compuesta. Las muestras fueron secadas al aire y preparadas para su análisis. Se determinó el pH en una suspensión suelo-agua de 1:1. La acidez intercambiable, Ca y Mg fueron extraídos con KCl 1N y la acidez intercambiable fue determinada por titulación, la cual fue considerada como Al intercambiable (Lin y Coleman, 1960). Calcio y Mg fueron determinados por absorción atómica (Salinas, 1979b). Fósforo disponible fue extraído con la solución Bray-II y potasio fue determinado en este extracto por absorción atómica (Salinas, 1979b).

RESULTADOS Y DISCUSION

Propiedades químicas del suelo

El Cuadro 1 resume las características edáficas del perfil del suelo de Carimagua. En términos de pH se observa que en los primeros 80 cm de profundidad, los valores de pH fluctúan entre 4,1 y 5,0, que es una condición ideal para una elevada solubilidad del Al (McLean, 1976) y por ende, llegar a niveles tóxicos para el crecimiento y desarrollo de muchas especies (Salinas, 1978). En efecto, el Al intercambiable se encuentra entre 1,0 y 3,6 meq/100g y que con el bajo contenido de bases intercambiables (Ca, Mg y K), la capacidad de intercambio catiónico efectiva es baja, fluctuando entre 1,4 y 4,2 meq/100g en los primeros 80 cm de profundidad. Estas características de acidez, se reflejan en la elevada saturación de Al que está por encima del 80%. Varios investigadores han mostrado una correlación significativa entre la saturación de Al y la respuesta de las plantas (Evans y Kamprath, 1970; Sartain y Kamprath, 1975; Salinas, 1978). En general, estos investigadores señalan que por encima del 60% saturación de Al, la mayoría de las especies presentan susceptibilidad a la toxicidad del elemento. Esto significa que, el Oxisol de Carimagua virtualmente tipifica a un suelo mineral ácido con nivel tóxico de Al en los primeros 80 cm de profundidad. Entre 80 y 160 cm existe una baja de la saturación de Al debido principalmente al aumento de Ca y Mg, cationes que llegan a neutralizar el aluminio intercambiable (Fig. 1). Esta situación sugiere un movimiento de Ca y Mg hacia los horizontes inferiores.

En relación a la disponibilidad de P se observa que la capa arable (0-20 cm) presenta un valor de 1,5 ppm de P Bray-II considerado como muy bajo. Prácticamente, por debajo de los 20 cm la cantidad de P presente puede ser considerada como trazas.

El Cuadro 2 resume los cambios de P disponible, pH, Al, Ca, Mg y K intercambiables, así como también los porcentajes de saturación de Al, Ca y Mg, en función de los tratamientos aplicados luego del cuarto

corte de las gramíneas forrajeras. Esta caracterización del suelo corresponde aproximadamente a 18 meses después de las aplicaciones de los tratamientos. Los niveles de cal dolomítica aplicados a los primeros 20 cm de profundidad, resultaron en diferencias significativas en pH, porcentajes de saturación de Al, Ca y Mg. La neutralización del Al estuvo en los rangos requeridos para observar la respuesta diferencial de las especies forrajeras. Sin embargo, es importante resaltar que la adición de fósforo por medio del superfosfato triple causó un aumento considerable en el calcio, debido al contenido de este elemento en el superfosfato triple. Este fertilizante con 45% de P_2O_5 contiene en promedio 31% de $CaCO_3$ equivalente (Mehring, 1961), lo que significa un aporte de 0,63 kg de Ca/kg de P. Teniendo en cuenta esta cantidad, los niveles de P aplicados en el experimento (0, 17, 117 y 277 kg de P/ha) aportaron 0, 11, 74 y 175 kg de Ca/ha, respectivamente. Estas cantidades equivalen a 0, 28, 185 y 428 kg de $CaCO_3$ eq/ha, lo cual influyó en la neutralización del Al cambiante y consecuentemente, en los porcentajes de saturación de Al y Ca a medida que aumentó el nivel de P (Cuadro 3). El porcentaje de saturación de Mg no fue afectado por el superfosfato triple al tener éste bajos contenidos del elemento y el cambio en Mg a cada nivel de cal no es sino un reflejo de la cal dolomítica empleada.

La Figura 2 muestra la relación entre el porcentaje de saturación de Al y los valores de pH del suelo obtenidos luego de 18 meses de aplicados los tratamientos de cal y P. La pendiente de la línea indica que los incrementos del porcentaje de saturación de Al afectan los cambios de pH en una forma bastante similar (disminución en 0,01 unidades de pH por cada unidad de aumento en saturación de Al). Además, la Figura 2 también ilustra el hecho de que alrededor de pH 5,5, la saturación del Al es prácticamente nula. Pearson (1975) concluye que, en general, los suelos ácidos minerales presentan una alta resistencia a los cambios de pH por encima de 5,5 y cualquier intento para encalar estos suelos a los valores convencionales de pH 6,5 a 7,0 no es aconsejable. Además, Kamprath (1972) indica que el encala-

miento de estos suelos para elevar el pH por encima de 6,0, neutralizaría mayormente el hidrógeno, grupos carboxílicos, hidróxidos de Al y Fe, los cuales esencialmente no corresponden a la acidez cambiante de estos suelos. Consecuentemente, los requerimientos de cal que consideren efectos directos y residuales deben ser basados en la neutralización del Al cambiante y no en el cambio del pH *per se*. Por supuesto, existen excepciones para condiciones específicas en la relación suelo-planta, debido a diferencias importantes en los requerimientos de cal entre especies y variedades (Salinas, 1978; Spain, 1976). El grado de tolerancia de especies y variedades puede ser expresado en términos del porcentaje de saturación de Al de la capacidad efectiva de cationes cambiables. Consecuentemente, viene a ser necesaria sólo la aplicación de cal en una cantidad suficiente como para reducir el porcentaje de saturación de Al a niveles que no afecten la producción. Con este criterio, fue desarrollada una ecuación para estimar los requerimientos de cal para compensar la tolerancia a Al de especies y variedades (Cochrane y colaboradores, 1980).

Los niveles de P aplicados al voleo mostraron diferencias significativas entre ellos, pero no al aumentar los niveles de cal, aunque se observa un ligero aumento en los niveles de 17 y 117 kg de P/ha al aumentar la aplicación de cal. Estos resultados concuerdan en cierta manera con los obtenidos por Woodruff y Kamprath (1965) y los publicados por Lathwell (1979), en el sentido de que el encalado aumenta la eficiencia del fertilizante fosforado a causa de una mayor disponibilidad de P. Sin embargo, el encalado sin la aplicación de P no aumentó la disponibilidad del P nativo tal como indica Lathwell (1979). Probablemente, esto se deba a una baja mineralización del P orgánico en este suelo, aun con las aplicaciones altas de cal.

Producción de materia seca

Dos medios externos, suelos ácidos y soluciones nutritivas, han sido empleados para determinar la respuesta diferencial de especies y

variedades a la toxicidad de Al y/o baja disponibilidad de P (Moore *et al.*, 1976; Rhue y Grogan, 1976; Salinas, 1978). Por otra parte, varios parámetros han sido utilizados para interpretar la respuesta diferencial de especies y variedades sometidas a condiciones de estrés de Al y/o P. Entre ellos se citan, la producción de grano y/o materia seca, longitud y/o peso radicular, tasas de crecimiento relativo de parte aérea y raíces, tasas de absorción y translocación de Al, P y otros nutrimentos. Todos estos parámetros utilizados en términos absolutos, relativos o sometidos a análisis de regresiones y correlaciones, así como también comparados con especies o variedades controles, han servido para identificar germoplasma tolerante a diversas condiciones adversas para el desarrollo vegetal (Tanaka y Hayakawa, 1974, 1975; Foy, 1974; Andrew *et al.*, 1973; Salinas, 1978). Sin embargo, de lo mencionado anteriormente, la definición del término "tolerante" presenta algunas limitaciones, debido principalmente a que en la actualidad no se sabe con exactitud lo que constituye la tolerancia a toxicidad de Al y/o baja disponibilidad de P en el medio externo.

Es reconocido el hecho de que algunas especies o variedades son más tolerantes que otras, pero no se conoce qué característica vegetal diferencia entre plantas tolerantes y susceptibles bajo las condiciones que se denominan "adversas". Por esta razón, en la actualidad se considera al grado de productividad de una especie o variedad como un indicador de esa "tolerancia" (Nieman y Shannon, 1976). En base a este criterio, durante la evaluación e interpretación de los resultados de este trabajo, se dió importancia particular al hecho de que especies forrajeras bajo estrés mineral pueden únicamente sobrevivir o producir. Consecuentemente, se visualiza que por lo menos existen cuatro maneras para explicar la tolerancia de estas especies forrajeras a estrés de Al y/o P: 1) La habilidad de una planta para sobrevivir en suelos ácidos infértiles; 2) La producción absoluta de la planta obtenida en el suelo ácido infértil; 3) La producción relativa de la planta obtenida a diferentes grados de acidez y fertilidad del suelo, comparado con la producción obtenida bajo condiciones de

acidez nula (ausencia de Al) y alta fertilidad (alta dosis de P); y 4) La producción relativa de la planta, obtenida a diferentes grados de acidez y fertilidad del suelo en relación a la producción máxima obtenida. Este último criterio difiere del tercero en el sentido de que no todas las especies o variedades desarrollan su máxima productividad bajo condiciones de acidez nula y alta fertilidad.

Por otra parte, se consideró que solamente la habilidad de una gramínea forrajera para sobrevivir en suelos ácidos infértiles no tendría valor si la producción es baja, por tanto, la producción absoluta indicaría el potencial de una especie forrajera para producir en condiciones adversas del suelo. De aquí, rendimientos relativos y absolutos fueron considerados como criterios útiles para interpretar la respuesta diferencial de las gramíneas a estrés de Al y/o P en el Oxisol de Carimagua.

Considerando el rendimiento relativo, se estimó que una producción de materia seca que no excedió al 50% de su rendimiento máximo, es determinante de la condición de "supervivencia" o "producción relativa baja". Cuando el rendimiento relativo estuvo entre 50 y 80% de ese máximo, se consideró a la gramínea en condición de "producción relativa media" y finalmente, por encima del 80% del rendimiento máximo, en condición de "producción relativa alta" bajo estrés de Al y/o P. El límite inferior se fijó en un 50%, con el criterio de que la reducción del potencial de producción de una especie a un 50% o menos tiene una implicación de supervivencia y no de productividad. Criterio bastante empleado en toxicología biológica (Matsumura, 1976; Liener, 1969; Lal, 1979). Finalmente, el límite superior se fijó en 80%, debido a que en la mayoría de los casos por encima de este porcentaje, la tasa de incremento en producción de materia seca por unidad de insumo aplicado (cal y/o fósforo) fue relativamente baja.

El Cuadro 3 presenta la producción de materia seca de las ocho gramíneas forrajeras estudiadas en relación a los diferentes niveles de cal y P aplicados. Estos resultados expresados en términos absolutos, mostraron que las producciones máximas de estas gramíneas fueron

obtenidas a diferentes combinaciones de cal y P, lo cual confirma el criterio 4 indicado anteriormente, en el sentido de que no todas las especies desarrollan su máxima productividad bajo condiciones de no toxicidad de Al y ausencia de estrés nutricional. En la mayoría de los casos, las gramíneas respondieron positivamente al primer incremento de cal y/o P (0,5 ton cal/ha y/o 17 kg P/ha), pero mostraron diferencias marcadas entre ellas bajo condiciones de máximo estrés de Al y P (tratamiento control). Teniendo en cuenta la producción absoluta (ton materia seca/ha) se observa que *Andropogon gayanus* tuvo el mayor potencial de producción bajo cualquier efecto de las interacciones cal-P que el resto de las gramíneas, seguido por *Brachiaria humidicola*. En efecto, *Andropogon gayanus* tiene poco vigor durante la etapa de plántula, pero luego de su establecimiento, las tasas de crecimiento y producción de materia seca supera a varias gramíneas forrajeras (CIAT, 1979). Es importante notar que bajo condiciones de un encalado elevado (5 ton/ha) y dosis altas de P (117 y 277 kg P/ha), todas las gramíneas, con excepción de *Pennisetum purpureum*, manifestaron una reducción en la producción de materia seca, lo cual probablemente esté relacionado con un desbalance nutricional debido a las altas dosis de cal y P aplicadas. *Pennisetum purpureum* fue la única gramínea que mostró una respuesta positiva a cada incremento de cal y P, con un rendimiento máximo en los niveles más altos de cal y P aplicados al suelo (5 ton cal y 277 kg P/ha).

La respuesta diferencial de las ocho gramíneas forrajeras tropicales en términos de rendimiento relativo es ilustrada en las Figuras 3, 4, 5 y 6, respectivamente. Sin la aplicación de cal y P (93% saturación de Al y 1,7 ppm de P), las gramíneas mostraron diferencias marcadas bajo estrés de Al y P. *Brachiaria humidicola* y *Andropogon gayanus* produjeron más del 50% de su rendimiento máximo, mientras que el resto de las gramíneas mostraron un 40% o menos de su producción máxima. El primer histograma de la Figura 3 muestra *per se* la amplia respuesta diferencial a ambas condiciones adversas del suelo, toxicidad de Al y baja disponibilidad de P. Las gramíneas que no alcanzaron un 50% de su rendimiento máximo son consideradas en un estado de

"supervivencia" o "producción relativa baja", bajo los efectos del Al tóxico y baja disponibilidad de P. Sin embargo, la producción de materia seca (producción absoluta) es considerada importante, por el hecho de que esta producción aunque no sobrepase el límite de 50% del rendimiento máximo, la cantidad de forraje producido puede satisfacer el criterio de tener una pastura aceptable y persistente. Esto sucede con *Brachiaria decumbens* al compararla con *Brachiaria humidicola*. El potencial de máxima producción de materia seca de *Brachiaria decumbens* fue de 7,1 ton/ha, mientras que el de *Brachiaria humidicola* fue de 3,3 ton/ha. Este potencial de producción determina una diferencia considerable entre ambas gramíneas al expresarla en términos relativos, pero que en términos absolutos y bajo condiciones de estrés de Al y P no existen diferencias considerables. Por esta razón, además de la producción relativa, debería considerarse la producción absoluta, por lo menos en el caso de especies forrajeras.

Con el primer incremento de P (17 kg P/ha) y manteniendo el estrés de Al (90% saturación de Al), la mayoría de las gramíneas aumentaron su rendimiento relativo. *Hyparrhenia rufa* y *Melinis minutiflora* sobrepasaron el límite de "supervivencia" o "producción relativa baja" pasando a una "producción relativa media". *Brachiaria humidicola* con este incremento bajo de P pasó el límite de "producción relativa media" (>80% producción relativa); *Andropogon gayanus* mantuvo su producción relativa, lo que significa que esta gramínea requiere de una mayor neutralización del Al o un suministro nutricional de Ca y Mg para una alta producción. Esta situación se explica al observar las Figuras 4 y 5, donde *Andropogon gayanus* pasó a una "producción relativa media" con 0,5 ton cal/ha y "producción relativa alta" con 1 ton cal/ha. En ambos casos, sin la aplicación de P o con el primer incremento de P (17 kg P/ha).

Se observa que con la adición de 0,5 ton de cal, cantidad que en promedio sólo neutralizó el Al en un 6%. la mayoría de las especies mostraron un incremento en producción de materia seca (Fig. 4). Resultados similares fueron observados cuando se aplicó 1 ton cal/ha (Fig.5).

Estos resultados indican que la respuesta de las gramíneas tolerantes a Al fue principalmente relativa a requerimientos nutricionales de Ca y Mg más que a un efecto de encalado. En general, con las aplicaciones de dosis altas de P (117 kg P y 277 kg/ha), las gramíneas mostraron un aumento en la producción de materia seca (absoluta y relativa); pero sin la aplicación de cal, *Brachiaria decumbens*, *Digitaria decumbens* y *Panicum maximum* no sobrepasaron el límite del 50% de rendimiento relativo. Estas gramíneas entraron a una "producción relativa media" al aplicarse 0,5 ton cal/ha (Fig. 4).

Cuando el aluminio se neutralizó (22% Sat.Al) con la aplicación de 5 ton cal dolomítica/ha (Fig. 6), las ocho gramíneas forrajeras mostraron más del 50% de producción relativa en los dos niveles bajos de P (1,5 y 2,9 ppm P). Sin embargo y como se dijo anteriormente, el incremento de la dosis de P causó en la mayoría de las gramíneas una reducción de la producción. Este comportamiento fue atribuido a un desbalance nutricional debido a las dosis altas de cal y P aplicadas. Varios investigadores indican que un encalado excesivo y/o una elevada dosis de P pueden tener efectos nocivos sobre el desarrollo de las plantas, principalmente debido a una deficiencia de Zn (Kamprath, 1972; Spain, 1976; Salinas, 1978; Cochrane *et al.*, 1980).

De los resultados de este experimento se puede concluir que los criterios de "producción relativa baja" o "supervivencia", "producción relativa media" y "producción relativa alta" obtenidos en base a la producción máxima absoluta, explican la respuesta diferencial de ecotipos forrajeros bajo condiciones de estrés de Al y/o P en suelos ácidos e infértiles. Este criterio relacionado al de rendimientos absolutos, permite comparar la tolerancia diferencial entre ecotipos forrajeros a estrés de Al y/o P aunque cada uno de ellos tenga diferente potencial genético para la producción de materia seca. Entre las gramíneas forrajeras tolerantes a la toxicidad de Al y baja disponibilidad de P se destacan, *Brachiaria humidicola* y *Andropogon gayanus*. En general, la mayoría de las gramíneas respondieron positivamente a las aplicaciones de Ca, Mg y P, incrementando su producción relativa hasta alcanzar más del 50% o aún más del 80% de su producción máxima, con aplicaciones bajas de cal y P.

LITERATURA CITADA

- Andrew, C.S., A.D. Johnson and R.L. Sandland. 1973. Effect of aluminum on the growth and chemical composition of some tropical and temperate pasture legumes. *Australian Journal Agriculture*. Res.24:325-339.
- Andrew, C.S. and P.J. Vanden-Berg. 1973. The influence of aluminum on phosphate absorption by whole plants and excised roots of some pasture legumes. *Australian Journal Agriculture*, Res. 24:341-351.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. 1978. Informe Anual 1977. Programa de Ganado de Carne. CIAT, Cali, Colombia.
- Centro Internacional de Agricultura Tropical. 1979. Informe Anual 1978. Programa de Ganado de Carne. CIAT, Cali, Colombia.
- Cochrane, T.T., J.G. Salinas and P.A.Sánchez. 1980. An equation for liming acid mineral soils to compensate Al tolerance. *Tropical Agriculture*. 59:133-140.
- Evans, C.E. and E.J. Kamprath. 1970. Lime response as related to percent Al saturation, solution Al, and organic matter content. *Soil Science Society of America Proceedings*. 34:893-896.
- Fenster, W.E. y L.A.León. 1979. Manejo de la fertilización con fósforo para el establecimiento y mantenimiento de pastos mejorados en suelos ácidos e infértiles de América Tropical. p.119-133. In L.E.Tergas y P.A.Sánchez (eds.), *Producción de Pastos en Suelos Ácidos de los Trópicos*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.
- Fox R.L. and E.J. Kamprath. 1979. Phosphate sorption isotherms for evaluating the phosphate requirements of soils. *Soil Science Society of America Proceedings*. 34:902-907.
- Foy, C.D. 1974. Effects of aluminum on plant growth. p.601-642. In E.W. Carson (ed.), *The Plant Root and Its Environment*. University Press of Virginia, Charlottesville.

