



NECESIDAD DE MEJORAR LOS PROCEDIMIENTOS DE EVALUACION
DEL FOSFORO EN SUELOS ACIDOS E INFERTILES DE
AMERICA TROPICAL^{1/}

JOSE G. SALINAS^{2/}

^{1/} Contribución del Programa de Pastos Tropicales del CIAT en la Conferencia Latinoamericana sobre Roca Fosfórica. Octubre 10-15, 1983. Cochabamba, Bolivia.

^{2/} Ph.D. Fertilidad de Suelos y Nutrición de Plantas, Programa de Pastos Tropicales, Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, Colombia.

I. INTRODUCCION

La deficiencia de fósforo es una de las limitaciones edáficas más extendida en los suelos de América Tropical. Aproximadamente el 82% de la tierra arable de los trópicos americanos es deficiente en fósforo en su estado nativo (Cuadro 1). En los ecosistemas de sabana y bosque con suelos clasificados como Oxisoles y Ultisoles, el estimado aumenta a un 96% del área (Sánchez y Cochrane, 1980). Los problemas de la deficiencia de fósforo en estos suelos, están ligados a la elevada capacidad de fijación de fósforo. Suelos con elevada capacidad de fijación de fósforo pueden ser definidos como aquellos que requieren adiciones de por lo menos 200 Kg P/ha para proporcionar una concentración en equilibrio de 0.2 ppm P en la solución del suelo (Sánchez y Uehara, 1980). Suelos ácidos que fijan tales cantidades de fósforo pueden ser identificados con texturas superficiales limosas o arcillosas con una relación arcilla/sesquióxido de 0.2 superior, o por el predominio de alofán en la fracción arcilla de la capa arable (Buol et al., 1975).

Alrededor del 53% de la capa superficial de los suelos en América tropical es dominada por una alta capacidad de fijación de fósforo. Esta figura se ve aumentada a un 72% en las regiones con Oxisoles y Ultisoles, pero suelos altamente fijadores de fósforo son menos extensivos en los bosques de la Amazonía que en las sabanas (Cochrane y Sánchez, 1981). La elevada fijación de fósforo es considerada como una de las principales razones del porque extensas áreas en las sabanas del trópico americano están subutilizadas (León y Fenster, 1980).

El elevado costo unitario del fertilizante fosforado, ligado a las limitaciones de deficiencia y fijación de fósforo en los suelos ácidos, requiere el desarrollo de una tecnología de insumos bajos, la cual determina un uso más eficiente del fósforo aplicado en estos suelos. Salinas y Sánchez (1976), Fenster y León (1979) y Sánchez y Uehara (1980) han sugerido estrategias similares para el desarrollo de un sistema de manejo del fósforo en los suelos ácidos e infértiles de América tropical, para la producción de cultivos y pastos. Al presente, la estrategia consiste en seis componentes principales, ellos son: 1) Determinar la combinación más apropiada de dosis y métodos de aplicación de fósforo para aumentar los efectos iniciales

y residuales; 2) Mejorar los procedimientos de evaluación del fósforo en la fertilidad del suelo para realizar recomendaciones de fertilización; 3) Usar fuentes de fósforo menos costosas tales como rocas fosfóricas, ya sea solas o combinadas con fuentes más solubles de fósforo; 4) Usar cantidades moderadas de cal para aumentar la disponibilidad de fósforo; 5) Seleccionar especies y variedades que puedan desarrollar a niveles más bajos de fósforo disponible en el suelo; y 6) Explorar las posibilidades prácticas de las asociaciones con micorriza para aumentar la absorción de fósforo por las plantas. De estos seis componentes, el segundo se considera en este trabajo y con énfasis en pasturas tropicales.

II. EVALUACION DEL FOSFORO EN EL SISTEMA SUELO-PLANTA

1. Requerimiento Crítico Nutricional

Una de las vías para aumentar la eficiencia de la fertilización fosforada, es tratar de mejorar los métodos de evaluación para determinar las recomendaciones de fertilización. El propósito es identificar el requerimiento inicial de fósforo para una especie o variedad en particular ya sea en términos de fósforo disponible en el suelo (nivel crítico externo) y/o contenido foliar (% P) o acumulación de fósforo (Kg P/ha) en la planta (nivel crítico interno). Estos niveles críticos son aquellos necesarios para proporcionar un nivel adecuado de producción de materia seca definido en este trabajo como el 80% de la producción máxima. Sin embargo, además de cumplir con este requisito, es importante la selección de otros parámetros apropiados de respuesta para relacionarlos con la concentración del fósforo y su influencia en la calidad del pasto. En general, la mayoría de la investigación en regiones tropicales considera la producción de materia seca como el parámetro más apropiado. Sin embargo, en muchas circunstancias, otros parámetros vienen a ser más importantes que el rendimiento de materia seca per se. Por ejemplo, en algunos casos para medir la calidad del pasto 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 relativos a la estabilidad de una pastura y factores que afectan la

producción animal asumen importancia primaria. Así se tienen por ejemplo, la composición botánica para un balance entre gramínea y leguminosa, producción animal, calidad de la pastura, contenido de nutrimentos en el pasto en relación a los requerimientos nutricionales del animal y los efectos secundarios de la fertilización del suelo sobre la nutrición del animal (Rees y Minson, 1977). Básicamente, muy poca investigación se ha realizado en los trópicos sobre los requerimientos nutricionales de los pastos tropicales en relación a los parámetros complejos señalados anteriormente.

Como resultado de la respuesta diferencial entre especies y variedades, surgió durante los últimos años la filosofía de insumos bajos en fertilización (Sánchez y Salinas, 1981). 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 y de la eficiencia de uso del fertilizante aplicado. De aquí, es más conveniente referirse a insumos críticos de fertilización puesto que un insumo mínimo (Sánchez y Salinas, 1981) o máximo económico de fertilización (Potash and Phosphate Institute, 1982) será determinado por el requerimiento nutricional crítico de una especie dada en función de su rendimiento (producción y calidad) y de la eficiencia de uso del fertilizante. 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 una producción adecuada. 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 y la calidad de la planta declina significativamente (Ulrich, 1952, Ritchey, 1979). Este criterio exige un buen estimado del rendimiento y una cuan-

tificación de la dosis de fertilizante al nivel crítico del nutrimento en el suelo y en la planta (especie). Es importante remarcar que los niveles críticos tanto externos como internos deben ser considerados como un rango de valores y no como valores únicos, puesto que fluctúan en función de las especies, variedades y ecotipos dentro de una especie, así como también en función de suelos y climas (CIAT, 1981).

Las técnicas disponibles de diagramas de dispersión (Figura 1) y el uso de modelos discontinuos (Figura 2), desarrollados por Cate y Nelson (1971), son herramientas convenientes para la interpretación de concentraciones críticas nutricionales externas e internas así como también estimar una dosis de fertilizante necesaria para un rendimiento adecuado. Por el contrario, la Figura 3 muestra que el uso de modelos de respuesta cuadrática tienden a exagerar las dosis de fertilización (Anderson y Nelson, 1975).

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 de una especie. Respecto a los dos primeros factores, variaciones en la movilidad y retranslocación de nutrimentos dentro de la planta resultan en diferencias acentuadas de la concentración de nutrimentos en los tejidos de diferente naturaleza y 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 esos nutrimentos y en los síntomas foliares de deficiencia en los tejidos jóvenes. En el caso de los nutrimentos 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. El Cuadro 2, presenta niveles críticos internos de P en pastos tropicales asociados

con un 80 a 90% del rendimiento máximo. Estos datos deben ser utilizados como una guía en la interpretación de los resultados obtenidos en otras regiones puesto que éstos fluctúan en función de factores externos (suelo, clima) e internos (especie, variedad, tasa de crecimiento, etc.).

La importancia de garantizar que un nutrimento en estudio es el factor limitativo en la producción de un pasto, no debe ser sobreenfatizada, puesto que muchas veces en forma simultánea otros nutrimentos pueden limitar dicha productividad. Bajo estas circunstancias, la interacción de nutrimentos y la identificación de nutrimentos claves constituyen un aspecto de importancia en el diagnóstico de los requerimientos nutricionales.

Swanson (1963) ha sugerido un modelo alternativo basado en la "Ley del Mínimo" de Liebig, el cual puede ser considerado para la interpretación de interacciones entre nutrimentos. Este modelo (Figura 4) 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 externos limitantes son eliminados.

