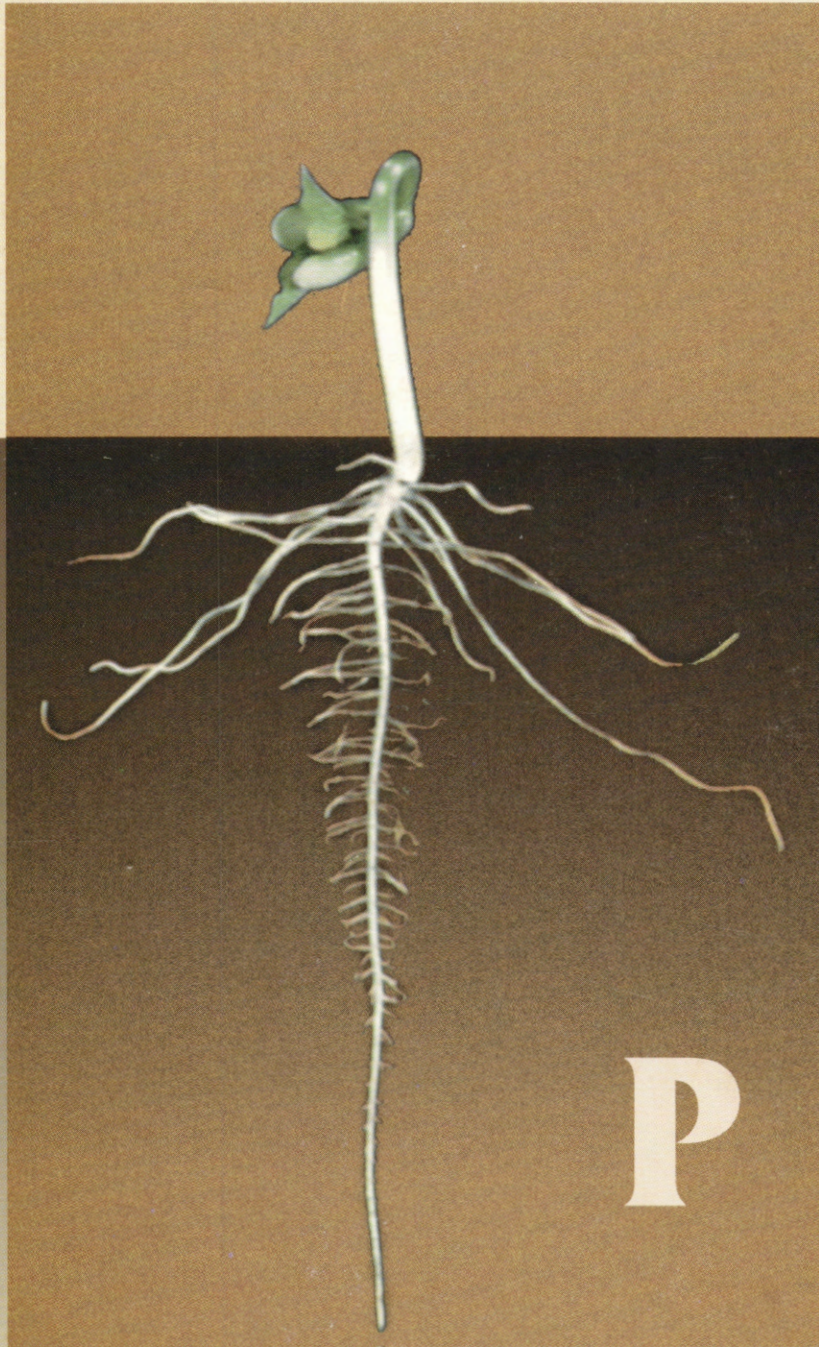


Mejoramiento y manejo agronómico del frijol común (*Phaseolus vulgaris*) para adaptación en suelos de bajo fósforo



Taller Internacional sobre bajo fósforo en
el cultivo del frijol.

Realizado del 13 al 15 de
noviembre de 1995
San José, Costa Rica.

**MEJORAMIENTO Y MANEJO AGRONÓMICO DEL FRIJOL
COMUN (*Phaseolus vulgaris* L.) PARA ADAPTACIÓN EN
SUELOS DE BAJO FOSFORO**

**Memoria del Taller Internacional sobre Bajo Fósforo
en el Cultivo del Frijol**

13 al 15 de noviembre de 1995
San José, Costa Rica

Compilación y edición :

Rodolfo Araya Villalobos
Douglas Beck

*Programa Cooperativo Regional de Frijol para Centroamérica,
México y el Caribe (PROFRIJOL)*
Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)
Universidad de Costa Rica (UCR)

CREDITOS

Compilación y edición

*Rodolfo Araya Villalobos
Douglas Beck*

Diseño de portada

Manrique Sánchez Villalobos

Diseño gráfico

Grettel Calderón Abarca

Coordinación de Distribución

*Universidad de Costa Rica
Facultad de Agronomía
Estación Experimental Fabio Baudrit M.*

*Apartado Postal 183-4050 Alajuela
Costa Rica, América Central
Fax : (506) 433-9086
Tels: (506) 433-9111 / 433-8284*

Entidades coordinadoras del seminario

CIAT-Programa Regional de Fitonutrición

*Universidad de Costa Rica. Facultad de
Agronomía.: Estación Experimental Fabio
Baudrit Moreno y Centro de Investigacio-
nes Agronómicas*

Financiación del Taller Internacional

PROFRIJOL

Financiación de la publicación de estas memorias

*PROFRIJOL
CIAT
Universidad de Costa Rica-Vicerrectoría
de Investigación
Centro Internacional de Investigación
para el desarrollo, a través del proyecto
"Mejoramiento de Sistemas con Cober-
tura: Frijol Tapado"*

INTRODUCCIÓN

El bajo fósforo, en los suelos tropicales, es un limitante primario para la productividad agrícola. Los actuales programas de investigación en agricultura están enfocando las limitaciones debidas a la fertilidad de suelos, de una manera diferente que en las décadas anteriores, cuando la estrategia de fertilización química fue la única alternativa. El mejoramiento y manejo agronómico del cultivo, para adaptación al bajo fósforo en las áreas tropicales y subtropicales, tienen como propósito obtener una producción más alta, económicamente sostenible y sin impacto ambiental negativo.

La estrategia para solucionar esta limitante en la producción de frijol común en Centroamérica, esta enfocado hacia la identificación de líneas de frijol con tolerancia al bajo fósforo, que puedan servir como cultivares para ser liberados por Programas Nacionales, o como donantes de genes de tolerancia al bajo fósforo. Para lograr este objetivo se requiere determinar los mecanismos de absorción y utilización del fósforo en las plantas tolerantes, lo cual favorecerá la obtención de marcadores moleculares y los factores que interactúan con el fósforo y sistemas de manejo en rotación con maíz. El Programa Cooperativo Regional de Frijol de Centroamérica, México y el Caribe (PROFRIJOL), con apoyo de COSUDE y CIAT, esta siguiendo esta estrategia, como un componente de su meta principal, para mejorar productividad sostenible de frijol en la región de Centroamérica Mexico y El Caribe.

En Noviembre de 1995, se realizó un taller internacional sobre bajo fósforo para brindar, en primera instancia, la información disponible sobre evaluaciones a nivel de campo, de la tolerancia del frijol al bajo fósforo. Aunque se dió mucho énfasis en selección y mejoramiento, una perspectiva del manejo de P en sistemas y consideración de variabilidad espacial de suelos, fue integrado en los discusiones. Esta publicación presenta los artículos de este taller internacional, con la esperanza de que sea proyectado a otros cultivos básicos, donde metodologías de mejoramiento y aplicación de fertilizantes estratégicos, pueden ser de provecho para mejorar la productividad y sostenibilidad en suelos pobres.

MEJORAMIENTO GENETICO DEL FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L) PARA TOLERANCIA A BAJO FOSFORO: ESTRATEGIAS Y FUENTES DE DIVERSIDAD ¹

Steve Beebe ²

RESUMEN

Mejoramiento genético del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) para tolerancia a bajo fósforo: estrategias y fuentes de diversidad. Hace varios años se han indicado diferencias genéticas en la capacidad del frijol de producir en condiciones de baja disponibilidad de fósforo. Sin embargo, fue difícil lograr avances genéticos en cruces entre los materiales conocidos como tolerantes a bajo fósforo. Por tanto, fue necesario ampliar la base genética para obtener la variabilidad para mejoramiento genético. Un estudio de 364 genotipos de diversos orígenes, reveló que germoplasma de Chiapas, México, y del norte de los Andes podría ser buenas fuentes de tolerancia a bajo fósforo. Sin embargo, el frijol silvestre resultó ser especialmente sensible a bajo fósforo, sugiriendo que la tolerancia a bajo fósforo en el frijol cultivado fue adquirido durante o después de la domesticación. El pleno aprovechamiento del germoplasma tolerante depende de su selección efectiva en poblaciones segregantes en programas de mejoramiento. Esto se puede facilitar con marcadores moleculares de ADN para genes que controlan la tolerancia, y esta labor se favorece, si se pueden buscar marcadores para mecanismos de tolerancia, identificados a través de estudios fisiológicos. Se discuten además tres métodos estadísticos para cuantificar la tolerancia.

ABSTRACT

Breeding of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) for tolerance to low phosphorus: strategies and sources of diversity. Genetic differences in the ability of common bean to produce at low levels of soil phosphorus (P) availability have been reported previously. However, no genetic advance was possible in crosses among genotypes recognized as tolerant to low P. Therefore, it was necessary to broaden the genetic base to provide the genetic variability for breeding efforts. A study of 364 genotypes of diverse origins revealed that germplasm from Chiapas, Mexico and from the north of the Andes could be important sources of tolerance to low P. However, wild bean was especially sensitive to low P, suggesting that tolerance would have been acquired during or after domestication. Full exploitation of tolerant germplasm depends on its effective reselection in segregating populations in breeding programs. This may be facilitated by DNA molecular markers linked to genes controlling tolerance. The use of molecular markers in turn will be facilitated if these are identified for specific tolerance mechanisms identified through physiological studies. Statistical methods for quantifying tolerance are discussed.

¹ Parte del proyecto PROFRIJOL en Veracruz, México.

² CIAT, Colombia. Apdo. Postal A.A. 6713 Cali, Colombia.

INTRODUCCION

Las especies varían en su adaptación a diferentes condiciones edáficas, sean estas de toxicidades o de disponibilidad de nutrientes. Este es un efecto genético. Igualmente, ecotipos o genotipos dentro de la misma especie pueden presentar diferencias en su capacidad de crecer y reproducir bajo estrés edáfico. En el caso presente estamos enfocando sobre la tolerancia del frijol a la baja disponibilidad de fósforo (P) en el suelo.

El mejoramiento genético para tolerancia a bajo P, aprovecha estas diferencias genéticas para mantener o ampliar dicha adaptación. Sin embargo, la meta de un programa de mejoramiento no es necesariamente eliminar el uso de fertilizantes. Un cultivo eficiente en producir a bajos niveles de P es apenas un elemento en lo que debe ser un programa integrado de manejo de fertilidad. El presente trabajo es una revisión muy ligera del mejoramiento del frijol para bajo P.

El frijol silvestre y la evolución de la tolerancia

El frijol tiene "fama" de ser un cultivo exigente en cuanto a requerimientos de P. Para entender una de las posibles razones por esto, es útil considerar el frijol silvestre del cual el frijol fue domesticado. El frijol silvestre es nativo del bosque seco premontano, por ejemplo, de México o de Boyaca, Colombia. Los suelos en este ambiente frecuentemente no son muy lixiviados, ni muy bajos en P. En nuestras evaluaciones el frijol silvestre se ha comportado en forma extremadamente pobre bajo estrés de P, muy por debajo del cultivado inclusive. Una posible razón sería su semilla muy pequeña que aporta pocas reservas de P, pero en recientes evaluaciones hemos visto, que el silvestre tiene más alta concentración de P en semilla que el cultivado. Mas bien,

su mal comportamiento bajo estrés se debe a su origen, y su evolución en un ambiente donde P normalmente no ha sido limitante. Selección para tolerancia a bajo P probablemente ocurrió cuando el frijol cultivado fue llevado a ambientes más deficientes en P. La superioridad del cultivado en comparación al silvestre demuestra que si es posible mejorar un especie para un estrés edáfico.

Los trabajos pioneros

Los primeros trabajos publicados sobre diferencias genéticas del frijol para tolerancia se basaron en análisis de producción de materia seca en un sistema hidropónica en el cual P fue el nutrimento limitante (Whiteaker *et al.*, 1976; Fawole *et al.*, 1982).

Schettini *et al.* (1982) produjeron líneas mejoradas con rendimiento superior bajo el estrés en el campo, utilizando los progenitores identificados en el sistema hidropónico. Los primeros trabajos en el trópico fueron llevados por Thung (1991), en los cuales se identificaron los cultivares brasileños 'Carioca' y 'Rio Tibagi', entre otros, como superiores en rendimiento bajo estrés en condiciones de campo. Sin embargo, todos los materiales con buena respuesta fueron de tipo Mesoamericano, y probablemente tuvieron origen en Centroamérica en años anteriores. No fue posible lograr un nivel superior de tolerancia en cruzamientos entre ellos (Singh *et al.*, 1989). Fue evidente que sería necesario ampliar la base genética para mejorar la tolerancia.

Ampliando la base genética

Todo mejoramiento genético depende de la existencia de variabilidad genética para el carácter de interés. Reconociendo la necesidad de ampliar la base genética para lograr mejoras en la tolerancia, se iniciaron traba-

jos de evaluación de un rango más amplio de germoplasma de variedades nativas o criollas. Para este propósito, fue necesario establecer viveros en un ambiente más fresco que Santander de Quilichao, Cauca (1000 msnm, 23°C temperatura promedio) donde se acostumbraban sembrar los viveros de bajo P, ya que una gran diversidad del frijol es originaria de las zonas montañosas de Mesoamérica y los Andes, y no se adapta en zonas cálidas. Con este fin, se adecuaron lotes en Popayan, Cauca (1700 msnl, 17°C temperatura promedio) para la evaluación de germoplasma. El suelo de Popayan es de origen volcánico, y aunque tiene un alto contenido de P total (aproximadamente 1000 ppm), la mayor parte se encuentra en forma orgánica y de muy baja disponibilidad. Además, el suelo tiene un alto contenido de alufano, el cual forma complejos con P y lo vuelve insoluble. Suelo nativo de Popayan típicamente presenta un valor alrededor de 2 ppm P disponible (Bray II). Este nivel de estrés no permite ningún desarrollo del frijol, y aun en los tratamientos de estrés fue necesario agregar P en baja cantidad.

Muestras de semilla fueron conseguidos de la Unidad de Recursos Genéticos del CIAT y sembrados en el campo. Frecuentemente un testigo del cv. 'Carioca' fue incluido para comparación con tipos arbustivos. Entre materiales volubles se utilizó como testigo el G2333, 'Colorado de Teopisca', un criollo de Chiapas, México.

A través de los años, muchos grupos de materiales fueron evaluados, pero un ensayo de 364 materiales fue seleccionado como "CORE" para bajo P fue particularmente diferente. Estos 364 fueron escogidos con base en distribución geográfica, para representar la variabilidad genética del frijol en los centros primarios de Mesoamérica y la zona Andina. Rendimientos en alto y bajo P fueron

comparados por un análisis de regresión, regresando rendimiento en bajo P sobre su valor en alto P y tomando el residual como medida de tolerancia (vea 'Análisis de datos' abajo). Resultados están presentados para los tipos 3 en Figura 1 y para los tipos 4 en Figura 2. Amplias diferencias en tolerancia fueron observados entre genotipos, y en parte estas fueron relacionadas con el origen. Materiales provenientes del altiplano seco de México (región 1 en Figuras 1 y 2: los estados de Durango, Zacatecas y Aguascalientes, entre otros) por lo general fueron pobres en bajo P. Aunque deficiencia de P puede ocurrir en estos estados, la sequía es un problema mucho más serio, y no hay alto contenido de aluminio o hierro que agudice el problema de P. Por otro lado, volubles de México (Figura 2: regiones 2, 3, 4 y 5) y posiblemente de Bolivia (región 9) fueron superiores a los de otras regiones. Materiales arbustivos de Chiapas y el Norte de los Andes rindieron relativamente bien (Figura 1, regiones 5 y 7). En otras evaluaciones arbustivos Andinos de la provincia de Amazonas, Perú (que también forma parte del norte de los Andes) se portaron como tolerantes.

Se han identificado materiales superiores entre varias razas del frijol cultivado, según la definición de razas utilizadas actualmente (Singh, 1989), incluyendo las razas M, J, N y P. Estas se encuentran dentro de los dos principales acervos genéticos del frijol cultivado. Esto sugiere que los materiales tolerantes han evolucionado en regiones lejanas y por líneas muy distintas. Ya que el frijol silvestre no parece ser la fuente de la tolerancia, los genes y los caracteres de tolerancia seguramente fueron seleccionados durante el desarrollo de cada una de estas líneas evolutivas. Este escenario ofrece la posibilidad de que los genes y mecanismos sean distintos también, y por tanto, que haya potencial para recombinar genes y lograr progreso genético.

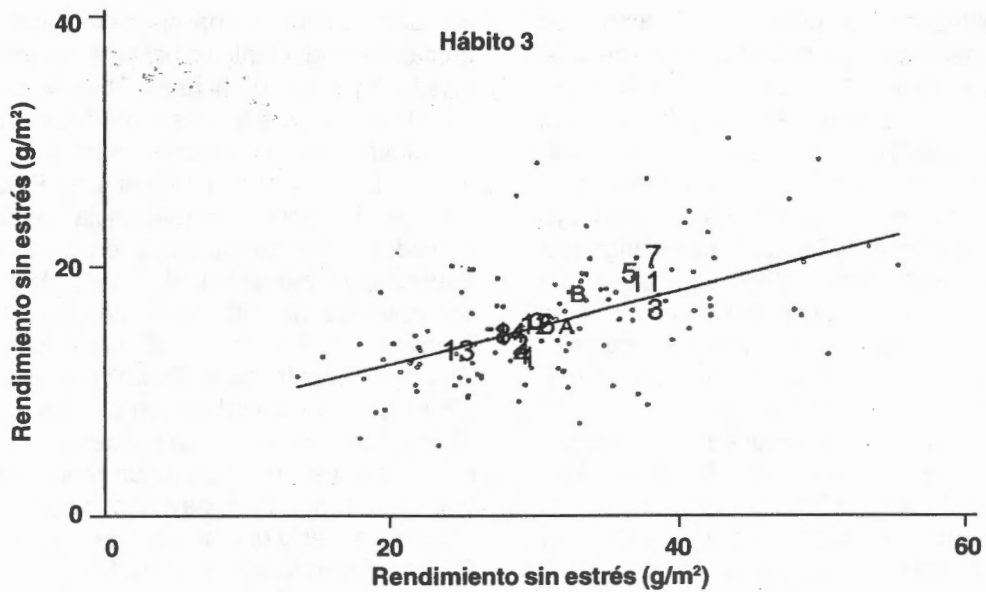


Fig. 1. Rendimiento con y sin estrés de 121 genotipos de hábito 3, con línea de regresión y promedios por regiones y centros de diversidad. Región 1= México altiplano seco; 2= México central occidental; 3= México central; 4= México occidental; 5= Sur de México -Guatemala occidental; 6= Centroamérica; 7= Colombia - Ecuador; 8= Perú; 9= Bolivia; 10= Argentina; 11= Brasil; 12= África oriental; 13= Sur de África; 14= otros; 15= Silvestres de Andes del Sur; 16= Silvestres de Perú; 17=Silvestres de México; A= Mesoamérica; B= Zona Andina; C= Centros secundarios.

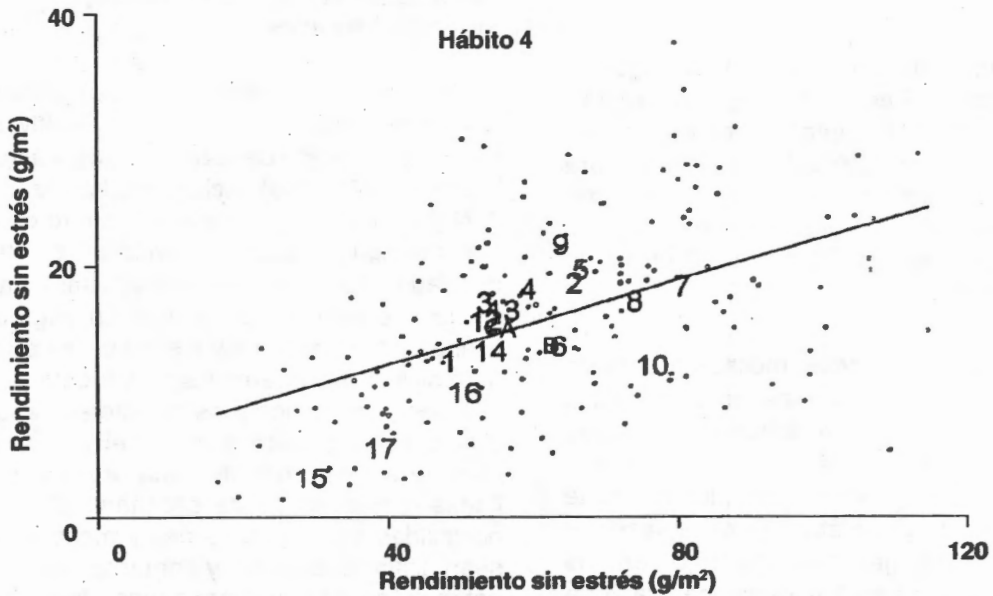


Fig. 2. Rendimientos con y sin estrés de 169 genotipos de hábito 4, con línea de regresión y promedios por regiones y centros de diversidad. Identificaciones de regiones y centros igual a Fig 1.

Análisis de datos

Mientras el mejoramiento depende de la existencia de variabilidad genética, la utilización de esta variabilidad depende de un correcto análisis de los datos, sin anomalías introducidas por el manipuleo de los datos. Normalmente la tolerancia a bajo P se mide por el rendimiento bajo estrés, y el análisis se hace relacionando este rendimiento con aquello en un tratamiento testigo sin estrés. Consideraremos tres opciones para relacionar datos con y sin estrés, y las posibles anomalías que pueden resultar de diferentes análisis que son utilizados frecuentemente.

Primero, consideramos el análisis utilizando la regresión de rendimiento con estrés sobre rendimiento sin estrés. Podemos visualizar este análisis si graficamos los rendimientos con y sin estrés, junto con la línea de regresión (Figura 3). La lógica detrás de este

análisis es la siguiente. Es de esperar que el nivel de rendimiento con estrés será afectado por el potencial de rendimiento sin estrés. Para el agricultor esto está bien; rendimiento alto es bueno en cualquier circunstancia. Pero para propósitos de cuantificar la tolerancia en sí, esta parte del rendimiento no nos interesa. Lo que nos interesa es cuantificar la parte del rendimiento que se debe a alguna capacidad de tolerar bajo P. Podemos estimar el efecto del potencial de rendimiento sobre el rendimiento con estrés, calculando la regresión, que nos dice que por cada unidad de rendimiento sin estrés, esperamos recuperar tantos kilos con estrés. El resto del rendimiento se debe a la tolerancia. Es decir, si el rendimiento es mayor que el valor esperado por la regresión, la variedad es tolerante. Si la variedad rinde menos que el valor esperado, es susceptible. En este caso, el residual de la regresión es la medida de tolerancia o susceptibilidad.

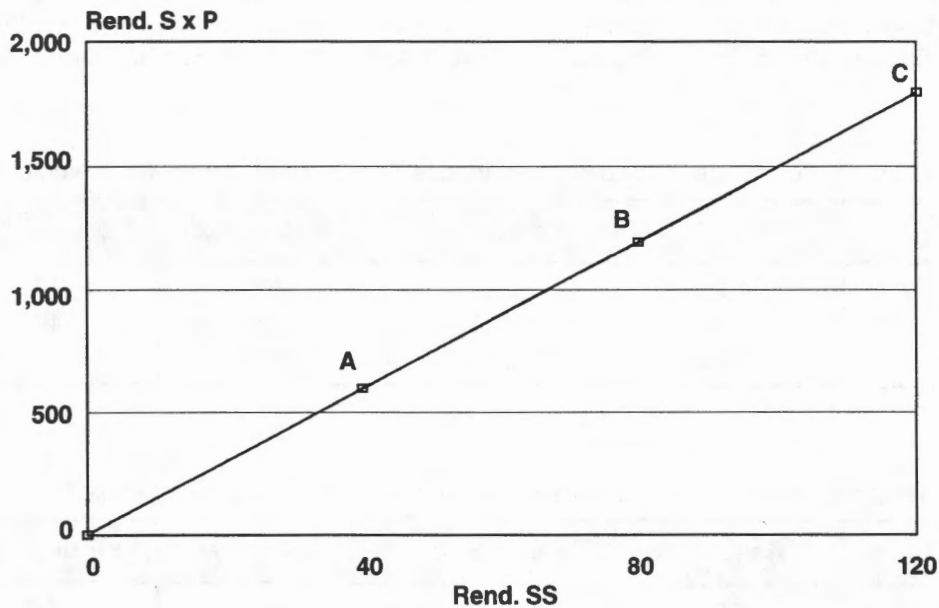


Fig. 3. Regresión de rendimiento con estrés sobre rendimiento sin estrés, para ejemplo 1.

Tomemos como ejemplo 1 un conjunto sencillo de datos de tres variedades: A, B y C. Sin estres de P, estos rinden 1000, 2000 y 3000 kg respectivamente (Cuadro 1). Con estres los rendimientos bajan a 600, 1200 y 1800, o sea, hay una reducción proporcional de 40% en cada variedad. Si trazamos la línea de regresión (Figura 3), esta pasa por el origen (0,0) y tiene un pendiente de 0,6; es decir, para cada kg de rendimiento sin estres, se espera 0.6 kg bajo estres. En el caso de este conjunto de variedades, todo el rendimiento bajo estres se puede explicar por la capacidad de rendimiento en si, y aparentemente no hay mecanismos específicos para tolerancia a bajo P. Al contrario, una variedad cuyos rendimientos graficaran arriba o abajo de la línea, sería tolerante o susceptible a bajo P.

Volvamos al conjunto de datos de las tres variedades A, B y C. De nuevo, rinden 1000, 2000 y 3000 kg sin estres, y con estres los rendimientos bajan a 600, 1200 y 1800 respectivamente. Las pérdidas son proporcionales y son de 400, 800 y 1200 kg según la variedad. Que sucedera si realizamos un ANDEVA? Ya que el efecto del tratamiento de

P varia con la variedad, un ANDEVA detectara un componente de interacción de Genotipo x Nivel de P (G x P). Muchas veces la existencia de G x P esta interpretada como una indicación que los genotipos se estan portando en forma distinta, y por tanto debe haber diferencias en tolerancia. Pero en este caso la interacción se debe exclusivamente a una reducción proporcional; el orden y los rendimientos relativos de los genotipos son iguales a cualquier nivel de P. La interacción de G x P en el ANDEVA sobre niveles de P no es un buen indicador de tolerancia.

En el ejemplo anterior, se puede corregir por una reducción proporcional, calculando el porcentaje de reducción en rendimiento. Es esta la mejor forma de analizar los datos, como porcentaje de pérdida? También puede resultar en anomalías! Supongamos para ejemplo 2 que los rendimientos sin estres no cambian y los con estres son de 400, 1000 y 1600, respectivamente (Cuadro 2). Esto equivale a restar 200 kg a los rendimientos bajo estres en el ejemplo anterior. Esto no cambia la relación relativa entre los rendimientos, la variedad C sigue siendo la mejor y por el

Cuadro 1. Rendimientos hipotéticos de tres variedades de frijol con y sin estrés; ejemplo 1.

VAR	Rend. SS	Rend. SxP	Pérdidas (kg)	Pérdidas (%)
A	1000	600	400	40
B	2000	1200	800	40
C	3000	1800	1200	40

Cuadro 2. Rendimientos hipotéticos de tres variedades de frijol con estrés; ejemplo 2.

VAR	Rend. SS	Rend. SxP	Pérdidas (kg)	Pérdidas (%)
A	1000	400	600	60
B	2000	1000	1000	50
C	3000	1600	1400	47

mismo margen. Si calculáramos la regresión, el pendiente de la línea sería el mismo, pero la línea se desplazaría hacia abajo (Figura 4). Pero que pasa con las pérdidas en términos de porcentaje? Ahora las tres variedades pierden 60, 50 y 47% respectivamente. A pesar de mantener la misma relación entre los rendimientos de las variedades bajo estrés, cuando los comparamos con rendimientos sin estrés, aparentemente hay diferencias. Esta es una anomalía.

El análisis de datos usando la regresión es bastante útil para cuantificar la tolerancia cuando hay materiales de diferentes capacidades de rendimiento. Supera las anomalías que puedan ocurrir al utilizar el término de $G \times P$ del ANDEVA, o el porcentaje de reducción como criterio de tolerancia. También sirve para visualizar los datos en el contexto de las magnitudes originales de rendimientos en el ensayo, y permite estimar el valor de la tole-

rancia en unidades de rendimiento (kg/ha), el cual se pierde con el cálculo de porcentaje.

La contribución de fisiología

El criterio para identificar genotipos superiores ha sido su rendimiento bajo estrés. Sin embargo, ensayos de rendimiento son costosos para ejecutar, y requieren varios semestres para tener confianza en los datos. Para el trabajo de identificar genotipos tolerantes, sería de gran ayuda conocer los mecanismos responsables para poder seleccionar para el mecanismo en si en vez del rendimiento, una vez que haya confianza que tal mecanismo es valioso.

Otra ventaja de entender los mecanismos involucrados, es saber donde y en que condiciones los genes de tolerancia serán útiles. Por ejemplo, semilla de mayor tamaño

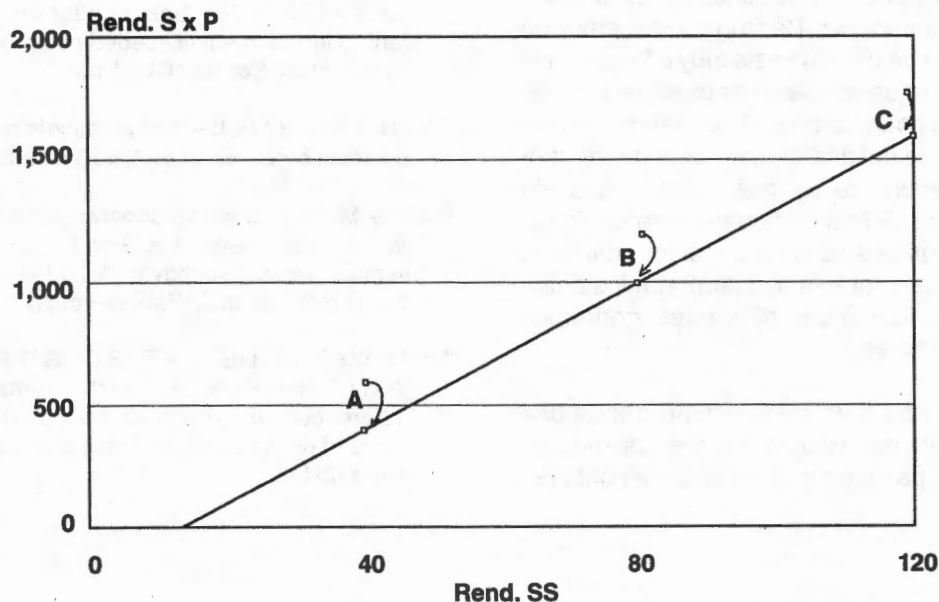


Fig. 4. Regresión de rendimiento con estrés sobre rendimiento sin estrés, para ejemplo 2.

confiere cierta tolerancia porque aporta mayor P a las plantulas, pero si grano grande no es aceptable al consumidor, esta no es una opción. Madurez tardia tiende a resultar en mayor tolerancia, pero muchos agricultores no estarian dispuestos a sembrar variedades tardias.

Marcadores moleculares

En los últimos años el uso de marcadores moleculares para reconocer y reselectionar genes útiles ha vuelto una realidad. En la mayoría de los casos los genes han sido genes mayores para caracteres sencillos, como ciertas resistencias. Hay pocos trabajos con complejos caracteres fisiológicos, que puedan ser gobernados por genes múltiples.

Genes múltiples requieren un esfuerzo especial para poder marcarlos, pero muchas veces el limitante más grande es la calidad de los datos fenotipicos, es decir, los datos sobre el caracter para ser marcado, como la resistencia o la tolerancia. Dado lo que sabemos de tolerancia a bajo P, que esta muy influida por el ambiente, y que requiere varios semestres de datos para poder confiar en la reacción de los genotipos, la calidad de los datos de tolerancia va a ser uno de los "cuellos de botella" sin lugar a duda. Además, el manejo de los datos, como discutido arriba, es un factor crítico, ya que diferentes formas de interpretar los datos llevaran a identificar diferentes genotipos como superiores.

Para el caso de marcar genes, sería una gran ventaja de conocer los mecanismos de tolerancia, para poder marcar el mecanismo,

en vez de marcar genes de rendimiento bajo estres. Ya que probablemente sera mas fácil reconocer la presencia del mecanismo que cuantificar tolerancia por rendimiento. Esto presupone que ya esta confirmado que el mecanismo tiene un efecto positivo sobre tolerancia y rendimiento.

LITERATURA CITADA

- FAWOLE, I.; GABELMAN, W.H.; GERLOFF, G.C.; NORDHEIM, E.V. 1982. Heritability of efficiency in phosphorus utilization in beans (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under phosphorus stress. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 107(1):98-100.
- SCHETTINI, T.M.; GABELMAN, W.H.; GERLOFF, G.C. 1987. Incorporation of phosphorus efficiency from exotic germplasm into agriculturally adapted germplasm of common bean (*Phaseolous vulgaris* L.). Plant Soil 99: 175-184.
- SINGH, S. P.; URREA, C. A.; GUTIERREZ, J. A.; GARCIA, J. 1989. Selection for yield at two fertility levels in small seeded common bean. Can. J. Plant Sci. 69:1011-1017.
- SINGH, S. P. 1989. Patterns of variation in cultivated common bean. Econ. Bot. 43(1): 39-57.
- THUNG, M. 1991. Bean agronomy in monoculture. In: Common beans: research for crop improvement. van Schoonhoven, A. and Voysest, O. C.A.B. International, Wallingford. pp. 737-834.
- WHITEAKER, G.; GERLOFF, G.C.; GABELMAN, W.H.; LINDGREN, D. 1976. Intraspecific differences in growth of beans at stress levels of phosphorus. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 101:472-475.

MEJORAMIENTO PARA TOLERANCIA A BAJO FOSFORO EN COSTA RICA

Arturo Saborío ¹, Steve Beebe ²

RESUMEN

Mejoramiento para tolerancia a bajo fósforo en Costa Rica. En dos localidades de Costa Rica, San Isidro de Pérez Zeledón, a 702 m.s.n.m, en un ultisol y en Fraijanes de Alajuela a 1650 m.s.n.m. en suelo de origen volcánico con alta fijación de fósforo, se estableció un programa de mejoramiento genético masal (Bulk) para la obtención de líneas con tolerancia bajo fósforo. Se inició con base en diez poblaciones con diferentes tipos de cruces e introduciendo padres del altiplano de México y Perú. En la generación F3, se midió rendimiento en condiciones de estrés de fósforo sobre la población cosechada en masal en F2, identificando las poblaciones de rendimiento superior. En la Población F4 se tomó selecciones individuales. En las siguientes generaciones se manejo en ensayos de rendimiento con el diseño de Látiçe en tres repeticiones y en diferentes dosis de fósforo; siendo el nivel de selección 15 kg. P₂O₅/ha en las dos localidades. Se observó una adaptación de las líneas a la zona de evaluación, lo cual sugiere una interacción genotipo-ambiente. Se seleccionaron y codificaron catorce líneas como TLP (líneas tolerantes a bajo fósforo). En respuesta a bajo fósforo sobresalen las líneas TLP 28 y TLP29.

ABSTRACT

Breeding for tolerance to low soil phosphorus in Costa Rica. A breeding program to obtain lines tolerant to low soil phosphorus (P) was established in two localities in Costa Rica, in San Isidro de Perez Zeledon at 702 masl in an ultisol, and in Fraijanes, Alajuela at 1650 masl in a volcanic andosol with high P fixation. The program initiated with ten segregating populations derived from crosses with varying structure, and incorporating parents from the highlands of Mexico and Peru. In the F3 generation, yield under P stress of bulked populations was measured identifying populations of superior yield potential. In the F4 populations, individual plant selections were taken. In subsequent generations yield trials were planted in lattice design with three repetitions and different levels of phosphorus, using a fertilization level of 15 kg/ha P₂O₅ for selection at low P in both localities. Specific adaptation of the lines to the evaluation sites was observed, suggesting G x E interaction. Fourteen lines were selected and coded as TLP lines (tolerant to low phosphorus). The lines TLP 28 and TLP 29 were superior in response to low P.

¹ Programa de Frijol. CIAT/IICA. Costa Rica.

² Programa de Frijol. CIAT. Cali, Colombia.

INTRODUCCION

El cultivo del frijol en América latina y Africa se produce en variedad de tipos de suelos, muchos de los cuales limitan frecuentemente el desarrollo de la planta y los rendimientos, debido a deficiencias nutricionales o a toxicidades (Schwarz y Gálvez 1980; Corrales y Schwartz, 1994). El frijol absorbe cantidades relativamente altas de nitrógeno y potasio; sin embargo, el problema nutricional más común es la deficiencia de fósforo

La deficiencia de fósforo es probablemente el principal problema nutricional del frijol en América Latina, limita los rendimientos en muchas áreas de Brasil y en los Andisoles de Colombia y América Central (Shwartz y Gálvez, 1980; Cardona, *et al.*, 1995). Entre las clases pobre y media su importancia nutricional es casi tan alta como en Africa Oriental.

La nutrición fosfórica ejerce una influencia significativa en el crecimiento axilar y cobertura vegetativa, en relación con esta reduce el área de superficie fotosintética y la utilización de carbohidratos (Xiaolong, *et al.*; 1995).

La selección por caracteres morfológicos asociados con un incremento de área superficial fotosintética y desarrollo radical profundo, podría ser un metodo efectivo para superar la baja disponibilidad de fósforo (Johansen, *et al.*; 1995).

También existen genotipos que no producen mucho bajo condiciones de bajo fósforo en el suelo, pero que sí responden bien a la aplicación de fertilizantes fosforados. Utilizando estos parámetros de eficiencia e ineficiencia en el uso del fósforo del suelo, y de su respuesta o falta de ella al elemento aplicado; se puede desarrollar una metodología para

identificar genotipos eficientes y con respuesta a la aplicación, los cuales son deseables (Corrales y Schwartz, 1994).

La falta de especificidad del suelo en respuesta al bajo fósforo puede significar que la adaptación del frijol a la baja disponibilidad de P, es estable en los diferentes suelos; por lo tanto hace que la selección y el mejoramiento a tolerancia a bajo fósforo sea más fácil (Xiaolong, *et al.*; 1995).

En Costa Rica, los suelos difieren considerablemente en cuanto a características fisicoquímicas, el frijol sufre por toxicidad de aluminio y manganeso y por deficiencia de fósforo y nitrógeno (Corella. J.F. 1983). A nivel nacional, un 74% de las muestras analizadas presentan contenido de fósforo iguales o menores a 10 Ug/ml; sin embargo, la causa de esta escasez varía según el tipo de suelo (Bertsch,F. 1987).

El objetivo general es desarrollar un programa de mejoramiento para la obtención de material genético con capacidad de adaptación a suelos de baja disponibilidad de fósforo.

MATERIALES Y METODOS

En dos zonas de Costa Rica en un ultisol de San Isidro de Pérez Zeledón a una altitud de 708 m.s.n.m. y en Fraijanes de Alajuela en un suelo de origen volcánico a 1650 m.s. n.m. se desarrolló un programa de mejoramiento para tolerancia del frijol a bajo fósforo.

En 1990, se inició la evaluación de nuevas introducciones (poblaciones F2), para buscar tolerancia del frijol a suelos ácidos de baja disponibilidad de fósforo en donde se utilizó cruza con progenitores del altiplano de México y el Perú.