- Gualdrón, R. y J.M.Spain. 1979. Calcio y magnesio: Ocurrencia y magnitud de los problemas en suelos ácidos. VI Coloquio de Suelos, Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo. Palmira, Colombia. 23 p.
- Heylar, K.R. 1978. Effects of aluminum and manganese toxicities on legume growth. p.207-231. In C.S. Andrew and E.J. Kamprath (eds.), Mineral Nutrition of Legumes in Tropical and Subtropical Soils. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Melbourne, Australia.
- Instituto Colombiano Agropecuario-Centro Internacional de Agricultura Tropical. 1979. Informe Anual Carimagua 1978. CIAT, Cali, Colombia. 138 p.
- Kamprath, E.J. 1970. Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. Soil Science Society of America Proceedings. 34:252-254.
- Kamprath, E.J. 1972. Soil acidity and liming. p.136-149. In M. Drosdoff (Chairman), Soils of the Humid Tropics. National Academy Science, Washington, D.C.
- Lal, R. 1979. Erosion as a constraint to food production in the tropics. Soil Constraints Conference, IRRI, Los Baños, Filipinas (En prensa).
- Lathwell, D.J. (ed.). 1979. Crop response to liming of Ultisols and Oxisols. Cornell International Agriculture Bulletin 35, Cornell University, Ithaca, New York. 36 p.
- Liener, I.E. 1969. Introduction. p.1-5. In I.E.Liener (ed.), Toxic Constituents of plant food stuffs. Academic Press, New York.
- Lin, C. and N.T. Coleman. 1960. The measurement of exchangeable aluminum in soils and clays. Soil Science Society of America Proceedings. 24:444-446.
- Matsumura, F. 1976. Toxicology of insecticides. Plenum Press, New York. 503 p.
- Mehring, A.L. 1961. Dictionary of plant food - A guide to fertilizer materials and terms. Farm Chemicals, Meister Publishing, Co., Willoughby, Ohio. 26 p.

- McLean, E.O. 1976. Chemistry of soil aluminum. *Community Soil Science Plant Analysis*. 7:619-636.
- Moore, D.P., W.E. Kronstand and R.J. Metzger. 1976. Screening wheat for aluminum tolerance. p. 287-295. *In* M.J. Wright (ed.), *Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils*. Cornell University, Ithaca, New York.
- Mott, G.O. and E.M. Hutton. 1979. Estrategias para la colección y el mejoramiento de plantas forrajeras. p.1-4. *In* G.O.Mott y A. Jiménez (eds.), *Manual para la Colección, Preservación y Caracterización de Recursos Forrajeros Tropicales*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.
- Nieman, R.H. and M.C. Shannon. 1976. Screening plants for salinity tolerance. p.359-367. *In* M.J. Wright (ed.), *Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils*. Cornell University, Ithaca, New York.
- Rhue, R.D. and C.O. Grogan. 1976. Screening corn for aluminum tolerance p.297-310. *In* M.J. Wright (ed.), *Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils*. Cornell University, Ithaca, New York.
- Salinas, J.G. 1978. Differential response of some cereal and bean cultivars to Al and P stress in an Oxisol of central Brazil. Ph.D. Thesis. North Carolina State University, Raleigh. 326 p.
- Salinas, J.G. 1979a. Adaptación de plantas a toxicidades de aluminio y manganeso en suelos ácidos. *Sociedad Colombiana de la Ciencia del Suelo*. Bogotá, Colombia. 31 p.
- Salinas, J.G. 1979b. *Métodos Analíticos para Suelos Acidos y Plantas*. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia. 53 p.
- Sánchez, P.A. and T.T.Cochrane. 1979. Soil constraints in relation to major farming systems of tropical America. *Soil constraints Conference, IRRI, Los Baños, Filipinas (In press)*.
- Sartain, J.B. and E.J. Kamprath. 1975. Effect of liming a highly Al-saturated soil on the top and root growth and soybean nodulation. *Agronomy Journal*. 67:507-510.

- Schultze-Kraft, R. y D.C. Giacometti. 1979. Recursos genéticos de leguminosas forrajeras para las sabanas de suelos ácidos e infértiles en América tropical. p.59-69. In L.E.Tergas y P.A.Sánchez (eds.), Producción de Pastos en Suelos Acidos de los Trópicos. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.
- Spain, J.M. 1976. Field studies on tolerance of plant species and cultivars to acid soil conditions in Colombia. p.213-222. In M.J. Wright (ed.), Plant Adaptation to Mineral Stress in Problem Soils. Cornell University, Ithaca, New York.
- Spain, J.M. 1979. Establecimiento y manejo de pastos en los Llanos Orientales de Colombia. p.181-189. In L.E.Tergas y P.A.Sánchez (eds.), Producción de Pastos en Suelos Acidos de los Trópicos. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.
- Tanaka, A. and Y. Hayakawa. 1974. Comparative studies on plant nutrition. Crop tolerance to soil acidity. I. Tolerance to low pH. II. Tolerance to high levels of Al and Mn. Journal Science Soil Manure. 45:561-570.
- Tanaka, A. and Y. Hayakawa. 1975. Comparative studies on plant nutrition. Crop tolerance to soil acidity. III. Tolerance to soil acidity. Journal Science Soil Manure. 46:19-32.
- Woodruff, J.R. and E.J. Kamprath. 1965. Phosphorus adsorption maximum as measured by the Langmuir isotherm and its relationship to phosphorus availability. Soil Science Society of America Proceedings. 29:148-150.

Cuadro 1. Características edáficas iniciales del perfil del suelo (Haplustox típico, arcilloso, caolínico, isohipertérmico), Carimagua, Colombia.

| Profundidad cm | Arcilla -----% | Arena ----- | pH _{H2O} (1:1) | P** ppm | Cationes cambiables | | | | Sat. Al | |
|-------------------|-------------------|----------------|----------------------------|------------|---------------------|------|------|------|------------|------|
| | | | | | Al* | Ca* | Mg* | K** | | CICE |
| 0 - 20 | 38 | 12 | 4,1 | 1,5 | 3,6 | 0,36 | 0,09 | 0,11 | 4,16 | 86,5 |
| 20 - 40 | 40 | 12 | 4,0 | 0,4 | 2,7 | 0,19 | 0,04 | 0,07 | 3,00 | 90,0 |
| 40 - 60 | 43 | 11 | 4,2 | 0,4 | 1,8 | 0,24 | 0,06 | 0,05 | 2,15 | 83,7 |
| 60 - 80 | 43 | 12 | 4,5 | 0,3 | 1,0 | 0,26 | 0,08 | 0,04 | 1,38 | 72,5 |
| 80 - 100 | 45 | 12 | 4,9 | 0,3 | 0,4 | 0,21 | 0,07 | 0,04 | 0,72 | 55,6 |
| 100 - 120 | 45 | 12 | 4,9 | 0,1 | 0,4 | 0,25 | 0,09 | 0,04 | 0,78 | 51,3 |
| 120 - 140 | 45 | 12 | 4,9 | 0,4 | 0,7 | 0,47 | 0,10 | 0,04 | 1,40 | 50,0 |
| 140 - 160 | 45 | 12 | 4,9 | 0,3 | 0,8 | 0,33 | 0,12 | 0,04 | 1,29 | 62,0 |
| 160 - 180 | 45 | 12 | 5,0 | 0,1 | 1,2 | 0,35 | 0,13 | 0,05 | 1,73 | 69,4 |
| 180 - 200 | 45 | 12 | 5,0 | 0,3 | 1,3 | 0,41 | 0,14 | 0,05 | 1,90 | 68,4 |

* Extractor KCl 1N

** Extractor Solución Bray-II

CICE: Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva.

Cuadro 2. Características químicas de la capa arable (0-20 cm) en las parcelas con tratamientos de cal y fósforo después del cuarto corte (Febrero, 1979).

| Tratamientos CaI Fósforo | pH _{H₂O} (1:1) | P* ppm | Cationes cambiabiles | | | | Saturación de Al | Saturación de Ca | Saturación de Mg |
|-----------------------------|---------------------------------------|-----------|----------------------|------|------|------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | | | Al | Ca | Mg | K | | | |
| 0 | 4,1 | 1,7 | 3,22 | 0,14 | 0,04 | 0,07 | 93,0 | 4,0 | 1,20 |
| 17 | 4,4 | 2,1 | 3,47 | 0,26 | 0,05 | 0,07 | 90,1 | 6,8 | 1,30 |
| 117 | 4,4 | 11,7 | 2,96 | 0,28 | 0,04 | 0,08 | 88,6 | 7,8 | 1,20 |
| 277 | 4,5 | 40,5 | 2,75 | 0,37 | 0,05 | 0,06 | 75,1 | 11,5 | 1,50 |
| 0,5 | 4,4 | 1,4 | 3,16 | 0,33 | 0,08 | 0,07 | 86,8 | 9,1 | 2,20 |
| 17 | 4,5 | 2,3 | 3,00 | 0,34 | 0,08 | 0,08 | 85,7 | 9,7 | 2,30 |
| 117 | 4,5 | 14,8 | 3,19 | 0,52 | 0,13 | 0,08 | 80,9 | 13,6 | 3,40 |
| 277 | 4,6 | 43,6 | 3,18 | 0,54 | 0,08 | 0,06 | 82,4 | 14,0 | 2,07 |
| 1,0 | 4,7 | 1,4 | 2,31 | 0,57 | 0,21 | 0,08 | 72,9 | 18,0 | 6,6 |
| 17 | 4,4 | 2,4 | 2,46 | 0,58 | 0,16 | 0,06 | 75,5 | 17,8 | 4,9 |
| 117 | 4,7 | 16,7 | 2,40 | 0,66 | 0,18 | 0,06 | 72,7 | 20,0 | 5,5 |
| 277 | 4,7 | 37,5 | 2,12 | 0,74 | 0,16 | 0,06 | 68,8 | 24,0 | 5,2 |
| 5,0 | 5,1 | 1,5 | 0,97 | 1,99 | 0,75 | 0,06 | 25,7 | 52,8 | 19,9 |
| 17 | 5,1 | 2,9 | 0,86 | 2,16 | 0,78 | 0,06 | 22,3 | 56,0 | 20,2 |
| 117 | 5,1 | 18,3 | 0,96 | 2,44 | 0,91 | 0,07 | 21,9 | 55,7 | 20,8 |
| 277 | 5,1 | 43,0 | 0,86 | 2,25 | 0,73 | 0,05 | 22,1 | 57,8 | 18,8 |

* Extractor solución Bray-II.

materia seca de ocho gramíneas forrajeras a diferentes niveles de saturación de Carimagua (Promedio de cuatro cortes y tres repeticiones).

| G r a m í n e a s | | f o r r a j e r a s | | | | |
|---------------------------|-------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|------------------------|-----------------------------|
| <i>Andropogon gayanus</i> | <i>Hyparrhenia rufa</i> | <i>Melinis minutiflora</i> | <i>Brachiaria decumbens</i> | <i>Digitaria decumbens</i> | <i>Panicum maximum</i> | <i>Pennisetum purpureum</i> |
| -----ton/ha----- | | | | | | |
| 3,87 | 1,87 | 1,54 | 2,17 | 1,04 | 1,54 | 0,99 |
| 3,64 | 2,99 | 2,79 | 2,62 | 1,49 | 1,62 | 1,38 |
| 3,78 | 3,34 | 3,69 | 2,67 | 2,36 | 2,38 | 3,12 |
| 4,84 | 2,26 | 3,67 | 3,40 | 2,16 | 2,21 | 5,29 |
| 4,28 | 2,71 | 3,42 | 2,09 | 1,84 | 1,38 | 3,05 |
| 3,71 | 2,50 | 3,88 | 3,09 | 2,12 | 1,92 | 3,10 |
| 7,26 | 4,31 | 3,23 | 2,92 | 2,45 | 2,65 | 4,74 |
| 3,80 | 2,17 | 2,78 | 3,76 | 2,70 | 3,30 | 5,58 |
| 6,36 | 2,13 | 1,92 | 2,78 | 1,77 | 2,80 | 4,15 |
| 6,04 | 2,77 | 2,51 | 4,74 | 2,22 | 2,78 | 4,75 |
| 6,79 | 3,28 | 1,60 | 4,97 | 2,30 | 2,93 | 5,74 |
| 5,81 | 4,11 | 2,95 | 2,84 | 4,59 | 4,90 | 5,86 |
| 5,67 | 3,37 | 2,74 | 5,32 | 2,54 | 3,13 | 5,22 |
| 7,35 | 3,63 | 3,03 | 7,14 | 3,58 | 3,40 | 5,68 |
| 4,44 | 3,21 | 2,64 | 5,29 | 1,93 | 4,27 | 6,24 |
| 5,99 | 3,54 | 1,90 | 4,38 | 2,00 | 3,77 | 6,98 |

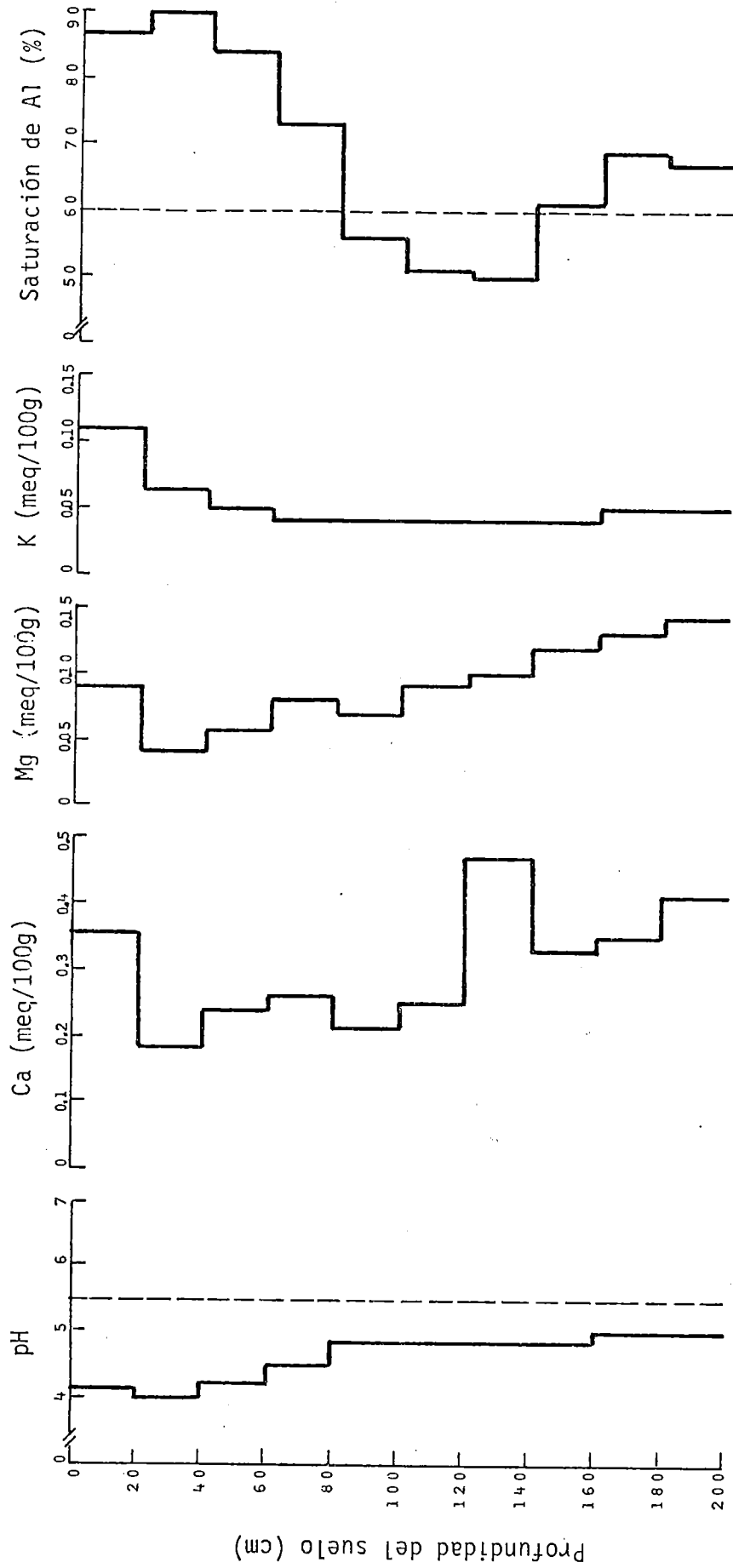


Figura 1. Perfiles de acidez (pH y Sat.Al) y de bases cambiabiles del Oxisol de Carimagua, Colombia.

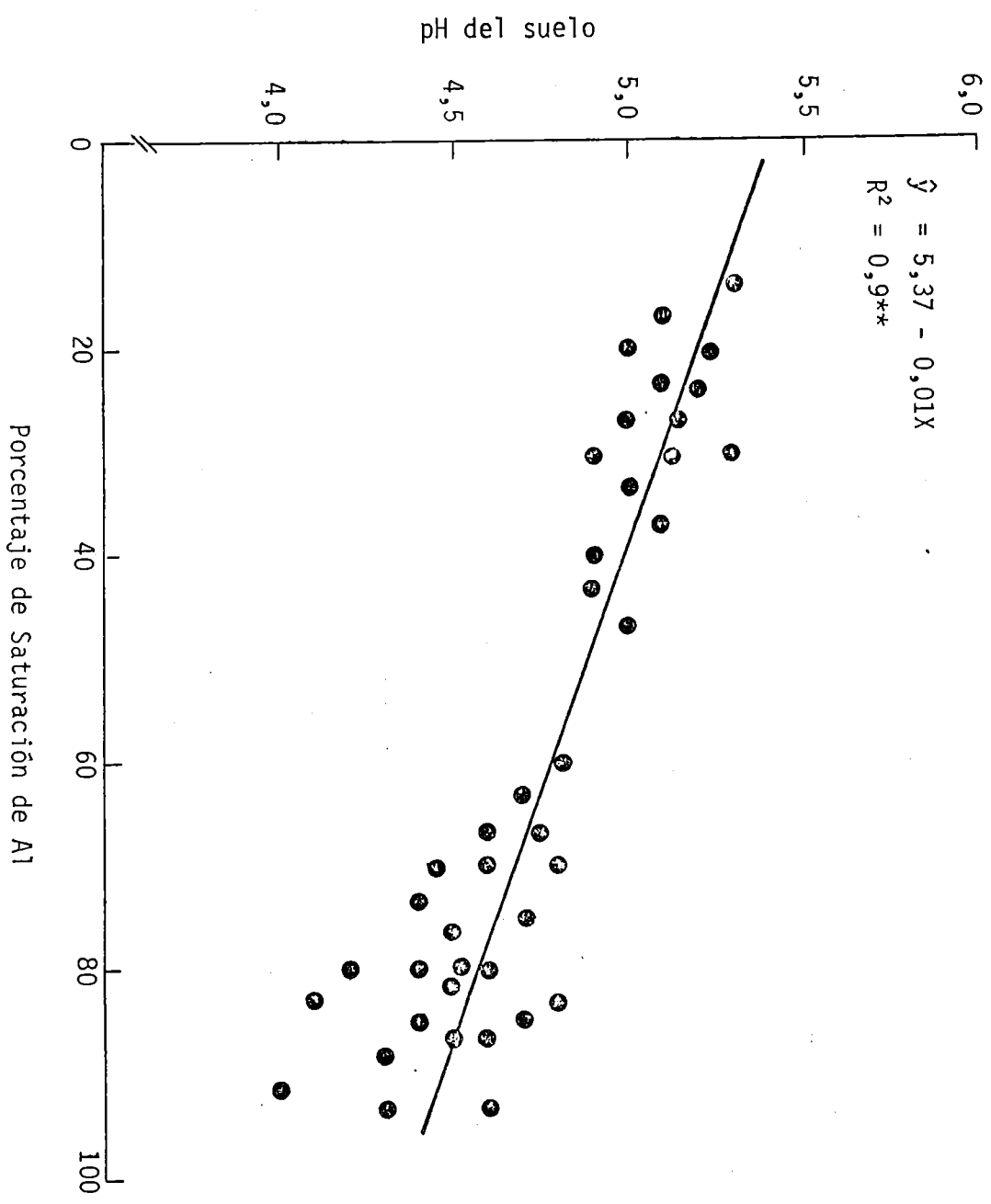
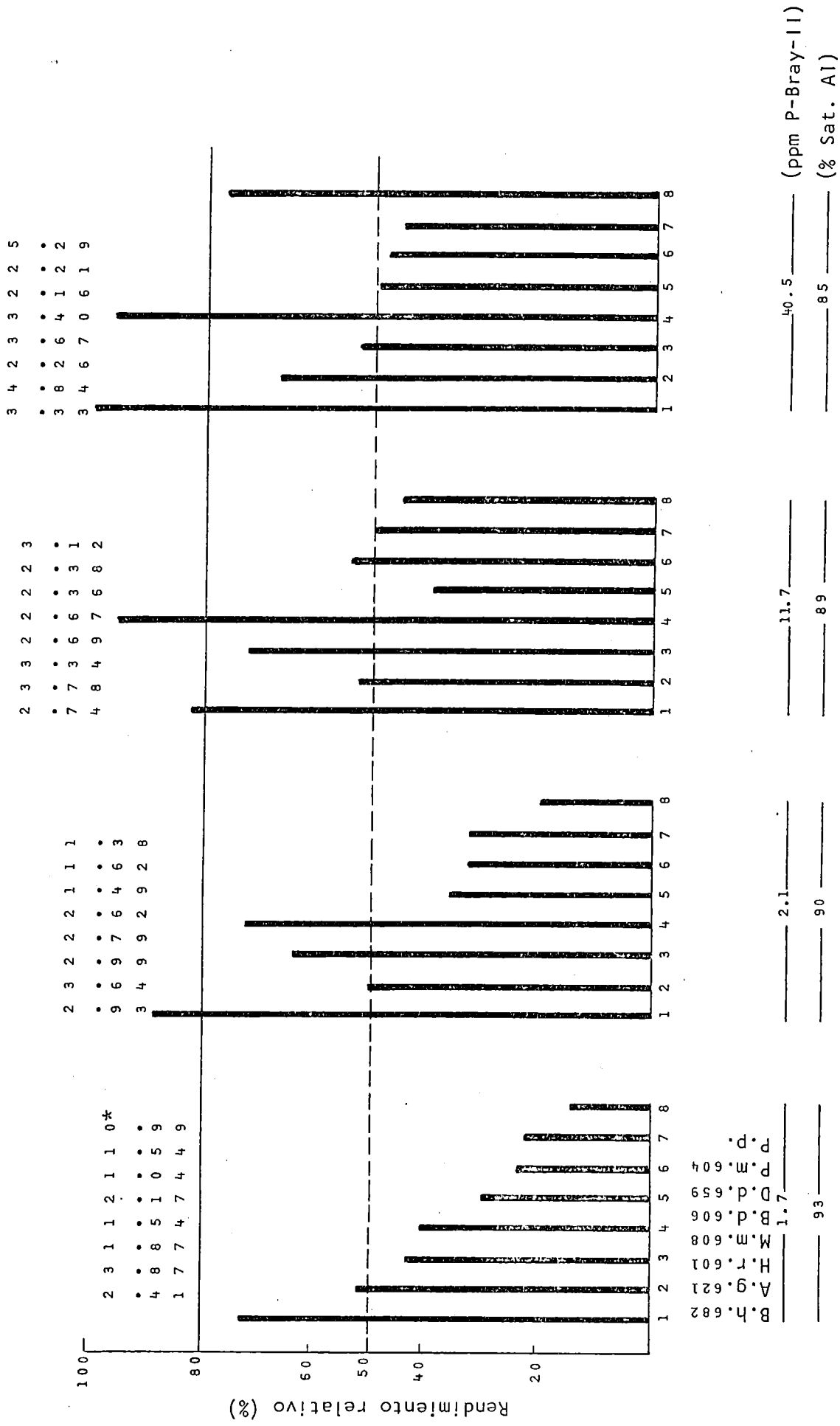