La interacción entre nutrimentos se presenta de diferentes maneras a través de los resultados experimentales. La más común ocurre cuando simultáneamente más de un nutrimento contribuye a una respuesta dada. En estos casos, cualquier nutrimento limitante afectará la respuesta de la especie forrajera a cualquier otro nutrimento. En efecto, un ensayo de 3 gramíneas forrajeras (*Andropogon gayanus*, *Brachiaria decumbens* y *Brachiaria humidicola*) fue establecido para evaluar diferentes niveles de P y K. Los resultados presentados en la Figura 5 muestran 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 22 kg P/ha y *Brachiaria humidicola* a 44 Kg P/ha. En la medida en que se incrementaron las dosis de K, todas las especies aumentaron sus rendimientos y acentuaron sus respuestas a P. *Andropogon gayanus* se mostró como la gramínea más eficiente

en la utilización de K aplicado, seguido por *Brachiaria decumbens* en términos de producción de materia seca por Kg de potasio aplicado (Fig. 6). La dosis de 30 Kg de K/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 (Salinas y Sánchez, 1976).

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 tiempo uno de los dos componentes es suprimido y en general, se observa que la leguminosa es el componente suprimido. Análisis teóricos sugieren que las leguminosas son intrínsecamente competidoras más débiles que las gramíneas por luz, nutrientes 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 nutrientes.

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 nutrientes 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 nutrientes es más importante que la competencia por luz.

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.

2. Pruebas Analíticas para Evaluar el Fósforo en el Suelo

Dada la limitación de fijación de fósforo en los suelos ácidos e infértiles, es interesante usar una estimación de la fijación de fósforo como guía para determinar las dosis de fósforo a aplicar. El método más común es extrapolar de las isotermas de adsorción de fósforo, la cantidad de P necesaria a ser añadida para satisfacer un nivel deseado en la solución del suelo (Fox et al., 1971, 1974). El nivel de P en la solución del suelo extrapolado al campo que produce 95% del rendimiento máximo fué definido por Fox y colaboradores como el "requerimiento crítico externo de fósforo" (Figura 7). El rango en tal nivel crítico entre especies es de 0.06 a 0.3 ppm P (Fox et al., 1974).

Al aplicar este método a Oxisoles y Ultisoles de América tropical, se tiene como resultado una exageración de las dosis recomendadas de fertilizante fosforado (Novais y Kamprath, 1979, Smyth y Sánchez, 1980; Fenster y León, 1979). La explicación es que en general, los niveles de P en la solución del suelo tan bajos como 0.025 ppm P producen valores superiores a los niveles críticos externos de P desarrollados con apropiada calibración. Además, es bastante difícil establecer niveles críticos en base a pocas partes por millón del elemento que corresponden a rangos agronómicos relevantes en estos suelos. La razón principal es la variabilidad existente que depende de la especie, estado de desarrollo de la planta y propiedades del suelo en relación a la difusión del fósforo hacia las raíces (Sánchez y Uehara, 1980). Una de las restricciones del uso de isotermas de adsorción de P es que su determinación está limitada a laboratorios de investigación. El tiempo requerido de 6 días y la precisión analítica necesaria para determinar fracciones del P en la solución del suelo impiden su uso en los laboratorios

analíticos como método de rutina.

Al considerar adiciones de dosis bajas de fertilizante fosforado (50-150 kg de P_2O_5 /ha, las isotermas de adsorción son de poco valor (Fenster y León, 1979). Por ejemplo, la Figura 8 muestra que el Oxisol de Carimagua fija cantidades considerables de P aplicado (400 ppm o 1818 kg de P_2O_5 /ha para llegar a 0,2 ppm P en la solución del suelo). Después de 5 años de cultivo y corte continuo con *Brachiaria decumbens*, una aplicación inicial de 44 kg de P/ha ya sea como roca fosfórica o superfosfato triple, produjo el 80% del rendimiento máximo obtenido con la dosis de 176 kg de P/ha (Figura 9). En esta dosis baja, los procedimientos de extracción por métodos convencionales a menudo no reflejan la cantidad de fertilizante añadido. El Cuadro 3 muestra los aumentos muy pequeños en fósforo disponible (Bray-11) cuando un Oxisol recibió de 0 a 100 kg de P_2O_5 /ha con incrementos de 20 kg. Esto causa una dificultad en las recomendaciones de fertilización en base a las pruebas analíticas convencionales.

Resultados de varios estudios han mostrado que las soluciones extractoras convencionales de los métodos Bray I, Bray II y el método modificado de ácido doble, proporcionan buenos índices de la disponibilidad de fósforo en los suelos ácidos e infértiles cuando las dosis de fertilización de fósforo están por encima de los 80 kg de P_2O_5 /ha (CIAT, 1981). Es decir, con la aplicación de altos insumos de fertilizante fosforado (Figura 10).

En la mayoría de los casos, los métodos comúnmente usados no reflejan adiciones de fósforo, especialmente en niveles bajos de aplicación (< 80 kg P_2O_5 /ha). Desde un punto de vista práctico, esto resulta nuevamente difícil para las recomendaciones de fertilizante fosfatado basadas únicamente en pruebas analíticas del suelo. Análisis de tejido y extracción de fósforo por parte de la planta, parecen ser parámetros prácticos bajo la estrategia de bajos insumos (Figura 11).

Teniendo en cuenta las limitaciones anteriores, estudios preliminares han sido realizados por el autor de este trabajo con el propósito de mejorar la sensibilidad de los métodos analíticos de suelos ya existentes (CIAT, 1981). La

Figura 12 ilustra los resultados obtenidos del aumento de la concentración del NH_4F en el extractante del método Bray-II. Se observa que los valores del llamado "P-disponible en el suelo" aumentaron considerablemente y que reflejan el P absorbido por las plantas de *Brachiaria decumbens*, repercutiendo en una mayor producción. Debido a que el NH_4F es capaz de extraer parte del fósforo ligado al aluminio y hierro en adición al fósforo ligado al calcio, todas estas fracciones estarían jugando un rol importante en la absorción de fósforo por las plantas. Probablemente este rol sea a través de las secreciones radiculares o de la actividad microbial (micorrizas). El Cuadro 3 muestra el fraccionamiento de fósforo en el Oxisol de Carimagua, Colombia, en función del nivel de fósforo aplicado. Todas estas fracciones contribuyeron a la disponibilidad de este nutriente, pero las plantas en condiciones de bajos niveles de P aplicados al suelo, parecen extraer fósforo de algunas fracciones de fósforo que los métodos convencionales de análisis de suelo no son capaces de detectarlas.

En conclusión, los procedimientos analíticos empleados en la evaluación del fósforo disponible en los suelos ácidos e infértiles del trópico americano, como un diagnóstico eficaz de la respuesta de la planta a la fertilización fosfatada y de las recomendaciones de fertilización, merece una atención más cuidadosa y sugiere una investigación sobre procedimientos químicos que puedan correlacionar con los procesos biológicos del desarrollo de las plantas en este tipo de suelos y especialmente al aplicar dosis bajas de fósforo, debido al uso de germoplasma adaptado a este tipo de suelos.

III. LITERATURA CITADA

- Andrew, C.S., and M.F. Robins. 1969. The effect of phosphorus on the growth and chemical composition of some tropical pasture legumes. 1. Growth and critical percentage of phosphorus. *Austr. J. Agric. Res.* 20: 665-674.
- Andrew, C.S. and M.F. Robins. 1971. The effect of phosphorus on the growth, chemical composition and critical phosphorus percentage of some tropical pasture grasses. *Aust. J. Agric. Res.* 22: 693-706.
- Anderson, R.L. and L.A. Nelson, 1975. A family of models involving intersecting straight lines and concomitant experimental designs useful in evaluating response to fertilizer nutrients. *Biometrics* 31: 303-318.
- Buol, S.W., P.A. Sánchez, R.B. Cate Jr. and M.A. Granger, 1975. Soil Fertility Capability Classification. pp. 126-141. In E. Bornemisza and A. Alvarado (eds.), *Soil Management in Tropical America*. North Carolina State University, Raleigh.
- 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.
- CIAT. 1978. "Annual Report for 1977". Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.
- CIAT. 1980. "Annual Report for 1979, Tropical Pastures Program". Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.
- CIAT. 1981. "Annual Report for 1980, Tropical Pastures Program". Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia.

- Crafts, A.S. and C.E. Crisp. 1971. Phloem transport in plants. W.H. Freeman and Co., San Francisco, California.
- Cochrane, T.T. and P.A. Sánchez. 1981. Land Resources, Soil Properties and their Management in the Amazon Region: A State of knowledge report in Amazon Agricultural and Land Use Research. Centro Internacional de Agricultura Tropical, Cali, Colombia (in press).
- Donald, L. 1963. Competition among crops and pasture plants. *Adv. in 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.
- Fox, R.L., S.M. Hasan, and R.C. Jones. 1971. Phosphate and sulfate sorption by Latosols. *Proc.Int. Symp. Soil Fert. Eval.* 1:857-864.
- Fox, R.L., K. Nishimoto, R.S. Thompson, and R.S. de la Peña. 1974. Comparative external phosphorus requirements of plant growing in tropical soils. *Int. Congr. Soil Sci. Trans. 10th (Moscow)* 4:232-239.
- Gray, B., M. Drake, and W. Colby. 1953. Potassium competition in grass-legume associations as a function of root cation exchange capacity. *Soil Sc. Soc. Proc.* 17:235-239.
- Hammond, L.L. y L.A. León. 1982. Efectividad Agronómica de las Rocas Fosfóricas. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Serie 04SR-09.05. 40p.
- King, J. 1971. Competition between established and newly sown grass species. *J.B. Grassl. Soc.* 26:221-229.
- León, L.A. y W.A. Fenster. 1980. El Uso de Rocas Fosfóricas como fuente de fósforo en suelos ácidos e infértiles de Sur América. Trabajo presentado en el VII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Heredia, Costa Rica. 24 p.