El programa se inició con diez poblaciones (Cuadro 1) proveniente del programa de mejoramiento de CIAT. La metodología que se utilizó fue masal, se realizó selecciones individuales en F4 y ensayos de rendimiento.

- F2: semilla recibida en poca cantidad,. Se sembró en Pérez Zeledón, en parcelas de dos surcos de 4 metros con tres repeticiones para observación e incremento.
- F3: parcelas de rendimiento de poblaciones masales, 3 repeticiones, parcelas de 4 surcos de 4 metros. Selección de poblaciones de mayor rendimiento.
- F4: evaluación de selecciones individuales, surcos sencillos sin repetición para observación y rendimiento; con testigos cada 4 surcos.
- F5: en adelante: ensayos de rendimiento en Pérez Zeledón y Fraijanes.

El diseño experimental de rendimiento consistió en un látice con parcelas de cuatro surcos de dos metros de largo, con un testigo tolerante de BAT 76 y tres repeticiones, dos dosis de fósforo; una para seleccionar 15 kg P₂O₅/ha en Pérez Zeledón y 30 kg P₂O₅/ha

en Fraijanes, y otra dosis para observar el potencial de rendimiento de 100 y 500 Kg P₂O₅/ha respectivamente. El análisis de suelo se observa en el Cuadro 2.

Se dió protección al cultivo contra insectos y patógenos para observar su respuesta de eficiencia nutricional de fósforo. Se evaluó principalmente la variable de rendimiento kg/ha y días de madurez fisiológica. Además de los testigos utilizados BAT 76 como tolerante y APN18 como menos tolerante, se incluyeron materiales como G19833, G16140, A750 y G18252 con referencia de ser evaluados en condiciones de baja fertilidad e incluidos como progenitores, en cruza anteriores.

RESULTADOS Y DISCUSION

La metodología masal, nos puede indicar cuales poblaciones tienen un mayor potencial de respuesta al rendimiento, en condiciones de bajo fósforo; como se observa en el Cuadro 3. En las parcelas de mayor tamaño (poblac. F3), se observó una mayor diferencia entre los

Cuadro 1. Poblaciones y progenitores utilizados en programa de mejoramiento para tolerancia a bajo fósforo. CIAT 1990.

Poblaciones	
NJBB 18443	(EMPASC 201 X A 140) X (MOC 58 X G 12896A)
NJBB 18445	(EMPASC 201 X CARIOCA 80) X ((BAT 271 X (BAT 271 X RAB 49)) X G12896A)
NJBB 18446	(EMPASC 201 X BAT 1647) X (G 4017 X G 12896A)
NJBB 18447	(EMPASC 201 X BAT 1647) X (FT 83-120 X G 12896A)
NJBB 18448	(A 140 X RAI 76) X (MOC 61 X G 12896A)
NJBB18450	(A 140 X RIONEGRO) X ((BAT 271 X (BAT 271 X RAB 49)) X G 12896A)
NJBB18451	(A 140 X RIONEGRO) X (FT 83-20 X G 12896A)
NJBB 18455	(CARIOCA 80 X RIONEGRO) X (MOC 58 X G 12896A)
NJBB 18459	(CNF 4787 X (475 X (A 475 X CNF 4615))) X (A 686 X G 12896A)
NJBB 18469	(CNF 4717 X (A 320 X CNF 4712)) X ((BAT 271 X (BAT 271 X RAB 49)) X G19504)

Cuadro 2. Análisis de suelos de las zonas donde se efectuó el programa de selección de líneas.

Identificación	pH	Mg/100 ml suelo				Ug/ml suelo				
		Al	Ca	Mg	K	P	Zn	Mn	Cu	Fe
Pérez Zeledón	5,3	0,4	2	0,9	0,12	6	8,6	3	3	38
Fraijanes	5,5	0,4	4,5	1,0	0,41	12	6,5	5	5	95

Cuadro 3. Rendimiento promedio de poblaciones F2 y F3. Fertilización 15 kg P₂O₅/ha. San Isidro, Pérez Zeledón.

No.	Identificación	Población F2 Rendimiento gr/ 2,4 m ²	Población F3 Rendimiento gr/9,6 m ²
1.	NJBB18433	261,3	648,3
2.	NJBB18445	245,0	762,0
3.	NJBB18446	292,0	759,3
4.	NJBB18447	308,7	739,3
5.	NJBB18448	272,0	774,3
6.	NJBB18450	241,0	776,3
7.	NJBB18451	253,3	942,0
8.	NJBB18455	200,0	931,0
9.	NJBB18459	251,3	671,0
10.	NJBB18469	233,3	1003,0
11.	BAT 76	295,0	774,0
12.	DOR 60	270,0	884,0

rendimientos de las poblaciones. Con base en estos resultados y lograr observar la influencia de dos progenitores distintos se continuó con la evaluación de tres poblaciones.

El testigo tolerante BAT 76, ha mostrado ser un material con buena respuesta a condiciones de baja disponibilidad de fósforo en los ultisoles de Pérez Zeledón, y la línea DOR-60, conocida en Costa Rica como variedad Negro Huasteco; fue otro punto de referencia.

Los rendimientos de las selecciones individuales se diferencian en más del 100% entre las líneas; superando un gran número al tes-

tigo BAT-76, además los mayores rendimientos corresponden a las líneas provenientes de la población NJBI 18469.

En el segundo periodo (1991B), se realizó ensayos de rendimiento en dos localidades: San Isidro de Pérez Zeledón; en un ultisol con baja disponibilidad de fósforo y en Fraijanes de Alajuela en un suelo volcánico con alta fijación de fósforo. Los resultados obtenidos; Cuadros 5 y 6; mostró una marcada interacción genotipo-ambiente; debido a que las líneas de la población NJBB 18469; proveniente de la progenie G19504, mostró más líneas con mayor respuesta a las condiciones de

Cuadro 4 . Rend. de selecciones individuales F4, para tolerancia a bajo fósforo. Pérez Zeledón. 1991 A.

No.	Identificación	Rendimiento g/3,6m ² .
1.	NJBI 18469-M-M-6	488
2.	NJBI 18469-M-M-15	401
3.	NJBI 18469-M-M-7	369
4.	NJBI 18469-M-M-8	355
5.	NJBI 18447-M-M-18	297
6.	NJBB 18447-M-M-20	288
7.	NJBI 18469-M-M-4	285
8.	NJBI 18469-M-M-14	267
9.	NJBI 18469-M-M-13	265
10.	NJBI 18469-M-M-11	261
11.	NJBB 18451-M-M-4	260
12.	NJBB 18447-M-M-14	258
13.	NJBB 18451-M-M-2	256
14.	NJBI 18469-M-M-1	245
15.	NJBB 18451-M-M-3	244
16.	NJBB 18447-M-M-15	243
17.	NJBB18447-M-M-19	239
18.	NJBB 18451-M-M-11	215
19.	NJBI 18469-M-M-2	215
20.	NJBB18447-M-M-3	212
21.	T.T. BAT 76 (Prom.15)	209
22.	NJBB 18447-M-M-7	205
23.	NJBB.18447-M-M-4	203

Cuadro 5 . Valores medios de rendimiento de líneas F5 para bajo fósforo Pérez Zeledón. 1991 B.

No.	Tratamiento	Días madurez	Rendimiento kg/ha
1.	NJBI 18469-M-M-15-M	73	709,84 a
2.	NJBI 18469-M-M-2-M	74	593,63 ab
3.	NJBI 18469-M-M-13-M	67	533,11 ab
4.	BAT-76 (T.T.)	74	518,59 ab
5.	NJBB 18451-M-M-4	72	503,69 ab
6.	NJBB 18447-M-M-3	73	497,55 ab
7.	NJBI 18469-M-M-14	67	493,11 ab
8.	NJBB 18451-M-M-11	74	485,39 ab
9.	NJBI 18469-M-M-1	76	476,51 ab
10.	NJBB 18447-M-M-4	74	471,54 ab
11.	NJBB 18447-M-M-7	74	469,79 ab
12.	NJBI 18469-M-M-7	76	459,59 ab
13.	NJBI 18469-M-M-8	67	458,64 ab
14.	NJBB 18447-M-M-20	74	453,81 ab
15.	NJBI 18469-M-M-11	67	446,49 ab
16.	NJBB 18447-M-M-18	74	446,39 ab
17.	NJBB 18447-M-M-14	74	423,27 ab
18.	NJBB 18451-M-M-3	70	399,82 ab
19.	NJBI 18469-M-M-4-M	68	364,26 b
20.	NJBB .18447-M-M-19-M	74	334,24 b
21.	NJBB 18447-M-M-15-M	75	328,80 b
22.	NJBI 18469-M-M-6-M	66	327,67 b
23.	NJBB 18451-M-M-2-M	68	284,21 b

C:V. 34,37% LSD: 47,52 Duncan 0,01

Cuadro 6. Valores medios de rendimiento de líneas F5 para bajo fósforo. Fraijanes, Alajuela. 1991 B.

No.	Identificación	Días madurez	Rendimiento kg/ha
1.	NJBB 18447-M-M-14-M	114	2868,75 a ^{1/}
2.	NJBB 18447-M-M-3-M	115	2854,17 a
3.	NJBB 18447-M-M-20-M	123	2445,83 ab
4.	NJBB 18447-M-M-18-18-M	118	2227,08 abc
5.	NJBB 18447-M-M-4-M	114	2112,25 abcd
6.	NJBB 18447-M-M-19-M	119	1948,12 abcd
7.	NJBI 18469-M-M-15-M	115	1906,67 abcd
8.	NJBB 18447-M-M-7-M	112	1873,54 abcde
9.	NJBI 18469-M-M-4-M	121	1819,17 abcdef
10.	NJBI 18469-M-M-7-M	128	1815,62 abcdef
11.	NJBI 18469-M-M-13-M	116	1776,87 bcdef
12.	NJBB 18447-M-M-15-M	118	1735,62 bcdef
13.	NJBI 18469-M-M-8-M	114	1670,00 bcdef
14.	NJBI 18469-M-M-11-M	114	1623,33 bcdef
15.	NJBB 18451-M-M-4-M	114	1607,71 bcdef
16.	NJBI 18469-M-M-2-M	109	1585,21 bcdef
17.	BAT-76 (T.T.).	112	1568,12 bcdef
18.	NJBI 18469-M-M-14-M	116	1479,37 bcdef
19.	NJBB 18451-M-M-11-M	115	1275,00 cdef
20.	NJBB 18451-M-M-3-M	112	1241,87 cdef
21.	NJBI 18469-M-M-6-M	113	1236,46 cdef
22.	NJBI 18469-M-M-1-M	113	1210,42 cdef
23.	NJBB 18451-M-M-2-M	109	803,96 ef

C.V.: 19,52 ^{1/} Tukey 0,05

Pérez Zeledón (702 m.s.n.m) y las líneas de las poblaciones NJBB18447 con progenie G12896A, dieron mayor rendimiento en Fraijanes (1650 m.s.n.m). Esto refiere la influencia marcada que los progenitores ejercen sobre los lugares donde se realice el proceso de selección de las líneas.

Los coeficientes de variación de los análisis resultaron ser altos en las localidades y épocas durante los ciclos de selección (Cuadros 7 y 8) dada la variabilidad entre las repeticiones debido principalmente a factores nutricionales (variabilidad espacial), aunque éste se trató de bloquear en los ensayos de rendimiento utilizando el diseño de látice.

En el Cuadro 7 la línea TLP 25 mostró un rendimiento superior a las demás líneas incluyendo al testigo tolerante BAT 76; aunque no se observó diferencias significativas, los coeficientes de variación fueron muy altos. En la zona de Fraijanes su rendimiento siempre fue superior al testigo tolerante y en el análisis combinado (1992) se observaron diferencias significativas con ambos testigos y algunas líneas como TLP 17, 18 y 19.

Las líneas TLP 28 y TLP 29 tuvieron un rendimiento más estable durante los ciclos de evaluación y en las dos localidades. En Fraijanes (1992B) fue superior a ambos testigos; este comportamiento hace pensar que bajo

Cuadro 7. Rendimientos promedios de líneas seleccionadas y codificadas para tolerancia a bajo fósforo. Pérez Zeledón.

	1991 A 15 kg P ₂ O ₅	1991 B 15 kg P ₂ O ₅	1992 A SIN P ₂ O ₅	1992 A 15 kg P ₂ O ₅	1992 B SIN P ₂ O ₅	1992 B 15 kg P ₂ O ₅	1993 A 15 kg P ₂ O ₅
TLP16	589	497 ab	352 a	541 a	120a	420cdefgh	195abc
TLP17	564	471 ab	368 a	887 a	239a	413cdefgh	238abc
TLP18	569	469 ab	318 a	787 a	179a	577abcd	219abc
TLP19	717	423 ab	344 a	923 a	169a	417cdefgh	275abc
TLP20	675	328 b	470 a	635 a	147a	350 defg	291abc
TLP21	800	453 ab	372 a	751 a	285a	634abc	363a
TLP22	711	284 b	276 a	433 a	143a	191 h	376a
TLP23	680	476 ab	512 a	674 a	242a	489abcdef	267abc
TLP24	597	593 ab	276 a	613 a	209a	443 bcdefg	305abc
TLP25	791	364 b	564 a	1458 a	151a	485abcdef	223abc
TLP26	1355	327 b	363 a	801 a	218a	503abcdef	237abc
TLP27	986	458 ab	575 a	936 a	88a	711a	277abc
TLP28	725	446 ab	247 a	979 a	236a	692a	384a
TLP29	741	493 ab	380 a	667a	237a	304 efgh	266abc
BAT76	613	518 ab	274 a	658a	116a	491abcdef	360a
APN18	**	**	392 a	947 947a	104a	675ab	234abc
			c.v. 54.16	c.v. 35.18	c.v. 41.96	c.v.42.00	c.v.37.27

condiciones más homogéneas de suelo, etc. sus rendimientos podrían ser muy superiores al testigo BAT 76; que ha mostrado ser un material estable y con buena respuesta a bajo fósforo.

La dosis de 15 kg P₂O₅/ha resultó ser eficiente para la selección de líneas, tal como lo confirmó Corella¹.

Se incluyó como referencia la Estación Experimental Fabio Baudrit (EEFB), en el análisis combinado (Cuadro 9) por ser una zona con condiciones edafoclimáticas adecuadas para observar respuesta al potencial de ren-

dimiento. Estos rendimientos son cuatro veces mayor que los de Pérez Zeledón.

Las líneas TLP 18, TLP 25 y TLP 28 mostraron un comportamiento superior al testigo BAT 76, por localidades y dosis de fósforo. El análisis mostró que; en general, considerando las tres localidades y las dosis de fósforo, el rendimiento promedio de las líneas es superior y en pocos casos similar al testigo tolerante.

La línea TLP 25 mostró el mayor rendimiento promedio de las tres zonas y en ambas dosis de fósforo. Las líneas TLP 28 y

¹ Departamento de Suelos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), San José, 1990.

Cuadro 8. Rendimientos promedios de líneas seleccionadas y codificadas para tolerancia a bajo fósforo. Fraijanes.

Línea	1991B 30 kg P ₂ O ₅	1992B 0 kg P ₂ O ₅	1992B 15 kg P ₂ O ₅	1992B A. COMB.	1992B 500 kg P ₂ O ₅	1993A 15 kg P ₂ O ₅	1993A 500 kg P ₂ O ₅
TLP16	2854 a	529 cdefg	1161 a	672abcdef	653 c	1356 abc	1714 abc
TLP17	2112 abcd	415 defg	249 ef	230 hij	1768 a	775 bc	598 e
TLP18	1873 abcde	615 cdef	499abcde	468 defgh		1465 abc	1505 abcde
TLP19	2868 a	564 cdef	521abcde	348 fghi	1506 a	1006 abc	1090 abcde
TLP20	1735 bcdef	820 abcd	496abcde	575 abcdef		1373 abc	1483 abcde
TLP21	2445 ab	739 abcd	722 abc	796 abcde	1075 b	1005 abc	1837 a
TLP22	804 ef	482 cdefg	597 abcd	570 abcdef		1183 abc	1651 abc
TLP23	1210 cdef	300 fg	629 abcd	471 bcdefg		1124 abc	1414 abcde
TLP24	1585bcdef	709abcde	565abcde	509 bcdefg		1079 abc	1139 abcde
TLP25	1819abcdef	809 abcd	815 abc	871 abc		1709 ab	1555 abcd
TLP26	1236 cdef	719 abcd	1151 a	860 abcd		1293 abc	1611 abcd
TLP27	1670 bcdef	589 cdef	643abcd	518 bcdefg		1475 abc	1386 abcde
TLP28	1623 bcdef	1076 abcd	885 ab	908 abc		1664 abc	1747 ab
TLP29	1479 bcdef	1503 ab	762 abc	952 ab		1320 abc	1339 abcde
BAT76	1568 bcdef	414 defg	456 bcdef	382 fghi	1039 b	1116 abc	1202 abcde
APN18		444 defg	290 def	298 ghij		689 c	718 de
	c.v.19.52	c.v.47.93	c.v.37.11	c.v.37.80	c.v.11.55	c.v.24.30	c.v.19.86

Cuadro 9. Análisis combinado de localidades y dosis de fertilización fosfórica. 1992.

Líneas	EEFBM 0 y 15 kg P ₂ O ₅ /ha 1992 B	Pérez Zeledón 0 y 15 kg P ₂ O ₅ /ha 1992 A y 1992 B	EEFBM, Pérez Z. y Fraijanes 0 y 15 kg P ₂ O ₅ /ha 1992 A y 1992 B
TLP 16	1861 ef	363 d	1004 cdef
TLP 17	2160 abcd	453 bcd	1031 cdef
TLP 18	2302 a	446 bcd	1115 abc
TLP 19	2145 abcd	457 bcd	1073 cde
TLP 20	2182 abc	407 bcd	1046 cdef
TLP 21	2142 abcd	484 abcd	1078 cd
TLP 22	2140 abcd	312 d	742 h
TLP 23	1472 g	472 bcd	1026 cdef
TLP 24	2130 abcd	393 bcd	1031 cdef
TLP 25	2286 a	645 a	1233 a
TLP 26	1885 ef	451 bcd	1011 cdef
TLP 27	2144 abcd	559 abc	1092 bcd
TLP 28	2175 abc	568 ab	1210 ab
TLP 29	2022 bcde	400 bcd	1108 abcd
BAT 76	2077 abcde	401 bcd	970 def
APN 18	1868 ef	559 abc	968 def
C.V.:	10.63%	40.79%	21.19%

Duncan 0,05

TLP 29 promediaron un rendimiento igual al testigo en la EEFB y Pérez Zeledón y superior cuando se combinaron las tres localidades.

El testigo menos tolerante (APN 18) tuvo un comportamiento similar al testigo BAT 76, esto implica; la necesidad de un manejo adecuado del terreno dada la forma heterogénea de distribución de la fertilidad del suelo.

Por su consistencia durante los ciclos de evaluación del programa de mejoramiento se seleccionó y codificó catorce líneas como tolerantes a bajo fósforo, en consecuencia sólo dos poblaciones de las diez fueron codificadas; éstas corresponden a NJBB 18447, NJBB 18451 y NJBI 18469 (Cuadro 10).

Como un inicio de un programa de mejoramiento para un factor, como es la tolerancia al bajo fósforo, se encuentra que el progreso genético, por esta metodología, es un factor

muy importante y viable; sin embargo, el manejo de otros factores; como la variabilidad de la fertilidad del suelo en los sitios de evaluación, ambientes apropiados y otros como los fitopatológicos, ayudan en forma considerable a la obtención de resultados más consistentes entre los materiales y durante las épocas; situación muy importante a considerar con el manejo de un carácter abiótico.

CONCLUSIONES

1. Se pudo recuperar líneas superiores al testigo tolerante (BAT 76) en Pérez Zeledón y Fraijanes. El margen de superioridad fue mayor en Fraijanes.
2. En Pérez Zeledón la población NJBB 18469 derivada de la progenie G19504 produjo líneas superiores. En Fraijanes

Cuadro 10. Líneas seleccionadas y codificadas para tolerancia a bajo fósforo disponible en San Isidro de Pérez Zeledón y Fraijanes de Alajuela. Marzo, 1993.

No.	Procedencia	CODIGO	Cruza	Genealogía/Pedigree
1	CIAT-CR.	TLP 16	NJBB 18447 -M-M-4-M	(Empasc 201 X BAT 1647) (FT 83-120 X G 12896A)
2	CIAT-CR.	TLP 17	NJBB 18447-M-M-4-M	
3	CIAT-CR.	TLP 18	NJBB 18447-M-M-7-M	
4	CIAT-CR.	TLP 19	NJBB 18447-M-M-14-M	
5	CIAT-CR.	TLP 20	NJBB 18447-M-M-15-M	
6	CIAT-CR.	TLP 21	NJBB 18447-M-M-20-M	
7	CIAT-CR.	TLP 22	NJBB 18451-M-M-2-M	(A140 x Río Negro) (FT 83120 x 12896A)
8	CIAT-CR.	TLP 23	NJBI 18469-M-M-1-M	(CNF 4717 x (A320 x CNF 4712 (BAT271 x BAT271 x RAB49) (G19504)
9	CIAT-CR.	TLP 24	NJBI 18469-M-M-2-M	
10	CIAT-CR.	TLP 25	NJBI 18469-M-M-4-M	
11	CIAT-CR.	TLP 26	NJBI 18469-M-M-6-M	
12	CIAT-CR.	TLP 27	NJBI 18469-M-M-8-M	
13	CIAT-CR.	TLP 28	NJBI 18469-M-M-11-M	
14	CIAT-CR.	TLP 29	NJBI 18469-M-M-14-M	

la población NJBB 18447 derivada de la progenie G12896A produjo mejores líneas. Esto sugiere la existencia de una interacción genotipo ambiente.

3. Ya que la población NJBB 18469 fue superior en rendimiento; como masal en Pérez Zeledón, parece decir que el rendimiento de las poblaciones en generaciones tempranas es un indicador del potencial de las líneas que se puedan seleccionar. Por lo tanto; las pruebas de rendimiento en generaciones tempranas es una opción viable para el mejoramiento de tolerancia a bajo fósforo.
4. En respuesta a tolerancia a bajo fósforo, las líneas TLP28 y TLP29; mostraron mayor consistencia durante el tiempo y/o épocas de evaluación lo que evidencia que su estabilidad es mejor.

LITERATURA CITADA

BERTSCH, F. 1987. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. San José, Costa Rica. Oficina de Publicaciones de la Universidad de Costa Rica.

CARDONA, C.; FLOR, C.; MORALES, F. 1995. Problemas de Campo en los cultivos de frijol en el Trópico. CIAT. Cali, Colombia. p. 220.

CORELLA, J.F. 1983. El Cultivo del Frijol en Costa Rica: Clasificación y Manejo de Suelos. Unidad de Suelos, Dirección de Investigaciones Agrícolas. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San José, Costa Rica. P. 46.

CORRALES, P; SCHWARTZ H.F, 1994. Problemas de Producción del frijol en los trópicos. CIAT. Cali, Colombia. p.220.

JOHANSEN, C.; LEE K.; SHARMA, K.; SUBBARAO, G.; KUENEMAN, E. 1995. Genetic Manipulation of Crop Plants to Enhance Integrated Nutrient Management in Cropping Systems - 1. Phosphorus. ICRISAT. India. p. 49-54.

SCHOONHOVEN, A.; Voysest, O. 1991. Common Beans: Research for Crop Improvement. C.A.B. International, CIAT. Cali, Colombia. p. 980.

SCHWARTZ, H.F.; GALVEZ, G.E. 1980. Bean Production Problems. CIAT. Cali, Colombia. p.424.

XIAOLONG, Y.; J. LINCH; S. BEEBE. 1995. Genetic Variation for Phosphorus Efficiency of Common Bean in Constrasting soil. Types: I. Vegetative Response. Crop Science. 35: 1086-1093.

TOLERANCIA DEL FRIJOL COMUN A LA BAJA DISPONIBILIDAD DE FOSFORO EN SUELOS DE HONDURAS ¹

Juan Carlos Rosas ², Margoth Andrews ², Aracely Castro ²

RESUMEN

Tolerancia del frijol común a la baja disponibilidad de fósforo en suelos de Honduras. El presente trabajo es el resultado de una revisión de la literatura disponible sobre fertilización con P y tolerancia del frijol a bajo P en Honduras. Se presentan resultados de la caracterización del contenido de P en suelos de regiones frijoleras, respuesta a la fertilización con P, efectos en la fijación de nitrógeno y diferencias en genotipos de frijol. El mayor énfasis del documento es en resultados obtenidos en Zamorano. En general, una gran proporción de los suelos de las zonas frijoleras evaluadas son de contenido bajo en P. Los rendimientos en estos suelos pueden ser incrementados con la aplicación de P. Se observaron diferencias genotípicas en la respuesta al P. A pesar de incrementos significativos en la nodulación en algunos estudios, no se observaron aumentos correspondientes en rendimiento.

ABSTRACT

Tolerance of common bean to low P in Honduras soils. This manuscript is the result of a review of the available literature on P fertilization and bean tolerance to low P in Honduras. Results in the characterization of P content in soils from some bean production regions, response to P fertilization, effects on nitrogen fixation and genotypic differences in beans are presented. The main emphasis of this document is on results obtained in Zamorano. In general, a great proportion of the soils from the bean regions tested are of low P content. Yields in these soils can be increased with P fertilization. Genotypic differences on the response to P were observed. In spite of significant increases in nodulation in some studies, the corresponding increases in yield were not observed.

INTRODUCCION

El frijol es uno de los granos básicos de mayor importancia en la dieta de los hondure-

ños, y junto con el maíz la principal fuente de proteínas de los pobladores de zonas rurales, como también para aquellos de bajos recursos en las zonas urbanas. Sin embargo, el consu-

¹ Departamento de Agronomía de Zamorano (Publicación AG-9509). Trabajo presentado en el Taller de Bajo Fósforo organizado por PROFRIJOL. San José, Costa Rica, Noviembre 14-16, 1995.

² Jefe, Profesor Asociado y Asistente de Investigación. Departamento de Agronomía, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras.

mo per cápita (11,0 kg/persona/año), para el periodo 1980-92, es considerado sólo moderado (Naciones Unidas, 1995). Una tasa de crecimiento de la producción de frijol de - 0,9 % anual (periodo 1980-93) y un incremento poblacional del 3,0 % (FAO, 1993), afectaron la disponibilidad y consumo de frijoles en Honduras en ese periodo.

Este importante grano básico se produce mayormente bajo condiciones de pequeña agricultura, donde predominan factores limitantes de suelo y clima, y enfermedades y plagas, que afectan la productividad de este cultivo en Honduras, estimada en 654 kg/ha (FAO, 1993). Entre las limitantes del suelo, se incluyen las deficiencias nutricionales, principalmente nitrógeno (N) y fósforo (P), que afectan el crecimiento y productividad del frijol en toda la región centroamericana (Bazán, 1975). Las alternativas para mejorar la productividad del frijol bajo condiciones de bajo P, comprenden la utilización de fertilizantes fosfatados, incluyendo las enmiendas (p.e. roca fosfórica), la tolerancia genética a bajo P, y las asociaciones con organismos benéficos (hongos micorrizas). La utilización de fertilizante por la mayoría de los productores de frijol se encuentra muy por debajo de las recomendaciones; sin embargo, variedades más eficientes podrían mejorar la productividad del cultivo aún cuando se usen dosis compatibles con las modestas inversiones en insumos agrícolas de estos productores. En Honduras, se han observado buenas respuestas a la aplicación de P mediante el uso de fertilizantes compuestos (p.e. 18-46-0), que contienen además N en menores cantidades.

El presente manuscrito es el resultado de una revisión de la escasa literatura disponible en esta área; se presentan resultados y comentarios sobre el contenido de P de suelos de las zonas frijoleras más importantes de Honduras, respuesta a la fertilización con P, efectos en la fijación de nitrógeno y mejoramiento genético de la tolerancia del cultivo.

Caracterización del fósforo en suelos de Honduras y Zamorano

El estudio de Andrews *et al.* (1994) presenta datos del contenido de P de 62 suelos en base a muestras tomadas en 59 localidades (25 municipios) de los departamentos de Olancho (región nor-oriental), Francisco Morazán y El Paraíso (región centro-oriental), donde se concentra más del 50 % de la producción de frijol de Honduras. Según el P aprovechable del suelo (Mehlich I), los suelos se clasificaron en bajo (< 17 ppm), medio (17-30 ppm) y alto (> 30 ppm). El contenido de P en estos suelos es muy variable, dependiendo de la procedencia de las muestra; en total, el 48 % (30 muestras) presentó niveles bajos de P, 21 % (14 muestras) niveles medios y 29% (18 muestras) niveles altos (Cuadro 1).

Sólo el 28 % de las muestras de Olancho presentaron niveles bajos, mientras 57 % niveles altos. Lo contrario se presentó en los departamentos de la región centro-oriental, Francisco Morazán y El Paraíso, donde las muestras con bajos niveles de P alcanzan el 54 %, y sólo el 21 % presentaron niveles altos. Estos resultados en el contenido de P, se relacionan con las condiciones de suelo y tecnología de la producción de frijol que caracterizan a estas regiones. En Olancho, región nor-oriental, la mayoría de las tierras utilizadas en la producción de frijol están localizadas en valles o laderas de poca pendiente, y poseen características de buena fertilidad. Además, muchos de los productores utilizan altas cantidades de fertilizante en la producción de maíz en el ciclo de primera, y cantidades medias a altas para la producción de frijol en el ciclo de postrera, debido a la rentabilidad potencial de estos cultivos. En la región centro-oriental del país, departamentos de Francisco Morazán y El Paraíso, el frijol es mayormente producido por pequeños agricultores en terrenos marginales, principalmente laderas de baja fertilidad, y utilizando un mínimo de insumos, debido a que en esta región el frijol es mayormente un

Cuadro 1. Distribución de suelos por departamentos, localidades y contenido de fósforo. Honduras, 1994.

Departamento	Número de localidades/Nivel de P			
	Bajo	Medio	Alto	Rango (ppm P)
Olancho	4	2	8	0,8 - 345
Fco. Morazán	13	7	7	3 - 121
El Paraíso	13	5	3	3 - 70
	30	14	18	

Bajo = <17 ppm; medio = 17-30 ppm; alto = >30 ppm.

cultivo de subsistencia y con un potencial relativo de comercialización. Como consecuencia, los rendimientos obtenidos en esta región son superados significativamente por los obtenidos en la región nor-oriental (Andrews *et al.*, 1994).

Algunos estudios sobre la caracterización del contenido de P en ciertos suelos de Zamorano (typic ustifluent) han sido conducidos hasta la fecha. Sierra (1959) estudió el horizonte Ap de tres suelos de Zamorano, encontrando variación en el pH de 5,3 a 5,8. El P extraído (Mehlich I) en estos suelos varió de 0.3 a 8 mg/kg de suelo. En un ensayo conducido por Awah (1964), en un período de dos años en dos lotes de Zamorano, se registraron las diferencias en rendimiento de sorgo, maíz y frijol (variedad Zamorano) debidas al efecto de tratamientos de cal, Ca (OH)₂ equivalente a 2 t/ha de CaCO₃, calculada para elevar el pH de 5,5 a 6,5, y aplicada en el primer año, y fósforo (35 kg/ha de P como superfosfato triple), aplicado a la siembra en cada cultivo. Los resultados al final de los dos años, indicaron que la mayor parte del P potencialmente disponible en suelos de Zamorano era en forma orgánica (Cuadro 2). El encalado libera el P de la fracción orgánica de estos suelos e incrementa la eficiencia del P aplicado y su utilización por los cultivos.

La capacidad de absorción de P por la variedad Dorado se determinó en un estudio en invernadero conducido por Tamashiro (1995), utilizando un suelo del lote Los Mingos del Zamorano (3 ppm de P), y tratamientos de 0, 20, 40, 60 y 80 kg/ha de P₂O₅ usando una solución nutritiva a base de ácido fosfórico. Se registró un incremento en la absorción de P (0,24 a 0,32 %) que fue proporcional al P aplicado. No se observaron diferencias en la absorción de N.

Respuesta a la fertilización con fósforo

Varios estudios conducidos en Honduras (Awah, 1964; Burgos, 1967; Barkdoll *et al.*, 1983; Andrews, 1990; Wong, 1992; Andrews *et al.*, 1994; 1995) reportan respuestas significativas del cultivo de frijol a la fertilización fosfatada. En el estudio de Awah (1964), se registraron incrementos significativos en el rendimiento de la variedad Zamorano, con las aplicaciones de cal sola y cal con P (Cuadro 3).

Barkdoll *et al.* (1983), encontraron diferencias en la respuesta de cuatro variedades de frijol a dos niveles de P (26 y 52 kg P/ha) en dos lotes de Zamorano (Cuadro 4). Tanto en San Nicolás (7,4 - 12,0 kg P/ha) como en Monte Redondo (15,7 - 22,0 kg P/ha), no se observa-

Cuadro 2. Efectos de cal y P en el pH y P del suelo del lote La Vega después de dos años de cultivo. Zamorano, Honduras, 1964.

Tratamiento	pH	Fósforo (ppm)			
		Disponible	Total	Inorgánico	Orgánico
Testigo	5,5	3,4	131	23	108 (82,4) ^z
Cal	6,3	6,0	129	36	93 (72,1)
P	5,4	6,7	149	38	111 (75,5)
Cal + P	6,3	12,0	150	61	89 (59,3)
DMS.05	-	4,8	7,9	6,2	10,6

^z Porcentaje del P total.

Cuadro 3. Efecto de tratamientos de cal y fósforo (P) en el rendimiento de frijol variedad Zamorano en el lote La Vega. Zamorano, Honduras, 1964.

Tratamiento	Rendimiento (kg/ha)	% Testigo
Testigo	1,113	100
Cal	1,729	155
P	1,570	141
Cal + P	2,065	186
Andeva	**	
DMS.05	175	

** Significativo al nivel de $P \leq 0,01$.

ron efectos del P en el rendimiento, pero la interacción Variedad (V) x P fue significativa, siendo superior la variedad Porrillo Sintético. Por falta de un tratamiento testigo sin P, no se pudo determinar si hubo respuesta al nivel de 26 kg P/ha.

Como sugieren Barkdoll *et al.* (1983), la respuesta a la aplicación de P depende de su contenido en el suelo. Esto fue corroborado por Wong (1992) utilizando dos lotes de Zamorano, Zorrales con bajo P (10,3 ppm) y

Colindres con alto P (45,5 ppm). En Zorrales, hubo una respuesta lineal y cuadrática en el rendimiento; en cambio en Colindres la respuesta al P fue solamente cuadrática (Cuadro 5).

Robleto (1988), logró un incremento significativo en la nodulación de la línea WBR 22-34, pero no encontró diferencias en el rendimiento aún usando dosis altas (0, 150 y 300 kg P₂O₅/ha), en suelos con contenido bajo a medio de P.

Cuadro 4. Rendimiento (kg/ha) de cuatro variedades de frijol bajo dos niveles de fertilización fosforada. Zamorano, Honduras, 1982.

P (kg/ha)	Porrillo 70	Acacias 4	Zamorano	México 27 R	Promedio
San Nicolás ^{1/}					
26	1709	1332	1440	1019	1375
52	1773	1367	1331	1148	1404
DSM.05 (Variedad x P) = 433					
Monte Redondo					
26	1570	1303	1115	1447	1359
52	1451	1177	1064	1353	1261
DSM.05 (Variedad x P) = 438.					

^{1/} Contenido de P (kg/ha): San Nicolás 7,4 - 12,0; Monte Redondo 15,7 - 22,9.

Cuadro 5. Efecto del fósforo en el número de nódulos (NN) y peso seco de nódulos (PSN) y parte aérea (PSPA) por planta en la etapa de floración (R6), y en el rendimiento de grano del frijol común. Zamorano, Honduras, 1991.

P ₂ O ₅ (kg/ha)	NN	PSN (mg)	PSPA (g)	Rendimiento (kg/ha)
Suelo con bajo P^{1/}				
0	5,1	6	8,2	684
40	3,6	7	8,5	748
120	5,6	7	10,4	840
200	5,0	5	9,2	766
R lineal	ns	**	ns	*
R cuadrático	**	**	*	*
Suelos con alto P^{2/}				
0	7,1	15	7,5	968
40	8,8	26	9,7	1172
120	10,7	11	9,7	1122
160	10,5	12	10,2	1084
R lineal	ns	ns	**	ns
R cuadrático	ns	ns	**	*

^{1/} Zorrales: 10,3 ppm P, pH 5,7, 0,18% N.

^{2/} Colindres (T1): 45,5 ppm P, pH 5,5, 0,16%.N.

**,* y ns Significativo al nivel de P≤0,01 y 0,05, y no significativo, respectivamente.

En los ensayos de Andrews *et al.* (1995), conducidos en lotes de bajo contenido de P en los Mingos, Zamorano y Casitas, Güinope, se observaron diferencias en las respuestas varietales a la aplicación de fertilizante fosfórico (Cuadro 6). En Zamorano, se observó una interacción significativa V x P, siendo mayor la respuesta cuadrática en Rio Tibagi ($R^2= 0.66$) que en Dorado ($R^2= 0,27$); en cambio, en Casitas, la interacción V x P no fue significativa ya que ambas variedades tuvieron una buena respuesta ($R^2=0,72$ y $0,80$, respectivamente). Las diferencias en temperatura y humedad de Zamorano (800 msnm) y Casitas (1,300 msnm), pudieron haber influido en el comportamiento de las variedades y su eficiencia en la utilización de P.

Efecto del P en la fijación de nitrógeno

El bajo contenido de P en los suelos reduce la capacidad de nodulación y fijación de N_2 del frijol común, y la respuesta a la fertilización con P varía según el genotipo (Graham, 1981). Estudios conducidos en Zamorano, indican un incremento significativo de la nodulación en frijol como consecuencia de la

aplicación de P. Wong (1992), obtuvo una respuesta cuadrática en el NN y PSN con aplicaciones de P, pero no observó incrementos en rendimiento en suelos de contenido medio de N (0,13 y 0,16 %) en los que la contribución de la fijación de N_2 es menor (Graham, 1981). Barkdoll *et al.* (1983) sugirieron que en Zamorano, la inoculación con *Rhizobium* podría ser usada efectivamente en vez de fertilizante nitrogenado, y esperarse un rendimiento equivalente a la aplicación de 60 kg N/ha, siempre que se adicione el P necesario.

Mejoramiento de la tolerancia a bajo P

En la actualidad, la EAP/Zamorano está caracterizando un germoplasma de >500 variedades criollas hondureñas por su tolerancia a bajo P en las localidades de Zamorano (800 msnm) y Tatumbla (1600 msnm). Por otro lado, se ha iniciado un programa de hibridaciones para recombinar fuentes de tolerancia a bajo P y eficiencia en la respuesta al P, provenientes de diversos reservorios genéticos, que puedan servir de donantes en el desarrollo de cultivares.

Cuadro 6. Respuesta en rendimiento de grano (kg/ha) a la fertilización fosforada en variedades de frijol en dos localidades. Honduras, 1994.

P (kg/ha)	Localidad			
	Zamorano		Güinope	
	Dorado	Rio Tibagi	Dorado	Catrachita
0	2,060	1,831	382	412
40	2,114	2,299	634	662
80	1,691	2,522	1,002	952
120	2,188	2,732	823	898
R^2	0.27 ^z	0.66	0.72	0.80
Andeva (V X P)	**	**	ns	ns

^z Respuesta cuadrática.