Figura 2. Relación entre la saturación del Al y el pH del suelo a la profundidad de 0-20 cm en el Oxisol de Carimagua.



* Rendimiento MS (ton/ha)

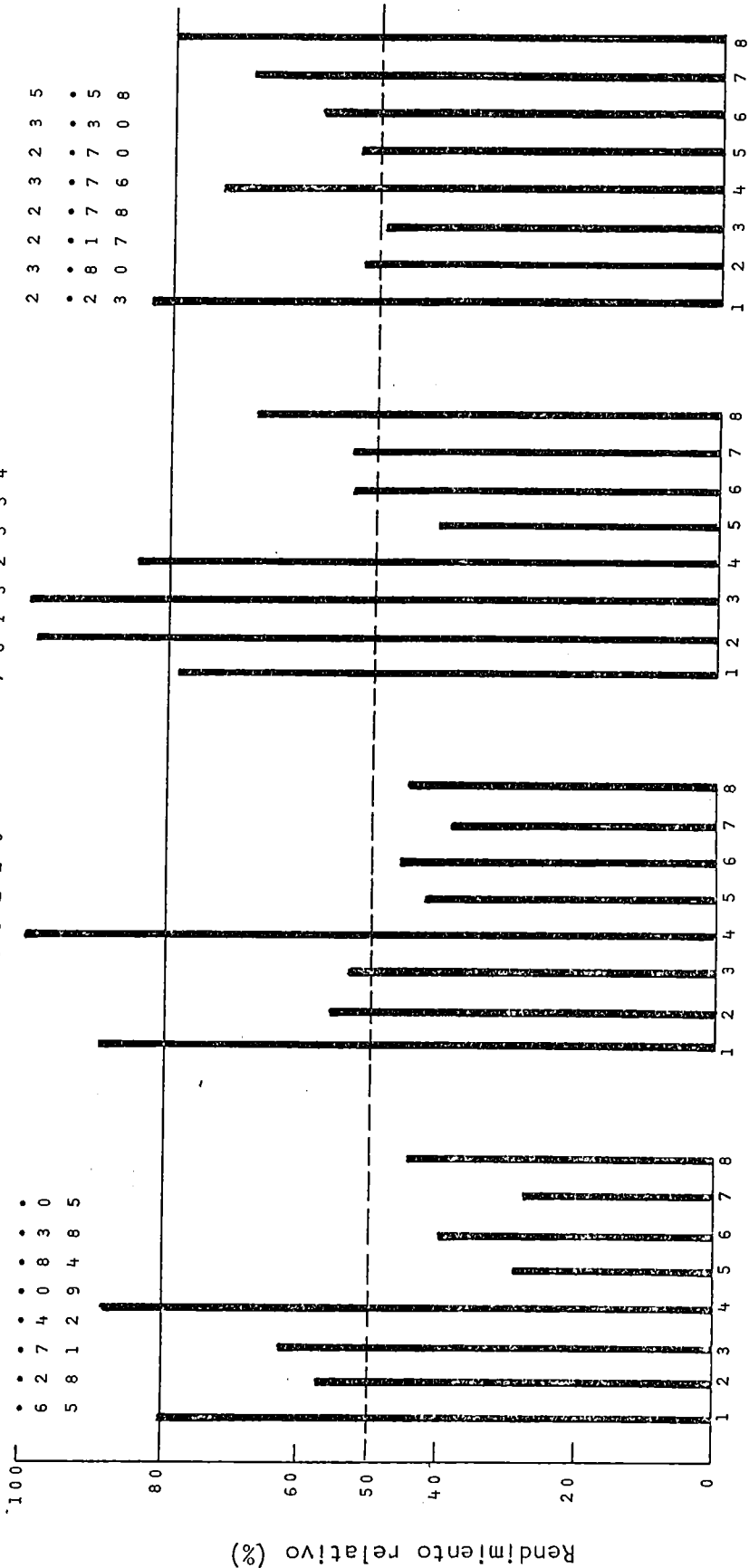
Figura 3. Respuesta diferencial de ocho gramíneas tropicales a diferentes niveles de fósforo y saturación de Al (sin aplicación de cal) bajo condiciones de campo en Carimagua.
 (B.h. 682 = *Brachiaria humidicola*; A.g. 621 = *Andropogon gayanus*;
 H.h. 601 = *Hyparrhenia rufa*; M.m. 608 = *Melinis minutiflora*;
 B.d. 606 = *Brachiaria decumbens*; D.d. 659 = *Digitaria decumbens*;
 P.m. 604 = *Panicum maximum*; and P.p. = *Pennisetum purpureum*).

2 3 2 3 3 2 1 3
 • • • • • • • •
 9 7 5 8 0 1 9 1
 8 1 0 8 9 2 2 0

2 7 4 3 2 2 2 4
 • • • • • • • •
 5 2 3 2 9 4 6 7
 7 6 1 3 2 5 5 4

2 4 2 3 2 1 1 3*
 • • • • • • • •
 6 2 7 4 0 8 3 0
 5 8 1 2 9 4 8 5

2 3 2 2 3 2 3 5
 • • • • • • • •
 2 8 1 7 7 3 3 5
 3 0 7 8 6 0 0 8



B.h. 682
 A.g. 621
 H.T. 601
 M.M. 608
 B.d. 606
 D.d. 659
 P.M. 604
 P.p. 604

(ppm P-Bray-II)
 (% Sat.A1)

1.4
 87

2.3
 86

* Rendimiento MS (ton/ha)

14.8
 81

43.6
 82

Figura 4. Respuesta diferencial de ocho gramíneas tropicales a diferentes niveles de fósforo y saturación de Al (1/2 ton cal/ha) bajo condiciones de campo en Carimagua (Ref. a Fig. 3 para identificación de accesiones).

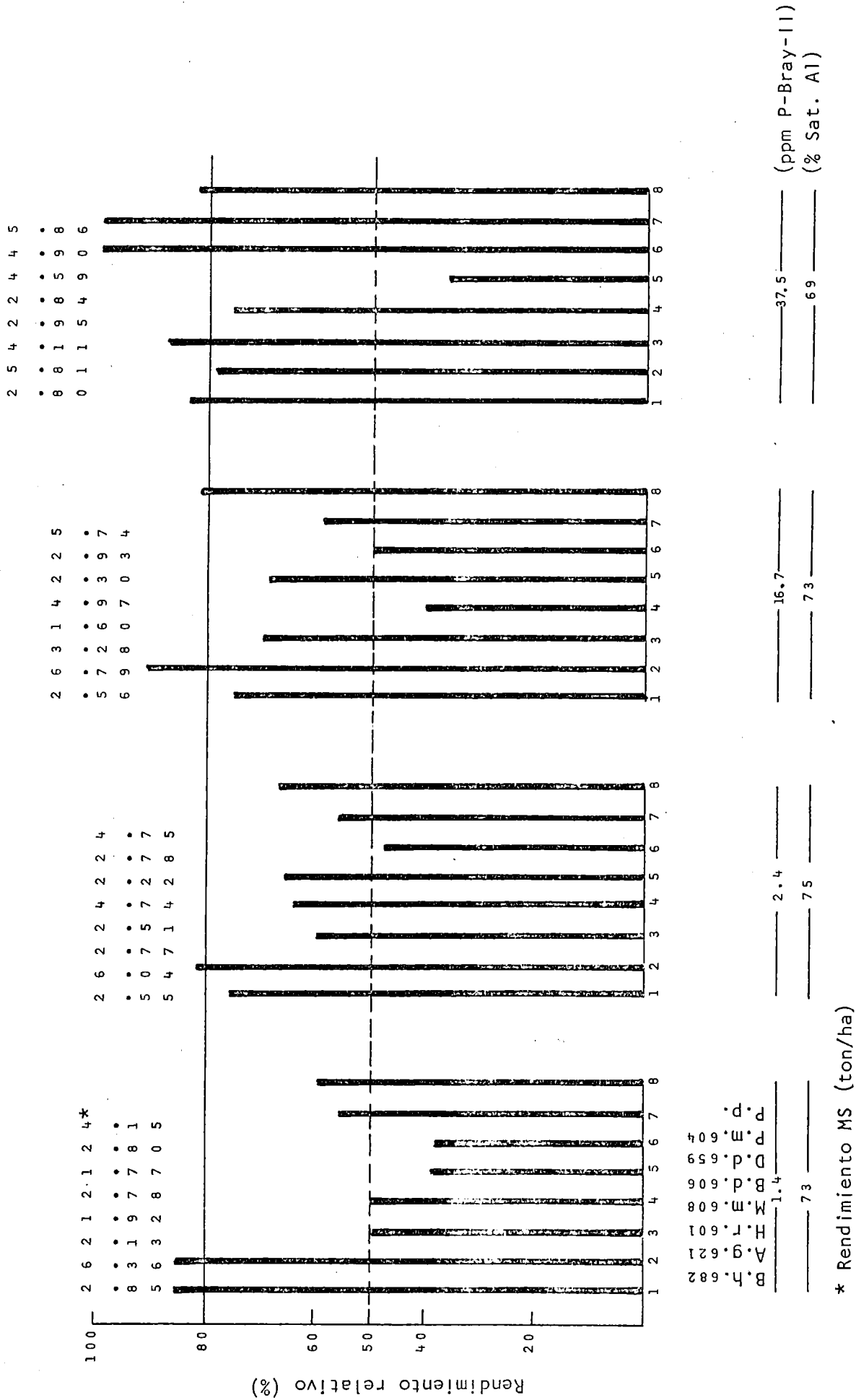
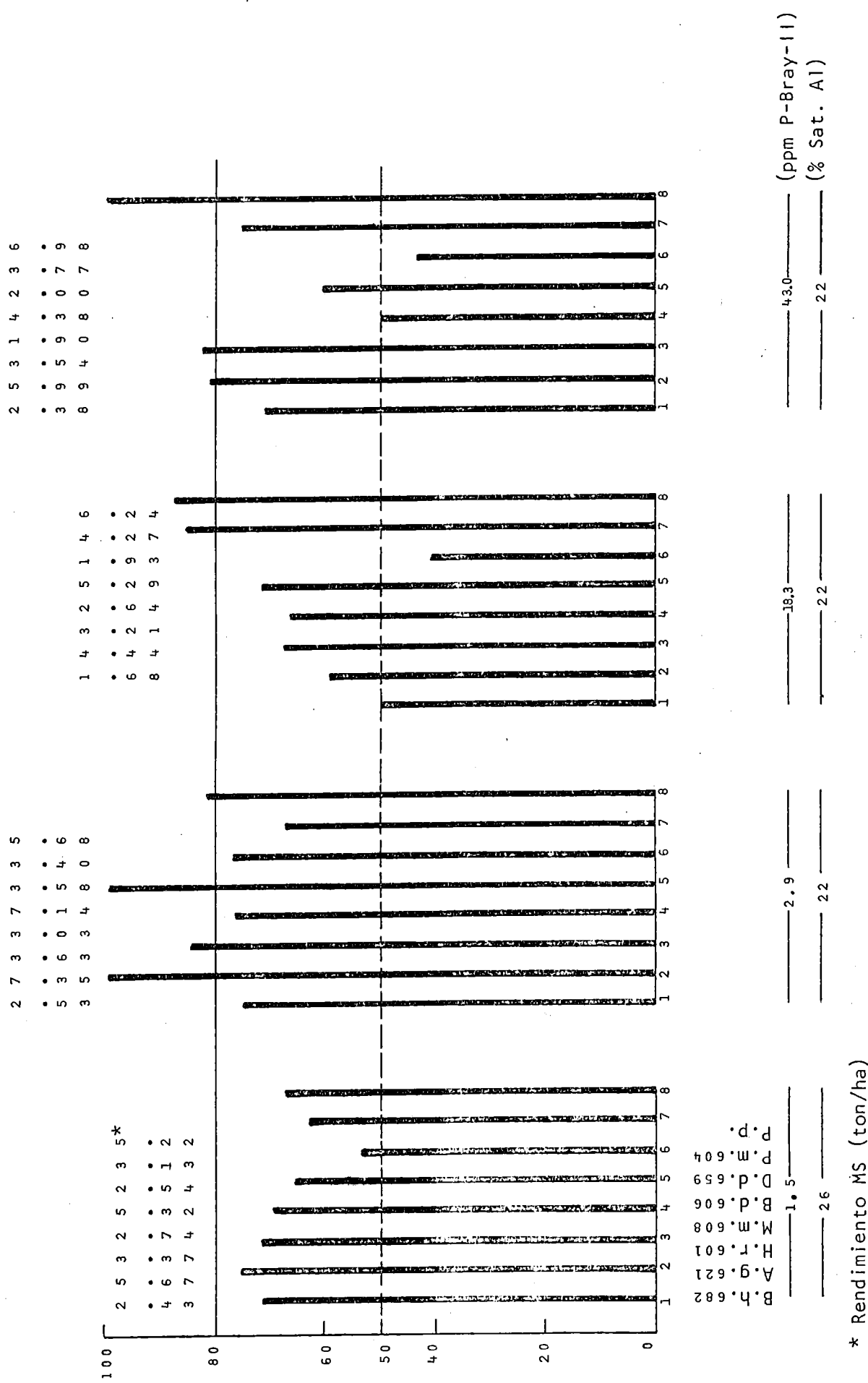


Figura 5. Respuesta diferencial de ocho gramíneas tropicales a diferentes niveles de fósforo y saturación de Al (1 ton cal/ha) bajo condiciones de campo en Carimagua (Ref. a Fig. 3 para identificación de accesiones).

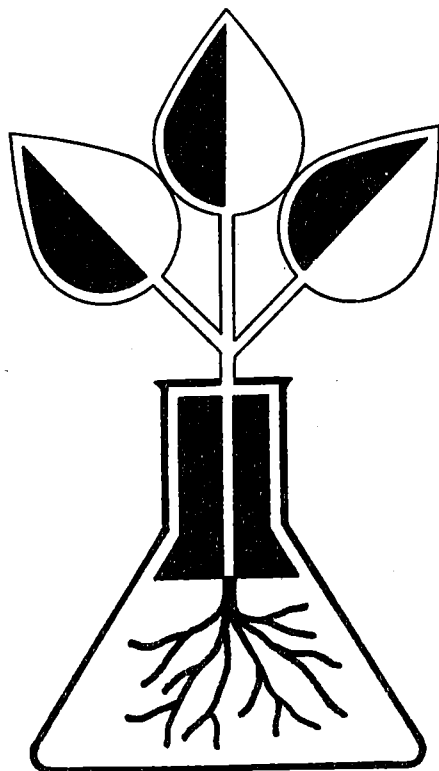
* Rendimiento MS (ton/ha)



* Rendimiento MS (ton/ha)

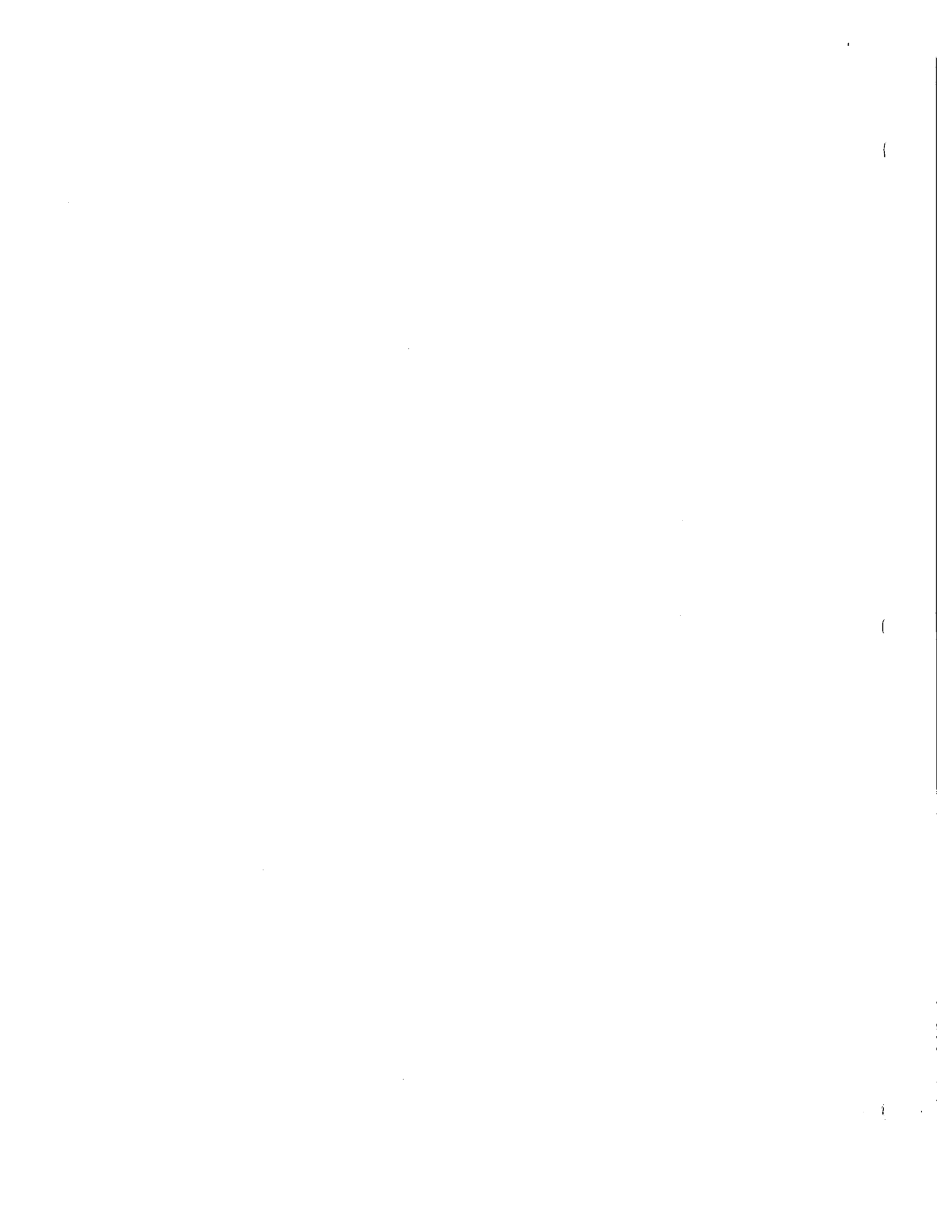
Figura 6. Respuesta diferencial de ocho gramíneas tropicales a diferentes niveles de fósforo y saturación de Al (5 ton cal/ha) bajo condiciones de campo en Carimagua (Ref. a Fig. 3 para identificación de accesiones).