- Novaes, R.F. e E.J. Kamprath. 1979. Parâmetros das isotermas de adsorção de fosforo como criterio de recomendação de adubação. Rev. Bras. Ciencia do Solo 3: 37-41.
- Potash & Phosphate Insitute. 1982. Maximum Economic Yield. Manual. A guide to profitable crop production. Atlanta, Georgia, 116 pp.
- Rayment, G.E., R.C. Bruce, and G.B. Robbins. 1977. Response of established Siratro (*macroptilium atropurpureum* cv. Siratro) pastures in south east Queensland to phosphorus fertilizer. Tropic Grasslands 11 (1): 67-77.
- Rees, M.C. and D.J. Minson. 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.
- Ritchey, K.D. 1979. Potassium fertility in Oxisols and Ultisols of the humid tropics. Cornell Int. Agric. Bull. No. 37. Cornell University, Ithaca, New York. 45 pp.
- Salinas, J.G. and P.A. Sánchez. 1976. Soil-plant relationships affecting varieties and species differences in tolerance to low available soil phosphorus. Ciencia e Cultura (Brazil) 28(2): 156-168.
- Sánchez, P.A. and T.T. Cochrane, 1980. Soil Constraints in Relation to Major Farming Systems of Tropical America. pp. 107-140. In Priorities for Alleviating Soil-Related Constraints to Food Production in the Tropics. IRRI, Los Baños, Philippines.
- Sánchez, P.A. and G. U ehara. 1980. Management Considerations for Acid Soils with High Phosphorus Fixation Capacity. pp. 471-514. In F.E. Khaswney, E.C. Sample and E.J. Kamprath (eds.), The Role of Phosphorus in Agriculture. Amer. Soc. Agron., Madison, Wisconsin.

- Sánchez, P.A. and J.G. Salinas. 1981. Low-input Technology for Managing Oxisols and Ultisols in Tropical America. *Advances in Agronomy* 34:279-406.
- Snaydon, R.W. 1971. An analysis of the competition between plants of Trifolium repens L. population collected from contrasting soils. *J. Appl. Ecol.* 7:687-697.
- Smyth, J.T. and P.A. Sánchez. 1980. Níveis críticos de fósforo para arroz de sequeiro em um Latossol dos Cerrados. *Rev. Bras. Ciencia do Solo* 4:88-92.
- Swanson, E.R. 1963. The static theory of the firm and three laws of plant growth. *Soil Sci.* 95:338-343.
- Ulrich, A. 1952. Physiological bases for assessing the nutritional requirements of plants. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 3:207-228.
- Waugh, D.L., R.B. Cate Jr., and L.A. Nelson. 1974. Discontinuous models for rapid correlation interpretation and utilization of soil analysis and fertilizer response data. *Int. Soil Fert. Eval. Impr. Program. Tech. Bull.* No. 7. North Carolina State University, Raleigh.

Cuadro 1. Extensión geográfica de las principales limitaciones edáficas en América tropical (23°Norte-23°Sud) y en las regiones dominadas por suelos ácidos e infértiles.

Limitación Edáfica	América Tropical (1493 millones ha)		Región Suelos ácidos infértiles (1043 millones ha)	
	Millones hectáreas	Porcentaje Area total	Millones hectáreas	Porcentaje Area total
Deficiencia de N	1332	89	969	93
Deficiencia de P	1217	82	1002	96
Deficiencia de K	799	54	799	77
Alta fijación de P	788	53	672	64
Toxicidad de Al	756	51	756	72
Deficiencia de S	756	51	745	71
Deficiencia de Zn	741	50	645	62
Deficiencia de Ca	732	49	732	70
Deficiencia de Mg	731	49	739	70
Estres de H ₂ O >3 meses	634	42	299	29
Baja capacidad de Retención H ₂ O	626	42	583	56
Baja CICE	620	41	577	55
Alta erosión	543	36	304	29
Deficiencia de Cu	310	21	310	30
Posibilidad de inundación	306	20	123	12
Compactación del suelo	169	11	169	16
Presencia de Laterita	126	8	81	8
Deficiencia de Fe	96	6	?	?
Suelos ácidos sulfatados	2	0	2	0
Toxicidad de Mn	?	?	?	?
Deficiencia de B	?	?	?	?
Deficiencia de Mo	?	?	?	?

Fuente : Sánchez y Cochrane, 1980.

Cuadro 2. Niveles Críticos Internos* de Fósforo en varias gramíneas y leguminosas forrajeras del trópico durante época lluviosa.

GRAMINEAS	% P	LEGUMINOSAS	% P
<i>Brachiaria humidicola</i>	0.08	<i>Desmodium ovalifolium</i>	0.10
<i>Brachiaria brizantha</i>	0.09	<i>Stylosanthes macrocephala</i>	0.10
<i>Brachiaria decumbens</i>	0.10	<i>Stylosanthes capitata</i>	0.13
<i>Andropogon gayanus</i>	0.10	<i>Centrosema brasilianum</i>	0.14
<i>Digitaria decumbens</i>	0.16	<i>Zornia sp.</i>	0.14
<i>Melinis minutiflora</i>	0.18	<i>Zornia latifolia</i>	0.15
<i>Panicum maximum</i>	0.19	<i>Centrosema macrocarpum</i>	0.16
<i>Setaria anceps</i>	0.22	<i>Stylosanthes humilis</i>	0.17
<i>Pennisetum clandestinum</i>	0.22	<i>Codariocalyx gyroides</i>	0.17
<i>Chloris gayana</i>	0.23	<i>Centrosema pubescens</i>	0.18
<i>Paspalum dilatatum</i>	0.25	<i>Aeschynomene histrix</i>	0.19
<i>Cenchrus ciliaris</i>	0.26	<i>Pueraria phaseoloides</i>	0.22
		<i>Desmodium intortum</i>	0.22
		<i>Desmodium uncinatum</i>	0.23
		<i>Phaseolus atropurpureus</i>	0.24
		<i>Vigna luteola</i>	0.25

* Niveles críticos asociados con 80-90% de rendimiento máximo.

Fuentes: CIAT, 1981, Andrew and Robins, 1969, 1971, Salinas, (datos sin publicar).

Cuadro 3. Fraccionamiento de P en un Oxisol de Carimagua en función de niveles de P aplicado.

P aplicado		P disponible		P-Ca	P-Al	P-Fe	P Inorgánico	P Orgánico	P Total
P ₂ O ₅	P	Bray-II							
-----kg/ha-----		-----ppm-----							
0	0	1.8	0.9	0.5	26	29.2	101	130.2	
10	4.4	1.8	0.8	0.6	29	32.2	97	129.2	
20	8.7	1.9	1.0	0.6	32	35.5	97	132.5	
40	17.5	2.1	1.1	0.6	35	38.8	108	146.8	
80	34.9	2.2	1.7	0.9	40	44.8	102	146.8	
100	43.7	3.5	1.7	1.0	42	48.2	92	140.2	
150	65.5	5.5	1.9	1.3	43	51.7	101	152.7	
200	87.3	6.6	2.2	1.5	45	55.3	101	156.3	