** ,ns Significativo al nivel $P \leq 0,01$ y no significativo, respectivamente.

LITERATURA CITADA

- ANDREWS, A.M., 1990. Soil factors affecting bean (*Phaseolus vulgaris*L.) and maize (*Zea mays*L.) production in Honduras, Central America. PhD. Dissertation, Universidad de Florida, Gainesville, FL. 234 p.
- ANDREWS, A. M.; CASTRO, J.A.; ROSAS, J.C.; RODRIGUEZ, F. 1994. Tolerancia del frijol a bajos niveles de fosfato. Informe Anual 1993 presentado a ProFrijol. 13 p.
- ANDREWS, A. M.; CASTRO, J. A.; ROSAS, J.C. 1995. Respuestas de variedades de frijol a la fertilización fosforada en dos localidades de Honduras. Informe Anual de Investigación, Departamento de Agronomía, Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, IAI 7: 90-91.
- AWAH, A.B. 1964. Effect of lime on availability of phosphorus in Zamorano soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 28 (5): 672-673.
- BARKDOLL, A.W.; SARTAIN, J.B.; HUBBELL, D.H. 1983. Effect of soil implanted granular and pellet *Rhizobium* inoculant on *Phaseolus vulgaris* L. in Honduras. Soil and Crop Sci. Soc. of Florida Proc. 42: 184-189.
- BAZAN, R. 1975. Nitrogen fertilization and management of grain legumes in Central America. pp 228-244. In: E. Bomemisza y A. Alvarado (eds.), Soil Management in Tropical America. North Carolina State Univ.
- BURGOS, C. F. 1967. Nitrogen-phosphorus interaction in the dark clays from Honduras. PhD. Dissertation, Universidad de Florida, Gainesville, FL. 97 p.
- FAO. 1993. Production Yearbook. FAO collection: Statistic 112, Vol. 46.
- GRAHAM, P.H. 1981. Some problems of nodulation and symbiotic N₂ fixation in *Phaseolus vulgaris* L. : A review. Field Crops Res. 4: 93-112.
- NACIONES UNIDAS. 1995. Granos básicos en Centro América: Propuestas para los pequeños agricultores (Información estadística general). CEPAL/ONU, 132 p.
- ROBLETO, E.A. 1988. Efecto de la fertilización con calcio, fósforo, y molibdeno en la fijación de nitrógeno y rendimiento del frijol común. Tesis Ing. Agr., Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras, 52 p.
- SIERRA, F.A. 1959. A comparison of the amount of P removed from different soils by extracting solutions. Tesis de Maestría, Universidad de Florida, Gainesville, FL., 79 p.
- TAMASHIRO, J. 1995. Absorción de nitrógeno y fósforo en maíz (*Zea mays*L.) y frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) bajo condiciones de Zamorano. Tesis Ing. Agr., Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras, 54 p.
- WONG, I. 1992. Efecto de la fertilización con nitrógeno y fósforo sobre la fijación de nitrógeno y rendimiento en frijol común. Tesis Ing. Agr., Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano, Honduras, 72 p.

IDENTIFICACION DE GENOTIPOS DE FRIJOL CON ADAPTACION A SUELOS DE BAJA FERTILIDAD

Jorge A. Acosta G.¹, Efraín Acosta D.¹, Simón Alvarado M.¹

RESUMEN

Identificación de genotipos de frijol con adaptación a suelos de baja fertilidad. Con el objetivo de identificar genotipos de frijol con adaptación a suelos pobres en fósforo, se establecieron dos experimentos con 36 materiales de diversos orígenes, en Chapingo, Méx. (19°20'N, 2240 msnm y 640 mm de precipitación anual). Los genotipos se evaluaron en dos dosis de fertilización fosfatada, 15 y 80 unidades de P₂O₅/ha en 1994 y 0 y 80 en 1995. En 1994 no hubo diferencias entre dosis de fertilización para rendimiento. Los genotipos Bayo Zacatecas II, A 800, Pinto Villa y G 5141 mostraron los más altos rendimientos con la dosis baja de fósforo. En 1995 se encontraron diferencias significativas (P<0.01) entre dosis de fertilización, genotipos y su interacción para la acumulación de materia seca en la etapa R6, rendimiento de grano, índice de cosecha y peso del grano (P<0.01). Se observó una relación positiva (r=0.58**) entre los días a floración y la acumulación de materia seca. Lo anterior sugiere la necesidad de agrupar genotipos de similar precocidad y hábito de crecimiento para su comparación. En la dosis baja de fósforo, los genotipos Pinto Villa, Manzano y G 3585 obtuvieron los más altos rendimientos y también los más altos índices de eficiencia. Los resultados señalan la existencia de amplia variación entre genotipos de frijol en producción de materia seca y grano en suelos con moderada disponibilidad de fósforo.

ABSTRACT

Identification of common bean genotypes adapted to low fertility soils. With the aim of identifying bean genotypes adapted to soils with low P availability, two trials were established with 36 genotypes at Chapingo, Mex. (19° 20' N, 2240 m.a.s.l. and 640 annual precipitation). Bean genotypes were grown under two levels of P fertilization, 15 and 80 units of P₂O₅/ha in 1994, and 0 and 80 unit of P₂O₅/ha in 1995. In 1994 there was not difference between P dosis. Genotypes Bayo Zacatecas II, A 800, Pinto Villa an G 5141 showed highest yields under low P. In 1995 there were signigicative differences (P<0.01) among P dosis, genotypes and their interaction for biomass at R6, seed yield, harwest index and seed mass at maturity. A positive relation ship was observed between day to flowering and biomass accumulation (r=0.58**). This strongly suggests the grouping of genotypes or the basis of phenology and growth habit for comparison. Genotypes Pinto Villa, Manzano and G 3585 showed highest yields under low P. Results indicated the availability of wide genetic variation in common bean for dry matter and seed yield in soils with low P content.



¹ Investigadores Programa de Frijol. Campo Experimental "Valle de México". Apdo. Postal #10. Chapingo, Méx. CP. 56230 Méxicc

INTRODUCCION

En regiones donde la agricultura es de subsistencia, la utilización de pocos insumos, como fertilizantes e insecticidas, es una estrategia efectiva en áreas donde existen deficiencias de nutrimentos minerales, plagas y enfermedades que limitan la producción de los cultivos. La utilización de variación intraespecífica para tolerancia a exceso o deficiencia de minerales podría permitir el desarrollo de variedades con adaptación a suelos deficientes en éstos (Gerloff y Gabelman, 1988). En frijol, se ha identificado variación intraespecífica para adaptación a suelos de bajo contenido de fósforo y nitrógeno (Beebe *et al.*, 1994; Sing *et al.*, 1995). También es conocido que la tolerancia a suelos con bajo contenido de fósforo es de herencia cuantitativa (Fawole *et al.*, 1982).

La selección de plantas tolerantes a deficiencias minerales está en función del nutrimento y condiciones específicas del suelo a superar. Cada nutrimento mineral tiene su química y su fisiología única, por lo que los mecanismos de "eficiencia" son diferentes para cada nutrimento. Sin embargo, existen procesos comunes a todos los nutrimentos como son: obtención a partir del medio ambiente, movimiento a través de las raíces y xilema, translocación y distribución dentro de las partes de la planta, y utilización en el metabolismo y crecimiento (Clark y Duncan, 1991). Graham (1984), definió agrónomicamente el término "eficiencia nutricional" como la capacidad de un genotipo para producir alto rendimiento en un suelo limitante en el elemento mineral de interés en comparación con un genotipo estándar. Para el caso de frijol común, Singh *et al.* (1995) propusieron la selección simultánea por tolerancia a varios nutrimentos minerales e identificaron genotipos tolerantes en uno o ambos nutrimentos, nitrógeno y fósforo, muchos de estos originados en el altiplano Mexicano.

En el altiplano de México existen áreas productoras de frijol con suelos deficientes en nutrimentos, principalmente nitrógeno y fósforo, y en materia orgánica (CIAT, 1987). Estos suelos por lo general son andosoles que tienen un contenido de moderado a alto de fósforo, pero debido al contenido de arcillas minerales amorfas, el nutrimento no está disponible. Por lo anterior, la presente investigación tuvo como objetivo la evaluación de un grupo de 36 genotipos de frijol de diferentes orígenes bajo dos dosis de fertilizante fosfatado. La mayoría de los genotipos introducidos fueron previamente identificados como tolerantes a suelos deficientes en fósforo (Beebe *et al.*, 1994, Singh, 1995).

MATERIALES Y METODOS

Se establecieron dos experimentos, uno en 1994 con 36 genotipos de frijol de diferentes orígenes y otro en 1995, en este último año algunos genotipos fueron sustituidos por otros reportados en la literatura como tolerantes a suelos deficientes en fósforo (Singh, *et al.*, 1995) (Cuadro 1). En ambos años la siembra se realizó el 22 de Junio, bajo condiciones de temporal en Chapingo, Méx. (19°20'N, 98°53'O, 2240 msnm y 640 mm de precipitación anual). Antes del establecimiento de los experimentos se realizó un análisis químico de la capa arable del suelo del sitio experimental y se encontró que este fue pobre en contenido de nitrógeno y regular en fósforo (18 ppm, Bray II).

En 1994 los genotipos se distribuyeron en un diseño de latice simple duplicado y se fertilizaron con la dosis 50-15-0 de N-P-K/ha en dos repeticiones y en otras dos con la dosis 50-80-0. En 1995 los genotipos se distribuyeron en un latice triple duplicado y se fertilizaron tres repeticiones con la dosis 50-0-0 de N-P-K/ha y tres con 50-80-0. En los dos experimentos, la parcela experimental

Cuadro 1. Identificación, origen y características agronómicas de 36 genotipos de frijol. CEVAMEX, México.

Genotipo	Origen	Genotipo	Origen
G 1323 ³	México	G 8259 ³	Colombia
G 3585 ³	México	G 17717 ³	Perú
G 4482 ¹	Honduras	G 7434 ¹	Colombia
G 4637 ¹	Colombia	G 12539 ¹	Perú
G 5141 ³	México	G 14016 ¹	Colombia
G 6113 ¹	México	G 16140 ¹	Perú
G 1825 ¹	Cuba	G 19428 ³	Perú
BAT 1467 ³	CIAT	G 19839 ¹	Perú
Río Tibagi ³	Brasil	G 19857 ¹	Perú
Negro INIFAP ³	INIFAP	Pinto Villa ³	INIFAP
G 2340 ¹	México	A 800 ¹	CIAT
G 2351 ¹	México	Bayo Zac. ³	INIFAP
G 3513 ³	México	Bayo Zac. II ³	INIFAP
G 3593 ¹	México	Negro Perla ³	INIFAP
G 4639 ¹	Colombia	Seqúfa 12 ³	CIAT
G 4691 ¹	Colombia	Seqúfa 23 ³	CIAT
G 4698 ³	Colombia	PV RR-2 ¹	INIFAP
G 5150 ³	México	Bayo Mecentral ¹	INIFAP
Pastilla T. ²	México	A 774 ²	CIAT
Bayo Dgo. ²	INIFAP	Amarillo 153 ²	INIFAP
Negro Qro. ²	México	Amarillo 169 ²	INIFAP
Bayo Blanco ²	México	Puebla 152 ²	México
Garb. Serdan ²	México	Garb. Supremo ²	INIFAP
Manzano ²	INIFAP	Bayo 400 ²	INIFAP
Carioca ²	Brasil	Hidalgo 67 ²	México
Tlaxcala 475 ²	México	Amarillo de C. ²	México
C. Small White ²	USA		

¹ = Incluidos en 1994; ² = Incluidos en 1995 y ³ = Incluidos en 1994 y 1995.

consistió en un surco de 5 m de longitud y 0.6 m de separación entre ellos. Durante la conducción del experimento, se dieron las labores culturales recomendadas para el cultivo en la región y se llevó un registro diario de las características climáticas en una estación localizada a 200 m del sitio experimental.

Las características determinadas en todas las parcelas fueron: días al 50% de la floración, días a la madurez fisiológica, reacción a enfermedades y rendimiento de grano y peso de 100 granos. También se cuantificó el número de plantas y la producción de paja por parcela. En el experimento de 1995 a los

25 días después de la floración de cada genotipo, se cosecharon las plantas de un metro lineal de surco para determinar la producción de materia seca de la parte aérea. Además, en ambos años para cada genotipo se calcularon índices de cosecha y de eficiencia relativa del rendimiento, considerando ambas condiciones de fertilización (Graham, 1984). Este último índice se calculó con la siguiente expresión:

$$I_i = (\text{Rend. genotipo } i \text{ en bajo P} / \text{Rend. promedio en bajo P}) * (\text{Rend. genotipo } i \text{ en alto P} / \text{Rend. promedio en alto P}).$$

Para cada experimento se realizaron análisis de varianza individuales con el diseño de Bloques Completos al Azar, uno para cada dosis de fertilización, y un análisis factorial 2 X 36 (dosis y genotipos). Se determinó el grado de asociación entre pares de las variables cuantificadas bajo las dos condiciones de fertilización.

RESULTADOS Y DISCUSION

1994.

Los análisis de varianza señalaron diferencias altamente significativas ($P < 0.01$) entre genotipos para todas las características cuantificadas y calculadas, pero no para las dosis de fósforo e interacción dosis X genotipo. Esto último fue debido a que el suelo del sitio experimental sólo fue moderadamente pobre en contenido de fósforo. Sin embargo, el rendimiento obtenido resultó ligeramente superior en el tratamiento con 80 unidades de fósforo/ha y hubo algunos genotipos que obtuvieron rendimientos superiores en la dosis baja de fósforo en comparación con la dosis alta (Cuadro 2). En el futuro, para realizar una evaluación confiable, es necesario disminuir el contenido de este nutrimento en el sitio experimental.

En el Cuadro 2 se presentan los rendimientos obtenidos por los 36 genotipos en ambas dosis de fósforo, así como el porcentaje relativo obtenido en la dosis baja de Fósforo en comparación con la dosis alta y el índice de eficiencia (Graham, 1984).

En la dosis alta de fósforo los genotipos Bayo Zacatecas y Negro Perla, entre otros, mostraron los rendimientos superiores, mientras que Bayo Zacatecas II, A 800 y Pinto Villa exhibieron un rendimiento superior en el tratamiento de bajo fósforo. En este ensayo se incluyeron algunos materiales andinos previamente identificados como tolerantes a suelos con bajo Fósforo (Beebe *et al.*, 1994), tales como G 12539, G 19839, y G 19857, los cuales tuvieron problemas de adaptación y en consecuencia un retraso en su fenología y presentaron bajos rendimientos e índices de cosecha en ambas dosis de fósforo. Sin embargo, debido a la distancia genética que existe entre el germoplasma Mesoamericano y el Andino (Singh *et al.*, 1991), los mejores de éstos últimos genotipos pueden ser de utilidad para ampliar la base genética del germoplasma del altiplano de México, por lo que deben utilizarse en cruzamientos con materiales adaptados locales.

En general, el índice de cosecha resultó menor en las dosis baja de fósforo. Al parecer, tal y como fue previamente señalado por Wortmann (1994) la adaptación local de los materiales interfirió con la evaluación a los problemas de fertilidad del suelo, y es por ello, que materiales de bajo rendimiento en ambas condiciones de fertilidad resultan con los mejores porcentajes al comparar el rendimiento en la dosis baja de fósforo con el de la dosis alta. En el caso del índice de eficiencia empleado, este es confiable para la evaluación y selección de genotipos ya que toma en consideración el rendimiento obtenido bajo ambas condiciones de fertilidad. Los genotipos a seleccionar son los que

Cuadro 2. Características fenológicas, rendimiento, porciento relativo e índice de eficiencia de 36 genotipos de frijol. CEVAMEX, Méx., 1994.

Genotipo	Días a		Rend. (gm ²)			Rend.(%)	ii ^{1/}	Índice cosecha
	flor.	Mad.	+P	-P	Prom.	-P/+P		
G 1323	60	112	235	170	202	72	1,03	45,2
G 3585	57	113	257	217	237	84	1,45	46,1
G 4482	57	118	187	140	164	75	0,68	38,5
G 4637	61	121	87	152	120	174	0,34	34,0
G 5141	61	114	232	292	262	126	1,76	48,8
G 6113	63	112	162	145	154	89	0,61	41,2
G 18257	62	113	177	157	167	89	0,72	42,3
BAT 1467	60	114	237	262	250	110	1,61	47,4
Rio Tibagi	61	115	232	207	220	89	1,25	48,4
Negro INIFAP	61	115	272	197	235	72	1,39	51,4
G 2340	65	116	192	112	152	58	0,56	36,5
G 2351	65	114	157	125	141	79	0,51	45,6
G 3513	62	114	210	175	192	83	0,95	42,3
G 3593	63	115	227	135	181	59	0,79	37,0
G 4639	71	121	180	105	142	58	0,49	42,7
G 4691	71	125	137	97	117	71	0,35	31,3
G 4698	71	118	247	172	210	70	1,10	43,3
G 5150	69	118	200	142	171	71	0,74	43,9
G 8259	63	119	205	145	175	71	0,77	46,5
G 17717	65	127	185	167	176	90	0,80	40,5
G 7434	70	127	165	122	144	74	0,52	42,8
G 12539	78	135	142	145	144	102	0,53	34,7
G 14016	72	130	97	107	102	110	0,27	35,1
G 16140	72	128	103	85	94	82	0,23	38,6
G 19428	69	123	195	232	214	119	1,18	38,8
G 19839	73	130	80	90	85	112	0,19	30,9
G 19857	73	130	135	110	122	81	0,38	33,4
Pinto Villa	51	106	284	310	297	109	2,28	63,5
A 800	53	112	270	340	305	126	2,38	58,7
Bayo Zac.	51	112	345	272	309	79	2,43	55,3
Bayo Zac. II	53	112	290	347	319	120	2,61	59,8
Negro Perla	51	103	315	245	280	77	2,00	56,5
Saquía 12	54	110	267	277	272	104	1,92	58,2
Sequía 23	54	113	257	270	264	105	1,80	61,7
PV RR-2	54	115	190	255	222	134	1,25	49,7
Bayo Mec.	54	105	250	215	232	86	1,39	57,5
Promedio	63	117	206	187	197	92	1,36	45,0
DMS 0,05	5,1	6,0	107	90	99	-	-	-

^{1/} Ver texto

obtengan los valores más altos con este índice, ya que en términos prácticos lo que más les importa los agricultores es el rendimiento.

Bajo ambas dosis de fertilización fosfatada, el rendimiento e índice de cosecha mostraron asociaciones negativas significativas con la fenología del cultivo, floración ($r = -0,62^{**}$ y $-0,60^{**}$, respectivamente) y madurez ($r = -0,68^{**}$ y $-0,63^{**}$, respectivamente). Esta respuesta puede deberse a la inclusión de materiales introducidos no adaptados, los cuales se caracterizaron por producir abundante biomasa, la que no fue redistribuida hacia las estructuras reproductivas. El rendimiento de grano sólo mostró una asociación positiva significativa con el índice de cosecha ($r = 0,80^{**}$). Los días a la floración y madurez fisiológica como era de esperarse, mostraron un alto grado de asociación positiva entre ellos ($r = 0,75^{**}$).

1995.

Los análisis de varianza detectaron diferencias altamente significativas ($P < 0,01$) entre genotipos y en la interacción dosis por genotipo para la acumulación de materia seca en la etapa R6. Se encontraron diferencias significativas ($P < 0,01$) para los efectos de dosis, genotipos y para la interacción para el rendimiento de grano, índice de cosecha y peso de 100 granos.

Los genotipos G 3585 y Amarillo de Calpan fueron de los materiales que mostraron la mayor producción de materia seca en la dosis de 0 fósforo y estuvieron entre los primeros en la dosis alta y por ello exhibieron los más altos valores del índice de eficiencia (Cuadro 3). Se registró una relación positiva entre la producción de materia seca y los días a la floración ($r = 0,58^{**}$), lo cual sugiere que genotipos tardíos acumulan mayor cantidad de biomasa de la

parte aérea en esa etapa. Para pruebas posteriores sería conveniente agrupar el material experimental de acuerdo a su fenología y hábito de crecimiento.

Con respecto al rendimiento de grano en la dosis baja de fósforo, los genotipos Pinto Villa, Manzano y G 3585 obtuvieron los más altos rendimientos y también los más altos índices de eficiencia, lo que indica que también estuvieron entre los de máximo rendimiento en la dosis alta de fósforo (Cuadro 4).

Bajo ambas dosis de fósforo, no se detectó relación entre la acumulación de materia seca en la etapa R6 y el rendimiento de grano. Esto se debió a que algunos genotipos introducidos tardíos acumularon bastante materia seca, pero su rendimiento e índice de cosecha fueron reducidos. Por ejemplo, los valores de la asociación negativa entre la floración y la madurez con el rendimiento ($r = -0,59^{**}$ y $-0,34^*$, resp.) e índice de cosecha ($r = -0,72^{**}$ y $-0,76^{**}$, resp.) observadas en el tratamiento sin fósforo fueron altos. Valores similares se observaron en el tratamiento con fósforo.

Durante el desarrollo del cultivo se registraron 421 mm de precipitación, con dos períodos de sequía, uno en la etapa de prefloración y otro durante el llenado de grano. Sin embargo, durante el mes de Agosto se presentaron abundantes precipitaciones las cuales favorecieron la presencia de diversas enfermedades. Los genotipos resultaron resistentes (calificación < 3) o intermedios en su reacción a las enfermedades (Cuadro 3) y no se encontró relación significativa entre la acumulación de materia seca y la severidad de las enfermedades.

De las enfermedades que se presentaron, la roya y la mancha redonda fueron las de mayor severidad y la antracnosis la de menor daño. Entre los genotipos, el de mayor

Cuadro 3. Características fenológicas, producción de materia seca y reacción a enfermedades de 36 genotipos de frijol. Chapingo, Méx., 1995.

Genotipo	Días a		MST ¹ (gm ⁻²)		MST -P/+P (%)	li ²	Reacción a ³				
	flor.	Mad.	+P	-P			R	A	TC	V	C
G 1323	56	109	290	275	95	0,73	4	1	2	1	3
G 3585	61	104	550	418	76	2,11	4	1	3	2	4
G 5141	56	103	413	365	88	1,38	3	1	2	2	3
BAT 1467	59	109	432	352	81	1,39	2	1	2	2	3
Rio Tibagi	55	102	352	352	100	1,13	3	1	3	2	3
Negro INIFAP	60	106	358	293	82	0,96	2	1	3	1	3
G 3513	58	105	275	297	108	0,75	4	1	2	1	2
G 4698	63	112	238	267	112	0,58	1	1	3	2	3
G 5150	62	106	375	347	92	1,19	2	1	3	1	3
G 8259	59	103	253	267	105	0,62	2	1	3	2	4
G 17717	66	107	418	328	78	1,25	3	1	3	2	4
G 19428	69	107	342	343	100	1,07	1	1	2	1	2
Pinto Villa	44	103	268	345	129	0,85	3	1	2	3	3
A 800	44	102	297	200	67	0,54	3	1	3	2	2
Bayo Zac.	46	101	295	260	88	0,70	1	1	2	3	3
Bayo Zac. II	47	111	278	187	67	0,48	2	1	3	3	4
Negro Perla	47	119	467	213	46	0,91	2	1	3	1	3
Sequía 12	45	105	285	195	68	0,51	2	1	2	1	3
Sequía 23	49	99	377	225	60	0,77	3	1	3	2	3
Pastilla T.	59	100	380	322	85	1,16	3	1	3	2	3
A 774	50	107	327	293	90	0,88	2	1	3	2	3
Bayo Dgo.	50	104	305	250	82	0,69	3	2	3	1	4
Amarillo 153	55	104	298	337	113	0,92	3	2	2	1	3
Negro Qro.	55	97	390	372	95	1,33	3	3	3	2	4
Amarillo 169	54	103	405	355	88	1,32	3	2	3	2	4
Bayo Bco. S.	52	109	352	290	82	0,94	3	1	3	2	3
Puebla 152	56	105	482	340	70	1,50	2	1	2	1	4
Garb. Serdan	56	107	405	353	87	1,30	4	2	2	2	3
Garb. Supremo	50	113	378	292	77	1,01	2	2	2	2	3
Manzano	51	113	408	298	73	1,11	4	1	3	2	3
Bayo 400	48	107	377	360	95	1,25	2	1	3	2	3
Carioca	54	104	303	260	86	0,72	1	1	2	2	4
Hidalgo 67	52	105	318	250	79	0,72	4	1	3	2	4
Tlaxcala 475	52	101	577	258	45	1,36	2	1	2	2	3
Amar. Calpan	66	111	477	450	94	1,96	3	1	3	2	3
C. Small White	59	103	292	317	108	0,85	2	1	2	3	3
Promedio	54	106	360	303	86	1,02	3	1	3	2	3
DMS 0,05	-	-	97	104	-	-	-	-	-	-	-

^{1/} MST= Materia seca total de la parte aérea en la etapa R6.^{2/} Ver texto.^{3/} R = Roya, A= antracnosis, TC= tizón común, V= Virosis y C= Cercospora (mancha foliar). Escala 1= sin síntomas visibles, 9= plantas severamente dañadas (Shoonhoven y Pastor-corrales, 1987).

Cuadro 4. Rendimiento, índice de eficiencia e índice de cosecha de 36 genotipos de frijol. Chapingo, Méx., 1995.

Genotipo	Rend.(gm ²)		II ^{1/}	Índice Cosecha (%)		Peso 100 Granos	
	-P	+P		-P	+P	-P	+P
G 1323	77	102	0.47	59	38	18	20
G 3585	209	211	2.61	52	48	25	27
G 5141	125	153	1.13	56	48	16	16
BAT 1467	173	158	1.62	62	51	20	14
Rio Tibagi	123	149	1.09	51	46	14	15
Negro INIFAP	101	93	0.47	49	34	17	17
G 3513	90	131	0.59	46	49	18	18
G 4698	94	87	0.41	46	37	22	18
G 5150	113	112	0.64	43	45	15	16
G 8259	81	66	0.27	39	33	18	18
G 17717	112	82	0.46	36	29	18	19
G 19428	56	58	0.16	26	16	19	20
Pinto Villa	221	248	2.77	70	63	32	33
A 800	143	186	1.34	53	59	27	28
Bayo Zac.	169	229	1.95	57	59	37	41
Bayo Zac. II	142	154	1.10	56	50	42	41
Negro Perla	102	166	0.86	55	52	22	21
Sequía 12	160	232	1.87	56	59	16	17
Sequía 23	157	194	1.52	56	59	22	20
Pastilla T.	78	119	0.47	43	46	40	44
A 774	152	213	1.64	50	52	21	21
Bayo Dgo.	134	154	1.04	59	50	45	49
Amarillo 153	150	177	1.34	45	44	29	31
Negro Qro.	95	168	0.80	45	52	16	18
Amarillo 169	163	148	1.22	47	39	25	27
Bayo Bco. S.	112	155	0.88	53	53	29	33
Puebla 152	122	173	1.07	52	58	26	23
Garb. Serdan	137	167	1.15	40	42	24	26
Garb. Supremo	178	185	1.66	55	53	18	17
Manzano	213	208	2.25	59	60	29	29
Bayo 400	191	180	1.73	58	42	30	34
Carioca	122	187	1.31	49	54	18	17
Hidalgo 67	98	107	0.53	57	45	39	41
Tlaxcala 475	127	183	1.18	48	51	30	32
Amar. de Calpan	37	46	0.08	7	8	30	35
C. Small White	101	107	0.54	42	33	13	13
Promedio	130	152	1.12	49	46	24	25
DMS 0.05	34.7	51.2	—	8.4	12.5	4.1	3.9

^{1/} MST= Materia seca total de la parte aérea en la etapa R6.^{2/} Ver texto.

resistencia a enfermedades fue el material andino G19428.

En conclusión, los resultados anteriores señalan la existencia de variación genética importante entre los materiales de frijol estudiados para el rendimiento de grano y materia seca a niveles moderados de fósforo en el suelo. La identificación de genotipos de diferentes orígenes y acervos genéticos, podría permitir la acumulación de diferentes genes de adaptación a las deficiencias nutrimentales y resistencia a enfermedades.

LITERATURA CITADA

- BEEBE, S.; YAN, X.L.; OCHOA, I.; LYNCH, J. 1994. *Phaseolus vulgaris* germplasm resources to phosphorus deficiency. pp. 358-361 *In*: W. Roca, J.E. Mayer, M.A. Pastor-Corrales and J. Tohme, Proceedings of the Second International Scientific Meeting "Phaseolus" Bean Advanced Biotechnology Research Network, CIAT, Cali, Colombia.
- CIAT. 1987. Programa de frijol. Informe anual 1987. Cali, Colombia.
- CLARK, R.B.; DUNCAN, R.R. 1991. Improvement of plant mineral nutrition through breeding. *Field Crops Res.* 27:219-240.
- FAWOLE, I.; GABELMAN, W.H.; GERLOFF, G.C. 1982a. Genetic control of root development in beans (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under phosphorus stress. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 107: 98-100.
- GERLOFF, G.C.; GABELMAN, W.H. 1983. The search for and interpretation of genetic controls that enhance plant growth under deficiency levels of a macronutrient. *Plant and Soil* 72:335-350.
- GRAHAM, R.D. 1984. Breeding for nutritional characteristics in cereals. *Advances in Plant Nutrition* 1:57-102.
- SCHOONHOVEN A. VAN; PASTOR CORRALES, M. 1987. Sistema estándar para la evaluación de germoplasma de frijol. CIAT, Cali, Colombia, p.56
- SINGH, S.P.; TAKEGAMI, J.C.; MUÑOZ, C.G. 1995. Screening common bean for sources of tolerance of low soil fertility. *Ann. Rep. Bean Improv. Coop.* 38:54-55.
- WORTMANN, C.S. 1994. The Africa network for screening beans for tolerance to edaphic stresses - an overview. *In*: C.S. Wortmann (ed.). *Bean Improvement for Low Fertility Soils in Africa: Proceedings of a Working Group Meeting, Kampala, Uganda, 23-26 May, 1994.* Network on Bean Research in Africa.

TOLERANCIA DEL FRIJOL COMUN A BAJA DISPONIBILIDAD DE FOSFORO EN SUELOS DE VERACRUZ, MEXICO ¹

Ernesto López ², Javier Cumpian ², Arturo Durán ², Jorge A. Acosta-Gallegos ³

RESUMEN

Tolerancia del frijol común a baja disponibilidad de fósforo en suelos de Veracruz, México. Durante dos años se evaluaron genotipos de frijol de diversos orígenes con el objetivo de identificar germoplasma adaptado a suelos ácidos, para el trópico de México. El estudio se realizó en Isla, Veracruz durante los ciclos agrícolas 1993-94 y 1994-95 en condiciones de humedad residual. El primer año se evaluaron 234 materiales y 134 el segundo. Se utilizaron diseños experimentales de látice simples duplicados, dos repeticiones con la adición de cal (1,25 t/ha) y dos sin cal. Para la evaluación de genotipos se utilizaron dos índices: Rendimiento relativo (%) = $(R_i \text{ sin cal} / R_i \text{ con cal})100$ y $li = (R_i \text{ sin cal/prom.sin}) / (R_i \text{ con cal/prom.con})$. Se identificaron genotipos con altos rendimientos en ambos tratamientos (con y sin cal) como: G-3645, BAT 1467 y Chis. 3-A-1, así como genotipos con respuesta a la adición de cal como: DOR-390 y Phavu-1125 y materiales con buena respuesta al tratamiento sin cal como: Chis-3-A-4, Chis-117-A e Hgo-67. Este último proveniente del altiplano mexicano, lo que abre las posibilidades de ampliar la base del germoplasma utilizado en el trópico.

ABSTRACT

Bean tolerance to low P in soils of Veracruz, México. Different bean genotypes were evaluated in order to identify material adapted to poor agricultural soils, mainly with low phosphorus content for the tropical areas of Mexico. The experiments were conducted in Isla, Veracruz, Mexico during 1993-94 and 1994-95; 234 and 134 bean materials were evaluated respectively. Simple lattice and duplicated experimental designs were employed in combination with lime (1.25 t/ha) and without it. The variable used for assessing the response of the genotypes were: Relative grain yield (%) = $R_i \text{ without} / R_i \text{ with}(100)$, $li = (R_i \text{ without lime/average without}) / (R_i \text{ with/average with})$. Results showed that promising genotypes in both treatments were: G-3645, BAT 1467 and Chis 3-A-1, and the ones with good response to the application of lime were: DOR 390 and Phavu-1125 and the material with good response without lime were: Chis 3-A-4, Chis 117-A and Hgo-67. This last genotype is from the Mexican Highlands and gives the opportunity for broadening the germplasm base in the low land tropics.

¹ Parcialmente financiado por la COSUDE a través de PROFRIJOL Proyecto: Tolerancia del frijol a bajo fósforo, toxicidad de aluminio y manganeso en suelos tropicales de México y América Central.

² Investigadores del Programa de Leguminosas Comestibles del INIFAP. Apartado Postal 429. Veracruz, Ver. C. P. 91700 México.

³ Investigador Programa de Frijol del INIFAP. Apdo. Postal 10, Chapingo, Méx. CP. 56230 México.

INTRODUCCION

En México, el estado de Veracruz se ubica entre los tres estados con mayor superficie de suelos ácidos, junto con Chiapas y Michoacán. Este problema se presenta también en otros estados del sur del país como Tabasco, Guerrero y Oaxaca. El estado de Veracruz tiene una superficie cultivable de 330,000 ha que presentan problemas de acidez de suelo, el pH de la capa arable varía de 4,5 a 5,5 (SARH 1982). En estas áreas predominan los suelos de los tipos *arenosol cambico*, *acrisol ortico*, *luvisol ferralico*, *luvisol plántico* y *andosol húmico*, que son en donde se establecen las siembras de frijol y donde son más notorios los efectos que tiene la acidez sobre el rendimiento en este cultivo.

El Instituto Nacional de Investigación en Forestales y Agropecuarias (INIFAP) dentro del Campo Experimental de Isla, Ver., ha realizado trabajos de encalado de suelos en varios cultivos. Para el caso del frijol, se encontraron respuestas más favorables con la aplicación de cal dolomítica con 1,25 t/ha que con la adición de CaCO₃. Existe evidencia de variación genética del frijol en cuanto a su eficiencia en el uso del fósforo y tolerancia a la toxicidad de aluminio y manganeso. Thung *et al.* (1990) mencionaron que las variedades comerciales del Brasil, Carioca y Mulatinho 349, no solamente son eficientes en el uso del fósforo, sino también tolerantes a un nivel moderadamente alto de aluminio y manganeso. Salinas (1978) clasificó a los genotipos Carioca 1030, Rico Pardo 896, Costa Rica 1031 y Seleção Cuva 1002, como tolerantes al aluminio y señaló que estas mismas variedades fueron eficientes en el uso de bajo fósforo.

Ronzelli *et al.* (1985) encontraron que la adición de cal incrementó la germinación del frijol; genotipos como Carioca 80, BAT 67 e ICTA Tamazulapa fueron muy susceptibles a la toxicidad de Al. Los genotipos Carioca, Río

Iguacú y Roxa 1805, presentaron mínima respuesta a la cal. Genotipos intermedios fueron Río Tibagí, Río Negro, Rico 23 y Rico 1735. Fontes *et al.*, (1985) observaron mejor utilización del fertilizante fosfatado por la planta de frijol, cuando el campo fue encalado. La cal incrementó la producción de frijol en 41% en el primer año y 34% el segundo.

Con base a la problemática anterior, a partir de 1993 se inició la evaluación de materiales de frijol de diferentes orígenes, con el objetivo de identificar germoplasma adaptado a suelos ácidos, para el trópico de México. El presente trabajo se llevó a cabo en Isla, Veracruz durante el otoño-invierno de 1993-94 y 1994-95, evaluándose 234 genotipos el primer año y 134 el segundo.

MATERIALES Y METODOS

Durante el ciclo otoño-invierno 1993-94, se sembraron bajo condiciones de humedad residual, tres experimentos con diferentes genotipos de frijol en el C.E. Papaloapan (Isla, Ver.) el 29 de octubre de 1993. Grupo 1: 49 genotipos calificados como tolerantes a bajo fósforo (Comun. pers. S. Beebe, 1992, CIAT), Grupo 2: 64 genotipos criollos del estado de Chiapas provenientes del Banco de Germoplasma del INIFAP y Grupo 3: 121 colectas representativas del Banco de Germoplasma del INIFAP (Comun. pers. F. Cárdenas, 1989, INIFAP). El suelo del sitio experimental es un acrisol (Clasificación FAO-UNESCO) de pH 4.4 (Cuadro 1). El diseño experimental utilizado para cada grupo de genotipos fue de látice simple (7X7, 8X8 y 11X11) con dos repeticiones sin y dos con 1,25 t/ha de cal dolomítica (cantidad suficiente para elevar el pH a 5,5). La cal fue incorporada al suelo e incubada 30 días antes de la siembra. En el siguiente ciclo otoño-invierno 1994-95, se sembraron tres experimentos el día 5 de octubre de 1994, en la

Cuadro 1. Características del suelo del Campo Experimental Isla, Veracruz.

Localidad	Estado	pH	Saturación		%	ppm			
			Al+++	Bases	M.O.	P	K	Ca	Mg
Isla	Ver.	4.4	-	-	0.91	18*	21	122	4

* Carolina del Norte

misma localidad y suelo del sitio experimental. Dos experimentos se sembraron en un diseño latice simple duplicado, dos repeticiones con cal dolomítica (1,25 t/ha) y dos sin cal. La cal fue incorporada al suelo 30 días antes de la siembra. En el tercer experimento sólo se sembró una repetición con dosis de 80 Kg/ha P₂O₅, en un diseño de latice simple. Grupo 1: 49 genotipos calificados, como tolerantes a bajo fósforo; Grupo 2: 36 genotipos, principalmente criollos del estado de Chiapas y del Banco de Germoplasma (INIFAP), y Grupo 3: 49 genotipos criollos de estado de Chiapas y colectas del Banco de Germoplasma del INIFAP. Para la evaluación de las respuestas en rendimiento se utilizaron los índices siguientes (Graham, 1984): Rendimiento relativo(%)= $R_i \text{ sin } (100)/R_i \text{ con}$, donde $R_i \text{ sin}$ y $R_i \text{ con}$ es el rendimiento del genotipo i bajo los dos niveles de cal dolomítica. Los genotipos eficientes mostraron un R_i cercano o superior a 100%. Genotipos con bajo rendimiento en ambas condiciones pueden erróneamente dar un alto R_i y deben ser excluidos. La exclusión de estos puede lograrse con el uso de otro índice que selecciona genotipos con alto rendimiento en ambos tratamientos $li = (R_i \text{ sin}/\text{prom. sin}) / (R_i \text{ con}/\text{prom. con})$, donde: R_i rendimiento del genotipo i ; prom. sin y con es el promedio general en los tratamientos sin y con cal. Además de los experimentos con variedades, se estableció un experimento factorial 2X2X4, dos dosis de cal dolomítica (0 y 1,25 t/ha), dos dosis de P₂O₅ (10 y 80 kg/ha) y cuatro variedades (Negro Tacaná, Negro Veracruz, Negro Cotaxtla 91 y Negro INIFAP).

RESULTADOS Y DISCUSION

Durante el ciclo del cultivo O-I 1993-94 de octubre a enero la precipitación ocurrida fué baja (167 mm), por lo que los materiales evaluados estuvieron bajo un severo déficit de humedad durante la etapa reproductiva (36 mm de noviembre a enero). En el Grupo de genotipos 1, el promedio de rendimiento en el tratamiento sin cal resultó de 35% en comparación con el obtenido con cal, mientras que los Grupos de genotipos 2 y 3 el rendimiento sin cal fue de 59 y 53%, respectivamente.

En el primer grupo los genotipos que resultaron sobresalientes por rendimiento en ambos tratamientos (valores altos en el índice li) fueron G-3645 (Jamapa), BAT-1467, G-6113 y G-1323, mientras que en los grupos 2 y 3 fueron: Chis. 104, Chi.s 3-A-1 y Chis. 256, así como Dgo. 21, Qro. 34 y Coah. 305.

En el grupo 1 también se identificaron variedades que sólo respondieron bien en los tratamientos con cal como: Negro Tacaná (DOR-390) y G-11586. En el grupo 2 se identificaron algunos genotipos que resultaron sobresalientes sólo en el tratamiento sin cal ($R_i > 100\%$) como Chis 3-A-4 y Chis 177-A e Hgo-67 del grupo 3 (Cuadro 2). Lo anterior confirma lo indicado por Bebee (comun. pers., 1991) al identificar germoplasma con tolerancia a aluminio y bajo fósforo en Popayán, Colombia sobre todo del estado de Chiapas en México.

Cuadro 2. Rendimiento de variedades de frijol tolerantes a bajo fósforo sembradas con y sin Cal en un suelo ácido (pH 4.4)* Isla, Ver. * Ciclo O-I. 1993-1994. INIFAP.