METODOS ANALITICOS PARA SUELOS ACIDOS Y PLANTAS



CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL

1979



METODOS ANALITICOS PARA SUELOS ACIDOS Y PLANTAS

José G. Salinas y Ramiro García

Suelos - Nutrición de Plantas
Programa Pastos Tropicales

CENTRO INTERNACIONAL DE AGRICULTURA TROPICAL (CIAT)

Apartado Aéreo 67-13 - Telex 05769

Cali - Colombia

1979

(

(

1

TABLA DE CONTENIDO

| | <u>Página</u> |
|--|---------------|
| 1. INTRODUCCION | 1 |
| 1.1. PROPOSITOS | 1 |
| 1.2. PRECISION DE LAS MEDICIONES EN LOS ANALISIS DE SUELOS Y PLANTAS | 2 |
| 1.3. EXACTITUD DE UNA MEDICION | 4 |
| 1.4. MEDICION PRECISA DE VALORES VERDADEROS CONSTANTES | 4 |
| 1.5. NUMERO DE MUESTRAS | 4 |
| 1.6. TIPOS DE ERRORES | 5 |
| 1.7. CIFRAS SIGNIFICATIVAS | 6 |
| 2. RECEPCION, PREPARACION Y ALMACENAJE DE MUESTRAS | 8 |
| 2.1. RECEPCION DE MUESTRAS | 8 |
| 2.2. PREPARACION DE MUESTRAS | 10 |
| 2.2.1. Suelo | 10 |
| 2.2.2. Tejido Vegetal | 11 |
| 2.3. ALMACENAJE DE MUESTRAS | 11 |
| 3. METODOLOGIA ANALITICA PARA SUELOS ACIDOS | 13 |
| 3.1. SUBMUESTREO EN LABORATORIO | 13 |
| 3.2. ANALISIS PRELIMINAR DEL SUELO | 14 |
| 3.2.1. Determinación de pH (Relación Suelo-Agua 1:1) | 15 |
| A. Material | 15 |
| B. Procedimiento | 15 |
| 3.2.2. Determinación de la Conductividad Eléctrica | 15 |
| A. Material | 15 |
| B. Reactivos | 15 |
| C. Procedimiento | 15 |
| 3.2.3. Determinación de la presencia o ausencia de CaCO ₃ Libre. Prueba de Efervescencia | 16 |

| | <u>Página</u> |
|--|---------------|
| 3.3. DETERMINACION DE MATERIA ORGANICA | 16 |
| A. Material | 16 |
| B. Reactivos | 16 |
| C. Procedimiento | 17 |
| D. Cálculos | 17 |
| 3.4. DETERMINACION DE FOSFORO | 18 |
| 3.4.1. Fósforo Extraíble por Fluoruro Diluido-Acido Diluido. (Bray y Kurtz No.2) | 18 |
| A. Material | 18 |
| B. Reactivos | 18 |
| C. Procedimiento | 20 |
| D. Cálculos | 20 |
| 3.4.2. Fósforo Extraíble por Carbonato Acido de Sodio ... | 20 |
| A. Material | 21 |
| B. Reactivos | 21 |
| C. Procedimiento | 22 |
| 3.5. DETERMINACION DE CATIONES CAMBIABLE EN SUELOS CON pH MENOR A 5.4, CON CARGA VARIABLE EN FUNCION DEL pH Y NO CALCAREOS, NO SALINOS | 24 |
| 3.5.1. Obtención del Extracto del Suelo | 24 |
| A. Material | 24 |
| B. Reactivos | 24 |
| C. Procedimiento | 24 |
| 3.5.2. Acidez Intercambiable (Al + H) | 24 |
| A. Material | 24 |
| B. Reactivos | 24 |
| C. Procedimiento | 25 |
| D. Cálculos | 25 |
| 3.5.3. Calcio (Ca) | 26 |
| A. Determinación | 26 |
| B. Preparación del Estándar de Calcio | 26 |

| | <u>Página</u> |
|--|---------------|
| 3.5.4. Magnesio (Mg) | 27 |
| A. Determinación | 27 |
| B. Preparación del Estándar de Magnesio | 27 |
| 3.5.5. Manganeso (Mn) | 27 |
| A. Determinación | 27 |
| B. Preparación de Estándares de Mn | 28 |
| 3.5.6. Determinación de Potasio (K) | 28 |
| A. Material | 28 |
| B. Reactivo | 28 |
| C. Procedimiento | 28 |
| D. Preparación de Estándar de K | 29 |
| 3.5.7. Parámetros Derivados | 29 |
| A. Capacidad de Intercambio Catiónico Efectivo (CICE). | 29 |
| B. Porcentaje de Saturación de Aluminio | 30 |
| 3.6. DETERMINACION DE CATIONES CAMBIABLES EN SUELOS CON pH 5.4 - 7.0, CON CARGA NO DEPENDIENTE DEL pH Y NO CALCAREOS, NO SALINOS | 30 |
| 3.6.1. Obtención del Extracto de Suelo | 30 |
| A. Material | 30 |
| B. Reactivos | 30 |
| C. Procedimiento | 31 |
| 3.6.2. Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Potasio (K) | 31 |
| A. Determinación | 31 |
| B. Preparación de Estándares de Ca, Mg y K | 32 |
| 3.6.3. Sodio (Na) | 32 |
| A. Determinación | 32 |
| B. Preparación de Estándares de Sodio | 33 |
| 3.7. DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC) DE pH MAYOR A 5.4 - 7.0, CON CARGA NO DEPENDIENTE DE pH Y NO CALCAREOS, NO SALINOS | 33 |

| | <u>Página</u> |
|--|---------------|
| A. Material | 33 |
| B. Reactivos | 33 |
| C. Procedimiento | 33 |
| D. Cálculos | 34 |
| 3.8. DETERMINACION DE AZUFRE (S) | 34 |
| 3.8.1. Obtención del Extracto de Suelo | 34 |
| A. Materiales | 34 |
| B. Reactivos | 34 |
| C. Procedimiento | 34 |
| 3.8.2. Método turbidimétrico para determinar azufre en el extracto de suelo | 35 |
| A. Material | 35 |
| B. Reactivos | 35 |
| C. Procedimiento | 35 |
| D. Preparación de Estándares de S | 36 |
| E. Cálculos | 36 |
| 3.9. DETERMINACIONES DE MICRONUTRIMENTOS | 36 |
| 3.9.1. Boro (B) | 36 |
| A. Material | 36 |
| B. Reactivos | 37 |
| C. Procedimiento | 37 |
| D. Cálculos | 37 |
| E. Soluciones Estándares de Boro | 37 |
| 3.9.2. Zinc (Zn), Cobre (Cu), Hierro (Fe) | 38 |
| A. Material | 38 |
| B. Reactivo | 38 |
| C. Procedimiento | 38 |
| D. Determinación | 38 |
| E. Preparación de Estándares de Elementos Menores | 39 |

| | | |
|--------|---|----|
| 4. | METODOLOGIA ANALITICA PARA PLANTAS | 40 |
| 4.1. | OBTENCION DEL EXTRACTO DE TEJIDO VEGETAL | 40 |
| | A. Material | 40 |
| | B. Reactivos | 40 |
| | C. Procedimiento | 40 |
| 4.2. | DETERMINACIONES DE FOSFORO (P), POTASIO (K), CALCIO (Ca) Y MAGNESIO (Mg) | 40 |
| 4.2.1. | Fósforo (P) | 40 |
| 4.2.2. | Potasio (K) | 41 |
| | A. Determinación | 41 |
| | B. Estándares de Potasio (K) | 41 |
| | C. Cálculos | 41 |
| 4.2.3. | Calcio (Ca) | 41 |
| 4.2.4. | Magnesio (Mg) | 42 |
| 4.3. | DETERMINACION DE AZUFRE (S) | 42 |
| | A. Material | 42 |
| | B. Reactivos | 42 |
| | C. Procedimiento | 43 |
| | D. Preparación de Estándares de Azufre (S) | 43 |
| 4.4. | DETERMINACIONES DE ALUMINIO (Al) | 43 |
| | A. Material | 43 |
| | B. Reactivos | 44 |
| | C. Procedimiento | 44 |
| | D. Preparación de Estándares de Aluminio (Al) | 45 |
| 4.5. | DETERMINACION DE NITROGENO (N) | 45 |
| | A. Material | 45 |
| | B. Reactivos | 45 |
| | C. Procedimiento | 46 |
| | D. Cálculos | 47 |

| | | |
|--------|--|----|
| 4.6. | DETERMINACION DE MICRONUTRIMENTOS (Zn, Cu, Fe, Mn, Na)..... | 47 |
| 4.6.1. | Obtención del Extracto de Tejido Vegetal | 47 |
| A. | Materiales | 47 |
| B. | Reactivos | 47 |
| C. | Procedimiento y Determinación de Micronutrientos (Zn, Cu, Fe, Mn, Na) | 47 |
| 4.6.2. | Determinación de Boro (B) | 48 |
| A. | Material | 48 |
| B. | Reactivos | 48 |
| C. | Procedimiento | 48 |
| 4.7. | DETERMINACION DE SILICE CRUDA | 49 |
| A. | Material | 49 |
| B. | Reactivo | 49 |
| C. | Procedimiento | 49 |
| D. | Cáculos | 49 |
| 5. | REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS | 50 |

1. INTRODUCCION

1.1. PROPOSITOS.

La cuantificación analítica de suelos y tejidos vegetales es un instrumento efectivo para interpretar la existencia de deficiencias o excesos de minerales. Consecuentemente, el uso adecuado de esta información influye significativamente en las recomendaciones de fertilizantes. Sin embargo, debe admitirse que existe conflicto en las fases de cuantificación, interpretación y recomendación debido a la alta variabilidad existente en estas fases. Esta variabilidad, generalmente, es consecuencia de la diversidad de métodos analíticos empleados y de los criterios técnicos adoptados en la interpretación y recomendación de los resultados analíticos en suelos y plantas. Probablemente, resulta utópico tratar de uniformizar las tres fases para todos los suelos existentes en los países así como para todo tejido vegetal. Sin embargo, resulta bastante desventajoso que suelos con propiedades químicas comparables existentes en América Tropical tengan una variabilidad en estas fases y principalmente en la cuantificación analítica. Por esta razón, es necesario uniformizar la metodología analítica.

La mayoría de los métodos y procedimientos descritos en esta publicación se utilizan actualmente en el Laboratorio de Servicios Analíticos del Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT). En muchos casos, los métodos son descritos en forma suficientemente detallada, de tal manera que puedan reproducirse en muchos laboratorios, sin consultar otras fuentes. Sin embargo, en algunos casos será necesario modificarlos para adaptarlos a las condiciones propias de un laboratorio específico, especialmente en cuanto se refiere al material empleado. Por otra parte, los investigadores al necesitar alguna información detallada sobre los principios de la teoría o técnica de un método, deben consultar la literatura pertinente. Con este propósito, se incluyen referencias bibliográficas.

El propósito de esta publicación es describir métodos estandarizados de procedimientos analíticos de suelo y tejido vegetal con el fin de satisfacer por lo menos tres objetivos: (1) Que investigadores en América Tropical estén más enterados de la metodología analítica para suelos y

plantas de esta región; (2) Incrementar entre instituciones nacionales e internacionales el intercambio de métodos empleados en América Tropical para definir y emplear la mejor metodología disponible, y (3) Hacer del análisis de suelos y plantas una parte dinámica de la investigación.

1.2. PRECISION DE LAS MEDICIONES EN LOS ANALISIS DE SUELOS Y PLANTAS.

La precisión de las mediciones en los análisis de suelos y plantas, depende mayormente de la precisión del método, naturaleza de la muestra y del cuidado del laboratorista. La precisión se trata de la dispersión de los datos obtenidos en un análisis. Con mucha dispersión la precisión es baja y con poca dispersión la precisión es alta.

Cuando se dice que un instrumento mide con 100 por ciento de probabilidad hasta la unidad más cercana de 0.1, se puede considerar que el instrumento permite leer con una confianza de ± 0.05 de unidad porque el error máximo en el juicio visual del operador será la mitad de la última unidad legible del instrumento. Si el error máximo legible es igual o mayor que el error máximo del mecanismo del instrumento, entonces la lectura indica el error máximo del instrumento. Si la probabilidad del error máximo del instrumento es 100 por ciento, ésto significa que para varias repeticiones de una lectura con un valor dado, que se puede representar como el promedio de las lecturas, cada lectura tiene 100 por ciento de probabilidad de estar dentro de los siguientes límites de confianza.

$$\text{Promedio } \pm 0.05 \text{ de unidad} \quad [1]$$

El error máximo puede estar expresado en forma absoluta o relativa. La forma absoluta por ejemplo es ± 0.05 de unidad, en cambio la forma relativa sería la siguiente:

$$\frac{\pm 0.05}{\text{Valor de la lectura}} \quad [2]$$

Por ejemplo si se puede medir 10 cm con un error máximo absoluto de ± 0.05 mm, entonces el error máximo relativo sería mayor que cuando se puede leer 300 cm con un error máximo absoluto ± 0.05 mm. El error máximo relativo es de gran importancia para evaluar la medición y general-

mente se expresa en porcentaje. Con base en este principio el tamaño del error máximo relativo se puede controlar variando el valor del error máximo y el tamaño de la muestra de un suelo. Por ejemplo: si se quiere pesar una muestra de suelo hasta un error máximo relativo de 1 por ciento de la masa del suelo, se puede pesar una muestra de 1 g de masa con un error máximo absoluto de ± 0.005 g o una muestra de 10 g de masa con un error máximo absoluto de ± 0.05 g.

Los límites de confianza de una predicción expresados en la ecuación 1 también se puede expresar en forma más general de la manera siguiente (Steel y Torrie, 1960)

$$LC = \text{Promedio} \pm t_{\alpha} s \frac{n+1}{n}^{1/2} \quad [3]$$

Donde:

LC = Límite de confianza de un valor pronosticado.

t_{α} = Valor de t que corresponde a cierta probabilidad con (n-1) grado de libertad.

s = Desviación estándar del valor de una lectura.

n = Número de lecturas.

Al expresar los límites de confianza comúnmente se escoge probabilidades de 95 por ciento o 99 por ciento. Los límites de confianza constituyen una medida de la precisión de un análisis o de un ensayo. La precisión de un análisis trata de la medida de la dispersión de las repeticiones de la lectura de una muestra.

La precisión de un análisis depende de la naturaleza y tamaño de la muestra. En la realidad, un análisis de suelos o plantas comprende la medición de varias muestras. La dispersión en los valores de las lecturas también puede tener su origen en la variabilidad del material de la muestra. La exactitud en los análisis de suelos o plantas ha consistido en mezclar bien una muestra compuesta para reducir la variabilidad en las repeticiones. Además, el tamaño de la muestra para el análisis influye sobre la variabilidad. Por ejemplo, se cree que una muestra de alrededor de 1 g es la muestra mínima para determinar la densidad de los sólidos de un suelo. Por lo tanto, una muestra de 0.01 g de suelo tendrá poca oportu-

nidad de representar un promedio típico de la densidad del suelo de la muestra. La muestra más grande contendrá todos los constituyentes característicos de la distribución de todo el suelo de la muestra.

1.3. EXACTITUD DE UNA MEDICION.

En contraste con la precisión de una medición la cual trata de la dispersión de varias repeticiones del análisis, la exactitud de una medición trata de la desviación del valor de un ensayo en relación con el valor verdadero del sistema o medio que se mide. La exactitud trata, entonces, de un sesgo que existe en el ensayo. En el análisis de laboratorio el sesgo puede controlarse usando calibración y muestras de control. El error debido al sesgo puede ser sistemático (constante) o aleatorio. El error sistemático se discute más adelante. Se puede apreciar entonces, que un método puede tener mucha precisión pero poca exactitud.

1.4. MEDICION PRECISA DE VALORES VERDADEROS CONSTANTES.

En el laboratorio hay muchas mediciones que son precisas, es decir que los mismos valores se esperan dentro de los límites dados de la precisión del análisis. Ej.: Dentro de ± 0.1 g o dentro ± 5 por ciento del valor.

Generalmente para revisar la técnica del análisis se hace ensayos en triplicado y si todos los resultados se ajustan a las especificaciones, se saca un promedio de ellos. Si uno de los valores se desvía más allá del límite de las especificaciones, se saca un promedio de los dos valores conformantes. Si la técnica en el procedimiento se ha controlado, con frecuencia basta hacer duplicados para revisar la técnica.

Muchos ensayos de laboratorio de suelos siguen las normas anteriormente citadas, sin embargo, es necesario mezclar bien la muestra compuesta para poder aplicar dichas normas, porque sabemos que hay mucha variabilidad de muchas de las propiedades de un suelo en distancias muy cortas.

1.5. NUMERO DE MUESTRAS.

Si se tienen dos muestras, se hace referencia al promedio y al intervalo de las muestras. Si se tienen más de dos muestras, se determina el promedio y la desviación estándar, y la desviación estándar del promedio. El estimado de la desviación estándar mejora con un mayor número de muestras.

El número de muestras necesarias para lograr una precisión dada (desviación del promedio) para un nivel de probabilidad es:

$$n = \frac{t_{\alpha}^2 \times s^2}{D^2} \quad [4]$$

Donde:

s = Desviación estándar del promedio.

t_{α} = Valor de t con (n-1) grados de libertad a un nivel dado de probabilidad .

D = Precisión deseada (P = 0.05 ó 0.01)

Se calcula la desviación estándar (s) de las primeras muestras para probar por medio de la ecuación si hace falta tomar más muestras (Peterson y Calvin, 1965). Esta técnica se usa cuando se tiene como fin comparar promedios de diferentes parcelas, siendo dicha técnica útil para estudiar respuestas a tratamientos.

1.6. TIPOS DE ERRORES.

1. Error Aleatorio: Si se realiza un número grande de determinaciones de la misma cantidad (muchas repeticiones) se encuentra que los valores de esta medida varían dentro de ciertos límites. La curva de frecuencia de estos valores determina la precisión de la operación. El rango de los límites de esta distribución puede depender del instrumento o del procedimiento usado. Este tipo de desviación del verdadero valor de la medida se llama error aleatorio. En determinaciones precisas se asume que la distribución tiene un rango muy estrecho, y generalmente se usan muestras duplicadas; la segunda muestra sirve para verificar la técnica del operador.
2. Error Sistemático: Este tipo de error se debe a una falla o a un sesgo en el instrumento, o en la calibración del mismo o en el procedimiento, que aparece constantemente en todos los resultados. Este tipo de error es reproducible y no se puede eliminar mediante el empleo de muchas repeticiones. De tal manera, se pueden obtener

malos resultados aunque haya mucha concordancia entre las repeticiones. En este caso es necesario tomar en cuenta el método o el instrumento para corregir este error.

1.7. CIFRAS SIGNIFICATIVAS.

El número de las cifras significativas dentro de una cantidad, no depende del signo decimal en la cantidad, sino de cuántos dígitos son confiables y característicos de la cantidad considerada. Por ejemplo, si la cantidad es 0.025, los tres números después de la coma decimal son confiables. En cambio, si la cantidad es 25.000 y sabemos que el tercer dígito es confiable, debemos escribir el número como 2.5×10^4 o también 25.000, o también 25.0* 00.