Fuente: CIAT, 1981

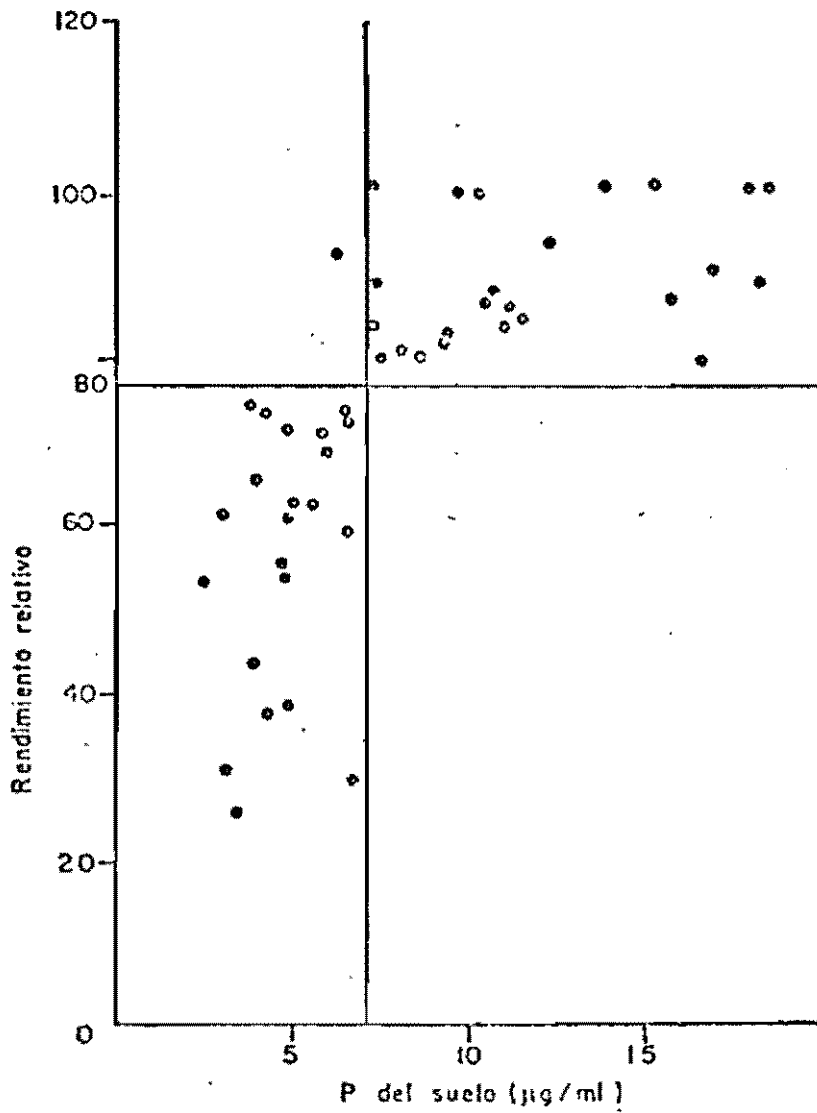


Figura 1. Diagrama de dispersión entre rendimiento relativo y fósforo en el suelo. Fuente: Maugh et al. (1974).

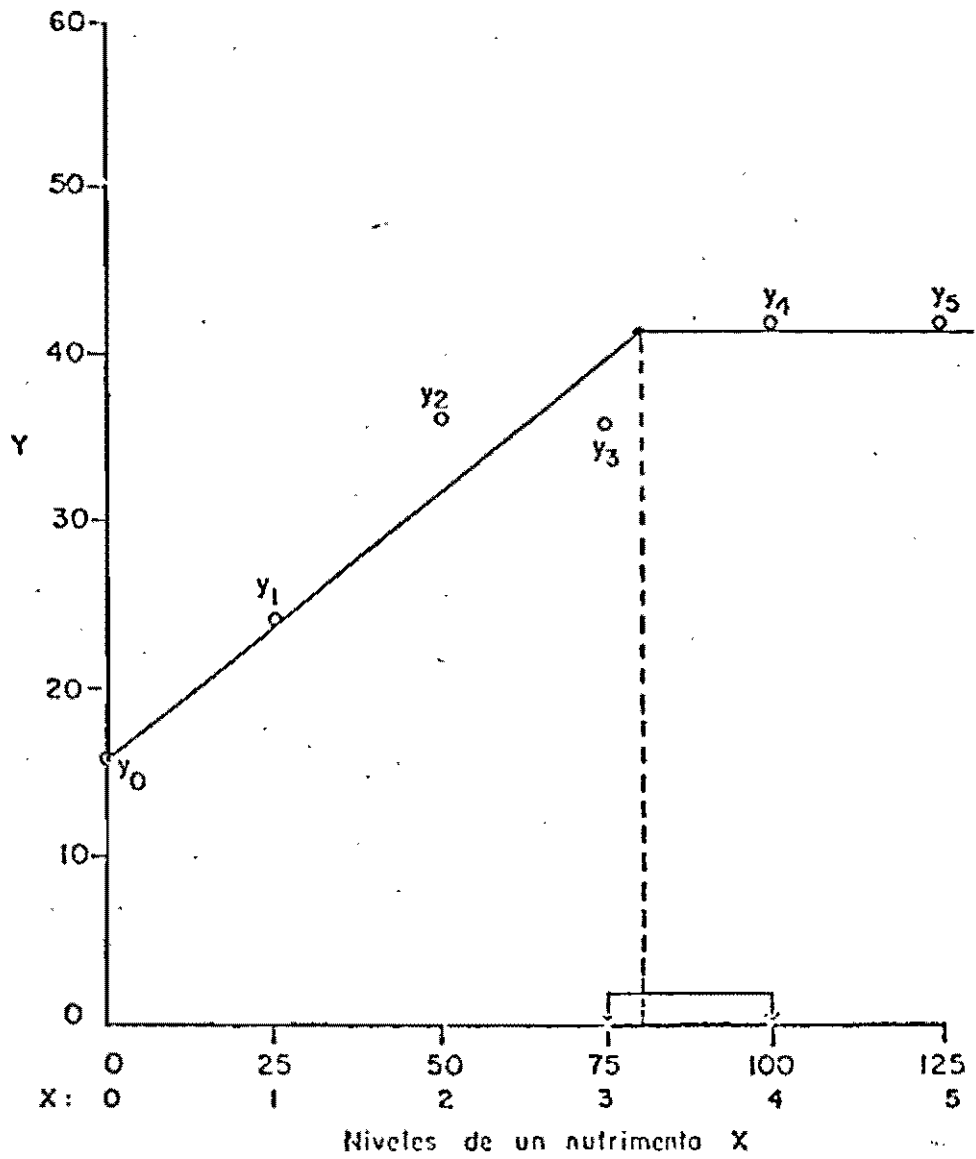


Figura 2. Representación gráfica en la cual cuatro puntos y_0 , y_1 , y_2 , y_3 determinan la pendiente..

Fuente: Cate y Nelson, 1971.

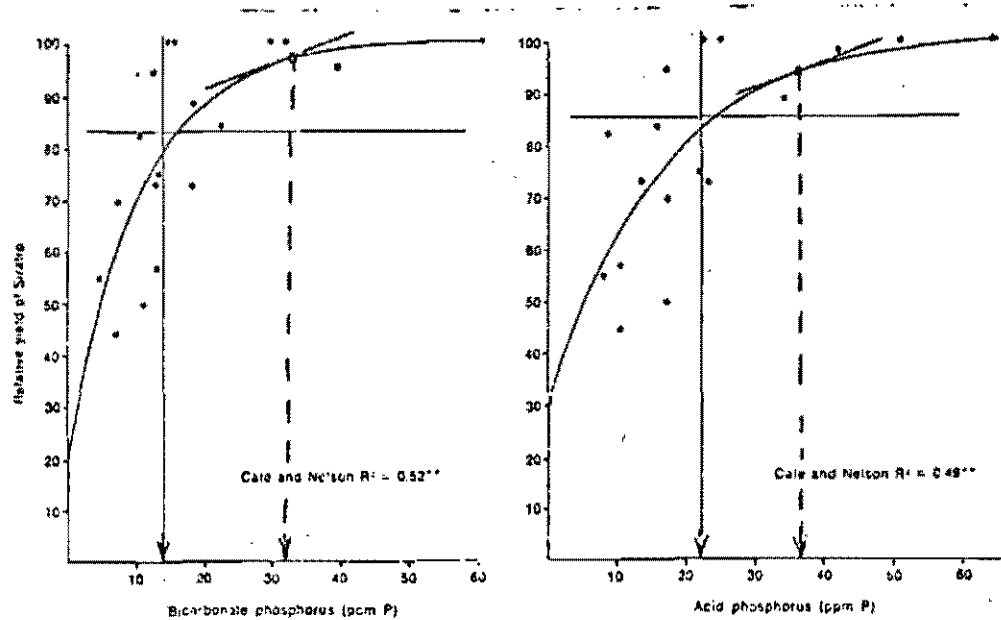


Figura 3. Respuesta curvilínea y aplicación del diagrama de dispersión de Cate-Nelson en la determinación del nivel crítico externo de P por dos métodos analíticos en la producción relativa de Siratro.

Fuente: Rayment, Bruce y Robins, 1977.