Genotipo	Días a floración	Cal g/m ²		Indices ^{1/}	
		Sin	Con *	Ri %	li,
G-3645	34	55,0	96,0	57	0,55
BAT-1467	42	67,0	67,0	100	9,01
G-6113	43	39,0	103,0	38	2,71
G-1323	41	38,0	58,0	65	1,49
DOR-390	37	20,0	95,0	21	1,05
G-11586	50	15,0	79,0	19	0,81
CHIS-104	41	77,5	131,0	59	2,13
CHIS-3-A-1	44	88,0	109,0	80	2,02
CHIS-256	46	72,0	132,0	54	1,99
CHIS-3-A-4	45	104,0	65,0	160	1,43
CHIS-177-A	46	78,0	48,0	162	0,79
DGO-21	33	100,5	123,0	82	3,77
QRO-34	39	85,5	109,0	78	2,84
COAH-305	44	65,0	141,0	46	2,79
HGO-67	34	112,0	57,0	195	1,96

^{1/} Ver texto

* 1,25 t/ha, cantidad necesaria para elevar el pH de la capa arable del suelo a 5,5.

Cuadro 3. Rendimiento de variedades de frijol tolerantes a bajo fósforo sembrados con y sin cal en un suelo ácido (pH 4,4)*. Isla, Ver. Ciclo O-I 1994-95, INIFAP.

Genotipos	Días a madurez	Cal (g/m ²)		Indices ^{1/}	
		Sin	Con *	Ri (%)	li
G-3645	92	112	96	117	4.8
NAG-161	90	70	222	31	7.4
RIO NEGRO	91	71	133	60	4.5
BAT-1467	89	69	183	38	4.5
DOR-390	92	34	222	16	3.4
G-1323	94	115	123	93	5.0
G-6113	92	92	138	67	4.5
PHAVU-1140	91	76	85	89	2.9
PHAVU-670	93	55	125	44	3.2
PHAVU-681	94	60	113	53	3.0
CHIS-3-A-1	90	38	99	38	1.6
PHAVU-1125	93	34	109	31	1.6
VERACRUZANO	91	75	109	69	3.7
PHAVU-115	69	94	108	87	3.6
C. ARBOLITO	94	77	164	47	4.5
DOR-448	89	100	186	54	8.9
II-307-CB-5E-0E-M	90	87	140	62	5.8

^{1/} Ver texto

* 1,25 t/ha, cantidad necesaria para elevar el pH de la capa arable del suelo a 5,5

Durante el ciclo del cultivo (octubre a enero) 1994-95 la precipitación fué de sólo 220 mm, por lo que los materiales evaluados estuvieron bajo sequía durante la época reproductiva, sequía que se incrementó en severidad conforme avanzó el ciclo (120 mm de noviembre a enero).

En el grupo de 36 genotipos el promedio de rendimiento en el tratamiento sin cal resultó de 57% en comparación con lo obtenido con cal, lo que confirma lo señalado por Fontes *et al.* (1965) sobre el incremento de producción de frijol en suelos encalados. Los genotipos Jamapa, BAT 1467, G-1323 y G-6113 resultaron sobresalientes en ambos tratamientos, así como la variedad Negro Tacaná (DOR-390), que nuevamente respondió bien en el tratamiento con cal tal como lo señalaron Ronzelli *et al.* (1985), quienes encontraron diferentes respuestas varietales al encalamiento (Cuadro 2). También resultaron sobresalientes ambos tratamientos los genotipos siguientes: NAG-161, DOR-448, Criollo Arbolito, II-307-CB-5E-OE, Phavu-1140, Phavu-670 y Chis-3-A-1. Aunque el proyecto es incipiente, se puede constatar que la variación genética presente en los grupos estudiados es muy amplia. Además, en este proyecto el objetivo de las evaluaciones es de doble propósito, identificar materiales prometedores para su posible utilización por los agricultores y la identificación de progenitores con altos niveles de tolerancia para su uso en los Programas de Mejoramiento genético.

Experimento Factorial

La respuesta de las cuatro variedades a la aplicación de P_2O_5 y cal dolomítica, indicaron que la población de plantas por hectárea se vió disminuida al fertilizar con solo 10 kg/ha de P_2O_5 ; la disminución fue de 18% a los 29 días después de la emergencia de las plantas y en 20,7% en la cosecha confirmando lo indicado por Ronzelli *et al.* (1985). Sin la

aplicación de cal dolomítica la población disminuyó de 2 a 10,7% en ambos años. El rendimiento no mostró diferencia estadística entre dosis de cal; sólo se detectó diferencia significativa ($P < 0,05$) para el factor dosis de P_2O_5 . En la Figura 1 se ilustra la respuesta de las variedades a este nutriente (80 kg/ha). La variedad Negro INIFAP superó a las demás variedades (Figura 2) con incrementos de 250 kg/ha, lo que representa el 55,1% de aumento respecto al tratamiento con 10 kg/ha de P_2O_5 , le siguió Negro Veracruz con 40,6% de incremento. La aplicación de cal dolomítica mostró un incremento con las mismas variedades, de 33,3 y 20,4%, respectivamente. La aplicación de P y cal manifestó su máximo incremento con la variedad Negro Cotaxtla-91 con 38,1% de aumento *versus* su control, seguida de Negro INIFAP y Negro Veracruz con 27,5 y 26,8% respectivamente.

Los resultados señalaron la importancia del fósforo como nutriente esencial para la producción del frijol. La adición de cal domi-

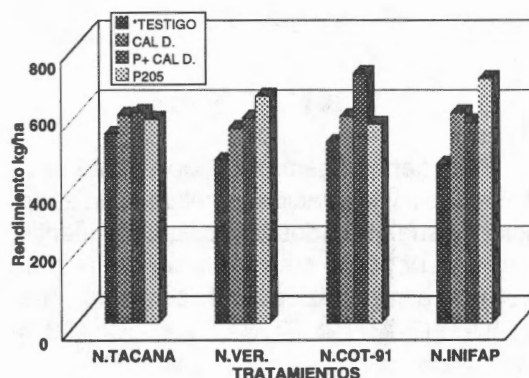


Fig. 1. Respuesta en rendimiento de cuatro variedades de frijol a la aplicación de dos niveles de P_2O_5 y Cal Dolomítica en suelo ácido de Isla, Ver. 0-I. 1994-95. PROFRIJOL.

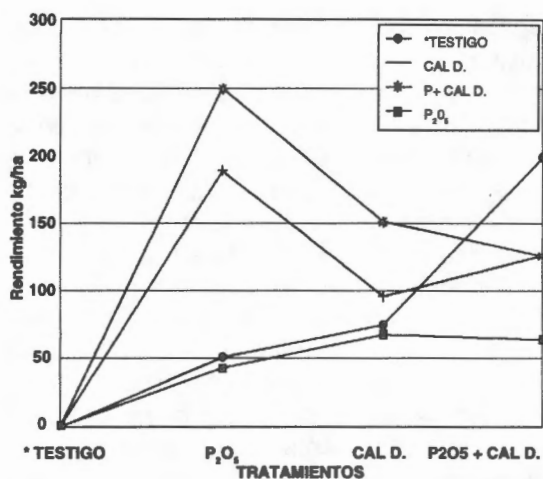


Fig.2. Respuesta en incremento de rendimiento respecto al testigo (10 kg/ha de P₂O₅) de cuatro variedades de frijol a la aplicación de P₂O₅ y Cal en suelo ácido de Isla, Ver. 0-I. 1994-95. PROFRIJOL.

lítica sólo mostró una leve respuesta positiva en el rendimiento tal vez influenciada por la baja disponibilidad de humedad durante el ciclo del cultivo.

CONCLUSIONES

En el germoplasma incluido en este estudio se observó variación genética en la adaptación a suelos ácidos tropicales. Se identificaron genotipos sobresalientes por su tolerancia a la acidez del suelo como Chis. 3-a-4, Chis. 117-A, Hgo. 67, BAT 1467, Chis. 3-A-1 y G 3645.

La adición de fertilizante fosfatado y cal dolomítica individuales o combinados

favorecieron el rendimiento del frijol en forma diferencial en las variedades de frijol estudiadas. En el suelo ácido de Isla, Ver., el efecto de la cal sólo fue más favorable, para el establecimiento y desarrollo del cultivo, que la adición de fósforo sólo.

LITERATURA CITADA

- DIRECCIÓN GENERAL DE CONSERVACIÓN DE SUELO Y AGUA, SARH. 1982. Inventario de áreas erosionadas, rangos de pendiente y unidades de suelo del estado de Veracruz. Universidad Autónoma de Chapingo. México.
- FONTES, L. A. N.; GOMES, R. F.; VIEIRA, C. 1965. Respuesta do feijoeiro a aplicação de N,P,K e calcário na zona da Matas, Minas Gerais. Rev. Ceres 12 (71): 265-285.
- GRAHAM, R. D. 1984. Breeding for nutritional characteristics in cereals. Advances in plant nutrition 1: 57-102.
- RONZELLI, P.; JUNIOR, P.; VIEIRA, C.; BRAGA, J. M.; SEDIYAMA, C. S. 1985. Resposta de cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) a calagem e adubação fosfatada. Rev. Ceres 32 (184): 500-524.
- 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. dissertation. North Carolina State University, Raleigh. N.C. U.S.A. 326 p.
- THUNG, M.; ORTEGA, J.; ERAZO, O. 1990. Metodología de selección por eficiencia en el uso del fósforo y por tolerancia a la toxicidad del aluminio y del manganeso en el frijol (*Phaseolus vulgaris* L.). En: Sorgo para suelos ácidos. Salinas, J.G. y Taurley, L.M. (Eds.). INTSORMIL. ICRISAT. CIAT. p.210.

ESTUDIO DE HERENCIA Y MECANISMOS DE TOLERANCIA EN LINEAS DE FRIJOL (*Phaseolus vulgaris* L.) ANDINAS Y MESOAMERICANAS A BAJO FOSFORO EN EL SUELO

Huver Posada¹, Julia Kornegay², Douglas Beck²

RESUMEN

Estudio de herencia y mecanismos de tolerancia en líneas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) andinas y mesoamericanas a bajo fósforo en el suelo. El bajo fósforo (P) aprovechable en el suelo es el factor abiótico más significativo que limita producción de frijol, porque presenta una amplia distribución a nivel mundial y tiene un impacto fuerte en los rendimientos actuales (Lynch, 1991). El aumento de la producción de frijol en suelos bajos en fósforo puede lograrse a través de estrategias como el uso de prácticas agronómicas (fertilización) y el mejoramiento genético (variedades tolerantes). La presente investigación muestra una estrategia de mejoramiento, con el objetivo de definir el tipo de herencia involucrado en la expresión del carácter adaptación a bajos niveles de P y a establecer los mecanismos fisiológicos que regulan la adaptación del frijol común a bajo P en suelo. Doce parentales de frijol tipo andino (6) y mesoamericano y 27 poblaciones F2, fueron evaluados por su respuesta a extracción de P y producción de biomasa (parte aérea y raíz) bajo condiciones de alto y bajo P. Las diferencias en padres y progenies en los mecanismos asociados a la tolerancia a bajo P, alta extracción del suelo y alta eficiencia del uso interno, fueron significantes y indican que estas buenas características pueden ser utilizadas para mejoramiento del frijol común a las condiciones de bajo P en el suelo.

ABSTRACT

Heritability and mechanisms of tolerance to low soil P in Mesoamerican and Andean cultivars of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Low soil phosphorus (P) is a severe limitation for common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) production in the tropics due to its prevalence in bean growing regions worldwide and considerable effect in reduction of grain yields (Lynch, 1991). Two potential strategies for improving bean yields in low P soils are improved agronomical practices (eg. fertilization) and plant breeding for tolerance. The present work describes a strategy of plant breeding in which the physiological mechanisms of tolerance and their heritability are investigated. Twelve parents, 6 each of Andean and Mesoamerican types, and 27 of their F2 populations were evaluated throughout growth for P uptake and biomass production (shoots and roots) under conditions of low and high soil P. Significant differences in traits associated with low P tolerance, including high P uptake and efficient internal use through efficient partitioning, were observed in both parents and progeny indicating that these characteristics could be used in a breeding program to improve low P tolerance of agronomically desirable bean cultivars.

¹ GENICAFE, A. A. 2427 Manizales.

² CIAT, A. A. 6713 Cali, Colombia.

INTRODUCCION

El frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) es la leguminosa comestible más importante en el mundo, es cultivada en muchos países, especialmente en América Latina y África, y es una fuente importante de proteína (FAO, 1991). El área sembrada con frijol se ha ido incrementando en los últimos años, pero la producción sin embargo, no es suficiente ante el crecimiento de la población (CIAT, 1992). De acuerdo con los niveles actuales, la producción de frijol en América Latina y África debe incrementarse en 42% y 72% respectivamente para satisfacer la demanda del año 2000 (Janssen, 1989). Aumentos en la producción mundial de frijol requieren incrementos en las áreas de siembra o en rendimiento por unidad de área, lo cual parece más viable considerando que en muchas regiones del mundo, las tierras nuevas que pueden ser sembradas con frijol son limitadas. También se debe considerar que actualmente los rendimientos promedios de frijol son bajos, y no sobrepasan en muchos casos el 20% del máximo rendimiento potencial (CIAT, 1991-1992).

Muchos factores bióticos y abióticos limitan el crecimiento del frijol. Entre estos, el bajo fósforo aprovechable en el suelo es el más significativo, porque presenta una amplia distribución a nivel mundial y tiene un impacto fuerte en los rendimientos actuales de frijol. Cerca del 50% del frijol en América Latina crece en suelos bajos en P, con rendimientos severamente limitados (CIAT, 1987). Las áreas con deficiencia de P en las zonas frijolerías del resto del mundo no se han cuantificado, pero probablemente son comparable a la situación de América Latina (Lynch *et al.*, 1991).

El aumento de la producción de frijol en suelos bajos en fósforo puede lograrse a través de estrategias como el uso de prácticas agronómicas adecuadas (fertilización) y el

mejoramiento genético (variedades tolerantes). El uso de fertilizantes químicos en el trópico es frecuentemente escaso. Además el frijol crece en tierras donde la fijación de P es intensa e irreversible, especialmente en los suelos tropicales (oxisoles, ultisoles, andepts y vertisoles); las prácticas de aplicación de fertilizantes en estos suelos no han sido ni efectivas ni económicas. Aquí el mejoramiento genético puede representar un beneficio para el cultivo.

Los objetivos de la investigación fueron:

- Estudiar el tipo de herencia involucrado en la expresión del carácter adaptación a bajos niveles de fósforo.
- Establecer los mecanismos fisiológicos que regulan la adaptación del frijol común a bajos niveles de fósforo en el suelo.

REVISION DE LITERATURA

Actualmente se reconoce la existencia de diferencias entre especies y variedades para tolerar factores adversos del suelo. El hecho de que algunos genes específicos hayan sido identificados como reguladores de estos factores sugiere que la tolerancia varietal a condiciones adversas de suelo puede ser incorporada como objetivo específico en el mejoramiento de plantas (Salinas, 1979). El fósforo es uno de los elementos más limitantes en la mayoría de los suelos tropicales altamente meteorizados, tales como los oxisoles y vertisoles, así como también en suelos derivados de cenizas volcánicas (andepts) (Salinas, 1979).

Una de las alternativas para solucionar este problema es la selección y uso de especies y variedades tolerantes y eficientes a baja disponibilidad de fósforo en el suelo. Diferencias entre especies y variedades en

cuanto a la utilización eficiente del fósforo han sido reconocidas por más de 40 años (Thomas, 1930; Lyness, 1936).

La única forma de absorción de fósforo de la solución del suelo por las plantas es el ión fosfato y se ha demostrado la existencia de una concentración óptima de fósforo en la solución del suelo que correlaciona significativamente con una producción adecuada; esta correlación varía entre especies (Fox *et al.*, 1974).

El fósforo es retenido por varios compuestos por medio de precipitación química y adsorción física en un fenómeno llamado fijación o retención de fósforo (Sample *et al.*, 1980). El proceso consiste en la transformación de fosfatos monocalcicos solubles (superfosfatos) en fosfatos menos solubles de calcio, aluminio o hierro, por lo tanto baja la asimilación por las plantas.

La fertilización con fósforo en muchos casos no soluciona la deficiencia porque el fósforo aplicado puede inmediatamente ser fijado por el suelo, especialmente en suelos tropicales con alta capacidad de fijación. Se ha estimado que en general únicamente del 20 al 25% del fósforo aplicado es utilizado por la planta y el resto es fijado por el suelo (Thung, 1991).

Los intentos por mejorar la tolerancia de las plantas a bajos niveles de fósforo en el suelo han sido pocos y no muy exitosos. Una de las razones de mayor importancia ha sido la de carecer de indicadores que estén estrechamente asociadas o sean responsables directos de la tolerancia a bajo fósforo. A falta de tales indicadores específicos, se ha utilizado como criterio general la capacidad de rendimiento bajo condiciones de estrés como criterio de selección.

El grado al cual las plantas toleran la baja asimilación de fósforo es usualmente llamado "Eficiencia a P" y está definido como la habili-

dad de las plantas para producir bajo condiciones de fósforo deficiente; genotipos eficientes pueden producir razonablemente altos rendimientos en suelos con baja disponibilidad de fósforo aprovechable (Clark, 1982; Graham, 1984). Esto es deseable si genotipos eficientes a bajo P en el suelo pueden también mostrar buen potencial de rendimiento en condiciones de P suficiente. En términos fisiológicos la eficiencia puede entenderse como la efectividad de algunos procesos fisiológicos específicos, que conllevan a una buena capacidad de las plantas para producir buenos rendimientos (Gabelman and Gerloff, 1983). La definición fisiológica de eficiencia del uso de fósforo puede dividirse en: eficiencia de asimilación y eficiencia de utilización.

La eficiencia de asimilación es atribuible a adaptaciones morfológicas y fisiológicas de las raíces (Gabelman and Gerloff, 1983; Graham, 1984). Ciertas características de la morfología de raíces pueden ser responsables de la eficiencia en la asimilación del fósforo. Por ejemplo se observaron incrementos en la relación raíz/tallo, en la longitud y en la formación de raíces jóvenes en plantas sometidas a estrés de P. Algunos de estos cambios pueden estar relacionados con la eficiencia del P (Anghinoni and Barber, 1980; Fohse and Jung K, 1983; Fohse *et al.*, 1991, Schenk and Barber, 1979). Estos cambios aumentan el área o superficie de las raíces aumentando la intercepción de P, el cual es muy inmóvil en el suelo (Barber, 1984).

La eficiencia en la utilización de un determinado elemento por la planta se puede expresar en términos de relación de eficiencia, por ejemplo cantidad de biomasa producida a cantidad de elementos absorbidos por la planta (Gabelman and Gerloff, 1983). Una mayor eficiencia en la utilización del P puede estar relacionada con:

1. Mejor translocación o redistribución de los elementos a los sitios fisiológicamente activos.

2. Superior actividad enzimática en relación con los procesos metabólicos.

El control genético de la eficiencia en el uso del fósforo para la mayoría de especies vegetales es difícil identificar el proceso primario que determina la eficiencia de P debido a que este elemento participa en casi todos los procesos de crecimiento y desarrollo de la planta, por esto, la eficiencia en el uso del P es un rasgo complejo con control genético difícil de descifrar (Marschner, 1986). Algunos estudios de herencia indican que la eficiencia en el uso del P por las plantas es un carácter cuantitativo (Gabelman and Gerloff, 1983; Graham, 1984; Schettini *et al.*, 1987), lo cual es explicable porque:

1. La eficiencia de la planta para utilizar el P esta usualmente definida en términos del rendimiento (biomasa o grano), que son caracteres de tipo cuantitativo.
2. Algunos atributos morfológicos o fisiológicos indicadores de la eficiencia a en el uso del P, como longitud de raíces, área de superficie de la raíz y tasa de absorción de P, son también cuantitativos.

Estudios de herencia indican que la eficiencia en el uso de P está controlada poligénicamente probablemente por muchos genes de menor efecto (Blum, 1988). El modo de acción de los genes que controlan la eficiencia en el uso de P varia con la especie vegetal. Generalmente es controlada por efecto de genes aditivos, aunque la dominancia es también importante (Fawole *et al.*, 1982; Gabelman and Gerloff, 1983). La interacción de genes no alélicos (efectos epistáticos) también puede jugar un papel importante (Rakha *et al.*, 1992; Whiteaker *et al.*, 1976). La eficiencia en el uso del P ha sido reportada como carácter de alta heredabilidad, cuando se usa el peso seco de plantas como índice de tolerancia. Algunos autores estiman que la

eficiencia a P en muchas familias de frijol tiene heredabilidad en sentido amplio del 70% o más, y heredabilidad en sentido estrecho en rangos desde el 45% a 76% (Fawole *et al.*, 1982).

MATERIALES Y METODOS

Estudio de Herencia

Doce parentales de frijol, 6 andinos (AND 995, AND 984, AFR 564, CAL 149, SUG 109 y AND 1010) y 6 mesoamericanos (CARIOCA, MCR 1010, REN 32, ASC 59, BRB 68, y BRB 50), se utilizaron para llevar a cabo el estudio de herencia de la respuesta del frijol a bajo contenido de fósforo en el suelo. El diseño de cruzamiento empleado fue el de Carolina del Norte II modelo de efectos fijos, propuesto por Comstock y Robinson (1948).

Los parentales conformaron tres grupos de cruzamientos: andino x andino, andino x mesoamericano y mesoamericano x mesoamericano; cada grupo constituido por seis parentales, tres de los cuales fueron usados al azar como machos y los otros tres como hembras para obtener 9 poblaciones híbridas F1 por grupo, para un total de 27 poblaciones.

En Marzo de 1994 las 27 poblaciones F2 fueron sembradas en el municipio de Darien, en dos condiciones de fertilidad respecto a fósforo: suelo con bajo fósforo (BP) y suelo con alto fósforo (AP). La condición de AP correspondió a un suelo donde las unidades experimentales fueron fertilizadas con 300 kg/ha de SPT (128 kg/ha de P₂O₅) al suelo. En la condición de BP el contenido de fósforo en el suelo, medido por el método de Bray II, estuvo por debajo de 2 ppm (Figura 1) y no fue fertilizado. En septiembre de 1994 a partir de la cosecha masal de la generación F2, prove-

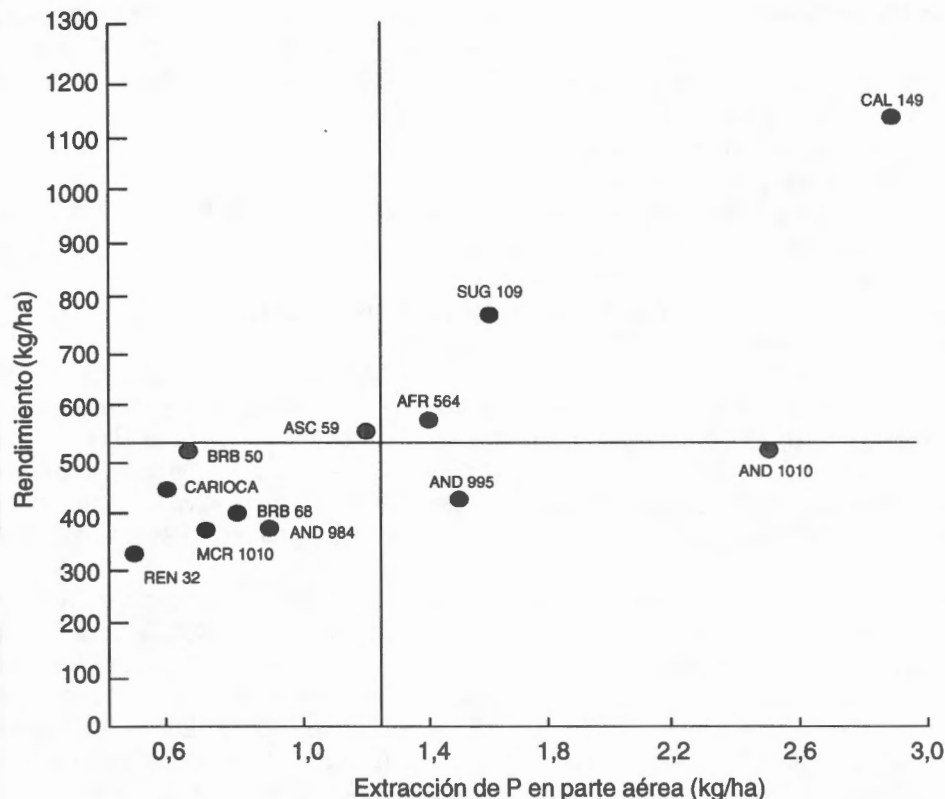


Fig. 1. Eficiencia en uso de P en progenitores de frijol de origen andino y mesoamericano, en condición de bajo P en el suelo, Darien 1994.

niente de la condición de AP, se realizó la siembra de las poblaciones F3 en las mismas condiciones de la generación F2. Las poblaciones F2 y F3 se distribuyeron en campo en un diseño de Bloques Completos al Azar (BCA) con tres repeticiones para cada condición de fósforo. Se utilizó una densidad de 20 pl/m². La cosecha se realizó sobre los cuatro surcos centrales de la parcela desechando 1.5 m de borde de cabecera, para un área útil de 9.6 m². Se evaluó días a floración, días a madurez fisiológica y rendimiento el cual se expresó en kg/ha al 14% de humedad.

Se realizó análisis de varianza de acuerdo con el diseño de Carolina del Norte II, modelo

fijo, para cada generación y cada condición de fósforo. La estimación de componentes de varianza se hizo a partir de los cuadrados medios de las fuentes de variación "Entre machos", "Entre hembras" y la interacción de "Machos x Hembras" (Hallauery Miranda, 1988). Los estimativos de la varianza genética aditiva (V2A) se obtuvieron a partir de la suma de cuadrados asociados con machos y hembras y la varianza genética de dominancia con la suma de cuadrados de la interacción.

La heredabilidad en sentido estrecho (h^2_e) se estimó a partir de la relación $h^2(e) = V2A/V2P$. Donde V2P representa la varianza fenotípica.

Mecanismos de tolerancia

Los parentales y las 27 poblaciones F2 fueron evaluados por su respuesta a extracción de fósforo y producción de materia seca en biomasa (parte aérea y raíz) en las dos condiciones de fósforo en el suelo: BP y AP. Se definieron tres épocas de muestreo: floración (35 días), formación de vainas (50 días) y madurez fisiológica (80 días). Las evaluaciones se hicieron en un metro lineal de surco. Se determinaron los pesos secos de biomasa y raíz y los valores de extracción de fósforo asociados a cada componente (metodología Bray II).

Se realizaron análisis de varianza individual (por época y condición de fósforo y combinado para el carácter extracción). Se realizaron análisis de correlaciones entre rendimiento y extracción en cada época de muestreo considerando padres y progenies agrupadas según su origen.

Los análisis de correlación mostraron una marcada asociación entre las diferentes variables de respuesta haciendo difícil la discriminación de los individuos con mejor respuesta a los tratamientos. Para reducir la dimensionalidad de la matriz de datos se hizo un análisis de componentes principales

(metodología factor análisis) y un análisis de clasificación con el fin de agrupar individuos por similitud o afinidad genética.

RESULTADOS Y DISCUSION

Estudio de Herencia

Los cuadrados medios (CM) del ANDEVA para las generaciones F2 y F3 en cada condición de fósforo mostraron que para el carácter rendimiento la interacción machos x hembras/grupo no resultó significativo (Cuadro 1). Hembras/grupo fue significativa solamente en AP.

Los estimativos de varianza para machos (V2m), para hembras (V2h) y su interacción (V2mxh), y los valores estimados de la varianza genética aditiva y no aditiva mostraron que en AP los estimativos V2m y V2h son relativamente similares (Cuadro 2). Por lo tanto los valores de heredabilidad estimados a partir de cada componente son también relativamente similares. En la condición de BP el componente mas importante fue V2m que explica el componente aditivo. Los componentes V2m y V2h asociados con la varianza genética aditiva

Cuadro 1. Cuadros medios del andeva para rendimiento en frijol (kg/ha), a partir del diseño de Carolina del Norte II. Darien 1994.

Fuente de variación	GL	F2		F3	
		Alto fósforo	Bajo fósforo	Alto fósforo	Bajo fósforo
Grupo	2	639362.36	80766.24	2600302.65 **	50499.64
Repetición / (G)	6	184308.18	227685.99	71742.27	31079.70
Hembra / (G)	6	69508.01 **	34748.84	121547.99 **	12282.38
Macho / (G)	6	75866.80 **	88509.48 **	103094.40 **	53372.93 *
H X M / (G)	12	24706.17	21426.25	16141.35	17466.47
Error	48	20188.3	21294.55	13240.46	18504.37

*, ** Significativos al 0.05 y 0.01 respectivamente

(V2a) resultaron ser más importantes que el componente no aditivo dado por la interacción de V2mxh tanto en la generación F2 como F3 para las dos condiciones de fósforo en el suelo. En BP, la V2mxh fue negativa, lo mismo la V2Ah.

En el tratamiento AP los estimativos de heredabilidad fueron similares estimados por V2Am, V2Ah y $(V2m + V2h)/2$. Como la varianza de V2h no fue significativa para BP fue posible estimar heredabilidad V2Ah con la interacción.

La heredabilidad en sentido estrecho fue más alta para la condición de BP que para la condición de AP estimado por V2Am (Cuadro 2).

De acuerdo al modelo del diseño II, es posible estimar 1/4 de varianza aditiva del CM asociado a hembras (h) y machos (m) y 1/4 de varianza de dominancia del cuadrado medio de la interacción. En las generaciones F2 y F3 y bajo las dos condiciones de P, la varianza aditiva cumple un papel muy importante en el

componente genético para la característica de rendimiento. En los cuadrados medios de mxh del cual se deriva la varianza de dominancia, se encontraron valores no significativos sugiriendo poca o ninguna importancia de la dominancia dentro de la acción génica de las poblaciones en estudio.

Los estimativos de heredabilidad fueron altos, lo cual supone fácil la tarea de pasar genes aditivos de una generación a otra cuando se emplean niveles de bajo y alto P. Además, se puede inferir que este es un carácter fácil de mejorar, altamente heredable que puede producir grandes progresos en selección. Lo anterior es cierto cuando se consideran los ambientes por separado, pero sería más factible obtener parámetros genéticos combinados a partir de diferentes ambientes, encontrándose un comportamiento diferente y más ajustado a la realidad. En los análisis individuales por grupo de cruza en condición de AP la variación encontrada es debida al grupo de progenitores Andinos.

Cuadro 2. Estimativos de los componentes de la varianza genética para poblaciones de frijol en dos condiciones de fósforo, Darien 1994.

Estimativos	Bajo fósforo		Alto fósforo	
	F2	F3	F2	F3
G2m	7453.7	3989.6	5684.51	9661.4
G2h	NS	NS	4977.98	11711.84
G2mh	-	-	1505.96	966.96
G2Am	29814.6	15958.4	22738.0	38645.6
G2Ah	-	-	19111.92	46847.3
G2D	-	-	6023.84	3867.8
h2 (1)	0.93 ± 0.26	0.89 ± 0.22	0.89 ± 0.62	0.93 ± 0.66
h2 (2)	-	-	0.82 ± 0.71	0.94 ± 0.46
h2 (3)	-	-	0.83 ± 0.50	0.80 ± 0.55

1 heredabilidad estimada a partir de la V2Am

2 heredabilidad estimada a partir de la V2Ah

3 heredabilidad estimada a partir de $(V2m + V2h)/2$

Mecanismos de tolerancia en el suelo genético en el campo

En condiciones de AP no se detectaron diferencias entre los parentales y las progenies evaluadas para las variables de extracción de P en biomasa, raíz y extracción total tanto en la época de floración como en la de formación de vainas (Cuadros 3 y 4). A madurez fisiológica, la extracción de fósforo en raíz en las progenies F2 del grupo mesoamericano x mesoamericano son significativamente mas alta en relación con los grupos andino x andino y andino x mesoamericano (Cuadro 4). Un comportamiento similar se observó en los parentales (Cuadro 3).

En condición de BP se presentaron diferencias en comportamiento de los grupos para

las diferentes épocas y variables de extracción evaluada, excepto en floración donde la extracción de fósforo por raíz no mostró diferencias entre grupos de cruza (Cuadro 5). En contraste en el estado de formación de vainas, solamente extracción de P en raíces fue sig-nificativa. En floración y formación de vainas las progenies de las cruza andino x andino tuvieron mas alto nivel de P en biomasa que las cruza mesoamericano x mesoamericano.

La mayor diferencia entre cruces fue observado en madurez fisiológica donde las cruza mesoamericano x mesoamericano tienen valores mas altos de extracción de P, que fueron diferentes de andino x mesoamericano y andino x andino, que tuvieron comportamientos similares.

Cuadro 3. Extracción de fósforo (kg/ha) en parentales en tres épocas de crecimiento y en condición de Alto y Bajo fósforo. Darien 1994A.

Identificación	Biomasa	Raíces	Total
Alto fósforo¹			
Floración			
Andinos	3,059	0,144	3,203
Mesoamericanos	2,979	0,136	3,115
Formación Vainas			
Andinos	5,583	0,215	5,798
Mesoamericanos	5,356	0,239	5,595
Madurez Fisiológica			
Andinos	7,430	0,119	7,550
Mesoamericanos	8,891	0,199	9,089
Bajo fósforo²			
Floración			
Andinos	1,543 a	0,075 a	1,618 a
Mesoamericanos	0,456 a	0,037 b	0,492 a
Formación Vainas			
Andinos	2,208 a	0,064 a	2,273 a
Mesoamericanos	0,898 b	0,043 a	0,940 b
Madurez Fisiológica			
Andinos	2,964 a	0,045 b	3,009 a
Mesoamericanos	2,257 a	0,057 b	2,314 a

1 = No presentaron diferencias significativas

2 = Valores con la misma letra en el mismo tratamiento y época no difieren estadísticamente (P= 0,05)

Cuadro 4. Extracción de fósforo (kg/ha) en progenies F2 en tres épocas de crecimiento y en condición de Alto fósforo. Darien 1994A.

Epoca	Biomasa	Raíz	Total
Floración ¹			
Andino x Mesoamericano	4,036	0,157	4,193
Andino x Andino	3,529	0,160	3,689
Mesoamericano x Mesoamericano	3,431	0,151	3,582
Formación Vainas ¹			
Andino x Mesoamericano	6,840	0,194	7,034
Andino x Andino	6,282	0,194	6,477
Mesoamericano x Mesoamericano	7,317	0,267	7,585
Madurez Fisiológica ²			
Andino x Mesoamericano	9,362 a	0,158 b	9,520 a
Andino x Andino	7,871 a	0,146 b	8,016 a
Mesoamericano x Mesoamericano	10,624 a	0,199 a	10,823 a

1 = No se presentan diferencias significativas.

2 = Valores con la misma letra en el mismo tratamiento y época no difieren significativamente (P= 0,05)

Cuadro 5. Extracción de fósforo (kg/ha) en progenies F2 en tres épocas de crecimiento y en condiciones de Bajo fósforo. Darien 1994 A.

Epoca	Biomasa	Raíces	Total
Floración			
Andino x Mesoamericano	1,047 b	0,061 a	1,107 b
Andino x Andino	1,276 a	0,072 a	1,349 a
Mesoamericano x Mesoamericano	0,807 c	0,055 a	0,862 c
Formación Vainas			
Andino x Mesoamericano	1,784 a	0,055 b	1,839 a
Andino x Andino	1,827 a	0,061 b	1,889 a
Mesoamericano x Mesoamericano	1,304 a	0,063 a	1,368 a
Madurez Fisiológica			
Andino x Mesoamericano	2,461 b	0,050 b	2,510 b
Andino x Andino	2,564 b	0,051 b	2,614 b
Mesoamericano x Mesoamericano	2,860 a	0,065 a	2,925 a

Valores con la misma letra dentro del mismo tratamiento y época no difieren estadísticamente (P= 0,05)

Los análisis individuales y combinados para la extracción de fósforo en biomasa, raíz y extracción total en parentales y progenies F2, bajo las dos condiciones de fósforo mostraron diferencias altamente significativas para la condición de fertilidad a fósforo y para las épocas tanto en bajo como en alto fósforo.

La correlación entre rendimiento y extracción de fósforo en biomasa en condiciones de AP para parentales y progenies es directa en Madurez Fisiológica, mientras que el rendimiento y extracción de raíz están inversamente correlacionados aunque no significativa (Cuadro 6). Las correlaciones en BP son altamente significativas en cada una

Cuadro 6. Correlaciones entre rendimiento y la extracción de fósforo en padres andinos y mesoamericanos y progenies F2 de frijol en condición de Alto y Bajo fósforo para diferente época de crecimiento.

Epocas	Alto fósforo		Bajo fósforo	
	Rto vs EXB	Rto vs EXR	Rto vs EXB	Rto vs EXR
Floración				
Andino	0,17	0,46	0,80 **	0,28
Mesoamericano	0,29	0,19	0,53 *	0,36
Andino x Mesoamericano	0,69 **	-0,04	0,67 **	0,59 **
Andino x Andino	0,21	-0,18	0,43 *	0,42 *
Mesoamericano x Mesoamericano	0,52 **	0,34	0,70 **	0,74 **
Formación Vainas				
Andino	0,42 **	-0,007	0,80 **	0,51 *
Mesoamericano	0,67 **	-0,27	0,52 *	0,49 *
Andino x Mesoamericano	0,59 **	-0,42 *	0,79 **	0,62 **
Andino x Andino	0,25	0,01	0,59 **	0,33
Mesoamericano x Mesoamericano	0,72 **	-0,01	0,69 **	0,67 **
Madurez Fisiológica				
Andino	0,68 **	0,27	0,85 **	0,71 **
Mesoamericano	0,76 **	-0,11	0,72 **	0,78 **
Andino x Mesoamericano	0,47 *	-0,21	0,60 **	0,54 **
Andino x Andino	0,45 *	-0,16	0,58 **	0,68 **
Mesoamericano x Mesoamericano	0,81 **	-0,01	0,83 **	0,82 **

EXB Extracción de P en biomasa; EXR= extracción de P en raíces

*, ** Correlaciones significantes al nivel P=0,05 y P=0,01, respectivamente

de las épocas de muestreo tanto para extracción de fósforo por biomasa como por raíz, estos valores son mayores en formación de vainas y en madurez fisiológica (Cuadro 6).

Estos resultados mostraron que en condición de AP, los padres del grupo mesoamericano y los cruces originados dentro de este grupo, presentan una mejor correlación entre rendimiento y extracción de P por biomasa, cuando son comparado con el grupo de parentales andinos (Cuadro 6). De igual manera los diferentes cruzamientos originados dentro y entre grupos mejoraron su capacidad de extracción tanto en biomasa como raíz durante las tres épocas de desarrollo del cultivo, cuando son comparados con los valores de extracción de los parentales (Cuadros 3 y 4).

En BP la extracción de los padres andinos, y los cruces originados dentro de este grupo, mejoraron su correlación para las diferentes épocas (Cuadro 6). El grupo de padres mesoamericanos, y cruces dentro de este grupo presentaron un comportamiento similar a la condición de AP (Cuadro 6). Cuando se comparan las extracciones de los padres andinos y mesoamericanos y los cruces originados dentro de cada grupo, la relación de extracción de P en biomasa, mejora únicamente en los cruces dentro del grupo mesoamericano (Cuadros 4 y 5). Las altas correlaciones en rendimiento vs raíz son importantes en la medida en que puedan ser asociadas a una mayor extracción de P que necesariamente debería reflejarse en altos valores de extracción de P en biomasa en la

época posterior. Los resultados mostraron una mejor traslocación de P de la raíz a la parte aérea en los parentales andinos y los cruces originados dentro de este grupo, situación diferente se presentó en los parentales mesoamericanos que acumularon más P en la raíz durante las tres épocas de evaluación (Cuadro 5), a causa de una ineficiencia en los procesos de traslocación, característica que mejora con la adición de P. Los resultados anteriores corroboran lo encontrado en la casa de malla.