En la práctica los registros de datos se hacen con una cifra adicional a la última cifra significativa. Posteriormente en el resultado final, solamente se emplean las cifras significativas.

Generalmente, en los análisis de suelos y plantas se miden varias cantidades a varios niveles de precisión, es decir, hasta un número dado de cifras decimales o hasta tantas cifras significativas.

En los cálculos se combinan cifras a diversos grados de precisión y hay que saber la manera en que estas combinaciones afectan el resultado final.

A este respecto las reglas siguientes son muy útiles:

1. En las sumas y en las restas no se deben retener más cifras decimales que las confiables en la cantidad que tiene el menor número de cifras decimales confiables.
2. En las multiplicaciones y las divisiones no se deben retener más cifras significativas que las cifras confiables en el factor con la menor cantidad de cifras significativas, o en otras palabras, las cantidades que tienen que ser multiplicadas o divididas deben tener el mismo número de cifras significativas. Es recomendable mantener una cifra más de las que las reglas indican hasta cuando se obtenga el resultado final (Minor, 1957).

Generalmente los cálculos incluyen una combinación de las operaciones matemáticas descritas en las reglas. Al realizar un cálculo es necesario

aplicar las reglas para evaluar el efecto total de dicho cálculo. Para mayor información sobre este asunto se puede consultar Minor (1957) y Olson et al. (1956).

2. RECEPCION, PREPARACION Y ALMACENAJE DE MUESTRAS

La determinación cuantitativa del contenido de un mineral específico en una muestra de suelo o planta, requiere en una primera fase, un procedimiento adecuado de muestreo que involucra la toma de la muestra en sí y la adecuada identificación de la misma. En una segunda fase, requiere una preparación apropiada y la aplicación de una metodología adecuada. La primera fase es la más crítica por el hecho de que aunque el análisis sea exacto, los resultados obtenidos no pueden ser mejores que la muestra. Existen procedimientos vigentes para el muestreo de suelos y tejido vegetal, y la aplicación de ellos depende del objetivo del muestreo. Referencias bibliográficas respecto al muestreo de suelos y tejido vegetal en el campo, se incluyen al final del texto. Entre ellos, sobresalen los trabajos de Chapman y Pratt (1961), Cline (1944), Hausenbuiller (1957), Peck y Melsted (1973), y Reed y Rigney (1947). Sin embargo, existen factores comunes a considerar en la recolección de muestras y entre ellos se citan:

1. Obtener una muestra representativa,
2. Evitar la contaminación,
3. Identificar la muestra en forma adecuada, y
4. Embalar y transportar las muestras al laboratorio lo más pronto posible.

En la mayoría de los casos, las muestras de suelo y planta son colocadas en bolsas plásticas (polietileno).

2.1. RECEPCION DE MUESTRAS:

Toda muestra, ya sea de suelo o tejido vegetal, antes del análisis químico o físico, debe pasar por una etapa de recepción. El propósito es identificar y preparar las muestras para dar entrada al laboratorio. En el caso del Laboratorio de Servicios Analíticos del CIAT, el usuario completa inicialmente un formulario de Solicitud de Análisis, similar al que se adjunta en el texto. Un formulario original completo y copia del mismo son anexados a las muestras al entregar a recepción. Es muy importante que el análisis solicitado se concentre específicamente en aquellos elementos que coadyuven en la explicación de los objetivos del trabajo realizado. Una vez realizado el análisis solicitado, el formulario original se devuelve al usuario con los resultados, y la copia se conserva en el laboratorio como récord de análisis.



Laboratorio Servicios Analíticos - CIAT
Solicitud de Análisis *

Programa: _____ No. serial laboratorio: _____

Fecha muestreo: _____ Fecha entrega laboratorio: _____ Fecha entrega resultado: _____

Suelo Tejido vegetal Tejido animal

Procedencia: _____ Enviar resultados a: _____

| Número | Descripción muestra | Análisis Solicitado |
|--------|---------------------|---------------------|
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |
| | | |

Observaciones: _____

*Enviar original y una copia con las muestras.

2.2. PREPARACION DE MUESTRAS :

2.2.1. Suelo. Las muestras de suelos debidamente identificadas, se transfieren a bandejas de madera (dimensiones 25 x 50 cms.) con base de anjeo para facilitar el flujo de calor a través de las muestras. Las muestras se secan en cajas diseñadas de tal forma que el aire, calentado por bombillos eléctricos, circule de la parte inferior hacia la parte superior con ayuda de un extractor, eliminando además la humedad de las cajas. La temperatura promedio es de 60°C y el tiempo de secado varía entre 24 y 48 horas, tiempo que depende del grado de humedad de las muestras.

Las muestras secas se someten a una molienda en molinos que tengan el cabezal y las cribas de acero inoxidable, lo que garantiza el análisis de micronutrientes. En la mayoría de los análisis rutinarios de suelos, las cribas corresponden a una malla No.10 (2 mm), con excepción en la determinación de la materia orgánica que se recomienda emplear suelo tamizado por malla No.60 (0.25 mm). El material molido es empacado en cajas de cartón con capacidad de 250 g, y estas cajas luego de identificadas con una numeración seriada, pasan al laboratorio.

Es importante remarcar que este proceso de preparación de las muestras de suelo exige que las muestras pasen inmediatamente al análisis químico y los resultados sean referidos en base a "suelo seco al aire". Caso contrario, cuando las muestras son almacenadas temporalmente, es necesario determinar un factor de humedad para cada muestra al momento del análisis, y los resultados deben ser ajustados por este factor para reducir el error.

Las determinaciones del contenido de humedad se realizan en submuestras de suelo seco al aire (10 g pesados exactamente) y secadas a 105°C por un período mínimo de 12 horas. El cálculo del Factor de Humedad (FH) está dado por:

$$\text{Factor de Humedad (FH)} = \frac{10}{\text{Peso de suelo seco a } 105^{\circ}\text{C}}$$

El contenido de humedad en la muestra de suelo está dado por la relación: % Humedad = 100 (FH - 1.00). (Gardner, 1965). De esta manera, los resultados de los análisis son dados en términos de "suelo seco" (105°C).

2.2.2. Tejido Vegetal. Luego del muestreo del tejido vegetal, las muestras son generalmente sometidas a cuatro fases preparativas antes del análisis químico (Jones y Steyn, 1973).

1. Limpieza del material para remover la contaminación superficial.
2. Secado del material con el fin de parar las reacciones enzimáticas y preparar el material para la molienda.
3. Molienda mecánica para reducir el material a una fineza apropiada para el análisis químico.
4. Secado final a peso constante para obtener un valor uniforme en el cual se basan los resultados analíticos.

El material vegetal seleccionado para el muestreo está siempre cubierto con una capa fina de polvo. Esta contaminación afecta los resultados del análisis y por lo tanto debe ser removida antes que el material vegetal sea secado. Desde la limpieza con un paño o cepillo de cerdas finas, hasta el lavado con una solución de detergente al 0.1%, son los procedimientos recomendados para eliminar la contaminación del material vegetal (Steyn, 1959; Jones y Steyn, 1973). El proceso de lavado debe ser lo más rápido posible para evitar períodos largos de contacto de la solución con el tejido vegetal, ya que de lo contrario, se tiene el riesgo de lixiviar ciertos nutrimentos tales como K y Ca (Jones y Steyn, 1973).

Una vez realizada la limpieza del material vegetal, las muestras son sometidas al secado a 70 °C durante 24 horas y molidas en molinos tipo Wiley con cribas de acero inoxidable de 1 mm. El tejido vegetal seco y molido se empaca en frascos plásticos con capacidad mínima de 25 g, y deben ser sellados herméticamente para prevenir los cambios de humedad en las muestras durante su análisis. Caso contrario, las muestras deben ser secadas nuevamente antes de ser analizadas. Los frascos deben ser debidamente identificadas con numeración seriada al pasar al laboratorio.

2.3. ALMACENAJE DE MUESTRAS:

Las muestras de suelo y tejido vegetal una vez analizadas, deben ser almacenadas bajo inventario, durante seis meses, como medida de precaución en caso de que el usuario solicite determinaciones adicionales.

Al cabo de este tiempo, las muestras se entregan a los usuarios para su eliminación. El laboratorio debe conservar una serie de muestras de suelo y tejido vegetal para utilizarlas como controles en los análisis de muestras. Toda muestra almacenada debe secarse nuevamente antes de ser sometidas a nuevo análisis y ajustar los resultados en base al factor de humedad.

3. METODOLOGIA ANALITICA PARA SUELOS ACIDOS

3.1. SUBMUESTREO EN LABORATORIO :

Las muestras de suelo que llegan al laboratorio deben ser sometidas a un submuestreo, con el propósito de que la muestra del suelo sometida a análisis químico sea representativa. Para ésto, distribuir el suelo en una hoja de papel limpio y dividir en cuadros de 5 x 5 cm. usando una regla de plástico. El suelo se toma así con una espátula seleccionando por lo menos 10 cuadros. Las submuestras de suelo se colocan en bolsas de plástico inmediatamente después del secado y tamizado.

La cantidad mínima necesaria de muestra de suelo seco al aire para el análisis completo es la siguiente:

1. Suelo seco al aire tamizado con malla No.10 (2 mm).

A. Análisi Preliminar del Suelo :

1. 10 g. para determinación de pH y conductividad eléctrica.
2. 10 g. para determinación de presencia o ausencia de CaCO_3 libre.

B. En Base a la Clasificación del Suelo en el Análisi Preliminar.

B.1. Para suelos muy ácidos, no calcáreos, no salinos.

1. 10 g. para extracto de $\text{KCl } 1\text{N}$ y determinación de cationes cambiabiles (Ca, Mg, Na), acidez intercambiable (Al, H) y micronutrimientos (Zn, Cu, Fe, Mn).
2. 10 g. para extracto de $\text{NH}_4\text{Cl } 1\text{N}$ y determinación de K.
3. 3 g. para extracto de Bray y Kurtz No.2 y determinación de P.
4. 10 g. para determinación de S.
5. 10 g. para determinación de B.

B.2. Para suelos ácidos no calcáreos, no salinos.

1. 10 g. para extracto de NH_4OAC y determinación de cationes cambiabiles (K, Ca, Mg, Na), Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC) y micronutrientos (Zn, Cu, Fe, Mn).
 2. 3 g. para extracto de Olsen y determinación de P.
 3. 10 g. para determinación de S.
 4. 10 g. para determinación de B.
2. Suelo seco al aire tamizado con malla No.60 (0.25 mm). (Para los suelos muy ácidos y ácidos clasificados en el análisis preliminar).
1. 0.5 g. para determinación de materia orgánica.

3.2. ANALISIS PRELIMINAR DEL SUELO :

Con el propósito de clasificar los suelos para la determinación de cationes intercambiables, acidez intercambiable, y capacidad de intercambio catiónico, es necesario realizar un análisis preliminar del suelo determinando el pH, conductividad eléctrica y presencia o ausencia de CaCO_3 libre. Si los suelos son calcáreos y/o salinos es necesario emplear procedimientos diferentes. (Uehara y Keng, 1975).

Los suelos se clasifican de acuerdo al análisis preliminar como sigue:

| pH (Suelo- H_2O 1:1) | Conductividad Eléctrica (micromhos/cm) a 25°C. | CaCO_3 Libre (Prueba de Efervescencia) | Clasificación |
|---|--|--|---|
| < 5.4 | < 400 | Ausente | Muy ácido, no calcáreo, no salino. |
| 5.4-7.0 | < 400 | Ausente | Acido a neutro, no calcáreo, no salino. |
| > 7.0 | < 400 | Presente | Calcáreo, no salino |
| < 7.0 | > 400 | Ausente | No calcáreo, salino |
| > 7.0 | > 400 | Presente | Calcáreo, salino |

3.2.1. Determinación de pH (Relación Suelo-Agua 1:1)*

A. Material:

Potenciómetro (pH-metro) provisto de electrodos de vidrio y calomel (solución saturada de KCl). Soluciones amortiguadas de pH conocido, generalmente de pH 4 y 7. Vasos de 50 ml. Agitador y balanza analítica.

B. Procedimiento:

1. Medir 10 ml de suelo seco al aire y transferir a un vaso de 50 ml. Añadir 10 ml de agua doblemente deionizada o destilada.
2. Agitar la suspensión aproximadamente 1 minuto y dejar en reposo por 1 hora.
3. Una vez calibrado el potenciómetro con las soluciones amortiguadas, se procede a determinar el pH de la muestra de suelo previa agitación enérgica de la suspensión.

3.2.2. Determinación de la Conductividad Eléctrica**

La medida de la conductividad eléctrica del extracto de suelo es una guía aproximada pero rápida del grado de salinidad en el suelo.

A. Material:

Vasos de 100 ml, varillas de vidrio, puente de conductividad eléctrica.

B. Reactivos:

Agua doblemente deionizada o destilada.

C. Procedimiento:

Pesar 10 g. de suelo seco al aire y tamizado con malla No.10 (2 mm) en un vaso de 100 ml. Añadir 50 ml de agua doblemente deionizada o destilada y agitar por 30 minutos. Dejar la suspensión en reposo durante la noche y volver a agitar por 15

* Jackson (1964), Peech (1965).

** Richards (1954)

minutos antes de leer la conductividad eléctrica usando un puente de conductividad. Los resultados se expresan en micromhos/cm a 25°C.

3.2.3. Determinación de la presencia o ausencia de CaCO₃ Libre.

Prueba de Efervescencia*

La presencia o ausencia de carbonato de calcio puede determinarse rápidamente y en forma cualitativa agregando unas cuantas gotas de HCl a 30% al suelo seco al aire tamizado con malla No.10 (2 mm). La efervescencia debida al desprendimiento de gas carbónico (CO₂) indica la presencia de carbonato.

3.3. DETERMINACION DE MATERIA ORGANICA**

A. Material:

Erlenmeyers de 250 ml, pipeta automática de 25 ml, garrafa plástica de 20 litros (Dicromato de Potasio), buretas graduadas de 50 ml (ácido sulfúrico, sulfato ferroso), balanza de precisión (± 0.01 g.)

B. Reactivos:

1. Solución de Dicromato de Potasio (K₂Cr₂O₇) 0.4N: Secar en una estufa aproximadamente 50 g del reactivo a una temperatura de 110°C durante 1 hora. Luego de enfriar en un desecador pesar 19.583 g y disolver en poca cantidad de agua doblemente deionizada o destilada para luego completar volumen a 1 litro con agua doblemente deionizada o destilada.
2. Acido sulfúrico concentrado (H₂SO₄).
3. Solución de Ferroina 0.025M: Pesar 14.87 g de ortofenantrolina monohidratada (C₁₂H₈N₂.H₂O) y 6.95 g de sulfato ferroso (FeSO₄.7H₂O). Disolverlos en agua doblemente deionizada o destilada y completar volumen a 1 litro con agua doblemente deionizada o destilada.

* Chapman y Pratt (1961)

** Walkley y Black (1934), Allison (1965)

4. Solución de sulfato ferroso ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 0.4N: Disolver 111.21 g del reactivo en 600 ml de agua doblemente deionizada o destilada, añadir 20 ml de H_2SO_4 concentrado y completar volumen a 1 litro con agua doblemente deionizada o destilada.

C. Procedimiento:

1. Pesar 0.5 g de suelo seco al aire y tamizado con malla No.60 (0.25 mm) en Erlenmeyer de 250 ml.
2. Añadir 25 ml de la solución de dicromato de potasio 0.4N y mezclar el suelo con la solución mediante un giro imprimido al Erlenmeyer.
3. Añadir 25 ml de H_2SO_4 concentrado y mezclar suavemente durante 1 minuto. Dejar la mezcla en reposo durante 20 a 30 minutos.
4. Simultáneamente realizar un ensayo de valoración en blanco (sin suelo) de la misma manera indicada en los párrafos 1, 2 y 3.
5. Diluir la solución a 200 ml con agua doblemente deionizada o destilada y añadir 1 ml de la solución ferrosa 0.025M.
6. Titular con la solución de sulfato ferroso 0.4N hasta que el color de la solución-muestra vire de verde a rojo en el punto final.

D. Cálculos:

Reportar el contenido de materia orgánica (M.O.) en base porcentual de acuerdo al siguiente cálculo:

$$\% \text{ M.O.} = 25 (1 - S/B) \times 0.55$$

Donde: S = Valoración de la muestra, ml de solución sulfato ferroso.

B = Valoración en blanco, ml de solución sulfato ferroso.

El factor 0.55 se deriva como sigue:

$$0.4 \times 0.003 \times (1.72/0.75) \times (100/0.5) = 0.55$$

Donde: 0.4 = Normalidad de la solución de dicromato de potasio.
 0.003 = Peso miliequivalente de carbono.
 1.72 = Factor de Conversión de Carbono a Materia Orgánica.
 0.75 = Factor de recuperación de carbono*
 0.5 = Peso de la muestra (g).

3.4. DETERMINACION DE FOSFORO:

3.4.1. Fósforo Extraíble por Fluoruro Diluido-Acido Diluido. (Bray y Kurtz No.2)**

A. Material:

Vasos de extracción de 50 ml, agitador, pipetas automáticas de 20 ml, papel filtro de 11 cm ϕ (Whatman No.42 o equivalente), frasco de vidrio o plástico para la solución extractora, vaso de 1 litro para la solución de trabajo, diluidor automático, colorímetro con filtro de 660 m μ of espectrofotómetro, probetas de 10 y 25 ml para las soluciones A y B para desarrollo de color.

B. Reactivos:

1. Solución extractora (HCl 0.1N + NH₄F 0.03N): Disolver 1.11 g de NH₄F y 16.64 ml de HCl 6N con agua doblemente deionizada o destilada y completar volumen a 1 litro con agua doblemente deionizada o destilada.

2. Soluciones patrones para desarrollo de color***

Solución A: Disolver 60 g de molibdato de amonio [(NH₄)₆ Mo₇O₂₄.4H₂O] en 200 ml de agua doblemente deionizada o destilada. Añadir 1.455 g de tartrato de antimonio y potasio [K(SbO)C₄H₄O₆.1/2 H₂O] y disolver. Agregar lentamente con agitación suave 700 ml de H₂SO₄ concentrado. Enfriar la solución y diluir a volumen de 1 litro con agua doblemente deionizada o destilada.

* Bornemisza et al (1979)

** Bray y Kurtz (1945), Dewis y Freitas (1970), McGaveston y Widdowson (1978)

*** Murphy y Riley (1963).

Solución B: Disolver 132 g de ácido ascórbico ($C_6H_8O_6$) en agua doblemente deionizada o destilada. Completar volumen a 1 litro con agua doblemente deionizada o destilada.

Las soluciones A y B deben almacenarse en un lugar frío y oscuro por ser sensible al calor y a la luz.

3. Solución de Trabajo: Preparar esta solución en el día a partir de las Soluciones A y B del Párrafo 2. Tomar 25 ml de la Solución A y transferir a 800 ml de agua doblemente deionizada o destilada en un vaso de 1 litro. Mezclar y añadir 10 ml de la Solución B llevando luego a volumen con agua doblemente deionizada o destilada.
4. Solución Estándar con Fósforo: Disolver 0.2195 g de fosfato de hidrógeno de potasio cristalizado (KH_2PO_4), previamente secado durante 1 hora a $105^\circ C$. Diluir con agua doblemente deionizada o destilada en matraz volumétrico de 1 litro y completar volumen. La solución contendrá 50 ppm P a partir de la cual se preparan las soluciones para la curva patrón de P de la manera indicada en la Tabla 2.