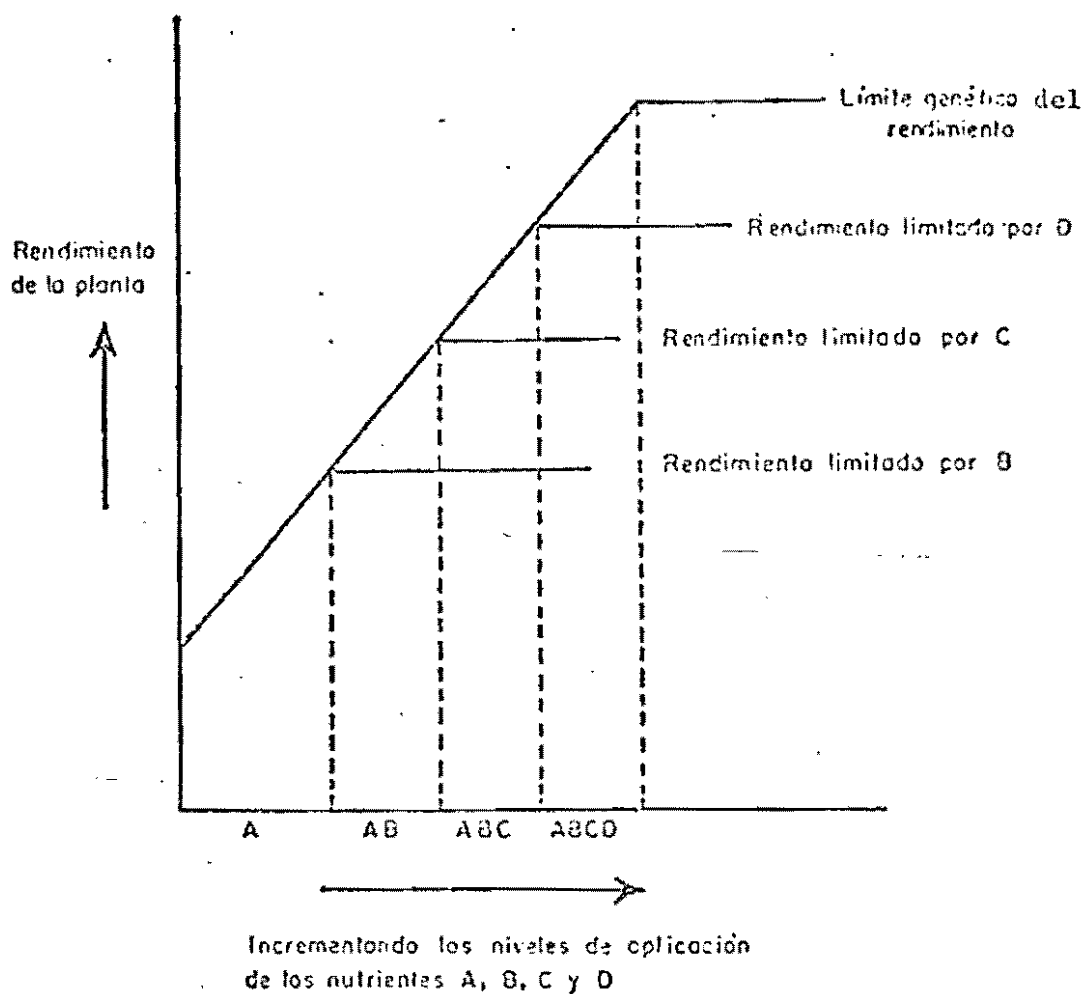


Figura 4. El modelo discontinuo rectilíneo teniendo como base la Ley del Mínimo de Liebig. Fuente: Waugh et al. (1974).

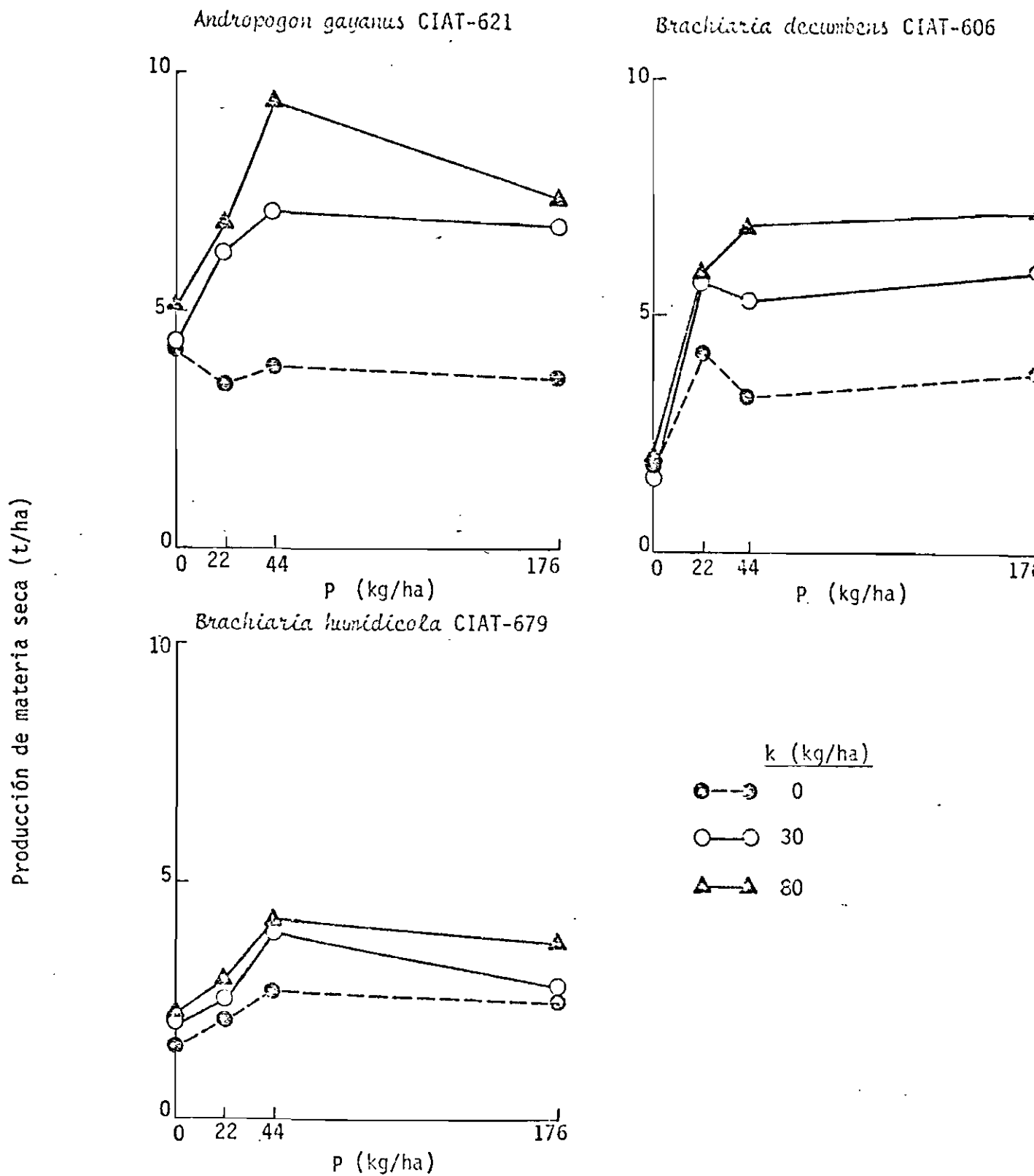


Figura 5. Efectos de niveles de P y K sobre la producción de materia seca de 3 gramíneas forrajeras del trópico en condiciones de campo en Carimagua.