El análisis de componentes principales y el análisis de clasificación permitieron generar 4 grupos tanto en condición de AP como de BP, originados a partir de los valores de peso seco de biomasa, raíz, extracción de P en biomasa, extracción de P en raíz y rendimiento. Los padres y poblaciones F2 pertenecientes a un grupo fueron similares dentro de ellos y cada grupo fue diferente de los otros (Cuadros 7 y 8). La agrupación de individuos dentro de cada grupo, tanto en AP como BP fue consistente en los diferentes estados de la planta donde se realizaron las evaluaciones (Cuadros 9 y 10).

Esto muestra que en condición de AP y BP es posible clasificar los diferentes cruces y padres por su eficiencia en la utilización de P, a partir de los valores de extracción y rendimiento. En AP los valores altos de extracción se asociaron a valores altos en producción de materia seca y estos a altos rendimientos.

En BP siguiendo el criterio de clasificación, se encontró un grupo formado por un solo individuo, que correspondió al padre andino CAL 149, que tuvo el más alto rendimiento en 1994B y el valor de extracción de P en biomasa más alto, pero de menor eficiencia en uso de P, cuando es comparado con los individuos del grupo dos (Cluster 2), que presentó un rendimiento promedio de 808 kg/ha con solo 1,41 kg de P.

Cuando se compararon individuos en AP y BP dentro de los grupos de rendimiento más alto, se destacaron los cruces AND995 x BRB68, CARIOCA x ASC59 y CARIOCA x BRB50 por su respuesta consistente en las dos condiciones de P.

Cuadro 7. Datos promedios de genotipos agrupados en condición de Alto fósforo, en tres épocas de muestreo. Darien 1994.

Epoca	Cluster	Rto	PSR	PBT	EXB	EXR
Floración	1	1876	8,33	76,54	2,79	0,11
	2	2178	9,38	85,47	3,06	0,13
	3	1552	9,00	81,65	2,89	0,13
	4	1070	8,01	74,16	2,61	0,12
Formación Vainas	1	1876	11,39	112,0	5,30	0,19
	2	2178	12,70	127,20	5,97	0,21
	3	1552	10,97	121,18	5,17	0,16
	4	1070	9,86	107,98	4,47	0,15
Madurez Fisiológica	1	1876	10,47	249,32	8,03	0,15
	2	2178	11,66	289,33	8,70	0,16
	3	1552	9,18	235,51	7,10	0,13
	4	1070	7,58	161,76	5,15	0,10

Rto Rendimiento (kg/ha). PSR, PBT, EXB, EXR, peso seco raíz, peso seco biomasa total, extracción fósforo biomasa y extracción fósforo raíz, respectivamente.

Cuadro 8. Datos promedios de genotipo agrupados en condición de Bajo fósforo, en tres épocas de muestreo. Darien 1994.

Epoca	Cluster	Rto	PSR	PBT	EXB	EXR
Floración	1	608	4,37	29,90	0,90	0,05
	2	381	3,70	19,11	0,27	0,04
	3	808	4,15	29,00	0,90	0,05
	4	1156	6,13	58,80	1,85	0,08
Formación Vainas	1	608	4,77	41,05	1,37	0,05
	2	381	4,17	27,84	0,94	0,04
	3	808	5,10	41,11	1,44	0,05
	4	1156	8,03	90,27	2,94	0,07
Madurez Fisiológica	1	608	4,85	89,44	2,37	0,05
	2	381	3,94	82,92	2,16	0,04
	3	808	3,64	52,94	1,41	0,04
	4	1156	6,48	165,3	4,22	0,06

Rto Rendimiento (kg/ha).

PSR, PBT, EXB, EXR, peso seco raíz, peso seco biomasa total, extracción fósforo biomasa y extracción fósforo raíz, respectivamente.

Cuadro 9. Identificación de cada uno de los cluster en condición de Alto fósforo. Darien 1994.

Cluster 1	Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
AND 995 x ASC 59	AND 995 x BRB 68	AFR 564 x AND 1010	AND 984 x AND 1010
AND 995 x CAL 149	AND 995 x CARIOCA	AFR 564 x CAL 149	AND 984 x SUG 109
CAL 149 x ASC 59	CARIOCA x ASC 59	AFR 564 x SUG 109	AND 995 x SUG 109
CAL 149 x CARIOCA	CARIOCA x BRB 50	AND 984 x CAL 149	AND 1010
SUG 109 x ASC 59	CARIOCA x BRB 68	AND 995 x AND 1010	AND 984
MCR 1010 x ASC 59	REN 32 x ASC 59	CAL 149 x BRB 68	AND 995
MCR 1010 x BRB 50	REN 32 x BRB 50	SUG 109 x BRB 68	MCR 1010
ASC 59	REN 32 x BRB 68	SUG 109 x CARIOCA	SUG 109
BRB 68	CARIOCA	AFR 564	
REN 32		BRB 50	
		CAL 149	
1876 *	2178 *	1552 *	1070 *

* Promedio de rendimiento para cada cluster.

A causa de la alta variabilidad del lote, el análisis de varianza únicamente detectó diferencia en los grupos de padres andinos y mesoamericanos en las épocas de floración en extracción de P por raíz y en formación de vainas para extracción de P por biomasa (parte aérea);

cuando fueron analizados los grupos de cruzamientos, las diferencias fueron significativas en las diferentes épocas de muestreo (Cuadro 5); pero es evidente la existencia de diferencias en padres y progenies en mecanismos asociados a la tolerancia bajo P en el suelo.

Cuadro 10. Identificación de cada uno de los cluster en condición de Bajo fósforo. Darien 1994.

Cluster 1		Cluster 2	Cluster 3	Cluster 4
AFR 564 x AND 1010	SUG 109 x CARIOCA	AFR 564 x CAL 149	AND 984 x SUG 109	CAL 149
AFR 564 x SUG 109	CARIOCA x BRB 689	AND 995 x BRB 68	AND 995 x AND 1010	
AND 984 x AND 1010	MCR 1010 x ASC 59	CAL 149 x ASC 59	REN 32 x ASC 59	
AND 984 x CAL 149	MCR 1010 x BRB 50	SUG 109 x BRB 68	AND 984	
AND 995 x CAL 149	MCR 1010 x BRB 68	CARIOCA x ASC 59	AND 995	
AND 995 x SUG 109	REN 32 x BRB 50	CARIOCA x BRB 50	BRB 68	
AND 995 x ASC 59	AFR 564	REN 32 x BRB 68	CARIOCA	
AND 995 x CARIOCA	ASC 59	SUG 109	MCR 1010	
CAL 149 x BRB 68	BRB 50		REN 32	
CAL 149 x CARIOCA	AND 1010			
SUG 109 x ASC 59				
607 *	808 *	381 *	1155 *	

* Promedio de rendimiento para cada cluster.

Para el estudio de mecanismos asociados a bajo P en el suelo, se clasificaron los padres en función a su rendimiento y extracción de P en biomasa (Figura 1), los genotipos andinos tuvieron una mejor respuesta a rendimiento en condición de BP que los genotipos de origen mesoamericano. Los altos rendimientos correlacionaron con las altas extracciones de P en raíz y biomasa (parte aérea). En los genotipos andinos la línea CAL 149, SUG 109 y AFR 564 fueron las de mejor respuesta a rendimiento, en el grupo mesoamericano es importante resaltar el pobre comportamiento de la línea CARIOCA, la cual ha sido utilizado como testigo universal de buen comportamiento en condiciones de bajo P en suelos ácidos de Brasil.

En las progenies F2 se notó un mejoramiento en la eficiencia de utilización de fósforo, a partir de la relación entre producción y extracción de fósforo total, cuando utilizando como referencia el comportamiento de los padres (Figura 2).

Para entender los mecanismos responsables a la tolerancia a bajo P en el suelo, en

los genotipos andinos y mesoamericanos, se realizaron comparaciones en las variables de respuesta asociadas a la raíz (peso seco, extracción y concentración) y en extracción total de P tanto en AP y BP.

Cuando comparamos el peso seco de la raíz de las líneas andinas CAL 149, SUG 109 y las mesoamericanas CARIOCA y ASC 59 (Figura 3), en condición de BP, los valores mas altos correspondieron a las líneas andinas y en especial a CAL 149. Tanto el tamaño como el tipo de raíces juegan un papel importante en la determinación de la concentración mínima de P a la cual genotipos andinos y mesoamericanos crecen satisfactoriamente.

En extracción de P por la raíz existe relación directa con el peso seco de raíz, los valores mas altos correspondieron a las líneas andinas CAL 149 y SUG 109 durante las tres épocas de muestreo (Figura 4), en términos de eficiencia en uso, la variación observada en la utilización de P, fueron debidas probablemente a diferencias en los procesos de absorción.

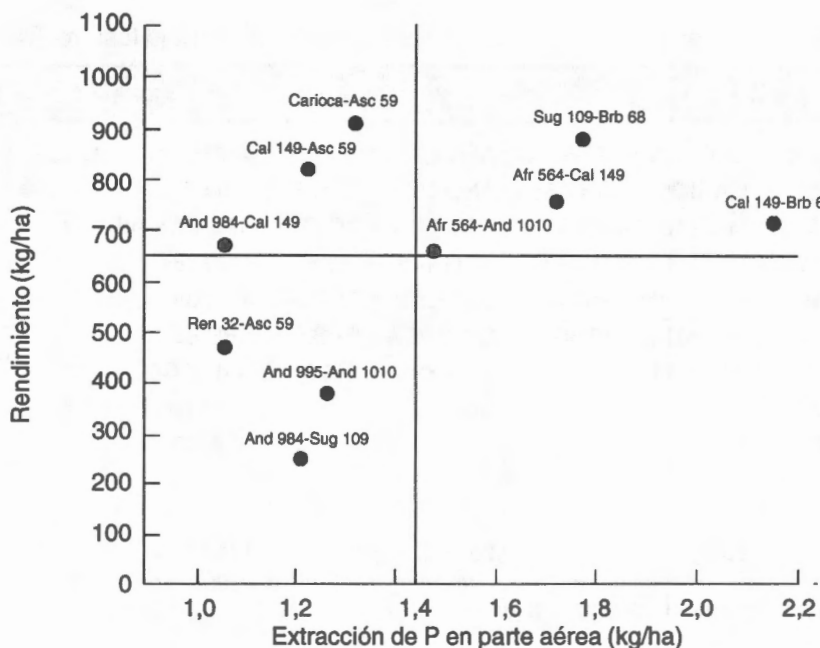


Fig. 2. Eficiencia en uso de P en poblaciones de frijol F2 en condición de bajo fósforo en el suelo, Darien 1994.

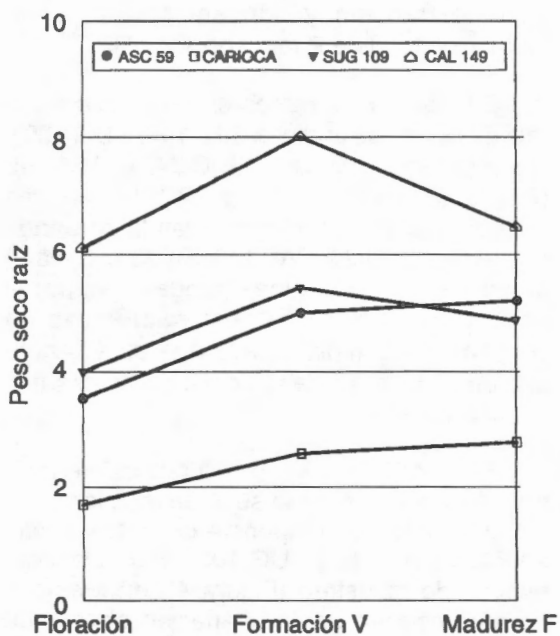


Fig. 3. Peso seco de raíz (g/m) en cuatro genotipos de frijol.

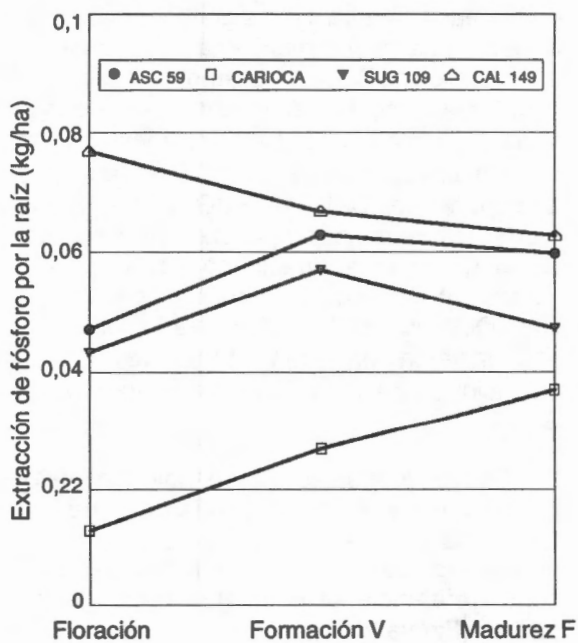


Fig. 4. Extracción de fósforo en la raíz en cuatro genotipos de frijol.

En condiciones de BP se presenta diferencias en el comportamiento de los padres, en los valores de concentración de P en el tejido de raíz, los bajos valores de concentración de P en madurez fisiológica estuvieron asociados a una mejor utilización de P en términos de eficiencia en traslocación hacia la parte aérea; los bajos valores de concentración en los genotipos andinos mostraron una mayor eficiencia en los procesos de traslocación y una acumulación de P a nivel de raíz en los genotipos mesoamericanos (Figura 5).

En la evaluación de eficiencia a partir de la relación entre rendimiento y extracción total de P, existe una respuesta directa en condición de BP, los mas altos valores de extracción de P correspondieron a los materiales andinos que tuvieron los mas altos rendimientos. Los valores de extracción total de P en condición de

AP en los genotipos mesoamericanos, evidenciaron una mayor eficiencia a el uso de P que las líneas CAL 149 y SUG 109 de origen andino (Figura 6).

Los resultados anteriores son importantes, en la medida en que buenas características, de eficiencia en asimilación y traslocación, unidas a una alta eficiencia en el uso del total, puedan ser utilizadas para el mejoramiento del frijol común a las condiciones de bajo P en el suelo.

CONCLUSIONES

Estudio de Herencia

- Genotipos pertenecientes al grupo Andino ofrecen mas posibilidad en el

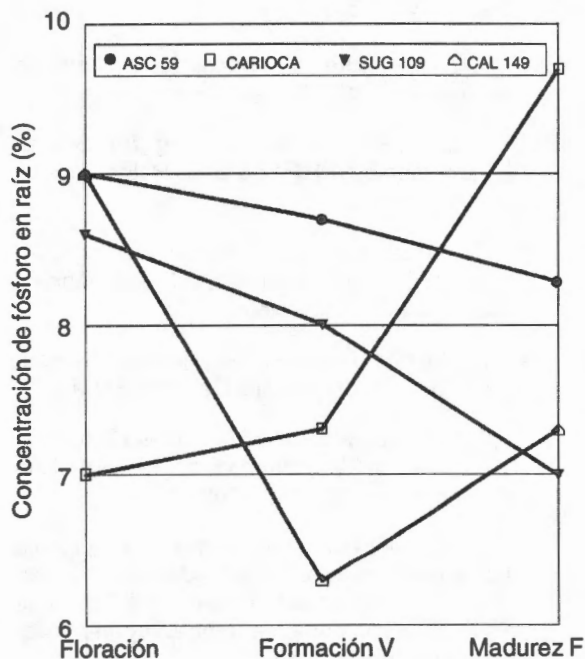


Fig. 5. Concentración de fósforo en la raíz en cuatro genotipos de frijol.

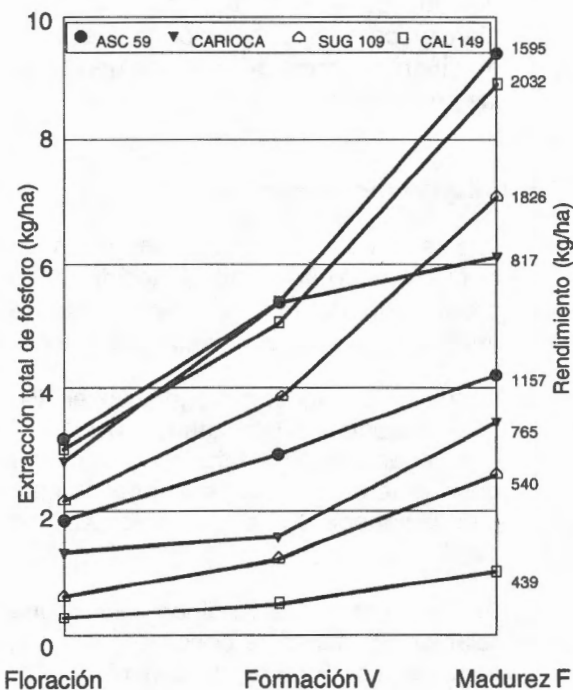


Fig. 6. Extracción de fósforo total en cuatro genotipos de frijol en dos niveles de fósforo.

mejoramiento del frijol a su respuesta a baja disponibilidad de fósforo en el suelo, en suelos derivados de cenizas volcánicas.

- En condiciones de bajo fósforo el componente de la varianza genética mas importante fue la V2m que explica el componente aditivo
- En condición de Alto fósforo los componentes de V2m y V2h son significativos y similares, originados a partir de la variación en la respuesta a rendimiento dentro del grupo de padres andino y mesoamericano.
- El componente varianza de machos (V2m) y de hembras (V2h), asociados con la varianza aditiva resultaron ser más importantes que el componente no aditivo, dado por la interacción V2mxh, tanto en la generación F2 y F3 para las dos condiciones de fósforo en el suelo, lo anterior sugiere poca o ninguna importancia de la dominancia dentro de la acción génica de las poblaciones.

Estudio de mecanismos

- Los resultados muestran diferencias en el crecimiento vegetativo, medido como producción de materia seca en parte aérea y raíz en condiciones de BP
- El mayor crecimiento vegetativo en BP estuvo asociado a los materiales Andinos, que tienen como característica un mayor peso de semilla, la cual en BP es altamente correlacionada con crecimiento (Xialong 1992).
- En los materiales Andinos existe una relación directa entre peso seco de raíz, extracción de P en raíz y rendimiento.
- A partir de los valores de concentración de P en raíz a madurez fisiológica es evidente que en los genotipos andinos los

valores mas bajos estén asociados a una mayor eficiencia en los procesos de traslocación de P a la parte aérea.

- En los genotipos mesoamericanos evaluados se encontró una mayor eficiencia en uso de P total en relación con rendimiento, cuando fueron evaluados en condición de AP.

LITERATURA CITADA

- ANGHINONI, I.; BARBER, S.A. 1980. Phosphorus influx and growth characteristics of corn roots as influence by phosphorus supply. *Agron. J.* 72:685-688.
- BARBER, S.A. 1980. Soil - Plant interactions in the phosphorus nutrition of plants. P. 591 -615. In F.E. Khasawneh. E.L. sample and E.J. Kamprath (ed.) *The role phosphorus in agriculture.* Am. Soc. Agron., Madison. Ws.
- BARBER, S.A. 1984. *Soil, Nutrient Bioavailability, A Mechanistic Approach.* John Wiley and Sons, New York, pp 201 - 228.
- BEEBE, S. 1991. *Breeding beans for unfavorable environments.* CIAT, Cali, Colombia.
- BLUM, A. 1988. *Plant Breeding for Stress Environments.* CPR Press. Boca Ratón, Florida. pp 133 - 162.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical). 1987. *IFCD/CIAT. Phosphate Project Annual Report, 1986,* Cali, Colombia.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical), 1991. *Bean Improvement,* Cali, Colombia.
- CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical), 1992. *Trend in CIAT commodities, 1992,* Working Document No. 111, Cali, Colombia.
- CLARK, R.B. 1982. *Plant response to mineral element toxicity and deficiency.* In: M.N. Christiansen and C.F. Lewis (eds.), *Breeding for Less Favorable Environments.* John Wiley and Sons, New York, pp 71 - 142.
- COMSTOCK, R.E.; ROBINSON, H.F. 1948. *The components of genetic variance in populations*

- of biparental progenies and their use in estimating the average degree or dominance. *Biometrics* 4:254-266.
- FAO (Food and Agriculture Organization). 1991. Production yearbook, 1990, Vol. 44 FAO, Rome Italy.
- FAWOLE, I.; GABELMAN, W.H.; GERLOFF, G.L. 1982. Genetics control of root development in beans (*Phaseolus vulgaris* L.) grown under phosphorus stress. *J. Am. Soc. Hortic. Science* 1970, 98-100.
- FOHSE, D.; JUNGK, A. 1983. Influence of phosphate and nitrate supply on root hairs formation of rape, spinach and tomato plants. *Plant and Soil* 74:359-368.
- FOHSE, D.; CLAASSEN, N.; JUNGK, A. 1991. Phosphorus efficiency of plants II. Significance of root radius, root hairs and cation - anion balance for phosphorus influx in seven plant species. *Plant and Soil* 132:261-272.
- FOX, R.L.; NI SHIMOTO, R.K.; THOMPSON, J.R.; DELA PEÑA, R.S. 1974. Comparative external phosphorus requirements of plants growing in tropical soils. *Hawaii Agr. Exp. Sta. Tech. Bull.* 1517. 5p.
- GABELMAN, W.H.; GERLOFF, G.C. 1983. The search for and interpretation of genetic controls that enhance plant growth under deficiency levels of a macronutrient. *Plant and Soil* 72:335-350.
- GRAHAM, R.D. 1984. Breeding for nutritional characteristics in cereals. *Adv. Plant Nutr.* 1:57-102.
- HALLAVER, A.R.; Miranda, J.B. 1988. Quantitative genetics in maize breeding. 2a. Ed. Iowa State University Press/Ames.
- JANSSEN, W. 1989. A socio-economic perspective on earliness beans. *In: S. Beebe, ed., Current topics in breeding of common bean. Working Document No. 47. Bean Program, CIAT, Cali, Colombia.* pp 135-155.
- LYNCH, J.; LAUCHLI, A.; EPSTEIN, E. 1991. Vegetative growth of the common bean in response to phosphorus nutrition. *Crop Sci.* 31:380-387.
- LYNESS, A.S. 1936. Varietal differences in the phosphorus capacity of plants. *Plant Physiol.* 11:665-688.
- MARSCHNER, H. 1986. Mineral nutrition of higher plants. Press, Harcourt Brace Jovanovich Publishers, pp 226-235.
- RAKHA, F.A.; ABOU - YOUSSEF, A.Y.; OMAR, A.A.; EL BENDARY, A.A.; EL -FOULY, M.M. 1992. Genetic nature of phosphorus accumulation in maize. *J. Plant Nutrition* 15:501-512.
- ROBINSON, H.F.; COMSTOCK, R.E.; HARVEY, P.H. 1949. Estimates of heredability and the degree of dominance in corn. *Agron. Jour.* 41:353-359.
- SALINAS, J.G.; SANCHEZ, P.A. 1976. Relaciones suelo-planta que afectan las diferencias entre especies y variedades para tolerar baja disponibilidad de fósforo en el suelo.
- SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J.; RACZ, G.J. 1980. Reactions of phosphate fertilizers in soils. *In: F.E. Khasawneh, E.C. Sample and E.J. Kamprath eds., The role of Phosphorus in Agriculture.* ASA, CSSA, SSSA, Madison, Wisconsin, pp 263-310.
- SCHENK, M.K.; BARBER, S.A. 1979. Root characteristics of corn genotypes as related to P uptake. *Agron. J.* 71:921-924.
- SCHETTINI, T.M.; GABELMAN, W.H.; GERLOFF, G.C. 1987. Incorporation of phosphorus efficiency from exotic germplasm into agriculturally adapted germplasm of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). *Plant and Soil* 99:175-184.
- THOMAS, W. 1930. The feeding power of plants. *Plant Physiology* 5:443-489.
- THUNG, M. 1991. Bean agronomy in monoculture. *In: A. Van Schoonhoven and O. Voysest eds., Common Beans: Research for crop improvement.* CAB International/CIAT, pp 737-834.
- WHITEAKER, G.; GERLOFF, G.C.; GABELMAN, W.H.; LINDGREN, D. 1976. Intraspecific differences in growth of bean at stress levels of phosphorus. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 101:472-475.

LA ADAPTACION FISIOLÓGICA DE FRIJOL COMUN (*Phaseolus vulgaris* L.) A BAJA DISPONIBILIDAD DE FOSFORO ¹

*Johathan Lynch*¹, *Kai Lonne Nielsen*¹, *Robert Ebel*¹, *Amy Bonser*¹, *Douglas Beck*²

RESUMEN

La adaptación fisiológica de frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) a baja disponibilidad de fósforo. La baja disponibilidad de P es una limitación primaria al crecimiento de la planta en la mayoría de los suelos nativos. Los genotipos del cultivo difieren sustancialmente en su capacidad para crecer en suelos de bajo P. El comprender la base fisiológica para tal variación podría ser útil al desarrollar genotipos con eficiencia de P superior, lo cual podría tener utilidad en los sistemas de baja entrada (input) y podría permitir un uso más eficiente de fertilizantes en los sistemas de alta entrada. En el frijol, el crecimiento bajo presión por poco P se ve reducido debido al aumento de costos C, para el sistema raíz. Los contrastes genéticos en eficiencia P no fueron asociados a los requerimientos de retoño reducidos, a las asociaciones micorrízales, a las interacciones químicas con conjuntos específicos de suelo P, o con el tamaño del sistema raíz, sino que fueron asociados con la arquitectura del sistema raíz. "SimRoot", un modelo geométrico explícito del crecimiento de la raíz del frijol, confirmó que las características arquitectónicas pueden influenciar la relación de los costos C de la raíz con la adquisición de P. El crecimiento de la raíz responde dinámicamente a la presión por falta de P, a través de cambios en la proliferación de las raíces laterales y la respuesta geotrópica a las raíces basales. Las diferencias en la arquitectura de la raíz, se notan por estas respuestas del crecimiento a la presión por falta de P, y pueden ser responsables por las diferencias genéticas en eficiencia de P.

ABSTRACT

Physiological adaptation of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to low phosphorus availability. Low P availability is a primary limitation to plant growth on most native soils. Crop genotypes differ substantially in their ability to grow in low P soils. Understanding the physiological basis for such variation would be useful in developing genotypes with superior P efficiency, which would have utility in low-input systems and might permit more efficient fertilizer use in high-input systems. In bean, growth under P stress is reduced because of increased C costs of the root system. Genetic contrasts in P efficiency were not associated with reduced shoot requirement, mycorrhizal associations, chemical interactions with specific soil P pools, or root system size, but were associated with root system architecture. SimRoot, an explicit geometric model of bean root growth, confirmed that architectural traits can influence the relationship of root C costs and P

¹ Departamento de Horticultura, Pennsylvania State University, University Park, 68002. USA.

² Programa del Frijol, Centro Internacional para la Agricultura Tropical (CIAT), A.A. 6713, Cali, Colombia.

acquisition. Root growth responds dynamically to P stress, through changes in the proliferation of lateral roots and the geotropic response of basal roots. Differences in root architecture arising from these growth responses to P stress may account for genetic differences in P efficiency.



INTRODUCCION

La disponibilidad del fósforo en los suelos nativos es rara vez la adecuada para el crecimiento óptimo de la planta. De los macronutrientes, K, Ca, Mg y S no son raros en la corteza terrestre ni en el agua dulce (Epstein, 1972); N es abundante en la atmósfera y está presente en la mayoría de las soluciones de suelos en concentraciones mM, mientras que P está presente en soluciones de suelo y agua dulce solamente en concentraciones μ M (Reading and Taylor, 1989). En gran parte esto se debe a que P se encuentra normalmente unido a muchos constituyentes del suelo que lo hacen poco disponible o solo de vez en cuando disponible para las plantas (Sample y otros, 1980). Un problema adicional es que el ciclo P en la mayoría de los ecosistemas terrestres es de final abierto y tiende hacia el desgaste, a diferencia del ciclo N en el cual los depósitos atmosféricos proveen alimentación continua a los depósitos del suelo (Stevenson, 1986). La disponibilidad del fósforo es generalmente baja en los suelos volcánicos (Andosuelos), con alto contenido de alofano, en los suelos minerales erosionados (Oxisuelos, Ultisuelos, algunos Alfisuelos), caracterizados por química de óxidos de Fe y Al, así como suelos de bosques de coníferas (Spodosuelos). En conjunto estos suelos sostienen la mayor parte de la vegetación de la tierra y a gran parte de su población humana. El comprender la naturaleza de la adaptación vegetal a la limitada disponibilidad del fósforo tiene relevancia para la agricultura de baja-entrada que todavía predomina en muchos lugares del mundo, y a los sistemas de

alta-entrada, en donde cultivos y sistemas de cultivos más eficientes en P requerirían menos fertilizante y causarían menos contaminación ambiental. El enfoque de este artículo se basa en los más recientes enfoques para poder comprender la adaptación del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.), a la baja disponibilidad del fósforo. Los posibles mecanismos fisiológicos de eficiencia de P y eficiencia de nutrientes, han sido definidos de muchas maneras y en diversos contextos (Clark, 1990). La mayoría de las definiciones comparten la concepción de que la eficiencia puede ser expresada como la capacidad de un sistema para convertir entradas (alimentación) en salidas (productos). En el caso de la eficiencia de P, expresamos este crecimiento y este rendimiento en la relación con el P disponible de los depósitos del suelo o las enmiendas del suelo, las cuales incorporan la habilidad para rendir con bajo P y con respuesta para con las entradas de fertilizantes.

DESARROLLO

Teóricamente, muchos rasgos fisiológicos distintos pueden contribuir a mejorar la eficiencia P, la cual podría eventualmente ser recombinada e incorporada a los genotipos eficientes P. Al considerar los posibles mecanismos de eficiencia P, podemos distinguir entre los rasgos que confieren eficiencia de adquisición de fósforo, o la habilidad superior para adquirir P del ambiente, y los de eficiencia en la utilización de fósforo, o la habilidad superior para convertir P en crecimiento y ren-

dimiento una vez que ha sido adquirido. Varios mecanismos posibles de la eficiencia en la utilización de P son los siguientes: Los requerimientos de P del tejido reducido podrían manifestarse como concentraciones bajas de P en el tejido. En experimentos extensivos realizados hasta la fecha, no hemos observado variación genética substancial para los requerimientos de P en el tejido bajo presión de P en estado continuo, que sea positivamente relacionado con la eficiencia de genotipo (Yan, 1995a,b; Lynch y Beebe, datos no publicados). La Fenología puede afectar la eficiencia de utilización de P al extender el tiempo disponible para su utilización fisiológica, tal como la fotosíntesis, en los recursos P de la planta. En estudios repetidos de frijoles para fenologías contrastantes (días de madurez) en ambientes tropicales en el campo, hemos observado que los genotipos de la estación más larga tienen cierta ventaja por sobre los genotipos de estación más corta, en ambientes de P bajo (datos no publicados). Este rasgo podría haber limitado la utilidad en sistemas de cultivo de frijol, sin embargo, dado que la estación de crecimiento del frijol está usualmente restringida por la distribución de la lluvia o por los requisitos de otros cultivos tales como el maíz en la rotación o en sistemas de intercultivos. También hemos observado variación importante en la eficiencia de P entre genotipos de duración similar (Yan, 1995, a,b), lo cual no podría explicarse en base a la fenología. Las reservas de P en las semillas pueden ser importantes al establecer los semilleros en suelo de bajo P. El depósito de P en las semillas puede variar por un factor de 4 entre los genotipos de semilla grande de la fuente o conjunto genético de los Andes, y los genotipos mesoamericanos de semilla pequeña (Sadeghian, 1991). Igual que con la fenología, las diferencias en eficiencia de P entre clases de semillas muy contrastantes, son de utilidad agronómica limitada, ya que las clases de semillas están asociadas a preferencias específicas de los consumidores que varían mucho entre naciones y culturas. En cualquier caso, nuestros estudios sobre el efecto de las

reservas de P en la semilla sobre los establecimientos de semilleros de genotipos de frijol en suelo de bajo P mostraron que los efectos estaban limitados a crecimiento temprano del semillero y no sería esto responsable por las diferencias genéticas en rendimiento bajo presión por falta de P (Sadeghina, 1991). También hemos observado importante variación genética en la eficiencia de P entre los genotipos del mismo tamaño de semilla, y aunque los materiales de semilla grande tendían a ser eficientes P, esto pudo deberse a las influencias asociadas del tamaño de célula en lugar de las reservas P por sí mismas (Yan, 1995 a, b). Por lo tanto podemos hacer la hipótesis de que la variación genética existente para la eficiencia P en el germen-plasma del frijol, especialmente que la variación agrónomicamente útil, es en gran parte debida a la variación en eficiencia de adquisición de P en lugar de la eficiencia en utilización de P. Esto parece razonable, ya uno podría esperar que los patrones de utilización de un recurso esencial aunque escaso, tal como P, podría ser determinado por el metabolismo y por la forma básica de vida de la planta, y podría por lo tanto ser relativamente uniforme, dentro de una especie cultivada. Por el contrario, la variación en la habilidad para adquirir P en primer lugar, puede ser más considerable debido a la adaptación ancestral para diversos regímenes edáficos, compuestos por una selección y cruce recientes bajo condiciones de alta fertilidad. Reportes de diferencias intra-específicas en eficiencia de adquisición de P, existen desde 1934 (Smith, 1934). Los posibles mecanismos de eficiencia de adquisición de P siguen.

Lo exudado por la raíz puede ser fosfatasa, ácidos orgánicos, y protones que pueden liberar P inorgánico de los depósitos P conectados (especialmente P orgánico, compuestos Fe-P, y compuestos Al-P), que predominan en la mayor parte de los suelos tropicales (Marschner, 1987; Uren y Reisenauer, 1988). Los frijoles también exudan fosfatasa en la rizosfera (Helal, 1990) y otras leguminosas

tales como el guisante de paloma liberan ácidos orgánicos en la rizosfera que liberan P por ligamentos complejos Fe (Ae y otros, 1990). Para determinar si la variación por exudados de la raíz, era responsable por las diferencias genéticas en eficiencia de P en el germen-plasma del frijol, hemos comparado el desempeño de un conjunto de genotipos contrastantes en suelos naturales y artificiales, en los cuales el P estaba disponible principalmente como complejos orgánicos e inorgánicos variados (Yan, 1995 a, b). Aunque algunos genotipos fueron capaces de extraer más P de los fosfatos de calcio en un medio artificial, en la mayoría de los suelos tropicales la fracción unida al calcio fue insignificante. No hubo evidencia de que alguno de los genotipos superiores fuera capaz de extraer P de depósitos no disponibles de P (fosfatos orgánicos, de hierro o de aluminio), normalmente encontrados en los suelos tropicales. Esto quedaba en contra del hecho de que los exudados fueran responsables por la variación genética existente de eficiencia de P. Hemos observado variación genética para la actividad de fosfatasa ácida en las hojas y en las raíces, pero tal variación parece estar más relacionada a la severidad de deficiencia P en los tejidos de un genotipo dado que con la adaptación superior de P (Yan, 1995, a,b; CIAT, 1986; McLachlan, 1980).

La simbiosis micorrizal entre ciertos hongos y las raíces de la mayoría de las plantas superiores es muy importante para la adquisición de P (Abbott y Robson, 1982; Bolan, 1991; Koide, 1991). Los frijoles son moderadamente micotróficos en que responden a las infecciones micorrizales pero son capaces de buen crecimiento sin el simbionte fungal (Lynch *et al.*, 1991). Nuestras observaciones de campo sobre la colonización micorrizal de las raíces del frijol mostraron que están altamente infectadas en forma uniforme, con cerca de 60 a 80% de la longitud de la raíz conteniendo simbiontes fungales, sin importar el tratamiento P ni el genotipo (Yan, 1995 a,b,). De hecho, en una prueba repetida diseñada específicamente

para buscar variación genética en la colonización micorrizal de las raíces del frijol (25 genotipos de frijol con tres especies fungales en un control esterilizado) no pudimos concluir en nada, ya que todos los tratamientos, incluyendo los tratamientos de control estéril, fueron altamente colonizados. Las calificaciones genéticas de eficiencia P en ambientes de campo y en substratos artificiales de ambiente invernadero son similares (Yan, 1995, a,b,), indicando esto que la presencia o ausencia del inóculo fungal no es responsable por la variación genética existente en eficiencia P.

La actividad y arquitectura de la raíz son especialmente importantes para la adquisición de P ya que la relativa inamovilidad de P en el suelo hace que la adquisición P por la planta sea muy dependiente de la exploración eficiente del suelo, en el tiempo y en el espacio (Barber, 1984). Hemos observado variación genética sustancial en el crecimiento y la arquitectura de los sistemas de raíces del frijol, con evidencia preliminar de que los genotipos eficientes P tienen un sistema muy ramificado y vigoroso de raíces con un gran número de puntos de crecimiento (Lynch y Van Beem, 1993). Además, varias líneas de evidencia teóricas y empíricas indican que la arquitectura de la raíz (La forma tridimensional del sistema de la raíz a través del tiempo) puede ser la base de las diferencias genéticas en eficiencia P en el frijol, como se discute a continuación.

La importancia del crecimiento y arquitectura de la raíz en eficiencia P

Una manera útil de considerar la eficiencia fisiológica de un proceso tal como la adquisición P es el emplear una analogía económica, en donde la adquisición P es el "beneficio" derivado de los "costos" de la planta, asociados con el constituyente primario de la materia seca de la planta y que está íntimamente unido al metabolismo de la planta (Reekie y Bazzaz, 1987). Aplicando este paradigma eco-

nómico de la función de la planta al problema de la eficiencia de adquisición de P, podemos analizar la eficiencia fisiológica de los sistemas de raíz, comparando los costos C de la construcción de la raíz, del mantenimiento y de las actividades con el beneficio del P adquirido por el sistema raíz procedente del ambiente. Operacionalmente, definimos la relación de adquisición de P y de los gastos de carbón bajo tierra (la cual será una relación dinámica en lugar de simple) como la Eficiencia en Adquisición de Fósforo, o E.A.F. La evidencia por el modelo, en conjunto con datos sobre análisis de crecimiento y estudios de partición, ha demostrado que los costos de carbono del sistema raíz pueden limitar el crecimiento de la planta bajo condiciones de baja fertilidad del suelo (Freden *et al.*, 1989; Lynch *et al.*, 1991). Por ejemplo, un modelo simple de simulación de economía del carbono usando datos de un estudio recientemente realizado sobre el

crecimiento del frijol, bajo condiciones P variables (Lynch *et al.*, 1991) indica que la ganancia de biomasa por área de unidad de hoja está debajo de la deficiencia P debido a que cada unidad de área de hoja tiene una carga mayor de tejido heterotrófico (primordialmente el sistema raíz) que sostener, y no debido a que la fotosíntesis fue afectada (Cuadro 1). De hecho, el modelo predice que las plantas con tensión por falta de P solamente retienen cerca del 25% de C adquirido a través de la fotosíntesis, en contraste con un 75% retenido por las plantas con P alto. Medidas experimentales de la distribución de C en frijol con tensión por falta de P, confirman estas predicciones del modelo (Figura 1). Ya que el crecimiento de la raíz es importante en la adquisición de P, aunque el consumo de C por las raíces sea una retención primordial del crecimiento de plantas con tensión por falta de P, sería razonable asumir que los genotipos con sistemas de raíces que usan

Cuadro 1. Modelo de simulación del balance de C en frijoles, basada en datos para la fotosíntesis de las hojas y locación de biomasa (Lynch, y otros, 1991), y valores publicados para la respiración de los tejidos. El modelo simulaba el crecimiento del frijol cv. EMP 84 a través de 34 días, y predecía el peso seco de la planta y el área de hojas en forma exacta. Estimaba la retención de C, calculada como el total de C retenido dividido por el total de C fijado, lo cual fue fuertemente reducido por la presión por falta de P. Los datos no publicados son de J. Lynch, A. Lauchli, y E. Epstein.