Tabla 2. Concentraciones de las Disoluciones Patrón de Fósforo.

| Volumen de la Solución Estándar (50 ppm, P) | Volumen final con H_2O doblemente deionizada o destilada | Concentración de P |
|---|--|--------------------|
| ml | ml | ppm |
| 0.0 | 250 | 0.0 |
| 2.5 | 250 | 0.5 |
| 5.0 | 250 | 1.0 |
| 10.0 | 250 | 2.0 |
| 20.0 | 250 | 4.0 |
| 30.0 | 250 | 6.0 |
| 40.0 | 250 | 8.0 |
| 50.0 | 250 | 10.0 |

C. Procedimiento:

1. Pesar una muestra de 2.85 g de suelo y transferir a un vaso de extracción de 50 ml.
2. Añadir 20 ml de la solución extractora y agitar durante 40 segundos.
3. Filtrar la suspensión con papel filtro Whatman No.42 o equivalente a un vaso de 50 ml. El filtrado constituye el extracto de suelo.
4. Tomar simultáneamente 2 ml del extracto de suelo y 18 ml de la solución de trabajo con ayuda de un "dilutor dispensador" a tubos colorimétricos. Este procedimiento se sigue con las disoluciones patrón de P, de manera que las concentraciones finales de P varían entre 0.05 y 1.0 ppm P.
5. Después de 15 minutos se leen los porcentajes de transmitancia en un espectrofotómetro usando una longitud de onda de 660 mu. Las muestras pueden leerse hasta las 24 horas. Los valores de %T se representan en papel semilogarítmico donde la ordenada (escala logarítmica) representa los porcentajes de transmitancia y la abscisa (escala ordinaria) representa las ppm de P. Construido el gráfico es posible pasar directamente la lectura del colorímetro a partes por millón de P en la solución durante el análisis de la muestra.

D. Cálculos:

$$\text{Factor de Dilución} = \frac{20 \text{ ml de solución extract.}}{1.000 \text{ ml} \times 1.000 / 2.85 \text{ g}} \times \frac{20 \text{ ml de extracto suelo}}{1.000} = 70.2$$

$$\text{P disponible en el suelo (ppm)} = \text{ppm en la solución muestra} \times 70.2.$$

3.4.2. Fósforo Extraíble por Carbonato Acido de Sodio *

El empleo de una disolución de carbonato ácido de sodio

* Olsen et al (1954)

(NaHCO_3 0.5N) de pH 8.5 tiene su fundamento en que esta solución regula la cantidad de calcio en solución por intermedio del carbonato cálcico.

A. Material:

Frascos de extracción de 250 ml o Erlenmeyers con tapón de vidrio Corning y resistente a los álcalis. Se han usado también frascos de plástico con buenos resultados. Agitador mecánico, papel de filtro Whatman No.42 de 15 cm ϕ o equivalente, dilutor-dispensador, vaso de 1 litro, colorímetro con filtro de 660 mu, frasco de polietileno para preparar la solución extractora.

B. Reactivos:

1. Solución Extractora (NaHCO_3 0.5M): Disolver 42 g de carbonato ácido de sodio (NaHCO_3) en 1 litro y ajustar a pH 8.5 con NaOH. La alcalinidad de esta solución tiende a aumentar con el tiempo a no ser que se proteja con una capa de aceite mineral. Verificar periódicamente el pH.
2. Carbón activo: Se usa Darco G-60 o similar al que se purifica de fosfatos lixiviándolo previamente con carbonato ácido de sodio, se lava con agua doblemente deionizada o destilada y se seca.
3. Soluciones patrones para desarrollo de color.

Solución A: Disolver 60 g de molibdato de amonio $[(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24} \cdot 4\text{H}_2\text{O}]$ en 200 ml de agua doblemente deionizada o destilada, añadir 1.455 g de tartrato de antimonio y potasio $[\text{K}(\text{SbO})\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 1/2 \text{H}_2\text{O}]$ y disolver. Agregar lentamente con agitación suave 700 ml de ácido sulfúrico concentrado (H_2SO_4). Enfriar la solución y diluir a volumen de 1 litro con agua doblemente deionizada o destilada.

Solución B: Disolver 132 g de ácido ascórbico ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$) en agua doblemente deionizada o destilada. Completar volumen a 1 litro con agua doblemente deionizada o destilada.

4. Solución de Trabajo: Preparar esta solución en el día a partir de las Soluciones A y B del Párrafo 3. Tomar 45 ml de la Solución A y transferir a 800 ml de agua doblemente deionizada o destilada en un vaso de 1 litro, mezclar y añadir 18 ml de la Solución B llevando luego a volumen con agua doblemente deionizada o destilada.
5. Solución Estándar de Fósforo: Disolver 0.2195 g de fosfato dehidrogenado de potasio cristalizado (KH_2PO_4), previamente secado durante 1 hora a 105°C . Diluir con agua doblemente deionizada o destilada en matraz volumétrico de 1 litro y completar volumen. La solución contendrá 50 ppm de P a partir de la cual se preparan las soluciones para la curva patrón de P de la manera indicada en la Tabla 3.

Tabla 3. Concentraciones de las Disoluciones Patrón de Fósforo

| Volumen de la Solución Estándar (50 ppm) | Volumen final con H_2O doblemente deionizada o destilada | Concentración de P |
|--|--|--------------------|
| ml | ml | ppm |
| 0.0 | 250 | 0.0 |
| 2.5 | 250 | 0.5 |
| 5.0 | 250 | 1.0 |
| 10.0 | 250 | 2.0 |
| 20.0 | 250 | 4.0 |
| 30.0 | 250 | 6.0 |
| 40.0 | 250 | 8.0 |
| 50.0 | 250 | 10.0 |

C. Procedimiento:

1. Colocar en un frasco de extracción 2.5 g de suelo y adicionar 50 ml de solución extractora de carbonato de sodio (pH 8.5) y aproximadamente 1 g de carbón activado.
3. Agitar por 30 minutos.
4. Filtrar la solución usando papel filtro Whatman No.42 o equivalente. Si el filtrado no es claro, retornar al frasco y

añadir más carbón agitando rápidamente y volviendo a filtrar por el mismo filtro.

Nota: Los extractos de suelo obtenido con carbonato de sodio presentan a menudo coloraciones intensas. Por esta razón se recomienda el método de molibdato azul con ácido ascórbico, ya que éste elimina las interferencias debidas al color. Comparaciones realizadas entre la cantidad de P medido, usando carbón para recuperar el color y sin carbón, han mostrado que hay una diferencia de menos de 1 ppm de P cuando la cantidad extraída es menos de 20 ppm de P.

4. Con un "dilutor dispensador" tomar 2 ml de filtrado, añadir 8 ml de agua doblemente deionizada o destilada y 10 ml de la solución de trabajo (Párrafo 4 de reactivos). Las diluciones patrones de P deben tener el mismo procedimiento que las muestras.
5. Después de 15 minutos, leer los porcentajes de transmitancia (%T) en un espectrofotómetro o colorímetro usando una longitud de onda de 660 mu.
6. Estos valores de %T se llevan a un gráfico en papel semilogarítmico en cuya abscisa (escala ordinaria) se representan las partes por millón de fósforo en solución (ppm P) y en la ordenada (escala logarítmica) se representan los porcentajes de transmisión de la luz (%T). Los puntos obtenidos se unen por una línea recta y a partir de este gráfico se pueden calcular las ppm de la solución-muestra sin más que leer en el colorímetro el %T correspondiente.

La cantidad de fósforo extraíble por el método del carbonato ácido se puede calcular:

$$\text{Factor de Dilución} = \frac{50 \text{ ml de solución extract.}}{1.000 \text{ ml}} \times \frac{1.000 \text{ g}}{2.5 \text{ g}} \times \frac{20 \text{ ml}}{2 \text{ ml}} \div \frac{\text{vol. extrac.}}{\text{final suelo}} = 200$$

$$P \text{ disponible en el suelo (ppm)} = \text{ppm en la solución-muestra} \times 200.$$

3.5. DETERMINACION DE CATIONES CAMBIABLES EN SUELOS CON pH MENOR A 5.4, CON CARGA VARIABLE EN FUNCION DEL pH Y NO CALCAREOS, NO SALINOS*.

3.5.1. Obtención del Extracto del Suelo.

A. Material:

Vasos de extracción de 50 ml, agitador de muestras, balones volumétricos de 100 ml, dispensador de 10 ml, frascos para la solución extractora, pipeta automática de 50 ml, embudos plásticos o de vidrio.

B. Reactivos:

Solución extractora de KCl 1N: Pesar 74.56 g de KCl, disolver en aproximadamente 500 ml de agua doblemente deionizada o destilada y completar volumen a 1 litro.

C. Procedimiento:

1. Pesar 10 g de suelo seco al aire y añadir 50 ml de KCl 1N.
2. Agitar durante 30 minutos y filtrar recibiendo en balones volumétricos de 100 ml. Lavar el suelo con 5 porciones de 10 ml cada una de KCl 1N. Finalizada la filtración completar volumen con KCl 1N y agitar para obtener una mezcla homogénea del filtrado (extracto de suelo en KCl 1N). Este filtrado constituye el extracto de suelo a partir del cual se determinan todos los cationes cambiables con excepción del K.

3.5.2. Acidez Intercambiable (Al + H):

A. Material:

Erlenmeyers de 125 ml, pipeta volumétrica de 50 ml, bureta con frasco para NaOH; frasco gotero para la solución de fenolftaleína.

B. Reactivos:

1. Metil Naranja 0.1% (indicador): Pesar 0.1 g de metil

* Lin y Coleman (1960), Pratt y Bair (1961), Coleman y Thomas (1967).

naranja y disolver con un poco de agua destilada para luego completar volumen a 100 ml con agua destilada.

2. Fenolftaleína 1% (indicador): Pesar 1 g de fenolftaleína y disolver en 70 ml de alcohol etílico para luego completar volumen a 100 ml con alcohol etílico.
3. Solución de NaOH 0.05N: Preparar a partir de una solución de NaOH 0.1N tomando 500 ml de esta solución y completando a volumen de 1 litro con agua doblemente deionizada o destilada.

C. Procedimiento:

1. Acidez Intercambiable: Transferir 50 ml del extracto obtenido con KCl 1N a un Erlenmeyer de 125 ml de capacidad. Agregar 3 gotas de fenolftaleína al 1% y titular con NaOH 0.05N hasta la aparición de un color rosado pálido permanente. Anotar los ml de NaOH empleados en la titulación.
2. Hidrógeno Intercambiable: Transferir 50 ml del extracto obtenido con KCl 1N a un Erlenmeyer de 125 ml de capacidad. Agregar 3 gotas del indicador metil naranja al 0.1% y titular con NaOH 0.05N hasta la aparición de un color amarillo permanente en la solución. Anotar los ml de NaOH empleados en la titulación.

D. Cálculos:

La acidez intercambiable y el hidrógeno intercambiable expresados en miliequivalentes/100 g suelo se calcula por la relación:

$$\text{Acidez Intercambiable o H intercambiable (meq/100g suelo)} = \text{ml NaOH} \times \frac{N \text{ NaOH}}{10} \times \frac{100}{\text{peso suelo}}$$

$$\text{Acidez Intercambiable o H intercambiable (meq/100g suelo)} = \text{ml NaOH} \times 0.05 \times \frac{100}{10}$$

$$\text{Acidez Intercambiable o H intercambiable (meq/100g suelo)} = \text{ml NaOH} \times 0.5$$

$$\text{Al Intercambiable} = \text{Acidez Intercambiable} - \text{H intercambiable.}$$

3.5.3. Calcio (Ca).

A. Determinación:

El calcio se determina en el extracto de KCl 1N tomando 2 ml y diluyendo con una solución de NaCl*. Leer la transmitancia en un espectrofotómetro de absorción atómica, usando estándares de Ca que han recibido el mismo tratamiento que las muestras, de tal forma que el estándar más concentrado sea igual a 5.0 ppm de Ca. Se usa la llama de óxido nitroso acetileno. La cantidad de calcio se determina considerando el factor de dilución (FD) que resulta del producto de:

$$FD = \frac{\text{ppm}}{20 \text{ g}} \times \frac{100 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{100 \text{ g}}{10 \text{ g}} \times \frac{20 \text{ ml}}{2 \text{ ml}} = 0.5$$

$$\text{Ca (meq/100 g)} = \text{ppm Ca en la solución-muestra} \times 0.5$$

B. Preparación del Estándar de Calcio:

Preparar a partir de una solución de 1.000 ppm de Ca (solución preparada comercialmente), estándares de 0, 4, 10, 30, 50 ppm Ca tomando de la solución concentrada las cantidades siguientes: 0, 1, 2.5, 7.5 y 12.5 ml y diluirlas a 250 ml con H₂O doblemente deionizada o destilada. Al momento de utilizarlas en el espectrofotómetro de absorción atómica deben diluirse de la manera siguiente: Tomar 2 ml de cada una por separado y diluirlas a volumen final de 20 ml con la solución de NaCl obteniéndose las siguientes concentraciones: 0, 0.4, 1.0, 3.0 y 5.0 ppm Ca, las cuales se usan para la curva patrón.

* Solución de Sodio: Pesar 50.84 g de cloruro de sodio y disolver por completo en unos 200 ml de H₂O doblemente deionizada o destilada y completar volumen a 1 litro. La concentración que se obtiene es de 20.000 ppm Na. A partir de esta solución se obtiene una solución diluída de Na tomándose 60 ml de la solución de 20.000 ppm y diluyendo a 1 litro. Esta solución se utiliza para diluir las muestras y evitar interferencia en los extractos al usar espectrofotometría de absorción atómica.

3.5.4. Magnesio (Mg).A. Determinación:

Utilizar la misma dilución del extracto de KCl 1N, usada en la determinación de calcio, y leer directamente la transmitancia en un espectrofotómetro de absorción atómica, usando una curva calibrada cuyo estándar más alto sea de 1.5 ppm Mg. Se emplea la llama de aire-acetileno. La cantidad de Mg se calcula considerando un factor de dilución (FD) que resulta de:

$$FD = \frac{\text{ppm}}{12} \times \frac{100 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{100 \text{ g}}{10 \text{ g}} \times \frac{20}{2} = 0.83$$

$$\text{Mg (meq/100 g)} = \text{ppm de Mg en la solución-muestra} \times 0.83.$$

B. Preparación del Estándar de Magnesio:

Preparar a partir de una solución de 500 ppm de Mg (solución preparada comercialmente). Las concentraciones de los estándares son: 0, 2, 5 y 15 ppm Mg, tomando de la solución concentrada 0, 1, 2.5 y 7.5 ml y llevando a volumen de 250 ml con agua doblemente deionizada o destilada. Al utilizar estas concentraciones deben diluirse tomando 2 ml y completando volumen a 20 ml con la solución de NaCl. Las concentraciones de estas diluciones son: 0, 0.2, 0.5 y 1.5 ppm de Mg, respectivamente, y son las empleadas para calibrar el equipo y obtener la curva patrón de Mg.

3.5.5. Manganeso (Mn).A. Determinación:

Utilizar el extracto de KCl 1N y leer directamente la transmitancia en un espectrofotómetro de absorción atómica, usando una curva calibrada cuyo estándar más alto sea de 20 ppm Mn. Se emplea la llama aire-acetileno. La cantidad de Mn se calcula considerando un factor de dilución (FD) que resulta de:

$$FD = \frac{100 \text{ ml}}{10 \text{ g}} = 10$$

$$\text{Mn (ppm)} = \text{ppm Mn en la solución} \times 10.$$

B. Preparación de Estándares de Mn:

Preparar a partir de una solución de 1.000 ppm de Mn (Solución preparada comercialmente) de la manera indicada en la Tabla 4.

Tabla 4. Concentraciones de las Disoluciones de Manganeso.

| Volumen de la Solución Estándar (1000 ppm Mn) | Volumen final con H ₂ O doblemente deionizada o destilada | Concentración de Mn |
|---|--|---------------------|
| ml | ml | ppm |
| 0.00 | 250 | 0.0 |
| 0.25 | 250 | 1.0 |
| 0.50 | 250 | 2.0 |
| 1.00 | 250 | 4.0 |
| 1.50 | 250 | 6.0 |
| 2.50 | 250 | 10.0 |
| 5.00 | 250 | 20.0 |

3.5.6. Determinación de Potasio (K).

A. Material:

Erlenmeyer de 125 ml, agitador de muestras, dispensador de 50 ml, frasco para la solución extractora, embudos de plástico o de vidrio, papel filtro de 11 cm ϕ .

B. Reactivo:

Solución extractora de NH₄Cl 1N: Pesar 53,49 g de NH₄Cl, disolver en aproximadamente 500 ml de agua doblemente deionizada o destilada y completar volumen a 1 litro.

C. Procedimiento:

Pesar 2.5 g de suelo seco al aire y tamizado con malla No.10 (2 mm), y agitar durante 30 minutos y filtrar. Este filtrado constituye el extracto de suelo. Leer directamente la transmitancia en un espectrofotómetro de absorción atómica, usando una curva calibrada cuyo estándar más alto sea de 40 ppm K.

Se emplea la llama aire-acetileno. El factor de dilución (FD) a considerar en los cálculos de K intercambiable es el siguiente:

$$FD = \frac{\text{ppm}}{39} \times \frac{50 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{10 \text{ g}}{2.5 \text{ g}} = 0.051$$

$$K \text{ (meq/100 g)} = \text{ppm de K en la solución muestra} \times 0.051.$$

D. Preparación de Estándar de K:

Pesar 1.9069 g de KCl seco, disolver y completar volumen a 1 litro con agua deionizada o destilada. Esta solución tiene 1.000 ppm de K a partir de la cual se preparan soluciones estándar diluídas con las siguientes concentraciones: 0, 2, 4, 10, 20 y 40 ppm de K.

Ej.: Para preparar una solución que contenga 4 ppm de K, se toma 1 ml de la solución de 1000 ppm de K y se diluye en 250 ml de agua doblemente deionizada o destilada.

3.5.7. Parámetros Derivados.

A. Capacidad de Intercambio Catiónico Efectivo (CICE)*:

La capacidad de intercambio catiónico es comúnmente referida a la cantidad de cationes absorbidos por soluciones salinas amortiguadas a pH 7 con acetato de amonio (NH₄OAc) o a pH 8.2 con cloruro de bario-trietanolamina (Ba-TEA). Para suelos de pH 7 u 8.2, estas medidas reflejan en forma adecuada la capacidad de intercambio catiónico. Además, para suelos que tienen poca o ninguna carga variable, estos métodos también son adecuados. En el caso de suelos ácidos, el uso de estos métodos es satisfactorio cuando estos suelos tienen sistemas de capas silicatadas con pH de carga no dependiente, tal el caso de suelos montmorilloníticos bajos en materia orgánica. Para suelos con pH menor que 5.5 y con carga variable, tal el caso de algunos Oxisoles y Ultisoles, los métodos indicados sobreestiman la capacidad de intercambio catiónico. En este caso, la medida que

* Coleman y Thomas (1967)

determina más exactamente la carga total al pH actual del suelo es el desplazamiento de cationes por una sal no amortiguada como el KCl, y la suma de cationes cambiabiles ha sido denominada "Capacidad de Intercambio Catiónico Efectiva" (Coleman y Thomas, 1967).

En general, valores de CICE superiores a 4 meq/100 g en suelos ácidos sugieren suficiente CIC para prevenir pérdidas considerables de cationes por lixiviación (Sánchez, 1976).

Capacidad de Intercambio Cationes Efectiva (CICE) = Al + Ca + Mg.

B. Porcentaje de Saturación de Aluminio:

El porcentaje de saturación de aluminio de la capacidad de intercambio catiónico efectiva es otra medida útil de la acidez del suelo. La saturación de Al es la relación entre el Al intercambiable extraído por una sal no amortiguada de KCl y la suma de bases cambiabiles más el Al intercambiable.

$$\% \text{ Saturación de Al} = \frac{\text{Al}}{\text{Al} + \text{Ca} + \text{Mg}} \times 100$$

3.6. DETERMINACION DE CATIONES CAMBIABLES EN SUELOS CON pH 5.4-7.0, CON CARGA NO DEPENDIENTE DEL pH Y NO CALCAREOS, NO SALINOS. *

3.6.1. Obtención del Extracto de Suelo.

A. Material:

Erlenmeyers de 125 ml, bureta automática de 25 ml, frascos volumétricos de 100 ml, papel filtro de 5.5 cm ϕ , embudos Buchner de 6 cm ϕ , gradilla para succionar y bomba de succión, frasco para solución extractora.

B. Reactivos:

1. Acetato de Amonio 1N, pH 7: Pesar 77.08 g de acetato de amonio y disolver por completo en 500 ml de agua doblemente deionizada o destilada y completar volumen a 1 litro.

* Peech et al (1947), Chapman (1965).