Fuente: CIAT, 1981

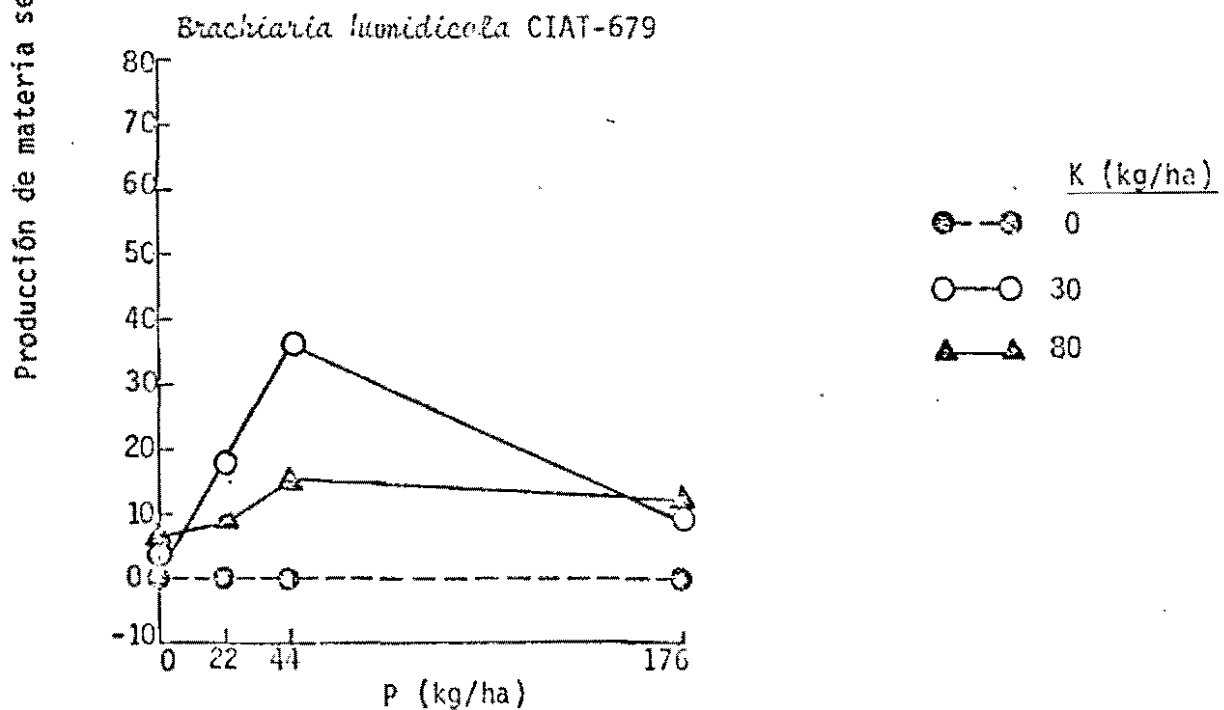
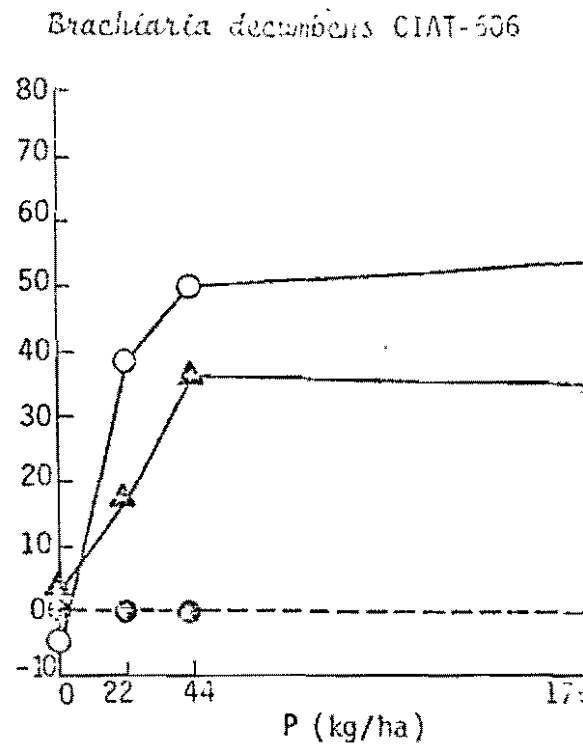
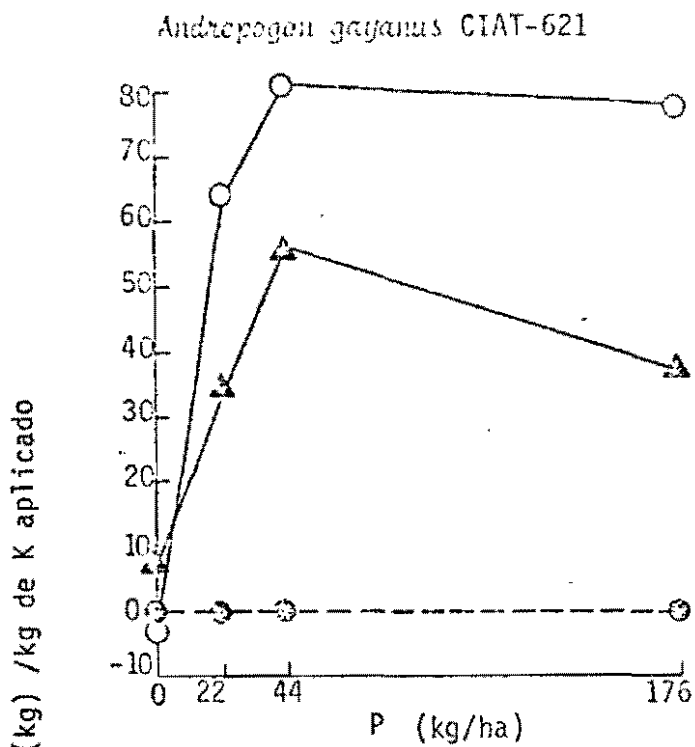


Figura 6. Eficacia en la producción de materia seca de 3 gramíneas forrajeras por kilo de K aplicado a diferentes niveles de P aplicado al voleo en un Oxisol de Carimagua.

Fuente: CIAT, 1981.

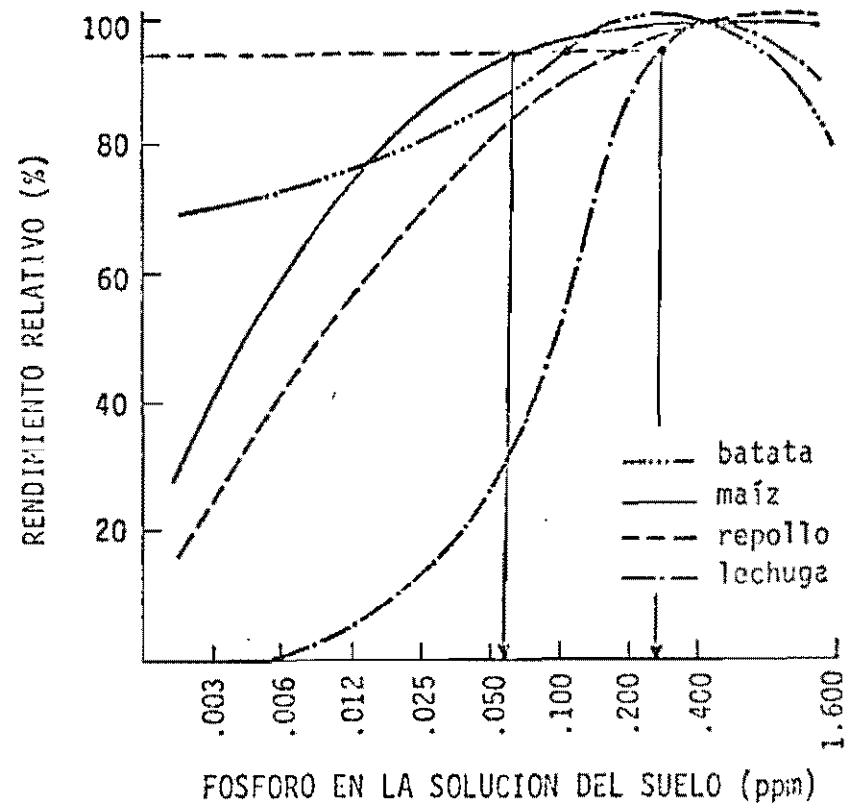


FIGURA 7. Curvas de respuesta para batata, maíz, repollo y lechuga cultivados en un suelo Latosol rojo (Eutruxox) de Hawaii. (Fox et al., 1974).