Variable	Datos	
	Observado	Modelo
P Bajo		
Peso seco (g)	1.1	1.1
Area de Hoja (cm ²)	83	83
Retención de C	—	0.26
P Medio		
Peso seco (g)	8.2	8.6
área de Hoja (cm ²)	950	875
Retención de C	—	0.55
P Alto		
Peso seco (g)	20.5	20.7
Area de Hoja (cm ²)	2889	2270
Retención de C	—	0.62

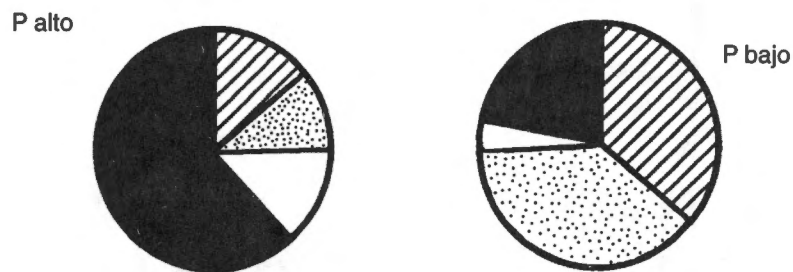


Fig. 1. Distribución diurna de C en el frijol durante antesis, como el porcentaje de tiempo diurno neto de fijación de C.

Rayado = respiración C raíz diurno.

Puntillado = respiración C raíz nocturno.

Blanco = respiración C retoño nocturno.

Negro = fijación C retoño diurno, fijación no perdida durante la respiración.

Los datos confirman las predicciones del modelo de que los costos C de la raíz son importantes para los frijoles en tensión por falta de P. Creemos que los costos C de la raíz en plantas en tensión por falta de P, son responsables por la baja retención de C. (Cuadro 1).

menos C en adquirir P o que adquieren más P por unidad C usada, tendrán un desempeño superior en suelos de bajo P. Aunque la arquitectura de la raíz (la configuración tridimensional de un sistema de raíz) determine la exploración del suelo en el tiempo y en el espacio, y debiera, por lo tanto, influenciar la EAF, esta relación ha sido poco estudiada y es poco comprendida, primordialmente por la dificultad de conceptualizar y de analizar la arquitectura de la raíz. Fitter y sus colegas (Fitter, 1991; Fitter *et al.*, 1991), sugieren sobre la base de modelos abstractos de topología bidimensional y tridimensional de la raíz, que la arquitectura de la raíz debería influenciar la EAF. Desarrollamos un modelo geométrico explícito del crecimiento de la raíz en tiempo y espacio (SimRoot), que incluye datos empíricos para la distribución espacial de C, respiración, exudación y deposición de biomasa a lo largo de los ejes de la raíz del frijol, para demostrar que las arquitecturas contrastantes de las raíces, pueden tener muy diferentes EAF (Figuras 2 y 3, Davis, 1993; Nielsen *et al.*, 1994). Los efectos arquitectónicos del EAF

fueron relacionados con las diferentes proporciones del crecimiento y maduración del tejido de la raíz, arquitecturas contrastantes, ya que los perfiles de uso de C fueron dinámicos a lo largo de los ejes de la raíz, y también variaron los grados de competición espacial entre las raíces adyacentes dentro de un sistema de raíz. Las características arquitectónicas específicas que pueden contribuir a la EAF de los sistemas de raíz del frijol están siendo investigados a través de modelos continuos acoplados a la medición de los presupuestos de C y P en genotipos contrastantes de frijol. Grandes diferencias en el desempeño entre los diferentes genotipos en respuesta a la disponibilidad de P, fueron observadas en experimentos de campo (Lynch y Beebe, 1995). Cuatro genotipos contrastantes, G19842 y G23275, que eran eficientes, y BAT881 y G5273, que eran ineficientes bajo condiciones de suelo de bajo P en el campo, fueron comparados en un experimento preliminar de invernadero. Las plantas fueron cultivadas bajo varios niveles de P para determinar algunos de las características arquitectónicas y

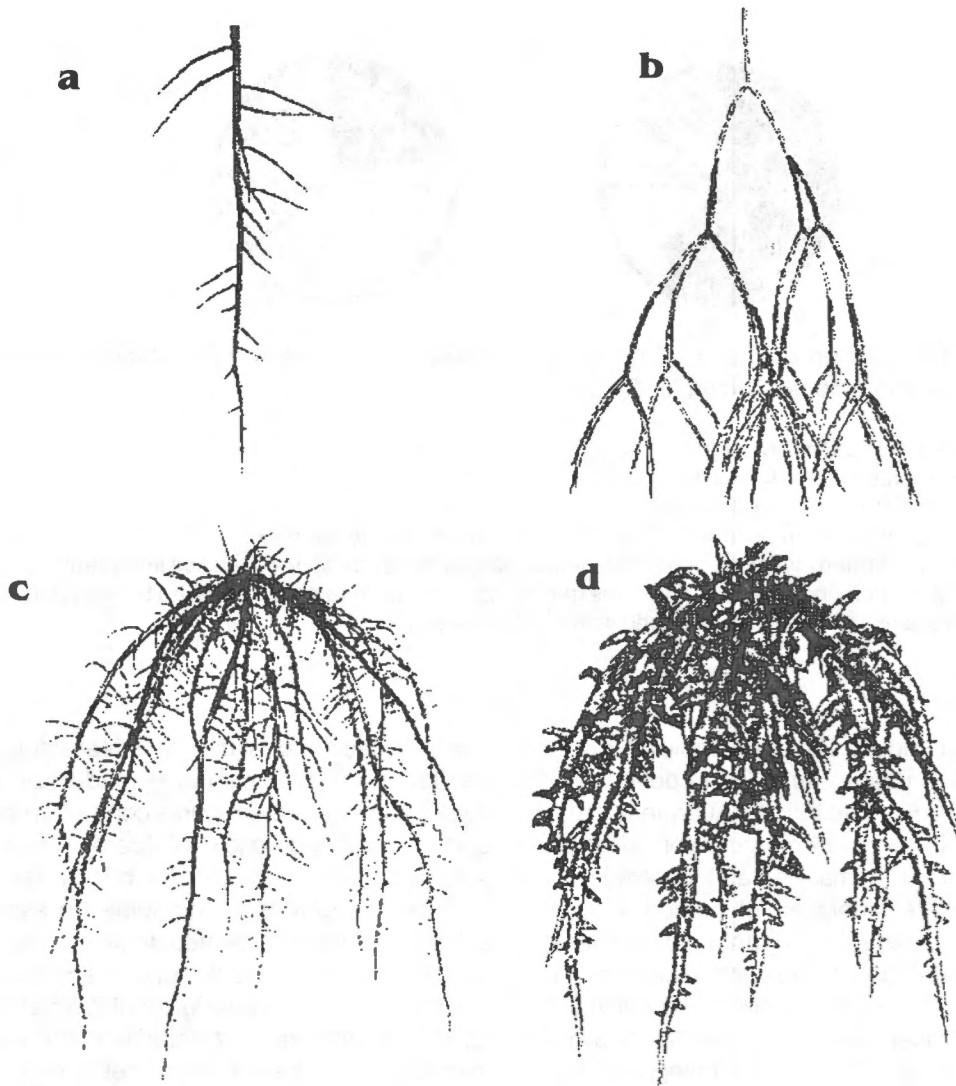


Fig. 2. La simulación geométrica del crecimiento de la raíz del frijol usando el SIMROOT.
 a) Arquitectura de la raíz en diseño "hueso de pescado".
 b) *Phaseolus vulgaris* L, cv "Carioca" y su sistema de raíz.
 c) Arquitectura dicotomial de raíz.
 d) Raíz madura de retoño de "Carioca".
 e) Zonas de falta de P alrededor del sistema de raíz de "Carioca". La configuración del sistema de raíz de "Carioca" fue derivada de observaciones de plantas crecidas en el suelo en los trópicos, mientras que las configuraciones del diseño hueso de pescado y las arquitecturas dicotomiales son extremos topológicos sintéticos. Las zonas de falta de fósforo fueron estimadas a partir de la tasa de difusión de P en suelos con buena agua.

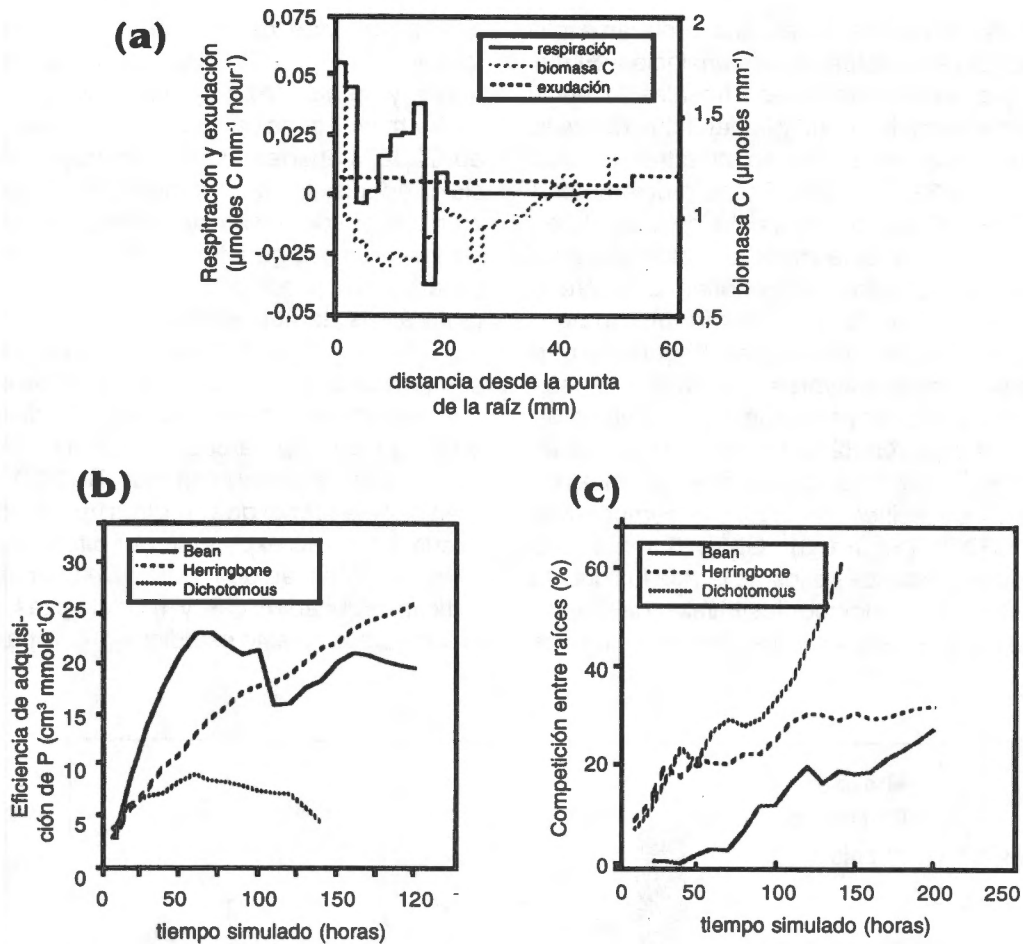


Fig. 3. a. Distribución de la inversión de carbono a lo largo de los ejes de la raíz de frijol cv. G4000. b. Eficiencia de la adquisición de P sobre el tiempo, contrastando arquitecturas de raíces (como se muestra en la FIG. 2) y como fue simulado por SIMROOT. c. Competición inter-raíces sobre el tiempo, para arquitecturas de raíces contrastantes (como se muestra en la Fig. 2)., y como fue simulado por SIMROOT.

Usando la información de la inversión de C mostrada en la Fig. 3a y la información sobre adquisición de P, como se muestra en la Fig. 2e, el EAF fue estimado sobre el período de tiempo, para cada una de las arquitecturas mostradas en la Fig. 2a-c. La Fig. 3b indica que las arquitecturas radicales contrastantes tienen diferentes EAF. La Fig 3c muestra la competición inter-raíces (traslape de zonas con faltante de P), y esto puede ser responsable por las diferencias de EAF en las arquitecturas radicales contrastantes.

morfológicos de las raíces, que pudieran explicar estas respuestas de diferenciación. El número de raíces adventicias y basales, la longitud específica de la raíz y la densidad del vello de la raíz fueron medidos en muestras intactas de raíz. G232725 y G5273 que crecieron con suficiente P tenían áreas de hoja similares (Figura 4) y de este modo ofrecían la mejor comparación entre un genotipo eficiente y uno deficiente. G23275 tenía un número mayor de raíces adventicias (Figura 5) que también tenían mayores longitudes específicas de la raíz, mayores que G5273 (Figura 6). Sin embargo, G23275 tenían menos raíces basales (Figura 7) las cuales eran similares en longitud específica de la raíz al compararlas con G5273 (Figura 8). G23275 tenía una mayor densidad de vellos de la raíz los cuales no fueron afectados por los niveles de fósforo mientras que G5273 tenía menos vellos los

cuales parecían declinar con la tensión por falta de P (Figura 9). Una longitud específica mayor y un número mayor de raíces adventicias y mayor densidad de vellos en las raíces de G23275 pueden explicar la mayor eficiencia en adquisición de P comparada con G5273, como se puede ver en las pruebas de campo. De los otros dos genotipos, G19842 tenía mayor área de hoja que G23275 y que G5273, pero tenía áreas de hoja similares bajo P medio y bajo. La única ventaja aparente de G19842 comparado con los otros dos genotipos era un número mayor de raíces adventicias, sin embargo aquellas raíces no tenían una longitud específica de raíz tan alta. BAT881 tenía área de hoja menor que los otros tres genotipos lo cual no podía explicarse por diferencias en las características de la raíz. De las características arquitectónicas y morfológicas de la raíz medidos en este estudio, algunos parecen

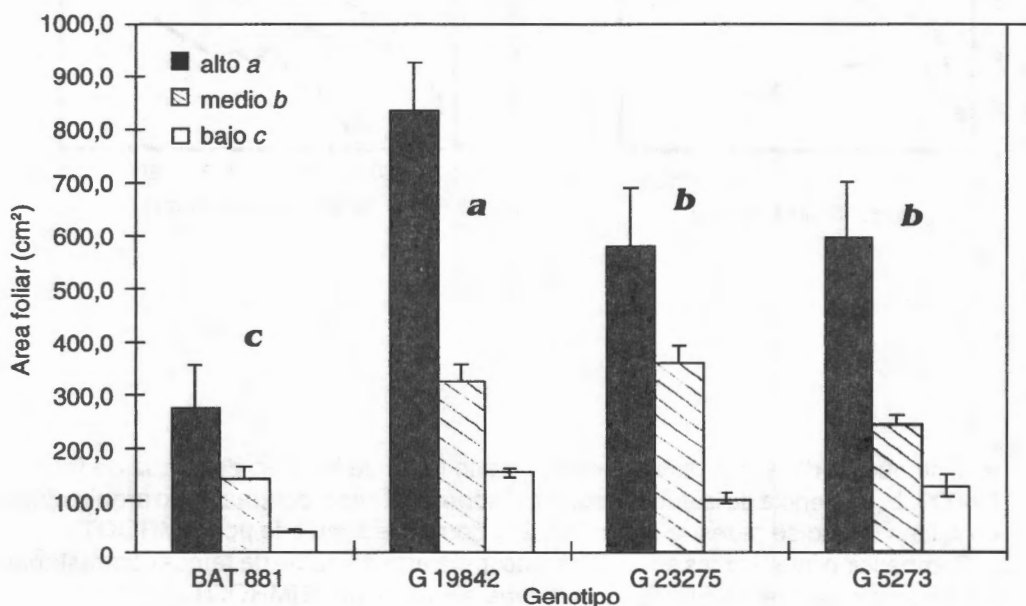


Fig. 4. El área de hoja de los dos genotipos eficientes en P (G19842 y G23275) y los dos ineficientes en P (BAT881 y G5273) desarrollados bajo varios niveles de P en el suelo. Los datos presentados son media #177#SE. La diferentes letras adyacentes a los tratamientos P en la leyenda, indican diferencias importantes. Las diferentes letras colocadas arriba de las barras, indican las diferencias entre los genotipos.

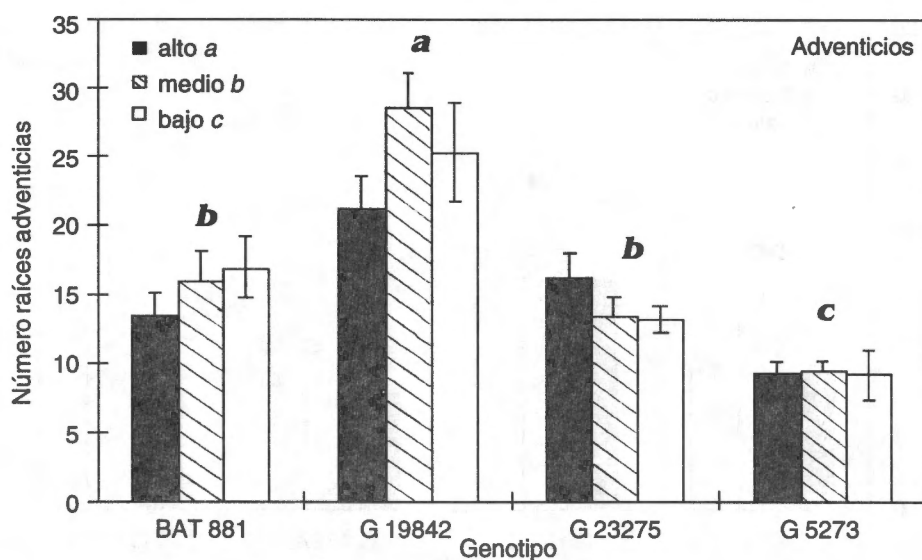


Fig. 5. El número de raíces adventicias superiores de los dos genotipos eficientes en P (G19842 y G23275) y los dos ineficientes en P (BAT881 y G5273) desarrollados bajo varios niveles de P en el suelo. Los datos presentados son la media #177#SE. Las diferentes letras colocadas arriba de las barras, indican las diferencias entre los genotipos.

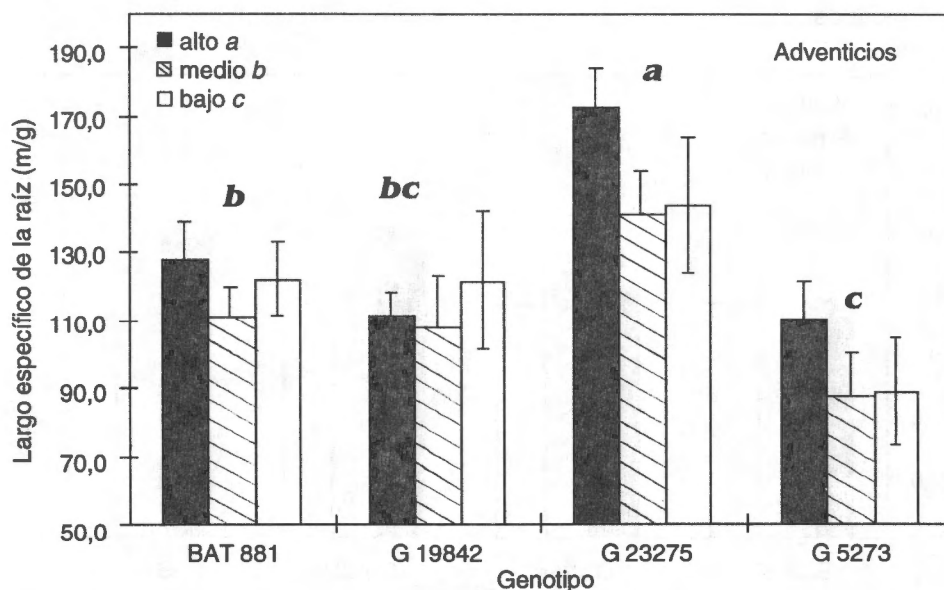


Fig. 6. Longitud específica de raíz en raíces adventicias superiores de los dos genotipos eficientes en P (G19842 y G23275) y los dos ineficientes en P (BAT881 y G5273) desarrollados bajo varios niveles de P en el suelo. Los datos presentados son media #177#SE. Las diferentes letras colocadas arriba de las barras, indican las diferencias entre los genotipos.

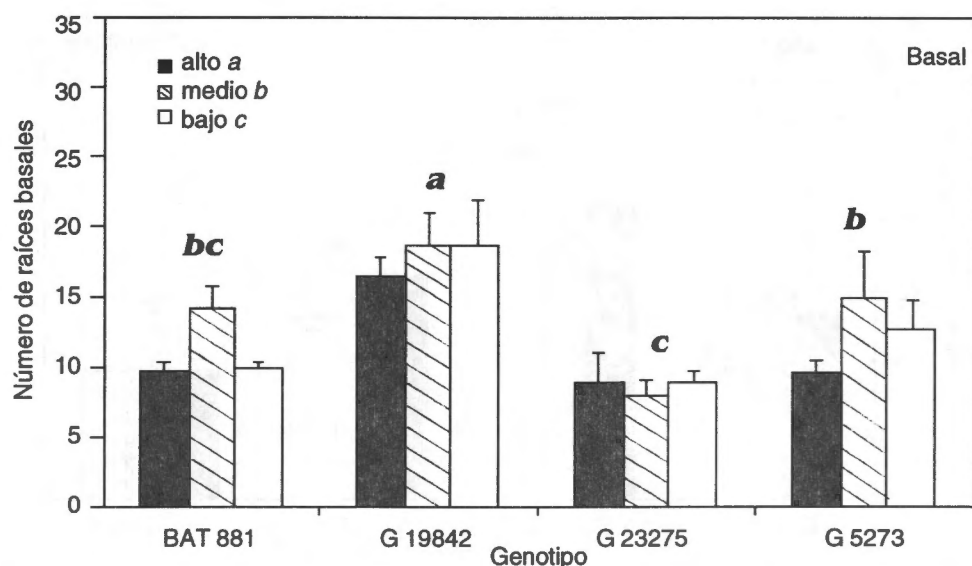


Fig. 7. Número de raíces adventicias inferiores de los dos genotipos eficientes en P (G19842 y G23275) y los dos ineficientes en P (BAT881 y G5273) desarrollados bajo varios niveles de P en el suelo. Los datos presentados son la media #177#SE. Las diferentes letras adyacentes a los tratamientos P en la leyenda, indican diferencias importantes. Las diferentes letras colocadas arriba de las barras, indican las diferencias entre los genotipos.

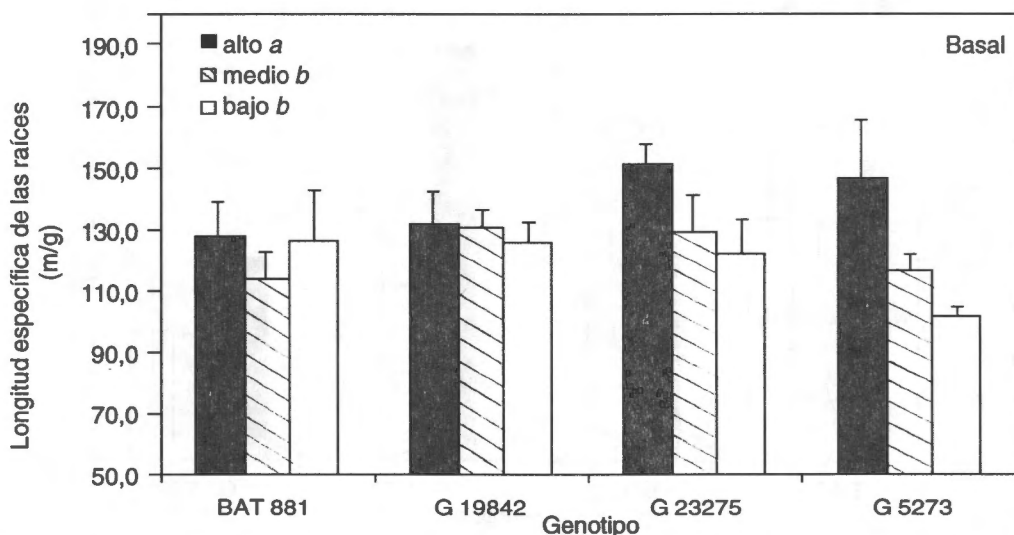


Fig. 8. Longitud específica de las raíces adventicias inferiores de los dos genotipos eficientes en P (G19842 y G23275) y los dos ineficientes en P (BAT881 y G5273) desarrollados bajo varios niveles de P en el suelo. Los datos presentados son la media #177#SE. Las diferentes letras colocadas arriba de las barras, indican las diferencias entre los genotipos.

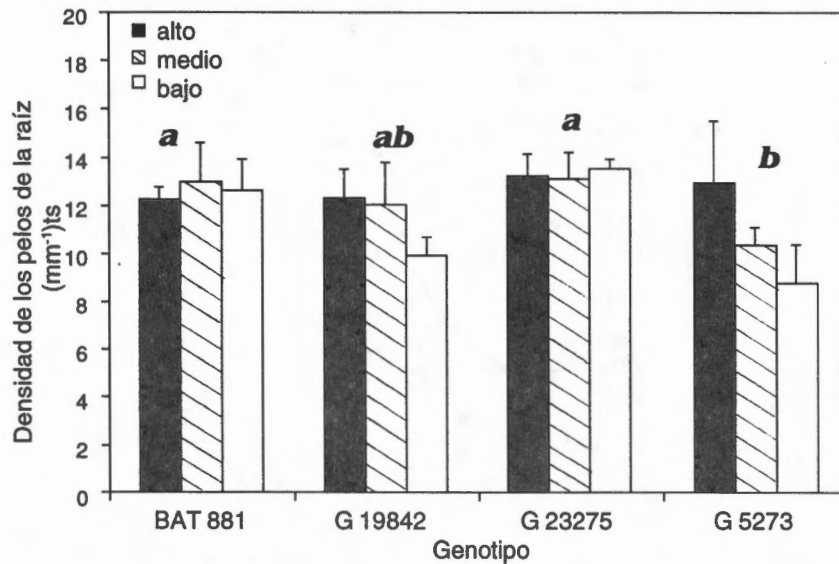


Fig. 9. Densidad de los vellos de la raíz del segundo orden de laterales de los dos genotipos eficientes en P (G19842 y G23275) y los dos ineficientes en P (BAT881 y G5273) desarrollados bajo varios niveles de P en el suelo. Los datos presentados son la media #177#SE. Las diferentes letras colocadas arriba de las barras, indican las diferencias entre los genotipos.

explicar al menos algunas de las diferencias en la respuesta de la planta a la tensión por falta de P observada en el campo. Un mayor obstáculo a la explotación de las características arquitectónicas en agronomía y en cruzamiento, es la dificultad en cuantificar la arquitectura de la raíz en una forma útil y tabulada.

Un enfoque relativamente nuevo es la cuantificación de la arquitectura de la raíz con geometría fractal. La geometría fractal es un sistema de geometría que mejora la descripción de los objetos naturales complejos, es mejor que la geometría euclidiana (Mandelbrot, 1983). Un fractal es un objeto que tiene una dimensión no-entera, y que los objetos fractales se aproximan a los sistemas de raíces en un ámbito finito de escalas (Tatsumi *et al.*, 1989). Es razonable esperar que la geometría fractal pueda proveer sumarios cuantitativos y enfoques funcionales a la arquitectura de raíz que

hasta ahora han eludido a los investigadores que usan la geometría euclidiana (Berntson *et al.*, en prensa).

Aunque el análisis fractal de los sistemas excavados de raíces pueda no ser válido, la geometría fractal de un sistema raíz en tres dimensiones espaciales, puede ser estimado a partir de mediciones de la geometría fractal en 1 o 2 dimensiones espaciales, en la misma forma que puede ser medido a partir de capas superiores del suelo y de trincheras expuestas (Nielsen y Lynch, 1994, datos no publicados). Hemos observado variación genética para la dimensión fractal de raíz en genotipos de frijol que parece estar relacionada con la intensidad de ramificación (Lynch y Van Beem, 1993), y se ha observado recientemente que la baja disponibilidad de P cambia los perfiles bidimensionales de dimensión fractal en los sistemas de raíz de frijoles (Figura 10). Estas

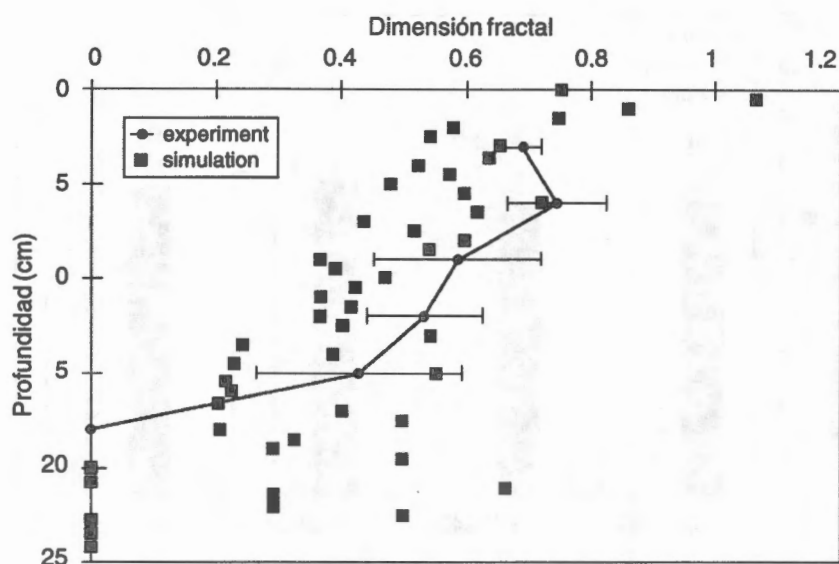


Fig. 10. Dimensión bidimensional fractal de las intersecciones horizontales planares con sistemas radicales del frijol verdaderos y simulados. Los puntos conectados por líneas representan a retoños reales de frijol cv Carioca, diez días después de plantados en cultivos de arena sin tensión. Cada punto es la media de 4 plantas, las barras representan el SE. Los puntos no conectados (n) representan las raíces simuladas de cv Carioca a 240 horas de edad.

observaciones sugieren que las propiedades fractales de los sistemas de raíces pueden ser útiles al distinguir los patrones de ramificación de la raíz de los distintos genotipos bajo presión de P. Estamos ahora desarrollando técnicas para la caracterización en el campo de perfiles fractales bidimensionales para la exploración de la utilidad de este tipo de análisis en los programas de cruzamiento.

La plasticidad y la Eficiencia en Adquisición del Fósforo.

Otro rasgo en la raíz que puede ser importante para la eficiencia de P es la plasticidad o la habilidad para sentir y responder para así localizar o lograr cambios temporales en la disponibilidad de P, (Para una discusión más

extensa, ver Grime y otros, 1991 y sus referencias). Se ha conocido por cierto tiempo que las raíces proliferan en zonas de alta disponibilidad de P) (p.e. Drew y Sakerr, 1978). Hemos observado que tanto las respuestas globales como locales del sistema de raíz del frijol a la tensión por falta de P permite una mayor explotación de la zona rica en P a un "costo" reducido de la biomasa, sugiriendo esto que la plasticidad en verdad aumenta la EAF (Cuadro 2, Snapp y Lynch, 1993). También hemos observado recientemente la estimulación de la ramificación de la raíz en respuesta a una baja disponibilidad de P, en el ambiente inmediato de la raíz (Figura 11). Los genotipos de frijol contrastan en su grado de plasticidad de raíz en respuesta a la tensión por falta de P (Figura 11). Las raíces del frijol también pueden cambiar su curvatura geotrópica en respuesta a la baja

Cuadro 2. Estimados de los costos asociados con la inversión de las raíces en lote P con plantas P Bajo y P Alto. Las raíces fueron divididas en raíces finas y gruesas, y el porcentaje de contribución de las raíces finas a los estimados de costos, fue lo que se reportó. Las plantas de bajo P fueron capaces de explotar un lote de P, como se evidencia por la longitud de la raíz en el lote, con comparativamente poca inversión en la biomasa y en el P de la raíz, aumentando la proporción de raíces finas hacia raíces gruesas. Las desviaciones media y estándar se presentan en las 5 réplicas. Los datos no publicados son de S. Snapp, R. Koide y J. Lynch.

Inversión en plantas del lote P	Plantas de P Bajo	Raíces finas de P Bajo	Plantas de P Alto	Raíces finas de P Alto
Longitud de Raíz (m)	1,4 (0,7)	97%	1,7 (0,4)	96%
Biomasa (mg)	30 (11)	70%	65 (16)	58%
Fósforo (mg)	0,06 (0,02)	88%	0,11 (0,03)	73%

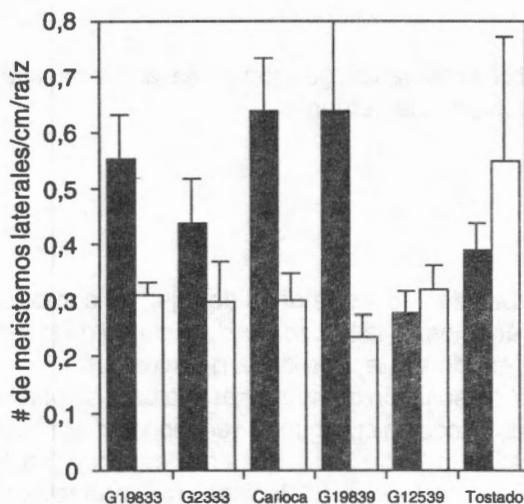


Fig. 11. La simulación de la ramificación lateral en genotipos de frijol deficientes de P. Las plantas crecieron 9 días en bolsas provistas de 1 nM con P (barras con puntos) o sin P (barras negras). Cada barra es la media de 5 réplicas, con SE. Los efectos de provisión de P, genotipo y de interacción P x genotipo, fueron importantes al momento de $P = 0,0001$.

disponibilidad de P, cambiando por lo tanto el volumen total de suelo explorado por la cofia de las raíces basales (las raíces basales son las ramificaciones principales laterales desde la base (taproot) en los retoños de dicotiledoneas),

así como la proporción del sistema de raíces en la capa superior del suelo, en donde la disponibilidad de P es típicamente mayor que en el subsuelo (Figura 12). La variación genética también se ha observado en la interacción de tensión por falta de P y en el gravitropismo (Cuadro 3), y lo cual es muy interesante, los genotipos con poco crecimiento de raíz se doblan angularmente según los retoños van progresando, en suelos de bajo P (Figura 13). Este tipo de explotación selectiva de los micro-ambientes de suelos específicos podrían contribuir significativamente a la eficiencia del sistema radical para así disponer los gastos de C en porciones del ambiente con la mayor disponibilidad de P.

Proyectos Futuros:

Basándose en la evidencia empírica y teórica arriba anotada, podemos hipotetizar que las diferencias genéticas para la eficiencia de P en el germoplasma del frijol son causadas primordialmente por la variación genética de las características de las raíces. La biología de la raíz todavía es poco comprendida y es un área metodológicamente retardada, en las ciencias botánicas, y con el fin de investigar esta hipótesis en el germoplasma del frijol debemos referirnos a muchos temas metodológicos y

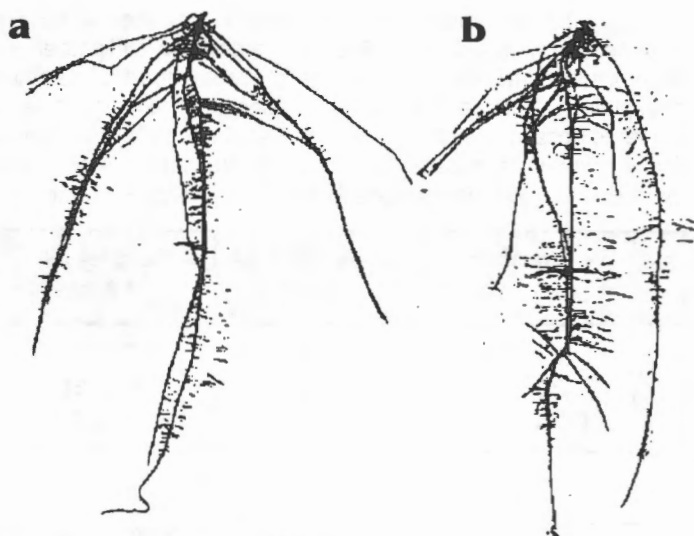


Fig. 12. El efecto de la tensión por falta de P, sobre la curvatura geotrópica de la raíz basal de retoños de frijol crecidos por 5 días en solución de nutrientes:
 a. Con 1 nM de P.
 b. Sin P.

Cuadro 3. El ángulo de ramificación de las raíces basales de los retoños de frijol, tal como fue afectado por la disponibilidad de P. Los ángulos de la horizontal de la punta de la raíz creciendo en bolsas, fueron medidos siete días después de la germinación (5 días después de emerger), tanto con 0 o 1 nM de solución de nutrientes. La baja disponibilidad externa de P aumentó el ángulo de ramificación en algunos genotipos y disminuyó o no tuvo efecto en otros. Cada valor es la media de 3 o plantas réplicas, con 5 o 10 raíces basales por planta, seguidas por el error estándar, *, ** indican la importancia con $P \leq 0.05$, 0.01 , respectivamente. ANOVA indicaba el efecto del genotipo ($F=4.483$, $P \leq 0.001$), y la interacción de genotipo y tiempo ($F=6.763$, $P \leq 0.001$), que tenían efectos importantes sobre el ángulo de ramificación de la raíz. Datos de Bonser y otros, 1994.

Genotipo	Angulo de Ramificación a partir de la Horizontal		F(Efecto P) de la ANOVA
	+P	-P	
GI19839	51,5 (5,4)	39,8 (5,3)	3,140
BAT1224	53,4 (3,8)	41,8 (3,4)	3,031
GI9833	72,1 (3,0)	57,9 (3,1)	6,271*
G12539	66,6 (3,4)	55,2 (3,5)	8,388**
DOR364	61,8 (5,0)	53,8 (5,4)	0,489
Carioca	65,2 (7,1)	58,6 (6,9)	0,530
G2333	59,5 (5,0)	69,5 (7,0)	4,593

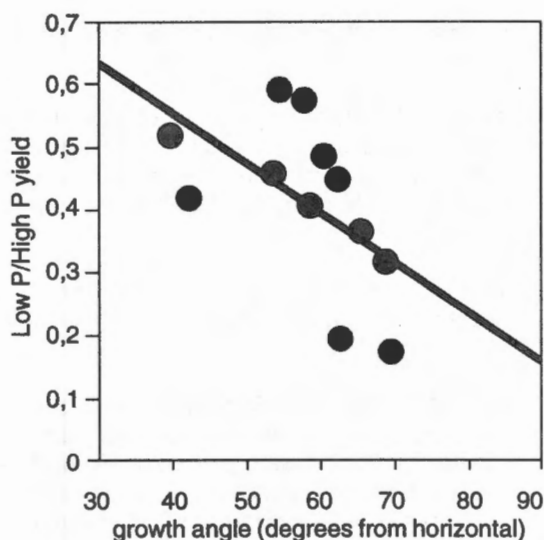


Fig. 13. La correlación entre el ángulo de crecimiento 5 días después de la emergencia de la raíz basal para raíces que crecieron sin P y su rendimiento, calculado como la relación entre rendimientos de semillas de bajo P y alto P. Los valores representan las medias de todas las raíces basales 5 días después de la emergencia de cuatro plantas crecidas sin P. Cada punto representa un genotipo. Los datos relativos de rendimiento fueron tomados de experimentos en el campo realizados en el CIAT. (1988, 1989, 1990, D. Beck, datos no publicados).

$R^2 = 0,315$.

$P = 0,067$.

Los genotipos son: G19839, A750, Antioquia8, G12539, Carioca, Calima, G16140, G5166, G2633, G13764 y G2333.

conceptuales de mayor importancia. Metodológicamente, debemos desarrollar herramientas apropiadas para analizar, cuantificar y resumir la actividad de la raíz en el tiempo y el espacio. Conceptualmente, debemos desarrollar maneras de pensar sobre la interrelación

de la topología de la raíz (estructura ramificada bidimensional), su arquitectura (configuración tridimensional del sistema radical), y su plasticidad, en un contexto funcional que permita la validación de hipótesis específicas relacionadas con el impacto de las características de la raíz en el bienestar de la planta (lo cual puede ser expresado en términos de rendimiento en el contexto agrícola). Creemos que los modelos de simulación de arquitectura de la raíz serán un enfoque muy útil, ya que la arquitectura de los sistemas radicales reales es tan compleja y difícil de cuantificar (Wullshleger *et al.*, 1993). Los presupuestos de carbón también pueden ser útiles como un medio de cuantificar la eficiencia fisiológica de sistemas radicales contrastantes. La geometría fractal puede proveer perspectivas útiles del análisis y medición de la arquitectura radical (Berntson *et al.*, en prensa, Nielsen y Lynch, 1994). En cuanto exista mayor información en relación con la base genética de las características de la raíz, la manipulación genética directa permitirá una evaluación rigurosa de las hipótesis concernientes con la formación y función de la raíz. Creemos que existe un gran potencial para el desarrollo de cultivos de frijol eficiente en P. El darse cuenta de tal potencial requerirá un esfuerzo multidisciplinario que incluirá a criadores de plantas, fisiólogos, y biólogos moleculares, trabajando juntos para caracterizar, comprender y manipular los recursos genéticos del frijol.