2. Solución de Sodio: Pesar 50.84 g de cloruro de sodio y disolver por completo en unos 200 ml de agua doblemente deionizada o destilada y completar volumen a 1 litro. La concentración que se obtiene es de 20.000 ppm Na. A partir de esta solución se obtiene una solución diluída de Na tomándose 60 ml de la solución de 20.000 ppm y diluyendo a 1 litro. Esta solución se utiliza para diluir las muestras y evitar interferencia en los extractos al usar espectrofotometría de absorción atómica.

C. Procedimiento:

1. Pesar 5 g de suelo en un Erlenmeyer de 125 ml y agregar 25 ml de la solución de acetato de amonio 1N. Agitar durante 30 minutos, dejar en reposo 15 minutos y filtrar usando succión. El filtrado se recibe en balón volumétrico de 100 ml, lavando el suelo con pequeñas porciones de la solución de acetato de amonio. Después de terminada la filtración, completar volumen y agitar. Este filtrado constituye el extracto de suelo a partir del cual se determinan los cationes cambiables.

3.6.2. Calcio (Ca), Magnesio (Mg) y Potasio (K).

A. Determinación:

Por medio de un "dilutor dispensador", tomar 2 ml de filtrado (extracto) y 18 ml de una solución de sodio de manera de obtener 1.000 ppm de Na. Leer la transmitancia en espectrofotómetro de absorción atómica usando estándares de Ca que han recibido el mismo tratamiento que las muestras, de tal forma que el estándar más concentrado no exceda de 5 ppm Ca. Se usa la llama óxido nitroso-acetileno para la lectura de Ca.

$$\text{Factor de Dilución(FD)} = \frac{\text{ppm}}{20} \times \frac{100 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{100 \text{ g}}{5 \text{ g}} \times \frac{20 \text{ ml}}{2 \text{ ml}} = 1$$

$$\text{Ca (meq/100 g suelo)} = \text{ppm en solución} \times 1.$$

Para la determinación de Magnesio, emplear la misma solución diluída indicada en el procedimiento de Ca. Leer la trasmisividad en espectrofotómetro de absorción atómica usando estándares de magnesio que han recibido el mismo tratamiento que las muestras, de tal forma que la concentración más alta no exceda de 1.5 ppm Mg. Se usa la llama aire-acetileno para la lectura de Magnesio.

$$\text{Factor de Dilución(FD)} = \frac{\text{ppm}}{12} \times \frac{100 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{100 \text{ g}}{5 \text{ g}} \times \frac{20 \text{ ml}}{2 \text{ ml}} = 1.667$$

$$\text{Mg (meq/100 g suelo)} = \text{ppm de mg en solución} \times 1.667.$$

En el caso de determinación de Potasio, se utiliza el extracto de acetato de amonio que se obtuvo para la determinación de Ca y se lee directamente en el espectrofotómetro de absorción atómica usando estándares de K que cubran un rango entre 0-40 ppm K. Se usa la llama aire-acetileno.

$$\text{Factor de Dilución(FD)} = \frac{\text{ppm}}{39} \times \frac{100 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{100 \text{ g}}{5 \text{ g}} = 0.051$$

$$\text{K (meq/100 g suelo)} = \text{ppm en solución de K} \times 0.051.$$

B. Preparación de Estándares de Ca, Mg y K:

Seguir el mismo procedimiento indicado para suelos con pH menor a 5.4.

3.6.3. Sodio (Na).

A. Determinación:

Se utiliza el extracto de acetato de amonio y se lee directamente en el espectrofotómetro de absorción atómica usando estándares de Na que cubran un rango entre 0-20 ppm Na. Se utiliza la llama aire-acetileno.

$$\text{Factor de Dilución(FD)} = \frac{\text{ppm}}{22.99} \times \frac{100 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{100 \text{ g}}{5 \text{ g}} = 0.087$$

$$\text{Na (meq/100 g suelo)} = \text{ppm en solución de Na} \times 0.087.$$

B. Preparación de Estándares de Sodio:

Preparar una solución de 1000 ppm de Na, pesando 2.542 g de NaCl y diluyendo en 1 litro. El NaCl debe ser secado en una estufa a 110°C durante varias horas. De la solución concentrada se preparan estándares cuyas concentraciones finales sean: 0, 1, 2, 5, 10 y 20 ppm de Na. Estos estándares se preparan tomando 0, 0.25, 0.5, 1.25, 2.5 y 5 ml de la solución 1000 ppm Na y diluyendo a un volumen final de 250 ml con agua doblemente deionizada o destilada.

Nota: La muestra para determinar Na debe tomarse antes de diluir para Ca y Mg para evitar contaminación en la solución de NaCl usada para estos cationes.

3.7. DETERMINACION DE LA CAPACIDAD DE INTERCAMBIO CATIONICO (CIC) EN SUELOS DE pH MAYOR A 5.4-7.0, CON CARGA NO DEPENDIENTE DE pH Y NO CALCAREOS, NO SALINOS.

A. Material:

Erlenmeyers de 125 ml, dispensadores de 10 ml, buretas con frascos.

B. Reactivos:

1. Alcohol etílico a 96%.
2. Solución de NaCl 10%.
3. Solución de Formaldehído 38%.
4. Solución de Fenolftaleína 1%.
5. Solución de NaOH 0.1N.

C. Procedimiento:

El suelo que queda en el embudo después de obtener el extracto de acetato de amonio para determinar cationes cambiables, se lava con 5 porciones de alcohol etílico del 96%, desechándose luego estos lavados. Desplazar el amonio intercambiable mediante 5 lavados con solución de NaCl al 10%, los cuales son recogidos en Erlenmeyers de 125 ml. Después de finalizada la la filtración se agregan 10 ml de solución de formaldehído de

de 38% al filtrado anterior, 3 gotas de fenolftaleína y se titula con NaOH 0.1N hasta obtener un color rosado pálido permanente.

D. Cálculos:

$$\text{Factor de Corrección (FC)} = \frac{0.1N \times 1000}{50} = 2$$

$$\text{Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)} = \text{ml NaOH} \times 2.$$

3.8. DETERMINACION DE AZUFRE (S)*

3.8.1. Obtención del Extracto de Suelo.

A. Materiales:

Erlenmeyer de 125 ml, bureta automática de 50 ml, agitador, papel filtro de 15 cm ϕ Whatman No.42 o equivalente, balanza, embudos plásticos o de vidrio, garrafa plástica para la solución extractora.

B. Reactivos:

Fosfato de calcio $[\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}]$: Disolver 2.02 g de fosfato de calcio en 1 litro de agua deionizada o destilada. La solución tiene una concentración de 0.008M.

C. Procedimiento:

Pesar 10 g de suelo en un Erlenmeyer de 125 ml y agregar 50 ml de la solución extractora. Agitar durante 30 minutos y después filtrar la suspensión.

Nota: Fox y colaboradores (1964) recomiendan usar fosfato de calcio en suelos con contenidos altos de materiales orgánica, ya que elimina el problema de la turbidez del extracto. El anion fosfato desplaza al anion sulfato adsorbido y el catión calcio retiene la extracción de materia orgánica del suelo, además de eliminar la contaminación que proviene del azufre orgánico.

* Referencias: Fox et al (1964), Ensminger (1954), Bartlett y Weller (1960); Massoumi y Cornfield (1963), Tabatabai y Bremner (1972), The Sulphur Institute - Tec. Bull. 14 (1968).

3.8.2. Método turbidimétrico para determinar azufre en el extracto de suelo:

Obtenido el extracto de suelo, la determinación de S en el suelo sigue un procedimiento de turbidimetría similar.

A. Material:

Colorímetro - tubos colorimétricos, pipetas de 1, 2, 2.5 y 10 ml.

B. Reactivos:

1. Solución de Acido Nítrico al 25% v/v: Mezclar 25 ml de ácido nítrico reactivo puro y 75 ml de agua deionizada o destilada.
2. Solución de Acido Acético-Acido Fosfórico: Mezclar 900 ml de ácido acético con 300 ml de ácido fosfórico.
3. Gelatina - Cloruro de Bario: Disolver 0.3 g de gelatina (Difco Bacto Gelatin - DIFCO Laboratorios Inc. Detroit Mich.) en 100 ml de agua caliente (60-70°C) y enfríe la solución a 4°C. Después de 4 horas llevar el fluido semigelatinoso a la temperatura ambiente y agregar 18 g de Cloruro de Bario ($BaCl_2 \cdot 2H_2O$) grado reactivo y agitar la mezcla hasta que el cloruro de bario esté disuelto. Agregar 1 ml de la solución de 320 ppm S-SO₄, agitar y llevar la solución a la nevera a 4°C por 16 horas. La solución debe estar a la temperatura ambiente por lo menos 2 horas antes de usarla.

C. Procedimiento:

1. Tomar 10 ml del filtrado (extracto de suelo).
2. Agregar 2.5 ml de ácido nítrico 25%.
3. Añadir 2 ml de la mezcla ácido acético - fosfórico, y agitar la muestra hasta que esté completamente homogénea.
4. Agregar 4.5 ml de agua deionizada o destilada.

5. Agregar 1 ml de la mezcla gelatina cloruro de bario y agitar bien hasta que la muestra esté bien homogénea.
6. Dejar en reposo por 70 minutos y luego agitar y leer a los 10 minutos el porcentaje de transmitancia en un colorímetro a 420 mu. Calcular el contenido de S-SO₄ en la alícuota analizada por referencia de una curva calibrada.

D. Preparación de Estándares de S:

Disolver 5.434 g de sulfato de potasio (K₂SO₄) grado reactivo en agua deionizada o destilada y diluir la solución a 1 litro. Un ml de esta solución contiene 1 mg de S-SO₄. Para la preparación de la curva pipetear 0, 8, 16, 32, 48, 64 y 80 ml de solución estándar de sulfato de potasio en volumétricos de 100 ml y ajustar el volumen con agua deionizada o destilada y agitar la mezcla. Las concentraciones son de 0, 80, 60, 320, 480, 640 y 800 ppm S. Luego pipetear alícuotas de 2 ml de los estándares anteriores en volumétricos de 50 ml y completar volumen con la solución extractora. De estas soluciones tomar 10 ml de cada una y seguir el procedimiento de la misma manera que para las muestras. Las concentraciones finales de estas soluciones son de 0, 1.6, 3.2, 6.4, 9.6, 12.8 y 16.0 ppm S.

E. Cálculos:

$$\text{Factor de Dilución (FD)} = \frac{50 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{1000 \text{ g}}{10 \text{ g}} \times \frac{20 \text{ ml}}{10 \text{ ml}} = 10$$

S disponible en el suelo (ppm) = ppm de S en la solución-muestra x 10.

3.9. DETERMINACIONES DE MICRONUTRIMENTOS.

3.9.1. Boro (B)*

A. Material:

Espectrofotómetro, bureta de 500 ml, pipeta 1 ml, vaso plástico de 250 ml, frascos plásticos de 50 ml, bureta de 50 ml,

* Dible et al (1954), Wear (1965).

plancha caliente, balanza, bomba de succión, embudos Buchner 5.5 cm ϕ , papel filtro 5.5 cm ϕ . Todo el material de vidrio debe ser de bajo o libre contenido de boro.

B. Reactivos:

1. Solución Curcumina-Ácido Oxálico: Pesar 0.04 g de curcumina y 5 g de ácido oxálico en 100 ml de etanol del 96%.
2. Alcohol etílico del 96%.

C. Procedimiento:

Pesar 10 g de suelo en un vaso de vidrio libre de boro de 250 ml y agregar 20 ml de agua doblemente deionizada o destilada. Pesar vaso + contenido y colocar sobre plancha caliente por 5 minutos exactos desde el momento en que aparece el primer hervor. Pesar nuevamente y reponer el agua perdida por evaporación. Dejar enfriar y filtrar recibiendo el extracto en frascos plásticos. Tomar 1 ml de este filtrado en vaso plástico de 250 ml y agregar 4 ml de solución curcumina-ácido oxálico y evaporar en estufa $\pm 55^{\circ}\text{C}$ durante 4 horas aproximadamente. En forma similar proceder con estándares de boro que varían entre 0.2 y 15 ug. A continuación, enfriar el vaso que contiene el residuo seco y añadir 25 ml de etanol del 96%. Agitar, filtrar y leer el color en un espectrofotómetro a 540 mu. Las muestras deben tomarse por triplicado.

D. Cálculos:

$$\text{Factor de Dilución (FD)} = \frac{20 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{1000 \text{ g}}{10 \text{ g}} = 2$$

$$\text{Boro (ppm)} = \text{ppm solución} \times 2$$

E. Soluciones Estándares de Boro:

Pesar 0.572 g de ácido bórico (H_3BO_3) y disolver con agua doblemente deionizada o destilada para luego completar volumen a 1 litro con agua doblemente deionizada o destilada. Esta solución contiene 100 ppm de B, a partir de la cual tomar 10

ml y completar a volumen de 100 ml con agua doblemente deionizada o destilada, obteniéndose una concentración de 10 ppm de B. De esta solución tomar 1, 2.4, 6.8, 10 y 15 ml, respectivamente, en balones de 50 ml y diluir con agua doblemente deionizada o destilada obteniéndose concentraciones de 0.2, 0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 y 3.0 ppm de B de los cuales tomar 1 ml y continuar con el mismo procedimiento indicado para una muestra de suelo. El estándar cero debe tomarse por triplicado.

3.9.2. Zinc (Zn), Cobre (Cu), Hierro (Fe)*

A. Material:

Vasos de extracción de 50 ml, agitador, pipeta automática de 20 ml, papel filtro 11 cm ϕ (Whatman No.42 o equivalente), frasco de vidrio para solución extractora.

B. Reactivo:

Solución Extractora (HCl 0.05N + H₂SO₄ 0.025N): Mezclar cuidadosamente 50 ml de HCl 1N y 2.5 ml de H₂SO₄ 10N llevando luego a volumen de 1 litro con agua doblemente deionizada o destilada.

C. Procedimiento:

1. Pesar 5 g de suelo seco al aire y tamizado con malla No.10 (2 mm.), transferir a un vaso de 50 ml. Añadir 20 ml de la solución extractora. La relación suelo-extractante es de 1:4.
2. Agitar por 15 minutos y filtrar usando papel filtro Whatman No.42 o equivalente.

D. Determinación:

Leer directamente, en el extracto obtenido, los elementos menores: Cu, Fe y Zn en un espectrofotómetro de absorción atómica. El factor de dilución común para estos microelementos es el siguiente:

$$\text{Factor de Dilución (FD)} = \frac{20 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{1000 \text{ g}}{5 \text{ g}} = 4$$

Zn, Cu, Fe, Mn (ppm) = ppm Zn, Cu, Fe, Mn en la solución x 4.

* Olsen y Dean (1965), Nelson et al. (1953) y Jackson (1964).

E. Preparación de Estándares de Elementos Menores:

Se emplean soluciones concentradas (1000 ppm Zn, Cu, Mn, Fe) ya preparadas comercialmente, a partir de las cuales se hacen soluciones diluídas.

1. Soluciones Estándares para Cobre (Cu) y Zinc (Zn):

| ml* de 1000 ppm de Cu y Zn | Volumen final con agua doblemente deionizada o destilada | Concentración de Cu y Zn en ppm |
|-------------------------------|--|------------------------------------|
| | ml | |
| 0.00 | 250 | 0.0 |
| 0.25 | 500 | 0.5 |
| 0.25 | 250 | 1.0 |
| 0.50 | 250 | 2.0 |
| 1.00 | 250 | 4.0 |

2. Soluciones Estándares para Hierro (Fe):

| ml* de 1000 ppm de Fe y Mn | Volumen final con agua doblemente deionizada o destilada | Concentración de Fe en ppm |
|-------------------------------|--|-------------------------------|
| | ml | |
| 0.00 | 250 | 0.0 |
| 0.25 | 250 | 1.0 |
| 0.50 | 250 | 2.0 |
| 1.00 | 250 | 4.0 |
| 1.50 | 250 | 6.0 |
| 2.50 | 250 | 10.0 |
| 5.00 | 250 | 20.0 |

* Estos mililitros de las soluciones de 1000 ppm de Cu, An y Fe pueden ir juntos en el mismo volumen.

4. METODOLOGIA ANALITICA PARA PLANTAS*

4.1. OBTENCION DEL EXTRACTO DE TEJIDO VEGETAL:**

El extracto de tejido vegetal resulta de la digestión de la muestra para determinar P, K, Ca, Mg, S y Al.

A. Material:

Tubos graduados de digestión Taylor de 50 ml, bureta con frasco, plancha caliente ubicada en campana con extractor para ácido perclórico.

B. Reactivos:

1. Acido Nítrico (65% analítico - grado reactivo)
2. Acido Perclórico (70% analítico - grado reactivo)
3. Acido Clorhídrico 6M : Tomar 500 ml de HCl concentrado y diluir a 1 litro con agua doblemente deionizada o destilada.

C. Procedimiento:

Pesar 0.25 g de tejido molido y seco en estufa (65°C por 24 horas) en tubos de digestión Taylor. Agregar 3 ml de ácido nítrico (HNO₃) y calentar a baja temperatura (150°C) en una plancha durante 30 minutos. Dejar enfriar durante 15 minutos y agregar 2 ml de ácido perclórico. Continuar el calentamiento a alta temperatura (200°C) durante 1 hora o más, hasta la aparición de humos blancos y obtener un líquido blanco. Dejar enfriar y agregar 3 ml de HCl 6M. Completar volumen a 50 ml con agua doblemente deionizada o destilada y agitar completamente. Esta solución constituye el extracto del tejido vegetal a partir del cual se determinan los elementos: fósforo, potasio, calcio, magnesio, azufre y aluminio.

4.2. DETERMINACIONES DE FOSFORO (P), POTASIO (K), CALCIO (Ca) Y MAGNESIO (Mg).

4.2.1. Fósforo (P):

Determinar colorimétricamente y en forma similar a lo indicado

* Johnson y Ulrich (1959), Sarruge y Haag (1974), Chapman y Pratt (1961), Hunter (1974).

** Sarruge y Haag (1974), Johnson y Ulrich (1959)

para suelos. El factor de dilución (FD) resulta de la siguiente relación:

$$\text{Factor de Dilución (FD)} = \frac{\text{ppm P}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{50 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{100 \text{ g}}{0.25 \text{ g}} \times \frac{20}{2} = 0.2$$

$$\% \text{ P} = \text{ppm P solución} \times 0.2.$$

4.2.2. Potasio (K).

A. Determinación:

Se lee directamente en el extracto obtenido usando la técnica de emisión de llama en el espectrofotómetro de absorción atómica usando llama aire-acetileno.

B. Estándares de Potasio (K):

Preparar una solución de 1.000 ppm K a partir de cloruro de potasio (KCl). Para ésto, tomar 10g del reactivo y secar en estufa a 105°C durante 1 hora. Una vez seco y frío pesar 1.91 g, disolver y diluir a 1 litro. A partir de esta solución, tomar alícuotas de 0, 2.5, 5, 10, 15, 20 y 30 ml diluyendo en 250 ml de agua doblemente deionizada o destilada. Las concentraciones finales serán de 0, 10, 20, 40, 60, 80 y 120 ppm K, respectivamente.

C. Cálculos:

El factor de dilución (FD) resulta de la siguiente relación:

$$\text{FD} = \frac{\text{ppm}}{1000} \times \frac{50 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{100 \text{ g}}{0.25 \text{ g}} = 0.02$$

$$\% \text{ K} = \text{ppm K en solución} \times 0.02$$

4.2.3. Calcio (Ca):

Su determinación es similar a la descrita en suelos y el factor de dilución (FD) resulta en este caso de la siguiente relación:

$$FD = \frac{\text{ppm}}{1000} \times \frac{50 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{100 \text{ g}}{0.25 \text{ g}} \times \frac{20}{2} = 0.2$$

% Ca = ppm de Ca en solución x 0.2.

4.2.4. Magnesio (Mg):

Su determinación es similar a la descrita en suelos, y el factor de dilución (FD) resulta en este caso de la siguiente relación:

$$FD = \frac{\text{ppm}}{1000} \times \frac{50 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{100 \text{ g}}{0.25 \text{ g}} \times \frac{20}{2} = 0.2$$

% Mg = ppm de Mg en solución x 0.2.

4.3 DETERMINACION DE AZUFRE (S), *

A. Material:

Tubos colorimétricos, pipetas de 10 ml, pipetas de 1 ml, colorímetro.