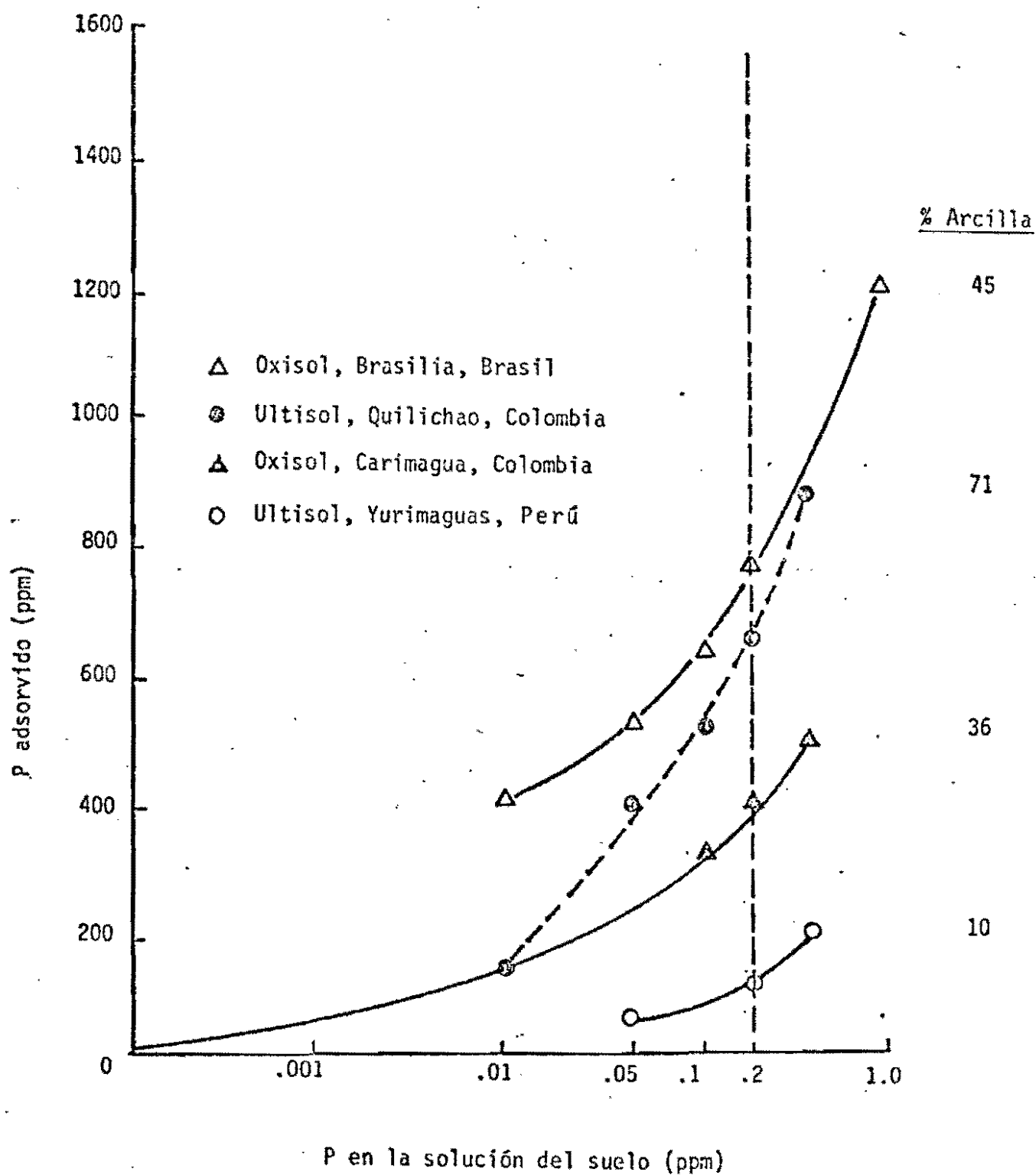


Figura 8. Ejemplos de isotermas de adsorción de P de Oxisoles y Ultisoles en sitios de investigación de América tropical.

Fuente: CIAT, 1978.

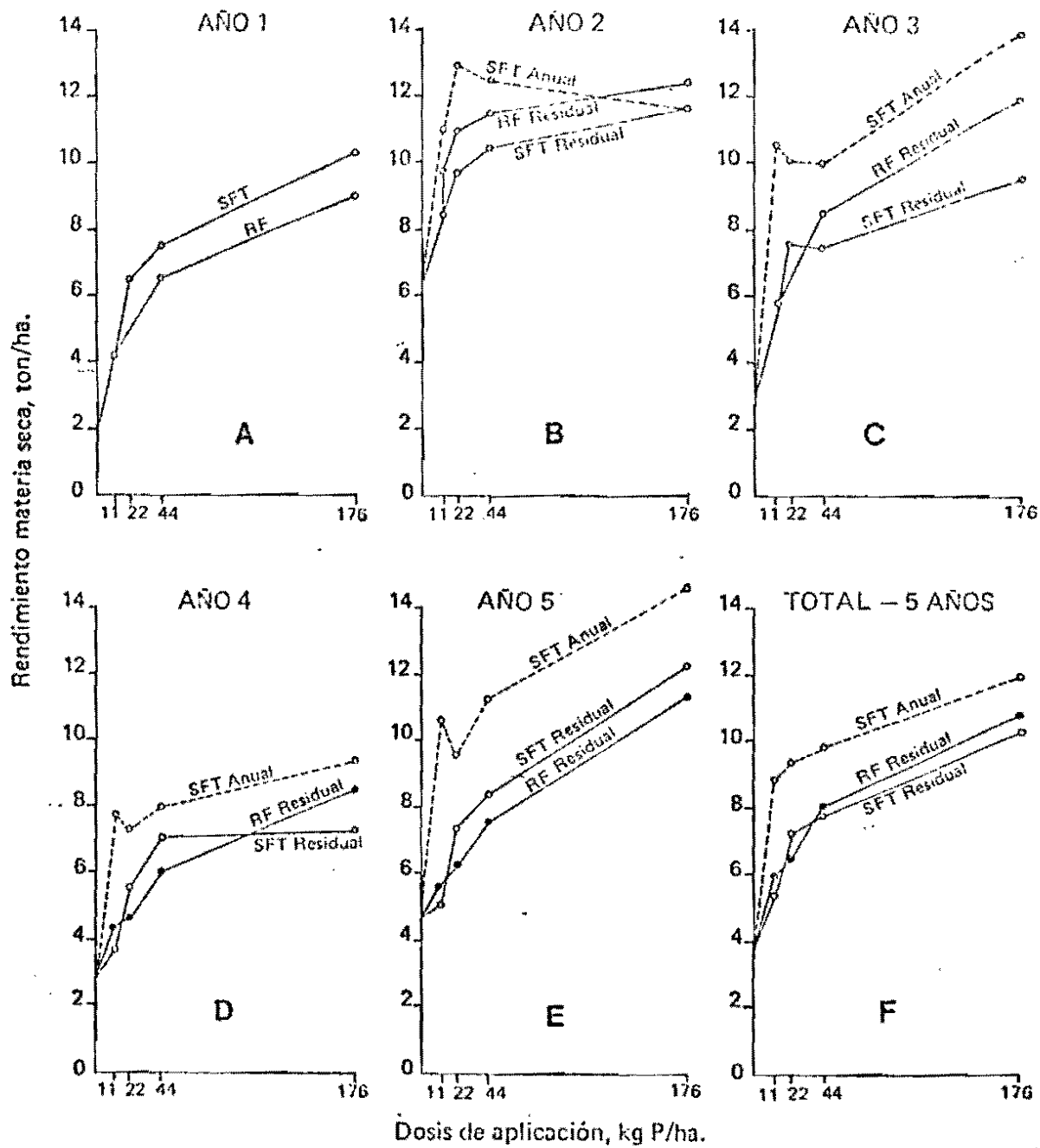


Figura 9. Producción de materia seca de *Brachiaria decumbens* en un Oxisol de Carimagua influenciada por la fuente y dosis de P durante un período de cinco años. Fuente: Hammond y León, 1982.

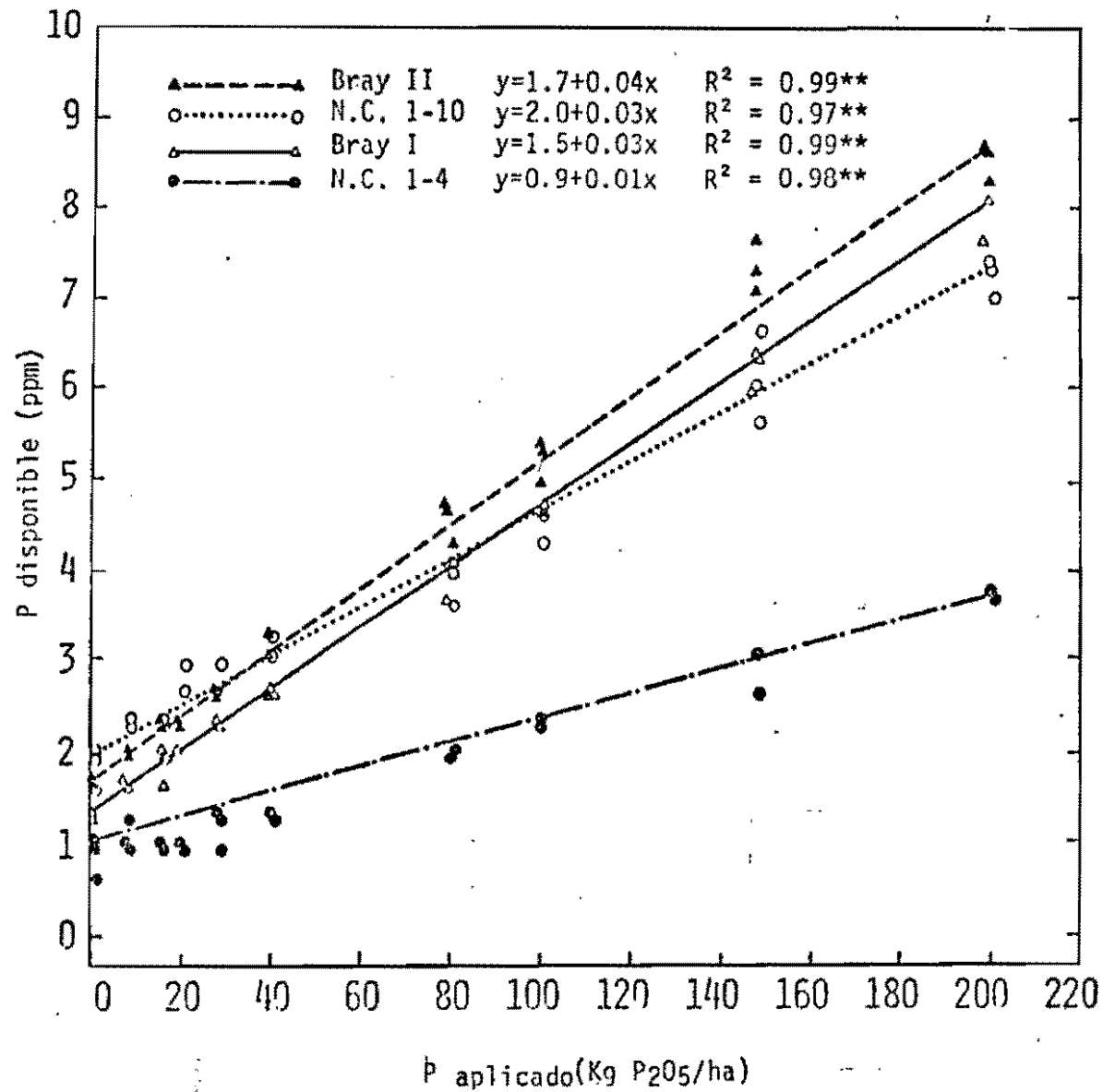


Figura 10. Fósforo disponible en el suelo determinado por 4 soluciones extractantes en el Oxisol de Carimagua.