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a los muchos colaboradores, estudiantes y mentores quienes contribuyeron a la investigación. En forma resumida incluimos a los Drs. Andre Lauchli y Emanuel Epstein, de la Universidad de California en Davis. Dr. Yan Xiaolong, de la Universidad Agrícola del Sur de China. Dr. Sieglinde Snapp,

de la Fundación Rockefeller. Dr. Andrei Jablokow, Dr. Roger Koide, Robert Davis, y Jae Pyo Han de la Universidad del Sur de Pensilvania. Esta investigación fue en parte respaldada por USDA-NRI por una donación 94371000311 y una donación NSF BIR 9220330, para JPL.

LITERATURA CITADA

- ABBOTT, L.K.; ROBSON, A.D. 1982. The role of vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in agriculture and the selection of fungi for inoculation. *Aust J Agric Res* 33:389-408.
- AE, N.; ARIHARA, J.; OKADA, K.; YOSHIHARA, T.; JOHANSEN, C. 1990. Phosphorus uptake by pigeon pea and its role in cropping systems of the Indian subcontinent. *Science* 248: 477-480.
- BARBER, S.A. 1984. *Soil Nutrient Bioavailability, a Mechanistic Approach*. John Wiley & Sons, New York.
- BEEBE, S.; LYNCH, J.; TOHME, J.; OCHOA, I. 1992. Genetic diversity for phosphorus efficiency in landraces of *Phaseolus vulgaris* L. Poster presented at the International Crop Science Congress. Ames, Iowa.
- BERNSTON, G.M.; LYNCH, J. P.; SNAPP, S. *Fractals and Plant Root Systems: Current Perspectives and Future Applications Chaos and Fractals in Soil Science*
- BLOOM, A.J.; CHAPIN, F.S.; MOONEY, H.A. 1985. Resource allocation in plants: an economic analogy. *Ann Rev Ecol Syst.* 16:363-392.
- BOLAN, N.S. 1991. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. *Plant and Soil* 134:189-207.
- BONSER, A.B.; LYNCH, J.P.; SNAPP, S. 1994. Differences in gravitropic response and branching angle in response to phosphorus stress in genotypes of *Phaseolus vulgaris*. *Plant Physiology*, in press (Abstr.).
- CIAT. 1986. *Bean Program Annual Report*. Cali, Colombia.
- CLARK, R.B. 1990. Physiology of cereals for mineral nutrient uptake, use, and efficiency. *In: Crops as enhancers of nutrient use*, eds. Baligar & Duncan, pp 131-210, Academic press.
- DAVIS, R.D. 1993. *Modeling and visualization of botanical root systems*. M.S. thesis, Penn State University.
- DREW, M.C.; SAKER, L.R. 1978. Nutrient supply and the growth of the seminal root system in barley. III. Compensatory increase in growth of lateral roots, and in rates of phosphate uptake, in response to a localized supply of phosphate. *J. Exp. Bot* 29:435-451.
- EPSTEIN, E. 1972. *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*. John Wiley and Sons, New York.
- FITTER, A.H. 1991. Characteristics and functions of root systems. p. 3-24. *In: Y. Waisel, A. Eshel, and U. Kafkafi (eds.) Plant Roots, the Hidden Half*. Marcel Dekker, Inc., New York.
- FITTER, A.H.; STICKLAND, T.R.; HARVEY, M.L.; WILSON, G.W. 1991. Architectural analysis of plant root systems. I. Architectural correlates of exploitation efficiency. *New Phytol.* 118: 375-382.
- FREDEEN, A.L.; RAO, I. M.; TERRY, N. 1989. Influence of phosphorus nutrition on growth and carbon partitioning in *Glycine max.* *Plant Physiol.* 89:225-230.
- GRIME, J.P.; CAMPBELL, B.D.; MACKEY, J.M.L.; CRICK, J.C. 1991. Root plasticity, nitrogen capture and competitive ability. pp 381-397 in *Plant Root Growth: an Ecological Perspective*. D Atkinson, ed. Blackwell, London.
- HELAL, H.M. 1990. Varietal differences in root phosphatase activity as related to the utilization of organic phosphates. *Plant Soil* 123:161-163.
- KOIDE, R.T. 1991. Nutrient supply, nutrient demand, and plant response to mycorrhizal infection. *New Phytol.* 117:365-386.

- LYNCH, J.; BEEBE, S.E. 1995. Adaptation of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) to low phosphorus availability. *Hortscience* 30:1165-1171.
- LYNCH, J.; LAUCHLI, A.; EPSTEIN, E. 1991. Vegetative growth of the common bean in response to P nutrition. *Crop Science* 31:380-387.
- LYNCH, J.; VAN BEEM, J. 1993. Growth and architecture of seedling roots of common bean genotypes. *Crop Science*, 33:1253-1257.
- MANDELBROT B.B. 1983. *The Fractal Geometry of Nature*. New York, W. H. Freeman and Co.
- MARSCHNER, H. 1987. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, New York.
- MCLACHLAN, K.D. 1980. Acid phosphatase activity of intact roots and phosphorus nutrition in plants. II. Variation among wheat roots. *Aust. J. Agric. Research* 31:441-448.
- NIELSEN, K.L.; LYNCH, J.P.; JABLOKOW, A.G.; CURTIS, P.S. 1994. Carbon cost of root systems: an architectural approach. *Plant and Soil*. in press.
- NIELSEN, K.N.; LYNCH, J. P. 1994. Fractal analysis of bean root systems. *Agronomy Abstracts* 1994. (Abstr.)
- REEKIE, E.G.; BAZZAZ, F.A. 1987. Reproductive effort in plants. 2. Does carbon reflect the allocation of other resources? *Am. Nat.* 129: 897-906.
- RENDIG, V.V.; TAYLOR, H.M. 1989. *Principles of Soil-Plant Relationships*. McGraw-Hill, New York.
- SADEGHIAN, S. 1991. Influencia de algunas características de las semillas y plantulas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) sobre la tolerancia a la baja disponibilidad de fosforo en el suelo. MS thesis, National University of Colombia, Palmira.
- SAMPLE, E.C.; SOPER, R.J.; RACZ, G.J. 1980. Reactions of phosphate fertilizers in soils. *In: The Role of Phosphorus in Agriculture*, Khasawneh et al. eds. ASA.
- SMITH, S.N. 1934. Response of inbred lines and crosses in maize to variations of nitrogen and phosphorus supplied as nutrients. *J. Amer. Soc. Agron.* 26:785-804.
- SNAPP, S.; LYNCH, J. 1993. Main versus external roots and phosphorus efficiency in common bean: are all roots created equal? *Hort Science* 28(5):126. (Abstr.)
- STEVENSON, F.J. 1986. *Cycles of Soil. Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients*. John Wiley and Sons, New York.
- TATSUMI J.; YAMAUCHI, A.; KONO, Y. 1989. Fractal analysis of plant root systems. *Annals of Botany* 64: 499-503.
- UREN, N.C.; REISENAUER, H.M. 1988. The role of root exudation in nutrient acquisition. *Adv. Plant Nutrition* 3:79-114.
- WULLSCHLEGER, S.D.; LYNCH, J.P.; BERNTSON, G.M. 1994. Modeling the belowground response of plants and soil biota to edaphic and climatic change - what can we expect to gain? *Plant and Soil*, in press.
- YAN, X.; LYNCH, J.P.; BEEBE, S.E. 1995a. Genetic variation for phosphorus efficiency of common bean in contrasting soil types: I. Vegetative response. *Crop Sci.* 35:1086-1093.
- YAN, X.; LYNCH, J.P.; BEEBE, S.E. 1995b. Genetic variation for phosphorus efficiency of common bean in contrasting soil types: I. Yield response. *Crop Sci.* 35:1094-1099.

TRABAJOS REALIZADOS EN EL PROGRAMA DE FACTORES LIMITANTES DE LA FIJACION SIMBIOTICA DEL NITROGENO EN BAJO FOSFORO EN CUBA

Germán Hernández¹, Vidalina Toscano¹, Luis Gómez¹, Nancy Méndez¹, Rafael Reyes¹, Odalis Veranez¹

RESUMEN

Trabajos realizados en el Programa de factores limitantes de la Fijación Simbiótica del Nitrógeno en bajo fósforo en Cuba. Se informa de manera resumida sobre los trabajos realizados por el Laboratorio de Rhizobiología de la Estación Experimental "La Renée", en el programa de factores limitantes de la F.B.N. Los ensayos se condujeron en tres tipos de suelos: Ferralíticos Cuarcíticos, Ferralítico Rojo y Pardos sin Carbonatos, ubicados en tres agroecosistemas diferentes, donde se produce, en ambiente favorable monocultivo con riego, las mayores áreas de frijol común en Cuba. Mayor información está disponible, según el interés específico de los grupos que trabajan en esta temática, dentro del Programa PROFRIJOL para Centroamérica, México y el Caribe.

ABSTRACT

Cuban research in factors limiting biological nitrogen fixation under conditions of limiting P availability. This summary of limiting factor research in the Rhizobium Laboratory of the La Renee Research Station, Cuba, includes research conducted in three types of soils located in three different agroecosystems where bean is cultivated under irrigation.



¹ Laboratorio de Rhizobiología. Estación Experimental "La Renée". Instituto de Suelos. MINAG. A. C. 6. Quivicán. La Habana. Cuba.

Balance de los ensayos que se realizan en el Programa de fósforo en frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) y encuestas P-nodulación

Encuestas nodulación.

Las encuestas fueron conducidas en 17 parcelas en Matanzas (diez en Jovellanos y siete en Agramontes) y cuatro parcelas de encuestas en Pinar del Río, para comprobar el efecto beneficioso de la inoculación sobre una red más amplia de inoculación en terrenos de agricultores. Los suelos de Matanzas son altos en potasio, bajos en materia orgánica y en fósforo. En Pinar del Río el suelo tiene alto potasio, bajo fósforo y pH. (Cuadro 1).

Para encuestar una parcela, se dividió en dos partes. Una mitad fue fertilizada con N P K (166 kg N/ha), la otra mitad fue inoculada y fertilizada con P y K y solo 30 kg N/ha. 10 plantas fueron cosechadas en las etapas R6 (floración) y R8 (llenado de vainas). Se separan los nódulos, la raíz y la parte aérea antes de estimar el contenido de N y P en cada parte. El rendimiento de grano se estimó en la cosecha. El porcentaje de ocupancia de la cepa inoculada se estimó (con antibióticos específicos de cada cepa).

Los resultados demuestran que los factores limitantes son principalmente el fósforo, el alto nivel de potasio, magnesio así como el bajo valor de pH, y que la inoculación con una cepa eficiente (adaptada a las condiciones edáficas del suelo) permiten alcanzar el mismo rendimiento que el control sin inoculación y fertilizado con 166 kg N/ha.

Cuadro 1. Valores de fertilidad en los tres tipos Genéticos de Suelos donde se condujeron los ensayos de validación.

	Pinar del Río	Matanzas	Holguín
pH KCl	4,2	6,5	6,3
Y1	2,3	0,94	1,40
Materia orgánica %	1,1	2,6	1,90
Nitrógeno total	54,2	200	150
P ₂ O ₅ mg 100g ⁻¹	7,30	8,40	10,80
K ₂ O mg 100g ⁻¹	6,60	35,40	26,50
Na meq 100g ⁻¹	0,07	—	0,45
K meq 100g ⁻¹	0,22	1,40	1,92
Ca meq 100g ⁻¹	1,50	5,63	4,10
Mg meq 100g ⁻¹	0,15	6,66	26,40
Valor de S	1,94	13,69	32,87

Y1 = Acidez hidrolítica de primera extracción método de Kappen modificado.

M.O % Método Walkley-Black. Según Jackson 1964.

Nitrógeno total. Método modificado de Kjeldahl. Según Jackson, 1964.

Jackson, M. L., 1964. Análisis químico de suelos. Ediciones Omega, Barcelona. 662 p.

Cationes canjeables. Método del Acetato de amonio 1N. Según Jackson, 1964.

Evaluación en campo de diferentes variedades de frijol.

a. Selección sobre 54 variedades de Cuba (Cuadros 2, 3 y 4).

Este ensayo se condujo en los suelos de La Habana, ricos en P, debido a la fertilización que recibieron durante muchos años, y pobres en N. Así se pudo estimar el potencial de fijación de nitrógeno en estos genotipos a alto P. En Matanzas y Holguín se evaluaron en bajo P.

b. Selección sobre materiales introducidos (Cuadros 5 y 6).

El ensayo se condujo en tres estaciones, Pinar del Río (-P ácido), Matanzas (-P +K -N) y

Holguín (-P +Na poca materia orgánica). Se hicieron ensayos N P K para estimar la mejor combinación.

c. Selección de 59 variedades de CIAT, Guatemala y Costa Rica (Cuadros 7 y 8).

El ensayo se condujo en tres estaciones: Cienfuegos (-P -N), Camagüey (-P), La Habana (+P -N). También se plantea ensayar estos genotipos con el cultivo hidropónico y diferentes aplicaciones de fósforo. Esta selección con la de 54 genotipos de Cuba, sigue un eje de origen Oeste-Este.

Trabajo en hidropónico sobre frijol.

La técnica de cultivo hidropónico fue establecida en Cuba en el marco de

Cuadro 2. Producción de masa seca aérea (MSPA) expresada en t. ha⁻¹ en la etapa de desarrollo R8 y consumo de nitrógeno y fósforo (kg ha⁻¹) en la etapa de desarrollo R8 y R9 por la MSPA, y el grano, respectivamente en 54 genotipos de frijol criollo crecidos en un suelo Ferralítico Rojo rico en fósforo en la Provincia La Habana.

Genotipos	MSPA t. ha ⁻¹	P Total kg.ha ⁻¹			N Total kg.ha ⁻¹	
		MSPA	Raíz	Grano	MSPA	Grano
P249a	1,81	6,52	0,82	6,15	54,30	48,20
P392	2,53	9,87	0,56	3,64	79,1	27,48
P229	3,26	13,06	0,75	6,51	101,71	51,00
P501	2,34	9,13	0,42	5,83	76,99	41,88
P185	2,14	7,92	0,46	6,55	69,55	50,61
P177	1,14	3,99	0,37	4,80	34,77	39,93
P376	2,99	11,36	0,72	6,45	97,17	47,46
P252	1,07	3,42	0,34	8,25	29,10	49,82
P341	2,79	10,04	0,46	7,84	78,12	48,80
P192	2,71	8,13	0,41	6,80	103,52	53,51
P191	3,28	11,81	0,41	7,48	122,34	55,22
P75	1,04	3,12	0,34	5,72	28,60	44,92
P145	3,20	11,20	0,32	6,93	92,80	55,78
P238	2,84	9,66	0,89	5,55	96,56	43,26
P266-1	1,35	4,86	0,12	7,18	51,84	47,27
P73-A	1,77	6,19	0,49	4,81	50,27	38,08
P261-1	1,40	4,62	0,43	6,59	54,18	48,35
P37	2,19	8,10	0,45	6,03	84,31	42,35

MSPA= Masa seca de la parte aérea.

Cuadro 3. Producción de masa seca aérea (MSPA) (expresada en t. ha⁻¹ en la etapa de desarrollo R8) y consumo de nitrógeno y fósforo (kg ha⁻¹) en la etapa de desarrollo R8 y R9 por la MSPA y el grano, respectivamente, en 54 genotipos de frijol criollo desarrollados en un suelo Ferralítico Rojo rico en fósforo en la Provincia La Habana.

Genotipos	MSPA t. ha ⁻¹	% P	P Total kg.ha ⁻¹			N Total kg.ha ⁻¹	
			MSPA	Raíz	Grano	MSPA	Grano
P12	2,27	0,37	8,40	0,57	9,08	74,91	73,35
P153	4,33	0,36	17,39	0,70	7,16	164,22	55,59
P134	3,71	0,32	12,98	0,67	4,68	128,36	35,70
P180	3,30	0,31	10,23	0,39	6,05	91,41	64,36
P173	3,28	0,34	11,15	0,29	7,61	122,67	54,29
P180-b	1,45	0,30	4,35	0,29	5,79	49,73	51,98
P186-P	3,11	0,30	9,83	0,50	5,30	108,81	43,44
P199	3,03	0,33	10,00	0,53	7,76	118,37	59,93
P232	3,05	0,26	7,93	0,44	6,79	89,67	57,89
P240	4,00	0,33	13,20	0,61	5,13	135,60	40,38
P64A	3,98	0,44	17,51	0,39	6,00	128,95	42,59
P304A	1,27	0,34	4,32	0,34	7,58	40,83	64,99
P500	2,46	0,31	7,62	0,63	8,59	75,03	65,95
P192	2,17	0,42	9,11	0,70	9,49	65,10	63,81
P184	2,93	0,34	9,96	0,45	9,99	101,89	67,85
P141	2,25	0,35	7,88	0,33	10,11	75,15	76,08
P148	1,55	0,34	5,27	0,41	7,79	51,46	61,18
P186	2,62	0,31	8,12	0,47	6,57	81,22	48,62

Cuadro 4. Producción de masa seca aérea (MSPA) en etapa de desarrollo R8 y consumo de N y P en etapa de desarrollo R8 y R9 por la MSPA, y el grano, respectivamente, en 54 genotipos de frijol criollo crecidos en un suelo Ferralítico Rojo rico en fósforo en la Provincia La Habana.

Genotipos	MSPA ent. ha ⁻¹	% P	P Total (kg ha ⁻¹)			N Total (kg ha ⁻¹)	
			MSPA	Raíz	Grano	MSPA	Grano
P256	3,03	0,31	9,39	0,58	4,04	101,24	65,60
P295	2,14	0,33	7,06	0,59	9,48	80,46	71,62
P117	3,44	0,36	12,38	0,85	8,15	133,73	59,57
P176	2,84	0,31	8,80	0,58	9,61	88,32	71,70
P220	3,35	0,34	11,39	0,59	8,04	110,55	60,66
P355	3,12	0,31	11,54	0,58	5,76	77,69	48,86
P285	3,73	0,30	8,19	0,59	7,42	93,64	57,99
P152	3,12	0,33	10,30	0,66	6,47	88,30	51,22
P267	1,76	0,34	5,98	0,46	8,00	52,80	64,05
P251	2,50	0,35	8,75	0,66	7,68	76,25	59,96
P365	2,73	0,34	9,28	0,42	5,19	92,82	49,01
P248	2,59	0,30	7,77	0,55	3,46	95,83	34,99
P275	2,59	0,25	6,47	0,60	5,09	86,87	46,48
P457	3,84	0,30	11,52	0,66	5,74	130,94	58,28
P57	2,95	0,32	9,44	0,70	5,40	103,25	55,47
P124	2,07	0,33	6,38	0,26	3,58	83,63	49,43
P118	2,75	0,32	8,80	0,32	7,42	111,10	68,41
P146A	3,55	0,31	11,00	0,54	6,37	138,81	60,06

Cuadro 5. Consumo de N por la masa seca aérea en la etapa R6 (floración) y por el grano en la cosecha en kg N.ha⁻¹, en 20 genotipos de frijol común sembrados en tres sitios con P deficiente.

Genotipos	Pinar del Río		Matanzas		Holguín	
	N total (MSPA)	N total (grano)	N total (MSPA)	N total (grano)	N total (MSPA)	N total (grano)
ICA Pijao	31,61	35,00	33,88	33,51	34,97	34,50
BAT 58	19,61	34,50	19,22	37,28	32,14	34,50
BAT 76	27,62	46,00	30,91	34,80	31,22	34,80
BAT 448	19,83	24,13	21,31	31,55	31,59	35,00
XAN 93	28,51	34,49	22,19	33,47	36,57	32,43
NAG 15	33,11	43,73	27,28	43,71	35,49	34,50
NAG 20	29,78	36,86	31,20	36,87	41,65	33,69
Guira 89	28,57	35,19	23,80	35,20	35,57	34,00
BAT 832	30,83	35,00	53,13	35,00	34,63	34,79
BAT 304	32,69	32,40	17,56	32,40	23,46	31,83
XAN 147	31,35	38,28	34,19	38,28	44,98	34,71
CC 25-9 (N)	28,79	48,91	30,87	30,51	35,19	35,50
Velasco Larso	27,23	37,40	31,49	37,41	29,47	35,50
Guama 23	28,07	36,19	26,56	36,19	30,49	34,80
MCD 254	28,05	32,36	35,98	32,36	29,25	34,50
Hatuey 24	29,08	38,83	37,84	38,89	32,29	33,49
BAT 93	29,26	33,66	34,13	33,66	32,37	32,97
A 336	32,23	29,83	31,07	29,84	31,63	35,00
BAT 482	30,68	34,74	33,68	34,75	27,03	35,00
CC 25-9 (B)	28,03	34,69	27,56	37,64	32,01	33,78

Los tres grupos de genotipos fueron Negro, Rojo y Blanco respectivamente.

Cuadro 6. Consumo de fósforo por la masa seca aérea (MSPA) en la etapa R6 (floración) y por el grano en la cosecha en kg P.ha⁻¹, en 20 genotipos de frijol común cultivados en tres localidades con fósforo deficiente.

Genotipos	Pinar del Río		Matanzas		Holguín	
	P total (MSPA)	P total (grano)	P total (MSPA)	P total (grano)	P total (MSPA)	P total (grano)
ICA Pijao	4,47	6,59	3,79	6,70	3,76	6,50
BAT 58	5,26	6,29	2,76	7,03	5,29	8,68
BAT 76	4,55	6,50	3,64	6,29	4,06	6,49
BAT 448	4,69	5,70	2,03	5,89	3,64	6,00
XAN 93	4,89	6,19	2,86	5,57	4,44	6,20
NAG 15	4,35	6,30	3,23	7,46	4,18	6,29
NAG 20	4,94	7,00	3,58	6,56	4,88	6,19
Guira 89	4,38	6,29	2,88	6,30	4,46	6,59
BAT 832	4,25	10,42	4,98	7,60	3,90	6,60
BAT 304	6,18	6,39	2,30	5,96	2,62	6,41
XAN 147	4,95	6,79	5,11	7,55	4,70	6,89
CC 25-9 (N)	4,79	6,25	4,46	4,71	4,17	6,79
Velasco Larso	7,36	6,49	5,54	7,36	6,16	6,50
Guama 23	5,49	7,79	3,18	8,37	4,97	6,30
MCD 254	6,01	7,00	2,91	6,47	3,30	6,80
Hatuey 24	4,59	6,29	4,14	8,12	4,26	9,29
BAT 93	5,12	6,89	3,92	6,05	4,49	6,29
A 336	4,48	6,29	2,71	5,45	4,24	6,50
BAT 482	6,07	7,19	3,82	5,68	4,93	6,60
CC 25-9 (B)	4,30	6,79	2,21	5,41	4,10	6,50

Cuadro 7. Formación de masa seca por la parte aérea (MSPA). contenido % de P, eficiencia de uso de fósforo estimados en la etapa de desarrollo R8 expresado en (g) por planta y el rendimiento en la etapa de desarrollo R9 expresado en kg.ha⁻¹, en 59 genotipos desarrollados en suelo Ferralítico Rojo rico en fósforo, en la provincia La Habana. Eficiencia de uso =MSPA % de P (MSPA)

Genotipo	MSPA R8	Rendimiento	% P MSPA	Eficiencia uso de P
G12168	35,41	1114	0,62	57,11
Calima	34,63	1422	0,54	64,12
Río Tibagi	38,52	1853	0,52	74,07
G19833	37,55	1389	0,70	53,64
Porillo	39,31	1790	0,64	61,42
G19839	31,42	1530	0,46	63,30
Jamapa	49,05	4596	0,30	163,35
APN 18	55,46	3429	0,28	198,07
Bat 271	85,35	4852	0,34	251,02
G12539	61,09	1606	0,34	179,66
Pot 51	65,08	4041	0,31	209,93
G12538	33,31	593	0,44	75,70
G19428	32,69	1617	0,35	93,40
Carioca	40,69	3531	0,30	135,63
PVA846	50,90	2100	0,38	169,66
Antioquia	36,31	1918	0,37	98,13
G2633	48,28	1639	0,36	134,11
G19441	37,37	1800	0,38	98,34
G14665	62,27	2195	0,35	177,91
Colorado	51,57	1389	0,38	135,71
Norge Bernal	47,00	1991	0,44	106,81
Mutante Riz 90	26,59	640	0,38	69,97
Engopa 208	20,52	1340	0,42	45,85
Huasteco 81	48,95	2819	0,37	132,29
Juan Abrahante	66,42	2246	0,38	172,34
Juasteco	69,83	3385	0,36	193,97
Alubias	104,10	3737	0,37	281,35

Cuadro 8. Formación de masa seca por la parte aérea (MSPA), contenido % de P, eficiencia de uso de fósforo (estimados en la etapa de desarrollo R8 expresado en (g) por planta) y el rendimiento en la etapa de desarrollo R9, expresado en kg.ha⁻¹, en 59 genotipos desarrollados en suelo Ferralítico Rojo rico en fósforo en la provincia La Habana.

Genotipo	MSPA R8	Rendimiento	% P MSPA	Eficiencia uso de P
Dor 390	37,62	2333	0,33	114,00
Icta precoz 2	52,53	2768	0,30	175,10
Icta octua	41,27	2689	0,32	128,96
Icta turbo	28,58	2325	0,32	89,31
Mex E-62	21,13	2307	0,33	64,03
Mex E-1	42,77	3828	0,34	125,79
Mus 90	41,17	3883	0,41	100,41
Dor 385	66,55	2632	0,27	246,48
Dor 446	55,18	3356	0,34	162,29
Icta Ju 90-4	130,2	6500	0,33	394,54
Dor 448	39,57	3500	0,34	16,38
Icta Cu 89-10	62,50	2969	0,33	189,39
Icta Ju 90-7	32,37	2500	0,37	87,48
Dor 500	22,22	29,24	0,38	58,47
Dor 445	39,49	2600	0,35	112,82
Bat 58	42,07	3542	0,36	116,86
Doricta	20,16	1645	0,32	63,00
Dor 391	26,47	891	0,30	88,23
Dor 484	24,32	721	0,24	101,33
Dor 489	15,94	923	0,29	54,96
Dor 513	14,19	10,61	0,28	50,67
Dor 488	29,92	1371	0,30	99,73
Rab 478	33,19	743	0,24	138,29
Dor 474	30,55	1190	0,27	113,14
Dor 472	27,08	1240	0,21	128,95
Dor 483	23,52	1140	0,25	94,08
Dor 482	14,97	1109	0,27	55,44
Rojo de Seda	21,34	1119	0,26	82,07
Dor 476	31,11	8747	0,32	97,21
Dor 481	38,82	1990	0,34	114,17
Dor 475	19,29	1500	0,33	58,45
CC25-9R	15,08	1564	0,32	47,12

MSPA= Masa seca en la parte aérea de la planta.

colaboración entre INRA de Francia y el Minagri de Cuba.

Varios tratamientos de P fueron ensayados (250-500-750-1000-1500-2000 $\mu\text{mol P/planta/semana}$) para buscar el óptimo para fijación de nitrógeno, Cuadro 9.

Trabajo en potes con suelo.

Fueron ensayadas 16 genotipos en invernadero en tres suelos de tipo Ferralítico Rojo, pobre en N, bajo, medio y alto P respectivamente. Los potes no fueron fertilizados ni inoculados. Así se pudo estimar el potencial de fijación de nitrógeno en suelo a diferentes disponibilidades de fósforo. Fue entonces importante trazar las curvas de absorción-desorción de estos suelos para determinar por cada tipo de suelo la aplica-

ción de P que logra la misma disponibilidad de P por la planta (o sea la misma concentración en la solución del suelo). La meta fue comparar una misma disponibilidad de P en diferentes tipos de suelos.

Resumen de la orientación del trabajo y perspectivas

Las encuestas a nivel de los campesinos o de las empresas estatales mostraron la eficiencia de la inoculación pero también la necesidad de inocular una cepa que sea adaptada a las condiciones edáficas del suelo (Por ejemplo la CF1 para los suelos Ferralíticos Rojos, o HG para los suelos de Holguín). Esto enfoca entonces la importancia de seguir aislando cepas de cada tipo de suelo para seleccionar las mejores. Los

Cuadro 9. Ensayo conducido con dos genotipos de frijol de grano negro pequeño CC 25-9(N) y BAT 58 desarrollados, en condiciones hidropónicas con concentraciones crecientes de P(i) y dos vías para suministrar nitrógeno. FBN y nitrato.

$\mu\text{mol P/semana}$	FBN		Nitrato	
	CC25-9	Bat 58	CC25-9	Bat 58
MSPA				
250	3,25	5,30	5,82	4,99
500	3,28	5,04	5,99	3,38
750	3,91	4,69	6,45	5,79
1000	4,12	5,29	7,51	5,64
2000	3,93	5,54	6,21	6,38
Promedio de M S R				
250	8,10	5,27	11,34	6,82
500	5,92	5,20	10,84	6,90
750	6,51	5,72	7,17	5,59
1000	4,77	5,92	7,56	6,43
2000	5,08	5,67	9,50	5,96

MSPA= Masa seca de la parte aérea (g/plantas).

MSR= Promedio de masa seca radical (g/plantas) a la etapa R6.

próximos ensayos de inoculación podrán incluir el método GUS para mejorar la selección de cepas.

En cuanto a los ensayos N P K en diferentes suelos se ve la importancia aportada al estudio de cada tipo de suelo para obtener la respuesta óptima en cada cual. Esta red de estaciones permite a Cuba mantener ensayos multilocales y así tener un conocimiento preciso del suelo tropical.

Hubo selección de genotipos a diferentes niveles de P, en donde se estimó la capacidad para fijar nitrógeno, los hábitos de crecimiento y sobre todo la eficiencia de uso del fósforo.

Nueva orientación del trabajo

En relación a las necesidades y los intereses científicos, podemos pensar que el

programa de fósforo de Cuba estará orientado para estudiar:

1. Efecto de la cepa y el genotipo sobre la eficiencia de la fijación de nitrógeno. Selección de cepas y genotipos eficientes a bajo P.
 2. Estudio del efecto sobre la eficiencia utilizando cepas eficientes y no eficientes a bajo P.
 3. Ensayo de campo con diferentes cepas y niveles de P.
 4. Estudio de la distribución del fósforo en la planta fijadora: efecto de la cepa.
 5. Estudio de la removilización del fósforo en la planta con la técnica de radioactividad ^{32}P .
 6. Influencia de la cepa sobre la actividad nitrogenasa específica.
-

INVESTIGACIONES EFECTUADAS EN EL CIAT SOBRE FUENTES DE MECANISMOS DE TOLERANCIA A BAJO FOSFORO EN FRIJOL COMUN

Fernando Muñoz¹, Douglas Beck²

RESUMEN

Investigaciones efectuadas en el CIAT sobre fuentes de mecanismos de tolerancia a bajo fósforo en frijol común. El fósforo (P) es el nutrimento más limitante para la producción de frijol en los trópicos y subtropicos. Mientras que la fertilización con P es una solución obvia, en los países en desarrollo los cultivadores de frijol generalmente carecen de los recursos para invertir en fertilización. El frijol también contribuye a la sostenibilidad del sistema de cultivo a través de su capacidad para realizar la fijación biológica de N₂, un proceso el cual requiere P adicional en la planta para poder funcionar. Los genotipos que obtienen y usan el P limitante más eficientemente, podrían por lo tanto mejorar y estabilizar la producción en los suelos marginales de baja fertilidad que caracterizan la mayoría de las áreas de cultivo del frijol. Por estas razones, un programa de investigación de los mecanismos potenciales del frijol para la tolerancia a bajo P fue realizado en CIAT. Los ensayos de campo conducidos en alfisoles con bajo P en dos sitios indican que dos diferentes mecanismos parecen estar operando en el germoplasma (23 cvs) probado. Algunos cultivares tienen una clara ventaja en la extracción de P, sin embargo la eficiencia de extracción estuvo pobremente relacionada con la masa radicular. Otros cultivares tuvieron una mayor capacidad para usar eficientemente el P para producir semilla. Los cultivares más tolerantes combinaron estos dos mecanismos en alguna proporción. El trabajo futuro se enfocará al entendimiento de estos mecanismos con vista a determinar su heredabilidad e identificación de los correspondientes marcadores moleculares para facilitar la incorporación de los genes responsables en programas de mejoramiento.

ABSTRACT

CIAT research on mechanisms for low P tolerance in bean. Phosphorus (P) is the most limiting nutrient for bean production in the tropics and subtropics. While P fertilization is an obvious solution, developing country bean growers generally lack the resources to invest in fertilization. Beans also contribute to cropping system sustainability through their ability for biological N₂ fixation, a process which requires additional plant P in order to function. Genotypes that obtain and use limiting P more efficiently would therefore improve and stabilize production in the marginal low fertility soils that characterize the majority of bean cropping areas. For these reasons, a program of investigation into potential mechanisms of low P tolerance in common bean was undertaken at CIAT. Field trials conducted in low-P alfisols at two sites indicate that two distinct mechanisms appear to be operating in the range of germplasm (23 cvs) tested. Some

¹ CIAT, AA 6713, Cali, Colombia.

² CIAT, Apdo.55-2200 Coronado, San José, Costa Rica

cultivars had a clear advantage in P uptake, although P uptake efficiency was poorly related to root mass. Other cultivars had a greater capacity for efficient use of P to produce seed. The most low P tolerant cultivars combined these two mechanisms to some extent. Future work will focus on understanding of these mechanisms with a view to determining their heritability and identifying the correspondent molecular markers to better enable incorporation of the responsible genes into breeding programs.



INTRODUCCION

El frijol contribuye a la sostenibilidad de los sistemas de producción en los cuales está incorporado a través de su capacidad de fijación biológica de N₂, un proceso que requiere adicionalmente de P en la planta. La baja disponibilidad o la deficiencia de P en el suelo es el mayor limitante para la producción de frijol en los trópicos y subtropicos. La solución obvia sería la fertilización pero ya citamos sus inconvenientes, además la fertilización fosforada es ineficiente en muchos suelos tropicales debido al fenómeno de la fijación a formas no disponibles a las plantas; la eficiencia de uso de fertilizantes fosforados en el tropico presenta un promedio menor del 10%. Por lo tanto, la aplicación de fertilizantes minerales procesados o abonos no deben ser tomadas como las unicas alternativas para compensar la deficiencia de P para los cultivos.

Se ha trabajado relativamente poco en el mejoramiento de la eficiencia de los cultivos a condiciones adversas del suelo. La exploración del germoplasma de un cultivo, para la búsqueda e identificación de mecanismos que permitan su adaptación a determinadas condiciones limitantes de su producción, es el paso inicial de una solución promisoría que permitiría incorporar características que harían al cultivo eficiente en la utilización de los recursos disponibles, sin altos costos para los agricultores y sin causar deterioro ambiental.

En el caso de eficiencia del frijol para fósforo, la hemos expresado como el crecimiento y rendimiento con relación al P disponible en el suelo o desde enmiendas aplicadas al suelo, incluyendo la capacidad para rendir con bajos niveles de P y respuesta a aplicación de fertilizantes. Teniendo en cuenta los posibles mecanismos de eficiencia de P, podemos distinguir características que le dan eficiencia en la adquisición de P desde su entorno y características que lo hacen eficiente en el uso del P adquirido. Algunos posibles mecanismos de eficiencia para la adquisición de P son: exudados radiculares (Marschner, 1987; Helal, 1990), simbiosis micorrizas-frijol (Lynch et al, 1991; Yan, 1995a,b), arquitectura y actividad radicular. Entre los posibles mecanismos de eficiencia de uso del P adquirido se pueden citar: bajo requerimiento de P en los tejidos, fenología, reserva de P en la semilla.

MATERIALES Y METODOS

Características ambientales de los sitios de trabajo

El trabajo se ha realizado en Colombia, en los municipios de Darien y Popayán en el periodo de 1994-95. Se encuentran a 1200 y 1750 m,s,n,m, presentan una temperatura promedio de 22 y 17 °C y una precipitación promedio de 1800 y 2000 mm /año, respecti-

vamente. Los 2 suelos son andosoles y presentan alta fijación de P. El contenido promedio disponible de P (Bray II) en el suelo de Darien es de 1.0 ppm, el rango de varia de 0.3 - 3.2 ppm. El suelo de Popayán presenta un contenido promedio de P de 2.0 ppm. Los 2 suelos presentan alto contenido de M.O con rango de 2-10%. Los contenidos de los otros nutrientes se encuentran dentro de lo normal. En el pasado los lotes estuvieron con pastos durante mucho tiempo.

Manejo del lote experimental

En los dos sitios el suelo es tipo Andosole de origen volcánico con alta concentración de alófanos y con muy alta capacidad a fijar fósforo en una forma inaccesible para plantas. Inicialmente se tomaron muestras de suelo a una profundidad de 25cm, bajo un sistema de coordenadas con muestras cada 5-10 m. Los valores de contenido de P (Bray II) en las muestras de suelo se utilizaron para levantar un mapa geoestadístico del lote que indica como están distribuidos los niveles de fósforo. El mapa de fósforo del suelo se tomó como uno de los criterios para definir las áreas de bajo y alto fósforo (con y sin stress de P) y como se bloquea sus parcelas en el lote. Así también puede ganar un buen idea de la variabilidad espacial del fósforo disponible y si el lote está apropiado para evaluación de genotipos para su tolerancia.

En el primer semestre de 1994 (94a) se aplicó una dosis de 100 kg/ha de superfosfato triple (SFT) a la zona de alto fósforo. En la zona de bajo fósforo se aplicó una dosis de 25 kg/ha a algunos parches en los cuales el nivel de P fue muy bajo. En los semestres 94b y 95a se aplicaron 100 y 30 kg/ha de SFT a las zonas de alto y bajo P, respectivamente. En el 95b se aplicaron 300 kg/ha de SFT a la zona de alto P para compensar la fijación de P en el suelo y se mantuvo la dosis de 30 kg/ha en bajo P. Las aplicaciones de P en todos los semestres

se han hecho al voleo y se han incorporado con la preparación del suelo.

En cada semestre se está haciendo rotación frijol-maíz parcialmente en el lote y el maíz en cada rotación se está utilizando como indicador para el nivel de P en el suelo. La densidad de siembra del frijol en todos los ensayos es de 166.000 plantas/ha. El maíz se siembra a una densidad de 50.000 plantas/ha. La distancia entre surcos en el lote siempre es de 0.6 m.

Niveles de observación

El trabajo se realiza en tres niveles (A,B,C) en los cuales se incrementa la precisión de observación de C hasta A.

En el nivel C se tienen muchos materiales (> 50), el tamaño de parcela es de 1.2 m² (2 surcos de 1 m) con 3 repeticiones tanto en alto como en bajo P. Este es un nivel exploratorio y en él se intenta identificar materiales promisorios. En este nivel se hace una evaluación visual para determinar adaptación y se mide rendimiento de grano. El tamaño demuestra para rendimiento de grano es de 15 plantas. Los materiales que presentan el mejor comportamiento pasan al nivel B.

El tamaño de parcela en el nivel B fue de 4.8 m² (4 surcos de 2 m) con tres repeticiones tanto en alto como en bajo P. Se observan entre 9-12 materiales y las variables observadas en cada época de muestreo son: Biomasa de parte aérea y de raíz en llenado de vainas, biomasa aérea en madurez fisiológica, rendimiento de grano y tamaño de semilla. Además se observa contenido de P de las muestras en cada época de muestreo. El tamaño de la muestra en llenado de vainas es de 3 plantas, en madurez fisiológica 4 plantas y para rendimiento de grano se cosechan 1.5 m de cada uno de los 2 surcos centrales de la parcela.