B. Reactivos:

1. Solución de Gelatina (Difco Bacto Gelatin, DIFCO Laboratories Inc, Detroit Michigan, USA: Disolver 0.6 g de gelatina en 200 ml de agua doblemente deionizada o destilada caliente (60-70°C) y enfriar la solución a 4°C. Después de 4 horas llevar el fluido semigelatinoso a la temperatura ambiente. Agregar 2 g de cloruro de bario de grado reactivo ($\text{BaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y agitar la mezcla hasta que el cloruro de bario esté disuelto. Llevar la solución a la nevera a 4°C por 16 horas antes de usarla. Esta solución puede ser refrigerada y utilizada hasta tres días después de preparada.

* Tabatabai y Bremner (1970), The Sulphur Institute (1968), Fox et al. (1964).

C. Procedimiento:

Tomar 10 ml del extracto de tejido vegetal en tubos colorimétricos, agregar 10 ml de agua deionizada o destilada y mezclar. Agregar 1 ml de la solución de gelatina-cloruro de bario y agitar. Leer el porcentaje de transmitancia en un colorímetro a 420 mμ, después de 80 minutos. El factor de dilución (FD) resulta de:

$$FD = \frac{\text{ppm}}{1000} \times \frac{50 \text{ g}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{100 \text{ g}}{0.25 \text{ g}} \times \frac{20}{10} = 0.04$$

$$\% S = \text{ppm de S en solución} \times 0.04.$$

D. Preparación de Estándares de Azufre (S):

Disolver 5.434 g de sulfato de potasio (K_2SO_4) grado reactivo en agua deionizada o destilada y diluir la solución a 1 litro. Un ml de esta solución contiene 1 mg de S-sulfato (1.000 ppm de S- SO_4) a partir de la cual preparar estándares de 0, 40, 80, 160, 240, 320 y 400 ppm de S- SO_4 , tomando alícuotas de 0, 4, 8, 16, 24, 32 y 40 ml y diluyendo en balones de 100 ml con agua doblemente deionizada o destilada. Luego de preparar estos estándares, se toman alícuotas de 2 ml en tubos Taylor, se agregan 3 ml de ácido nítrico y se continúa con el mismo procedimiento empleado para las muestras. La concentración que queda en los tubos Taylor será de 0, 1.6, 3.2, 6.4, 9.6, 12.8 y 16.0 ppm S- SO_4 , respectivamente. Luego se transfieren 10 ml de estos estándares a tubos colorimétricos y se continúa con el mismo procedimiento que para las muestras, teniendo concentraciones finales de 0, 0.8, 1.6, 3.2, 4.8, 6.4, 8.0 ppm de S- SO_4 , respectivamente.

4.4. DETERMINACIONES DE ALUMINIO (Al).*

A. Material:

Tubos de ensayo graduados de 25 ml, pipetas de 2 ml, pipetas de 1 ml, pipetas de 5 ml, baño de agua hirviendo, colorímetro.

* Chenery (1948), Plant Stress Laboratory, USDA ARS (1975).

B. Reactivos:

1. Fenolftaleína: Disolver 1 g en 60 ml de etanol absoluto y completar a volumen de 100 ml con agua doblemente deionizada o destilada.
2. Hidróxido de Amonio (NH₄OH): Diluir 10 ml de NH₄OH concentrado en 100 ml de agua doblemente deionizada o destilada.
3. Aluminon: En vasos separados disolver 0.1 g del reactivo "Aluminon" (ammonium-aurine tricarboxilate, C₂₂H₂₃N₃O₉), 20 g de goma acacia y, 267 g de acetato de amonio en agua doblemente deionizada o destilada. Cuando estén disueltos, mezclar y agregar 254 ml de HCl concentrado. Filtrar y diluir a 2 litros.
4. Acido Tioglicólico 1%: Tomar 1 ml de ácido tioglicólico de grado reactivo, y diluir con agua doblemente deionizada o destilada hasta 100 ml.

C. Procedimiento:

Transferir 2 ml del extracto a un tubo de ensayo graduado de 25 ml. Agregar 2-3 gotas de fenolftaleína y luego hidróxido de amonio hasta la aparición de un color rosado. Diluir a 10 ml con agua doblemente deionizada o destilada y agregar 1 ml de la solución de ácido tioglicólico al 1%. Mezclar y agregar 5 ml de solución de "aluminon". Mezclar nuevamente y ajustar pH a 4.2 con la solución de NH₄OH. Calentar en un baño de agua hirviendo durante 16 minutos. Enfriar durante hora y media como mínimo y completar a volumen de 25 ml con agua doblemente deionizada o destilada. Mezclar completamente y leer transmitancia a 537 mu. El factor de dilución (FD) resulta de la siguiente relación:

$$FD = \frac{50 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{1000 \text{ g}}{0.25 \text{ g}} \times \frac{25 \text{ ml}}{2} = 2500$$

Al (ppm) = ppm Al en la solución x 2500.

D. Preparación de Estándares de Aluminio (Al):

Pesar 8.95 g de cloruro de aluminio ($AlCl_3 \cdot 6H_2O$), disolver en agua doblemente deionizada o destilada y completar volumen a 1 litro. Esta solución contiene 1000 ppm Al. A partir de esta solución preparar 2 soluciones conteniendo 50 y 100 ppm de Al. Para ésto, tomar 12,5 y 25 ml de la solución 1000 ppm Al y diluir a 250 ml con agua doblemente deionizada o destilada. De estos nuevos estándares transferir diferentes alícuotas indicadas en la Tabla 5., a tubos Taylor de 50 ml y seguir el procedimiento en forma similar a la muestra.

Tabla 5. Preparación de Estándares de Aluminio.

| ml de 50 ppm Al en tubos Taylor de 50ml | ppm de Al en los tubos Taylor | ppm Al tomando 2 ml de digestado en 25 ml |
|---|-------------------------------|---|
| 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1 | 0.08 |
| 2 | 2 | 0.16 |
| 4 | 4 | 0.32 |
| ml de 100 ppm Al en tubos Taylor de 50 ml | ppm de Al en los tubos Taylor | ppm Al tomando 2 ml de digestado en 25 ml |
| 3 | 6 | 0.48 |
| 4 | 8 | 0.64 |
| 5 | 10 | 0.80 |

4.5. DETERMINACION DE NITROGENO. *

A. Material:

Tubos de digestión, bloque de digestión a 370°C, microdestilador, bureta con frasco de 50 ml, Erlenmeyers de 125 ml.

B. Reactivos:

1. Hidróxido de Sodio al 50%

* Bremner (1965).

2. Solución de Acido Bórico al 4%, la cual contiene 5 ml de solución de indicador mixto/litro.
3. Indicador Mixto: Pesar 0.5 g del indicador verde bromocresol y 0.1 g del indicador rojo de metilo en 100 ml de alcohol etílico del 96%.
4. HCl 0.02N : Preparar a partir de HCl 1N tomando 20 ml y diluyendo con agua doblemente deionizada o destilada a 1 litro.
5. Acido sulfúrico concentrado.
6. Catalizador: 0.5 g de selenio y 100 g de Na_2SO_4 se mezclan hasta que queden bien compactos.

C. Procedimiento:

1. Pesar 0.1 g de muestra en un tubo de digestión.
2. Agregar una porción del catalizador.
3. Agregar 4 ml de ácido sulfúrico concentrado.
4. Digerir la muestra en bloques a 370°C durante 30 minutos.
5. Dejar enfriar y agregar un poco de agua deionizada.
6. Pasar cuantitativamente el contenido del tubo a un microdestilador enjuagando con agua deionizada o destilada.
7. Agregar 20 ml de la solución de hidróxido de sodio al 50% y destilar recibiendo el destilado en una solución de ácido bórico al 4%.
8. Titular el destilado con HCl 0.02N hasta obtener un color gris claro.

NOTA: Al preparar las soluciones debe incluirse un control que contiene todos los reactivos menos la muestra. Luego de la titulación, los mililitros gastados con este control deben tomarse en cuenta para restarlos a las muestras.

D. Cálculos:

$$\% N = \frac{V-B}{0.1} \times 0.02 \times 0.014 \times \frac{100}{0.1}$$

Donde: V = ml gastados de HCl 0.02N en la muestra

B = ml gastados de HCl 0.02N en el control

0.02 = normalidad del HCl

0.014 = peso equivalente del nitrógeno

100 = relación porcentual

0.1 = peso de la muestra

4.6. DETERMINACION DE MICRONUTRIMENTOS (Zn, Cu, Fe, Mn, Na)*.

4.6.1. Obtención del Extracto de Tejido Vegetal:A. Materiales:

Tubos de digestión Taylor graduados 12.5, 25, 37.5 y 50 ml, buretas de 50 ml con frasco, plancha caliente para tubos.

B. Reactivos:

Mezcla Acido Nitro-Perclórico: Mezclar 1 litro de ácido nítrico (NH₃) 65% analítico-grado reactivo con 500 ml de ácido perclórico (HClO₄) 70%, la relación entre ácidos es 2:1.

C. Procedimiento y Determinación de Micronutrientos (Zn, Cu, Fe, Mn, Na):

Pesar 0.5 g de tejido vegetal molido y seco en tubos de digestión Taylor y agregar 5 ml de la mezcla ácido nitro-perclórico. Colocar los tubos en un bloque de aluminio y calentar a una tasa tal, que el ácido nítrico sea expelido en 35 a 40 minutos, teniendo en cuenta que la temperatura final no debe exceder 220°C. Luego que el ácido perclórico haya reaccionado y aparezcan humos blancos, retirar los tubos y enfriar. Diluir a 12.5 ml con agua doblemente deionizada o destilada y esta solución constituye el extracto.

* Baker y Smith (1973), Sarruge y Haag (1974), Chapman y Pratt (1961).

Los elementos Zn, Cu, Fe, Mn y Na son determinados en forma similar a la indicada en su determinación en suelos. El factor de dilución (FD) común resulta de la siguiente relación:

$$FD = \frac{12.5 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{1000 \text{ g}}{0.5 \text{ g}} = 25$$

Zn, Cu, Fe, Mn, Na (ppm) = ppm Zn,Cu,Fe,Mn,Na en la solución x 25.

4.6.2. Determinación de Boro (B). *

A. Material:

Crisoles de porcelana, mufla, varillas protegidas en su extremo con tubo de goma, embudos, bureta de 100 ml.

B. Reactivos:

Preparar una solución de HCl 0.1N tomando 8.3 ml de HCl concentrado (reactivo puro) y diluyendo en 1 litro. El resto de reactivos son los mismos empleados en suelos.

C. Procedimiento:

Pesar 0.5 g de tejido vegetal molido y seco en crisoles de porcelana e incinerar en una mufla a 550°C durante 2 horas. Enfriar el crisol y contenido y añadir 10 ml de HCl 0.1N triturando el residuo mediante una varilla. Filtrar y proceder tal como se indica en suelos. El factor de dilución (FD) es el siguiente:

$$FD = \frac{10 \text{ ml}}{1000 \text{ ml}} \times \frac{1000 \text{ g}}{0.5 \text{ g}} = 20$$

Boro (ppm) = ppm B en solución x 20.

NOTA: Los estándares de boro son los mismos que para suelos.

* Dibleet al. (1954).

4.7. DETERMINACION DE SILICE CRUDA.

A. Material:

Tubos Taylor de 50 ml, crisol Gooch de porcelana, planchas para tubos, mufla, asbesto, balanza, vasos de 250 ml, Erlenmeyers de vacío.

B. Reactivo:

Acido nítrico - Acido perclórico en una relación de 2:1.

C. Procedimiento:

1. Pesar 0.5 g de tejido vegetal en tubos Taylor.
2. Agregar 5 ml de ácido nítrico-perclórico relación 2:1.
3. Digerir la muestra en plancha caliente.
4. Transferir la solución digerida a un vaso de 250 ml lavando bien el tubo.
5. Preparar un Erlenmeyer de vacío introduciendo un crisol Gooch de porcelana con capa de asbesto (el crisol debe ser pesado previamente).
6. Tomar el contenido del vaso y filtrar a través del crisol Gooch de porcelana con capa de asbesto y lavar con abundante agua hasta obtener un "test negativo a ácido". Luego incinerar en una mufla a la temperatura de 550°C durante 2 horas. Dejar enfriar y pesar.

D. Cálculos:

$$\% \text{ Silice Cruda} = \frac{\text{Peso de la muestra seca en la mufla}}{0.5 \text{ g.} = \text{peso de la muestra}} \times 100$$

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Allison, L.E. 1965. Organic Carbon. pp. 1367-1368. In C.A. Black (ed), Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Amer. Soc. Agr., Madison, Wisconsin.
- Baker, A.S. y R.R. Smith. 1973. Preparation of solutions for atomic absorption analyses of Fe, Mn, Zn, and Cu in plant tissue. J. Agr. Food Chem. 22:103.
- Bartlett, F.D. y J.R. Weller. 1960. Turbidimetric determination of sulfate-sulfur in soil extracts. Soil Sci. 90:201-204.
- Bornemisza, E., M. Constenla, A. Alvarado, E.J. Ortega, y A.J. Vasquez. 1979. Organic carbon determination by the Walkley-Black and Dry Combustion Methods in surface soils and Adept Profiles from Costa Rica. Soil Sci. Soc. Am. J. 43:78-83.
- Bray, R.H. and L.T. Kurtz. 1945. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soil. Soil Sci. 59:39-45.
- Bremner, J.M. 1965. Total Nitrogen. pp. 1149-1178. In C.A. Black (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Amer. Soc. Agr., Madison, Wisconsin.
- Chapman, H.D. 1965. Cation-Exchange Capacity. pp. 891-901. In C.A. Black (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Amer. Soc. Agr., Madison, Wisconsin.
- Chapman, H.D. y P.F. Pratt. 1961. Methods of Analysis for Soils, Plants and Waters. University of California, Division of Agricultural Sciences, Riverside.
- Chenery, E.M. 1948. Thioglycolic acid as an inhibitor for iron in the colorimetric determination of aluminum by means of aluminom. Analyst 73:501-502.
- Coleman, N.T. y G.W. Thomas. 1967. The basic chemistry of soil acidity. Agron. Monogr. 12:1-41.

- Cline, M.G. 1944. Principles of soil sampling. *Soil Sci.* 58:275-288.
- Dewis, J. and F. Freitas. 1970. Physical and chemical methods of soil and water analysis. FAO Soil Bull. No.10, Roma.
- Dible, W.T., W. Truog, and K.C. Berger. 1954. Boron determination in soils and plants. Simplified curcumin procedure. *Anal. Chem.* 26:418-421.
- Ensminger, L.E. 1954. Some factors affecting the adsorption of sulfate by Alabama soils. *Soil Sci. Amer. Proc.* 18:259-264.
- Fox, R.L., R.A. Olsen, and H.F. Rhoades. 1964. Evaluating the sulfur status of soils by plant and soil tests. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 28:243-246.
- Gardner, W.H. 1965. Water Content. pp. 82-127. In C.A. Black (ed.) *Methods of Soil Analysis. Part 1. Physical and Mineralogical Properties.* Amer. Soc. Agr., Madison, Wisconsin.
- Hausenbuiller, R.L. 1957. Sampling saline and alkaly soils for laboratory analysis. *Washington Agr. Exp. Sta. Cir.* 303. 6 p.
- Hunter, A.H. 1974. Laboratory analysis of plant tissue samples. *International Soil Fertility Evaluation and Improvement*, Raleigh, N.C. 5 p.
- Jackson, M.L. 1964. *Analisis Químico de Suelos.* Omega, Barcelona, España. 662 p.
- Johnson, C.M. and A. Ulrich. 1959. *Analytical Methods.* California Agr. Exp. Sta. Bull. 766.
- Jones, J.B. y W.J.A. Steyn. 1973. Sampling, Handling and Analyzing Plant Tissue Samples. pp. 249-270. In L.M. Walsh y J.D. Beaton (eds.), *Soil Testing and Plant Analysis.* Soil Sci. Amer., Madison, Wisconsin.
- Lin, C. and N.T. Coleman. 1960. The measurement of exchangeable aluminum in soils and clays. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.* 24:444-446.
- Massoumi, A. and A.H. Cornfield. 1963. A rapid method for determining sulphate in water extracts of soil. *Analist* 88:321-322.

- McGaveston, D.A. and J.P. Widdowson. 1978. Comparison of six extractants for determining available phosphorus in soils from the Kingdom of Tonga. *Trop. Agric. (Trinidad)* 55:141-148.
- Minor, R.S. 1957. Physical measurements. Part I. Berkeley, California. 180 p.
- Murphy, J. and J. Riley. 1963. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Anal. Chem. Acta* 27:31-35.
- Nelson, W.L., A. Mehlich, and E. Winters. 1953. The development, evaluation and use of soil tests for phosphorus availability. *Agron.* 4:153-188.
- Olsen, S.R., C.V. Cole, F.S. Watanabe, and L.A. Dean. 1954. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate. *USDA Circular* 939:1-19.
- Olsen, S.R. and L.A. Dean. 1965. Phosphorus. In C.A. Black (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* Amer. Soc. Agr., Madison, Wisconsin.
- Olson, A.R., C.R. Koch y G.C. Pimentel. 1956. *Introductory Quantitative Chemistry.* Freeman & Co., San Francisco. 470 p.
- Peck, T.R. y S.W. Melsted. 1973. Field Sampling for Soil Testing. In Walsh, L.M. y J.D. Beaton (ed.), *Soil Testing and Plant Analysis - Revised Edition.* Soil Sci. Soc. of America, Inc. Madison, Wisconsin, U.S.A. 491 p.
- Peech, M., L.T. Alexander, L.A. Dean and J.F. Reed. 1947. *Methods of Soil Analysis for Soil Fertility Investigations.* *USDA Circular* 757. 25 p.
- Peech, M. 1965. Hydrogen-Ion Activity, pp.914-926. In C.A. Black (ed.), *Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties.* Amer. Soc. Agr., Madison, Wisconsin.
- Petersen, R.G. y L.D. Calvin. 1965. Sampling. In C.A. Black et al. (eds.) *Methods of Soil Analysis. Agronomy No.9. Part I.* American Society of Agronomy, Inc. Madison, Wisconsin, U.S.A. 770 p.

- Plant Stress Laboratory, USDA-ARS. 1975. The aluminom procedure for determining aluminum in plant tissue. Beltsville, Maryland. 5 pp.
- Pratt, P.F. and F.L. Bair. 1961. A comparison of three reagents for the extraction of aluminum from soils. *Soil Sci.* 91:357-359.
- Reed, J.F. y J.A. Rigney. 1947. Soil sampling from fields of uniform and non-uniform appearance and soil types. *Jour. Amer. Soc. Agron.* 39:26-40.
- Richards, L.A. 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils. U.S. Salinity Laboratory, USDA Handbook 60.
- Sanchez, P.A. 1976. Properties and Management of soils in the Tropics. Wiley, New York. pp. 135-160.
- Sarruge, J.R. and H.P. Haag. 1974. Analises químicas em plantas. E.S.A. Luiz de Queiroz, Piracicaba, Sao Paulo, Brasil. 56 p.
- Steel, R.G. y J.H. Torrie. 1960. Principles and procedures of statistics. McGraw-Hill, New York. 481 p.
- Steyn, W.J.A. 1959. Leaf analysis. Errors involved in the preparative phase. *J. Agr. Food Chem.* 7:344-348.
- Tabatabai, M.A. and J.H. Bremner. 1970. A simple tubidimetric method of determining total sulfur in plant materials. *Agr. J.* 62:805-806.
- Tabatabai, M.A. and J.M. Bremner. 1972. Distribution of total and available sulfur in selected soils and soil profiles. *Agr. J.* 64:40-44.
- The Sulphur Institute. 1968. Determination of sulphur in soil and plant material. *Tec. Bull.* 14:36-40.
- Uehara, G. y J. Keng. 1975. Management implications of soil mineralogy in Latin America. pp. 351-363. In E. Bornemisza y A. Alvarado (eds.), *Soil Management in Tropical America*. North Carolina State University, Raleigh.
- Walkley, A., and I.A. Black. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Sci.* 37:29-38.

Wear, J.I. 1965. Boron. pp. 1059-1063. In C.A. Black (ed.), Methods of Soil Analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. Amer. Soc. Agr. Madison, Wisconsin.