Fuente: CIAT, 1980.

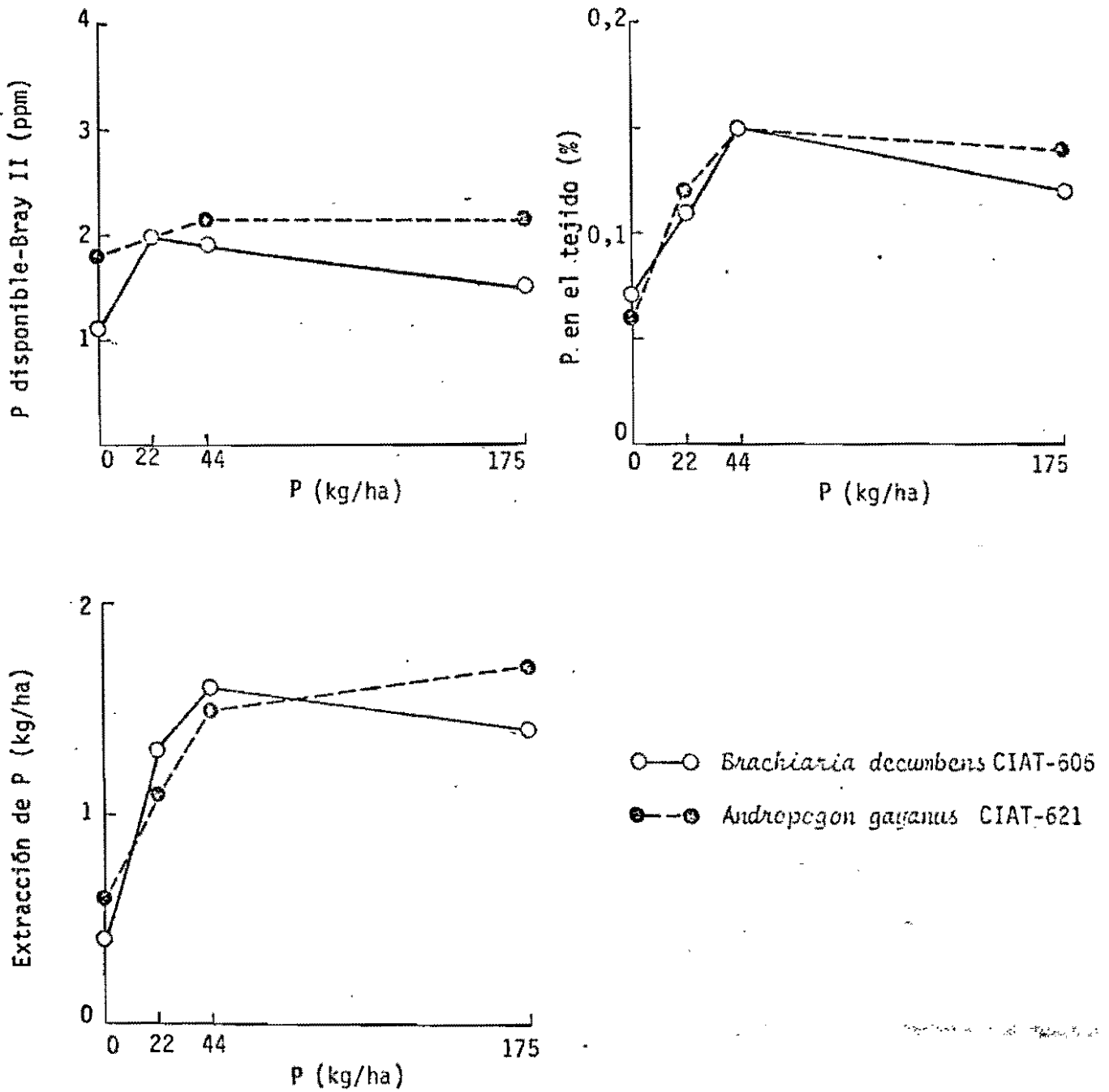


Figura 11. Fósforo disponible en el suelo (0-20 cm de profundidad), contenido de P en el tejido y extracción de P por dos gramíneas forrajeras tropicales bajo diferentes niveles de P aplicados a un Oxisol de Carimagua.

Fuente: CIAT, 1981.

Producción Relativa de materia seca

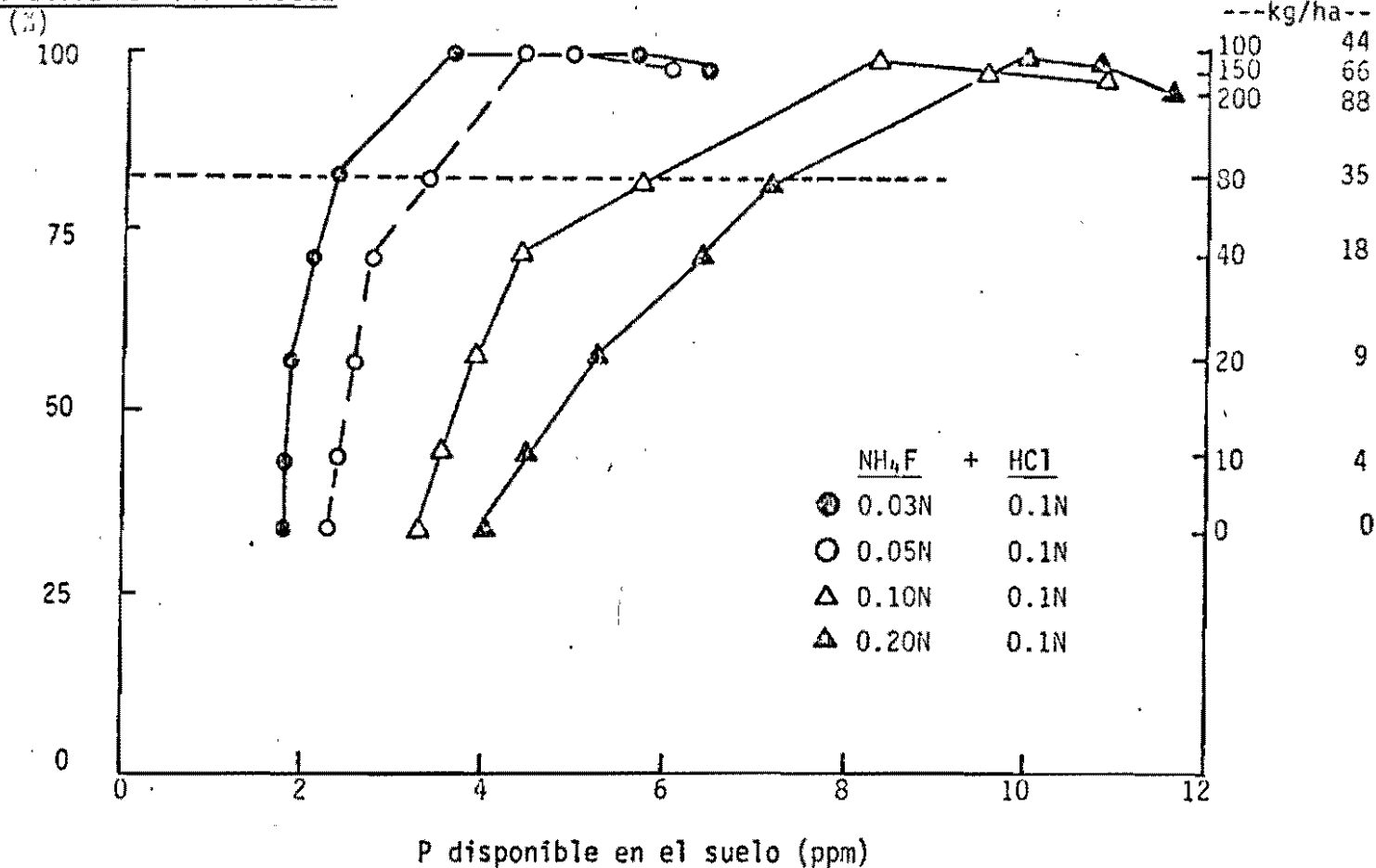


Figura 12. Niveles diferentes de P disponible obtenidos por cuatro soluciones extractantes en relación a niveles de P aplicado y producción de materia seca de *Brachiaria decumbens* en un Oxisol de Carimagua.