Al nivel A llegan los materiales que han mostrado características promisorias en los niveles C y B. El tamaño de parcela en este nivel está entre 9 y 16.8 m² (6 - 8 surcos de 2.5 - 3.5 m.), dependiendo del número de materiales observados y se tienen 3-4 repeticiones en cada nivel. El número de materiales observados en este nivel está entre 12 y 15. Se realizan los mismos muestreos que se hacen en el nivel B pero además se realiza un muestreo de parte aérea y raíz en floración con un tamaño de muestra de 6 plantas por parcela. El tamaño de muestra (parcela útil) para rendimiento de grano varía entre 6 y 10.8 m².

Además de las variables mencionadas para el nivel A, en llenado de vainas se toma una planta representativa de la muestra para realizar un análisis de imagen de la raíz de la planta para estudiar la relación entre arquitectura de raíz y la eficiencia de los materiales para extraer fósforo del suelo. Los resultados de este análisis están en proceso.

Análisis estadístico de los datos

Los ensayos en los tres niveles (A, B y C) se han dispuesto como bloques completos al azar (BCA) en un arreglo de parcelas divididas (split plot) en las cuales la parcela principal es el nivel de P (alto o bajo) y la subparcela el genotipo.

RESULTADOS Y DISCUSION

Aumento de la eficiencia de extracción

Se ha observado gran variabilidad en el rendimiento de grano de los genotipos bien adaptados probados en las dos localidades (Darien y Popayán) bajo los dos niveles de disponibilidad de P (Figura 1). Es interesante observar que algunos genotipos que rinden muy bien sin stress de P, son incapaces de producir semilla efectivamente a bajo P y la

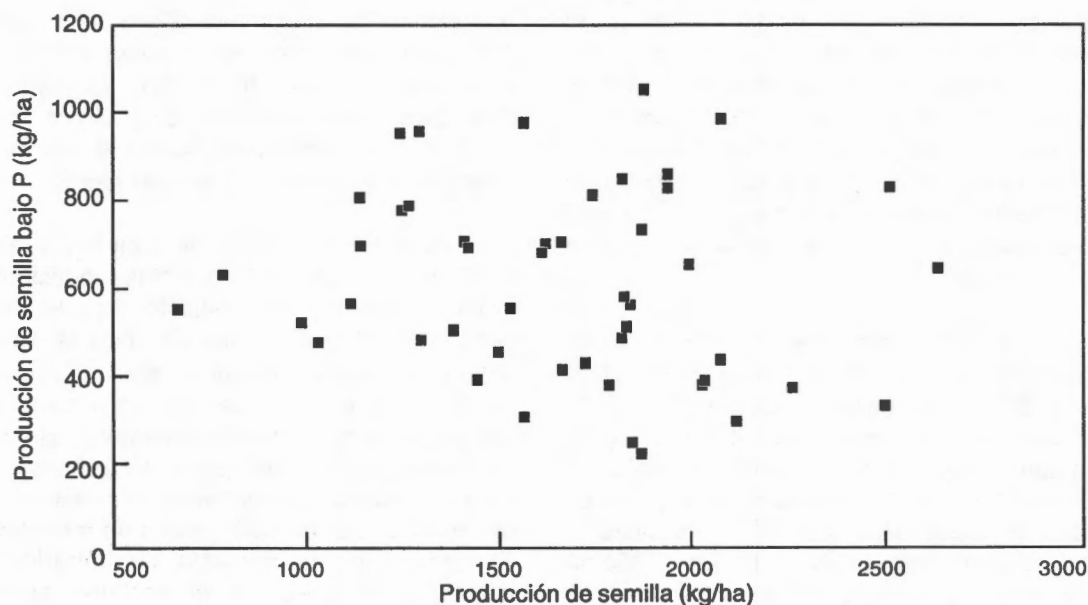


Fig. 1. Rendimiento de 23 genotipos de frijol comun cultivado en dos lugares y dos semestres, bajo de condiciones de alto y bajo P. 1994-1995.

reducción puede ser del 70-90%. Se observa un comportamiento similar en cuanto a acumulación total de P en el cultivo en madurez fisiológica. Aunque se observa mayor correspondencia entre capacidades de extracción a alto y bajo P (Figura 2). Se nota que una gran proporción de los genotipos muestra aceptable acumulación de P bajo condiciones de stress de P y esto es debido principalmente a que los materiales han sido seleccionados tempranamente por su capacidad para rendir en suelos con bajo P. Algunos materiales fueron capaces de acumular aceptablemente P bajo condiciones de alta y baja disponibilidad de este.

La relación entre extracción total de P y producción de biomasa se observa muy bien en la correlación representada en la Figura 3 donde se describe el comportamiento en el campo de 19 cultivares creciendo en alto y bajo P. En ella se observa el efecto sobre la producción de biomasa de mejorar la capaci-

dad del frijol para extraer P del suelo. También demuestra un muy consistente requerimiento de P en los cultivares de frijol. La importancia de la extracción del P total para la producción de semilla se observa en la regresión representada en la Figura 4, aunque también se observa que para un contenido de P, el rendimiento de los cultivares presenta considerable variación.

Se han observado grandes diferencias en el comportamiento de los diferentes genotipos en respuesta a la disponibilidad de P en el suelo. La relación entre biomasa de raíz y extracción de P bajo condiciones limitantes de éste, es débil (Figura 5). Hablando en términos de P extraído por unidad de masa de raíz, se han observado genotipos que son capaces de extraer mucho P a través de una gran biomasa radicular (G1937, G3513, G6111, G6133, G19839 y G23275). Otros genotipos son capaces de tomar relativamente grandes cantidades de P con una más limitada

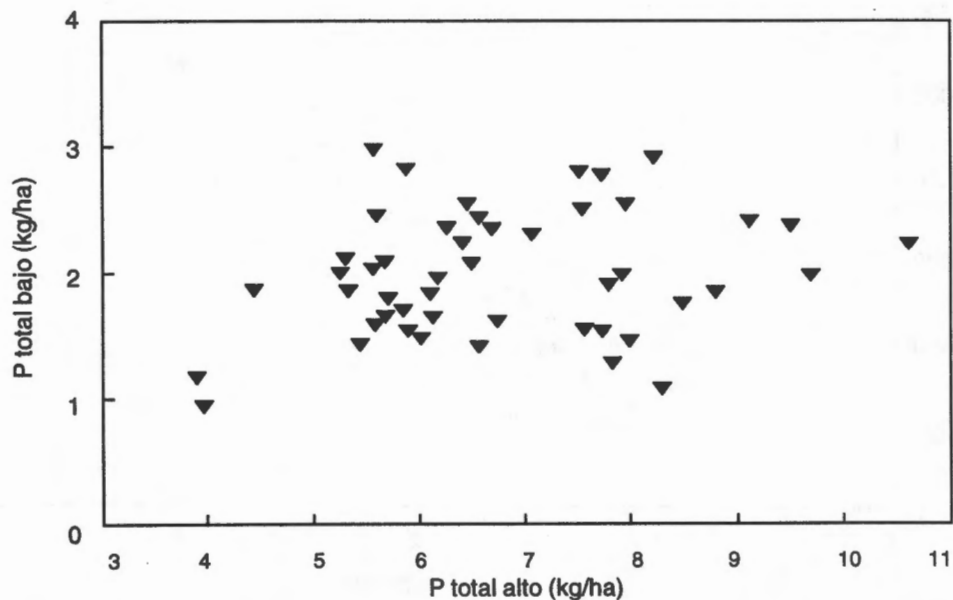


Fig. 2. P total de 23 genotipos de frijol cultivado en dos lugares y dos semestres, bajo de condiciones de alto y bajo P. 1994-1995.

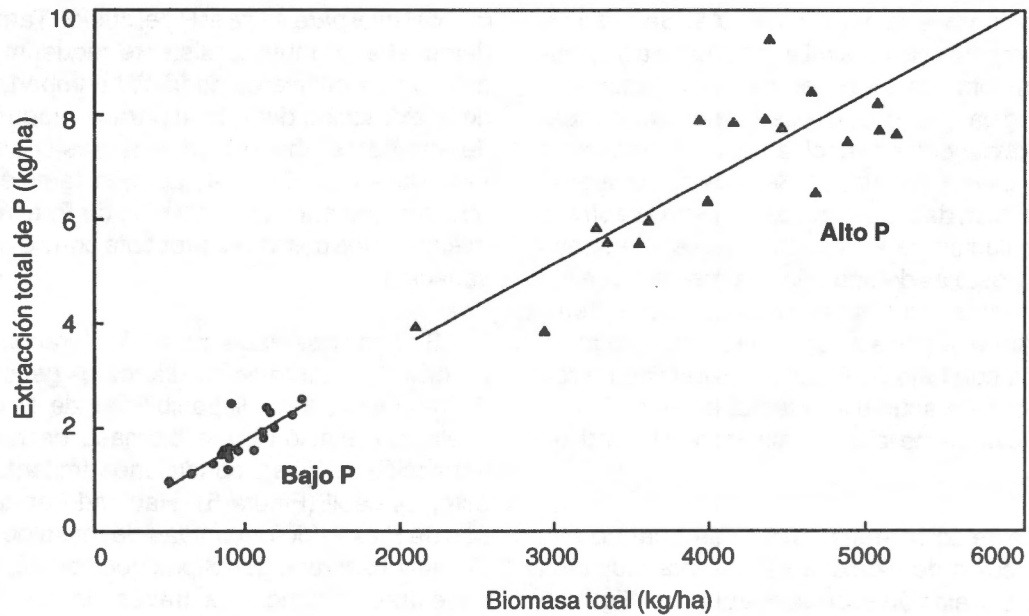


Fig. 3. Biomasa total en madures fisiologica en 19 cultivares por P total bajo alto y bajo disponibilidad de P. Darien, 1994.

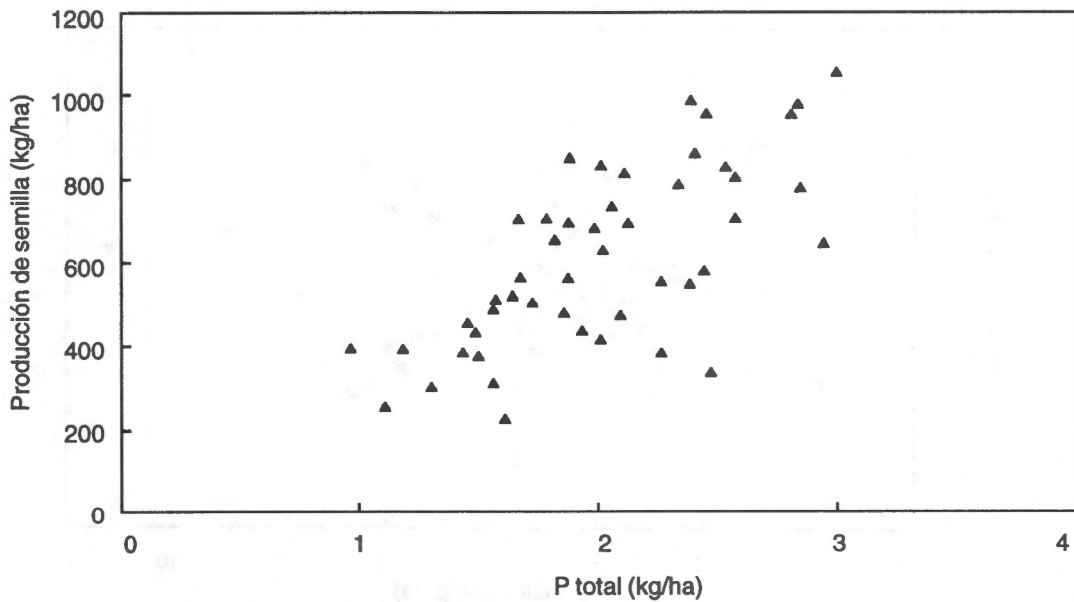


Fig. 4. Rendimiento de 23 genotipos cultivado en condiciones de bajo-P, en relación a P total. Darien y Popayan, 1994-1995.

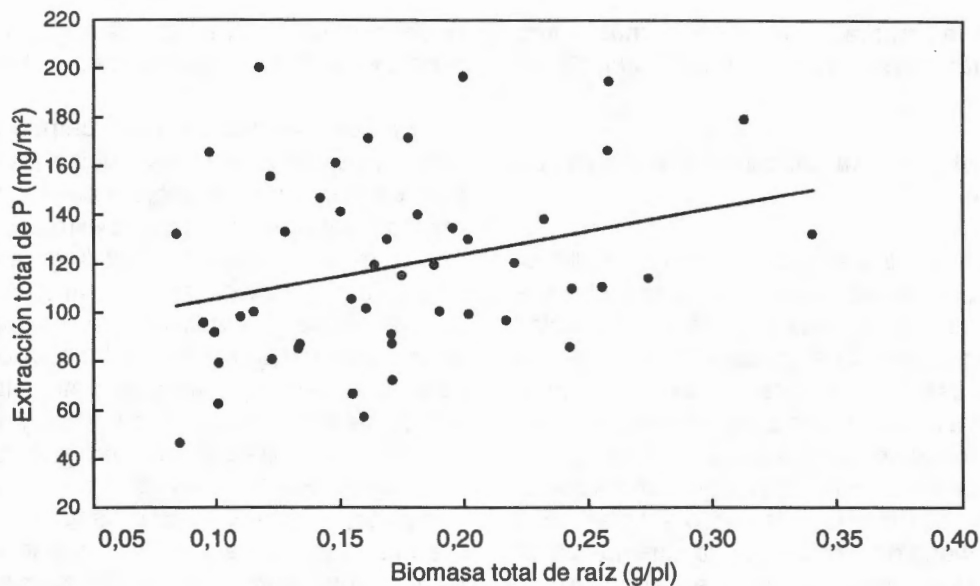


Fig. 5. Biomasa de raíz en la etapa de llenarlo de vainas y P total en madurez fisiológica de 23 genotipos cultivado en suelo de bajo P. Darien y Popayan, 1994-1995.

inversión en biomasa radicular (G6450 y G21212) y algunos producen una gran biomasa de raíz pero toman relativamente poco P bajo stress de P (Tostado, G13772 y G17198). Lo anterior indica que la biomasa de raíz por si sola no es un buen indicador de la capacidad de extracción de P del frijol y que la capacidad de extracción de P probablemente depende de la interacción de factores como longitud y diámetro (área de absorción), volumen de suelo explorado, proliferación de pelos absorbentes.

En todos los ensayos para tolerancia a bajo P realizados hasta ahora se ha colectado el sistema radicular en cada tratamiento y están en proceso de evaluación longitud, distribución diametral, complejidad (dimensión fractal) y números de puntos de crecimiento. Esto permitirá el eventual análisis de las características radiculares de plantas cultivadas en el campo y su relación con la capacidad de extracción de P, dando una mejor

representación de la eficiencia de extracción y una indicación de las características arquitecturales responsables de la eficiencia.

Ha existido la preocupación de que la selección para incrementar la eficiencia de P podría terminar en selección fenológica de materiales tardíos, ya que en estudios anteriores con frijoles de fenología contrastante (días a madurez) en ambientes tropicales y en condiciones de campo variables, mostraron que algunos genotipos tardíos tienen ventaja sobre genotipos precoces en ambientes de bajo P. En el presente trabajo de investigación utilizando 23 genotipos de fenología variable en dos sitios (Darien y Popayán) y en tres ciclos, se demostró que aunque la tendencia general fue la de mejorar el rendimiento de semilla y aumentar el P total con el incremento de los días a madurez, se observó un amplio rango de variabilidad para cada clase de madurez y que los cultivares de madurez

precoz a media tuvieron los más altos rendimientos de P y de semilla (Figura 6).

Aumento de la eficiencia de uso de fósforo

Debido a que el interés primario en el frijol es como cultivo leguminoso de grano, el rendimiento en condiciones de baja disponibilidad de P sigue siendo el principal criterio de selección para la investigación de la tolerancia del frijol a bajo P. Por lo tanto, el reforzamiento de la capacidad de transformar el P escaso en rendimiento de semilla es de gran importancia, más aún cuando hay consenso general sobre la necesidad de incrementar la explotación de las limitadas reservas de P en el suelo con cultivares eficientes en la extracción de P. La identificación del o de los mecanismos específicos que conviertan eficientemente el P de los tejidos en semilla, probablemente hará posible la combinación de esta característica con otras características agronómicas deseables, incluida la de la alta eficiencia en la extracción de P del suelo, para buscar el aumento de la

estabilidad de la productividad y del rendimiento en suelos marginales de baja fertilidad.

En las evaluaciones de campo de 23 cultivares bajo condiciones ambientales variables y stress de P severo, se estableció una relación clara y positiva entre extracción total de P y rendimiento de semilla (Figura 4). Sin embargo, a cualquier nivel de extracción de P se observó considerable variabilidad genética de la capacidad para convertir P en producción de semilla. El comportamiento entre sitios de la EUF de los cultivares entre sitios y semestres fue sin embargo relativamente consistente, permitiendo la caracterización de cultivares capaces de usar este mecanismo. Esto fue importante para asegurar que lo que se estaba observando no fue simplemente un efecto de índice de cosecha (IC), por ejemplo una tendencia hacia el incremento del particionamiento de los recursos de la planta hacia la producción de semilla bajo stress de P. Al examinar la relación entre EUF e IC en condiciones de bajo P, se observa que para una EUF dada existe una amplia variación en los IC de los cultivares (Figura 7). Debido a que

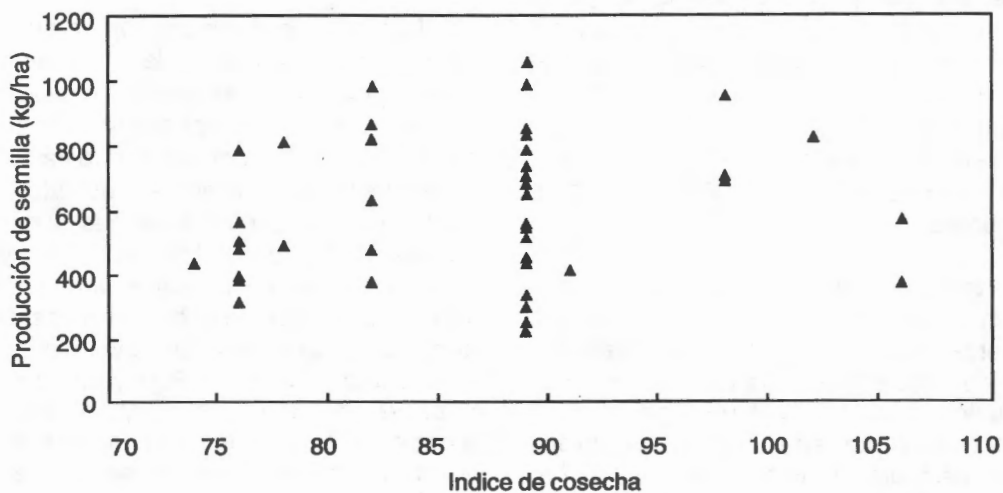


Fig. 6. Rendimiento en relación con días a madurez en 23 genotipos cultivado en suelo de bajo P. Darien y Popayan, 1994-1995.

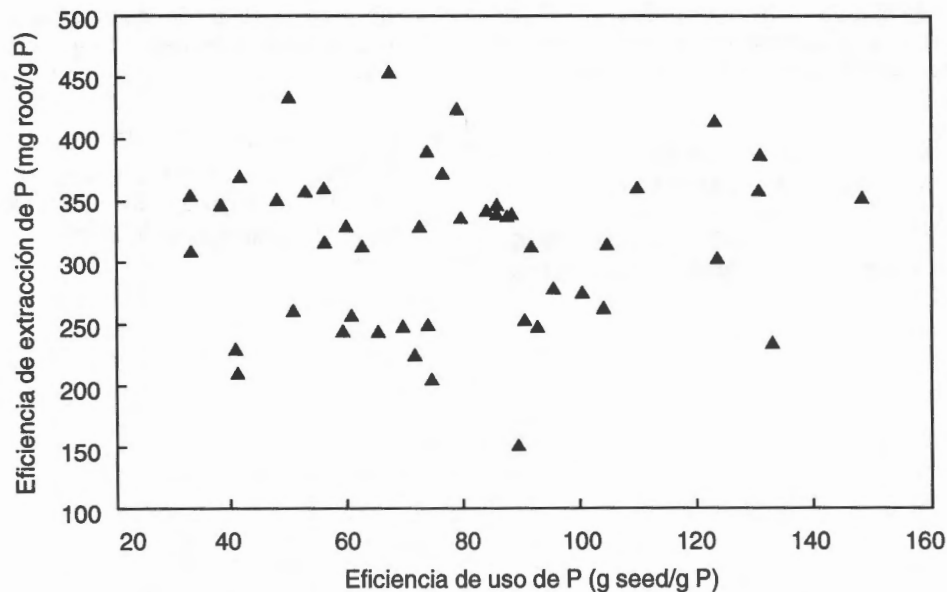


Fig. 7. Eficiencia del uso de P y eficiencia de extracción de genotipos bajo P stress. Darien y Popayan, 1994-1995.

casi todos los cultivares estuvieron bien adaptados en ambas localidades (indicado por el alto rendimiento de semilla en alto P), se concluye que las diferencias en UEF son reales.

La combinación de UEF y la capacidad de extracción de P de un cultivar en condiciones de bajo P da como resultado la "tolerancia a bajo P" del cultivar, mejor expresada aquí como rendimiento de semilla a bajo P. Los cultivares que consistentemente fueron capaces de convertir P de los tejidos de la planta en rendimientos de semilla relativamente altos fueron: G3513, G6450, G16835, G19842, G21212 y G23275. Algunos genotipos incluyendo BAT881, DOR364, G13772, y Tostado, tuvieron una relativamente alta UEF, pero acumularon poco P su crecimiento y por lo tanto produjeron bajos rendimientos de semilla. Los resultados hasta aquí expresados son muy promisorios en términos de identificación de cultivares capaces de rendir

bajo severo stress de P y los mecanismos responsables de su eficiencia. Se puede deducir que aparentemente varios cultivares aparentemente combinan mecanismos de extracción y de uso de P, mientras que otros son aparentemente eficientes en la extracción o uso interno. En el futuro el trabajo se enfocará hacia el entendimiento de estos mecanismos con vista a determinar su heredabilidad e identificación de los correspondientes marcadores moleculares que permitan la incorporación de los genes responsables mediante programas de mejoramiento.

LITERATURA CITADA

- HELAL, H.M. 1990. Varietal differences in root phosphatase activity as related to the utilization of organic phosphates. *Plant Soil* 123: 161-163.

- LYNCH, J.; LAUCHLI, A.; EPSTEIN, E. 1991. Vegetative growth of the common bean in response to P nutrition. *Crop Science* 31:380-387.
- MARSCHNER, H. 1987. *Mineral Nutrition of Higher Plants*. Academic Press, New York.
- YAN, X.; LYNCH, J.P.; BEEBE, S.E. 1995a. Genetic variation for phosphorus efficiency of common bean in contrasting soil types: I. Vegetative response. *Crop Sci.* 35: 1086-1093.
- YAN, X.; LYNCH, J.P.; BEEBE, S.E. 1995b. Genetic variation for phosphorus efficiency of common bean in contrasting soil types: I. Yield response. *Crop Sci.* 35: 1094-1099.
-

EFFECTO DE LA APLICACION DE MICORRIZAS Y ROCA FOSFORICA SOBRE EL CRECIMIENTO Y LA ADQUISICION DE NUTRIMENTOS DE PLANTAS DE FRIJOL EN UN ULTISOL DE COSTA RICA

Mariela Bermúdez¹, Leida Castro²

RESUMEN

Efecto de la aplicación de micorrizas y roca fosfórica sobre el crecimiento y la adquisición de nutrimentos de plantas de frijol en un ultisol de Costa Rica. Con el objetivo de evaluar el efecto de la interacción entre la aplicación de roca fosfórica y la inoculación con la micorriza *Glomus Manihotis* sobre el crecimiento del frijol común, se realizó un ensayo a nivel de campo (San Carlos), utilizando suelo fumigado con bromuro de metilo y suelo sin fumigar. Los tratamientos fueron los siguientes: 1-Suelo fumigado + P; 2-Suelo fumigado + P + *Glomus manihotis*; 3-Suelo fumigado + P + restitución de la microbiota natural del suelo sin micorrizas; 4-Suelo fumigado - P; 5-Suelo fumigado - P + *Glomus*; 6-Suelo fumigado - P + restitución de la microbiota natural del suelo sin micorrizas; 7-Suelo sin fumigar + P; 8-Suelo sin fumigar - P. La dosis de P utilizada fue de 100 Kg/ha en forma de roca fosfórica y de *Glomus manihotis* de 5 g/espeque. Todos los tratamientos fueron inoculados con la cepa de *Rhizobium* CR-477. El experimento se cosechó en la etapa de crecimiento R6 y se determinó: el peso seco de la parte aérea y de la raíz, peso seco de nódulos, % de infección con MVA y contenido de nutrimentos foliares. Los resultados obtenidos en el suelo fumigado (ver gráficos adjuntos) muestran que el tratamiento que produjo mayor producción de materia seca fue el de adición de micorriza y roca fosfórica superando ampliamente este tratamiento al de solo adición de roca fosfórica o de roca fosfórica + restitución de la microbiota natural, evidenciando este hecho, la necesidad de la presencia de micorrizas para la absorción de fósforo por parte de la planta. En el suelo sin fumigar el tratamiento con la adición de fósforo superó al control, sin embargo no fue capaz de alcanzar al tratamiento fumigado + P + micorriza, debido posiblemente a que las cepas nativas no son tan eficientes como *Glomus manihotis* o a que existe competencia por el P de parte de la microbiota natural del suelo. Para la variable % de micorrización, la más alta se obtuvo para el tratamiento en suelo fumigado con fósforo y inoculado con micorriza, cuando solo se adicionó la micorriza el % de infección fue menor, evidenciando como la presencia de P estimula la infección micorrízica. En cuanto a la nodulación en suelo fumigado, esta fue mayor cuando se adicionó fósforo y se inoculó con *Glomus manihotis*, posiblemente la inoculación con la micorriza favoreció la infección y la nodulación con *Rhizobium*. Por otro lado la inoculación con micorrizas favoreció la absorción de N, P, Ca, K, Mg, Mn, Fe, Zn y Cu.

¹ Museo Nacional. Departamento de Historia Natural. San José, Costa Rica.

² Centro de Investigaciones Agronómicas. Facultad de Agronomía, Universidad de Costa Rica. San José, Costa Rica.

ABSTRACT

The effect of micorrhizal inoculation and rock phosphate application on bean growth and uptake of nutrients in a Costa Rican ultisol. A field experiment was conducted in San Carlos, Costa Rica, to determine the interaction between application of rock phosphate and mycorrhizal inoculation. Treatments included a non-mycorrhizal treatment, fumigated with methyl bromide to eliminate native fungi, and applications of P and a strain of *Glomus manihotis* in a factorial experiment. The treatment giving the highest yield was mycorrhiza plus rock phosphate, confirming that mycorrhiza are necessary for optimum plant uptake of P. In non-fumigated soil P addition gave a higher yield than the non-fertilized control but was less than the fumigated +P +mycorrhiza treatment, possibly because the *G. manihotis* strain was more efficient for P uptake than native mycorrhiza. Uptake of all major nutrients was enhanced by mycorrhizal inoculation.



INTRODUCCION

El fósforo forma parte de importantes compuestos que están directamente relacionados con los procesos energéticos de las plantas y en general de los organismos vivos. Normalmente los suelos tienen un bajo contenido de fósforo, pero en algunos suelos del trópico esta situación se hace crítica especialmente por la fijación y retención de los fosfatos. En consecuencia, no siempre que se aplican fertilizantes fosfóricos se garantiza la disponibilidad de este elemento para las plantas (Vinasco-Ossa y Carrillo-Pachon, 1987). En el caso de Costa Rica Bertsch (1986) informa que para el análisis de 13765 muestras de suelo, el 75% presentaron valores menores de 10 ppm de P.

Por otro lado cuando se aplican fertilizantes fosfatados solubles al suelo, estos reaccionan con los componentes del suelo para formar compuestos muy insolubles. Este fenómeno cobra mayor importancia en los suelos ácidos, pero también se presenta en suelos alcalinos (Vinasco-Ossa y Carrillo-Pachon, 1987).

Las Micorrizas Vesículo Arbusculares (MVA) son hongos que están presentes en

todos los suelos e infectan la mayoría de las plantas incluyendo los cultivos agrícolas; cuando están asociadas con plantas superiores juegan un papel muy importante en la nutrición del fósforo, en esta asociación simbiótica el hongo utiliza carbohidratos producidos por la planta, mientras que la planta se beneficia por el aumento en la absorción de fósforo y otros nutrientes a través de las hifas externas que se extienden en la superficie del suelo, esto es de importancia para la absorción de nutrientes de baja movilidad como P, Zn y Cu (Barea y Azcón-Aguilar, 1983). Barea (1991) informa que además las MVA absorben de la solución del suelo ciertas formas de N.

El fósforo es probablemente el nutriente más limitante para el crecimiento y nodulación de leguminosas. Está ampliamente documentado en la literatura que la fijación de nitrógeno por *Rhizobium* tiene un alto requerimiento de energía en forma de ATP. Las MVA que son muy comunes en leguminosas pueden incrementar la absorción de P en suelos con baja disponibilidad de este elemento o donde la fijación de P en el suelo es muy alta. Se han realizado investigaciones sobre la relación tripartita de *Rhizobium*-MVA-leguminosas como soya (*Glycine max*),

frijol (*Phaseolus vulgaris*), *Centrosema*, *Stylozanthes* y se ha demostrado que la nodulación, la fijación de nitrógeno, peso seco y contenidos de fósforo son mayores cuando las plantas están infectadas con MVA (Asimi *et. al.*, 1979; Mosse *et. al.*, 1976; Saif, 1987; Rosemeyer, 1992; Bethlienfalvay, *et. al.*, 1985; Reeves, M. 1992).

Howeler *et. al.* (1987) y Mosse *et. al.* (1976) han demostrado que el frijol presenta un alto requerimiento de P, el cual puede ser suministrado mediante la asociación con MVA. Howeler, Sieverding y Saif (1987) encontraron en Colombia a nivel de invernadero que el frijol aumenta su biomasa (peso seco de la planta) significativamente, al ser inoculado con MVA, ya que este cultivo tiene una alta dependencia micorrícica. Los mismos autores demostraron que la dependencia micorrícica del frijol en suelos con diferentes dosis de P (0, 100, 500 Kg/ha) resultó ser 72%. Como dependencia micorrícica se entiende el nivel o el grado al cual una planta es dependiente de la presencia de micorizas para alcanzar su máxima productividad a un nivel dado de fertilidad del suelo; factores tales como la geometría de la raíz, las especies de MVA, el tipo de suelo y la cantidad de P presente pueden afectar la dependencia micorrícica (Saif, 1987).

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar efecto de la inoculación con micorizas y la aplicación de roca fosfórica sobre el crecimiento del frijol en un Ultisol de la zona Norte de Costa Rica.

MATERIALES Y METODOS

El experimento se llevó a cabo a nivel de campo en la Finca Coope San Juan, San Carlos, Zona Norte de Costa Rica. Se utilizó la variedad de frijol Negro Husteco.

La unidad experimental estuvo constituida por parcelas de 1,5 m², y se realizaron cuatro repeticiones por tratamiento.

El experimento se organizó en 2 parcelas principales una fumigada con Bromuro de metilo y la otra sin fumigar.

En la parcela no fumigada se analizaron dos tratamientos:

- 1- Control (C)
- 2- Adición de 133 kg/ha de P (P).

En la parcela fumigada se analizaron 6 tratamientos

- 1- Control (C)
- 2- Adición de 133 kg/ha de P (P).
- 3- Inoculación con micorizas (*Glomus manihotis*) (M)
- 4- Adición de la misma dosis de P e inoculación con micorizas (P+M)
- 5- Reinoculación de la biota natural del suelo (B)
- 6- Reinoculación de la biota natural del suelo y adición de P (B+P).

Todos los tratamientos se inocularon con la cepa de *Rhizobium* CR-477.

Las variables evaluadas fueron:

- 1- Peso seco de la parte aérea
- 2- Peso seco de la raíz
- 3- % de infección con micorizas
- 4- Peso seco de nódulos
- 5- Contenido de nutrientes foliares (Ca, Mg, K, P, N, Mg, Zn, Fe, Cu).

RESULTADOS Y DISCUSION

Si se observa la Figura 1 se deduce que la adición de roca fosfórica por si misma no parece ser tan benéfica para el crecimiento (peso seco foliar, peso seco de raíz) y absor-

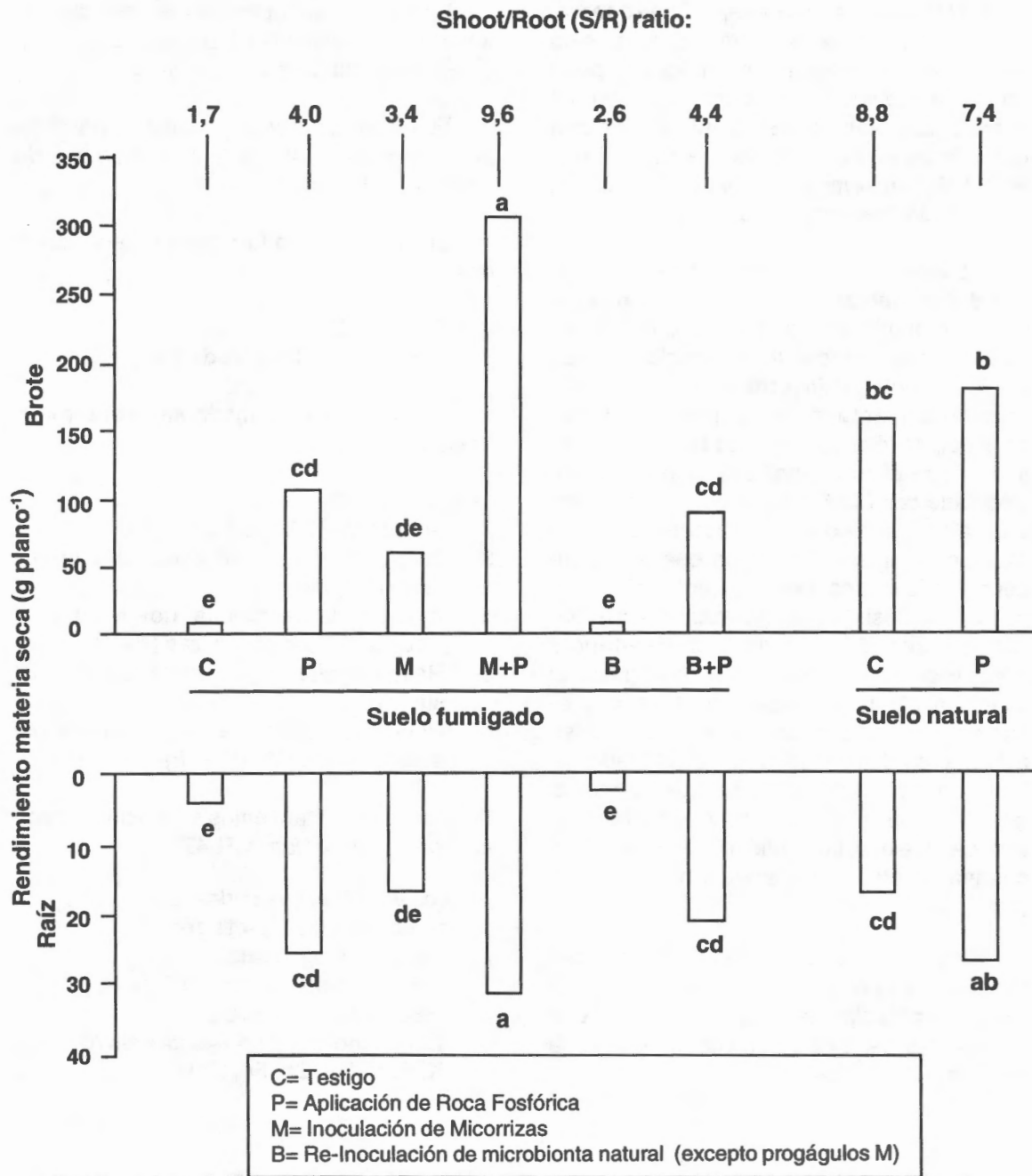
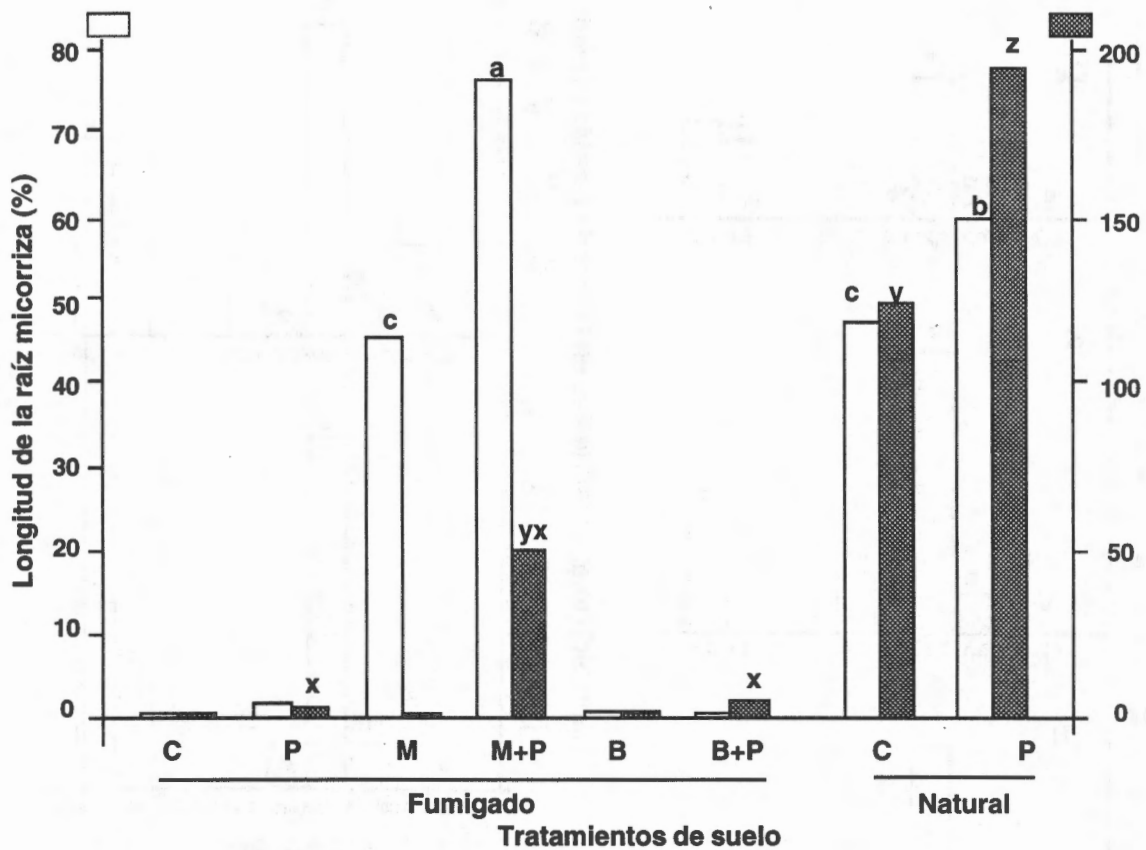


Fig. 1. Efecto de tratamientos microbianos y/o de roca fosfórica sobre el rendimiento (materia seca) de la biomasa de plantas producidas por plantas de frijol con módulos desarrolladas en lotes fumigados y no fumigados. Para cada parámetro, los valores medios (cuatro repeticiones), que no comparten la misma letra, difieren significativamente ($P < 0,05$).



C= Testigo
 P= Aplicación de Roca Fosfórica
 M= Inoculación de Micorizas
 B= Re-Inoculación de microbionta natural (excepto progáulos M)

Fig. 2. Efecto de tratamientos microbianos y/o de roca fosfórica sobre la nodulación y colonización de micorizas en la raíz de plantas de frijol con módulos desarrolladas en lotes fumigados y no fumigados. Para cada parámetro, los valores medios (cuatro repeticiones), que no comparten la misma letra, difieren significativamente ($P < 0,05$).

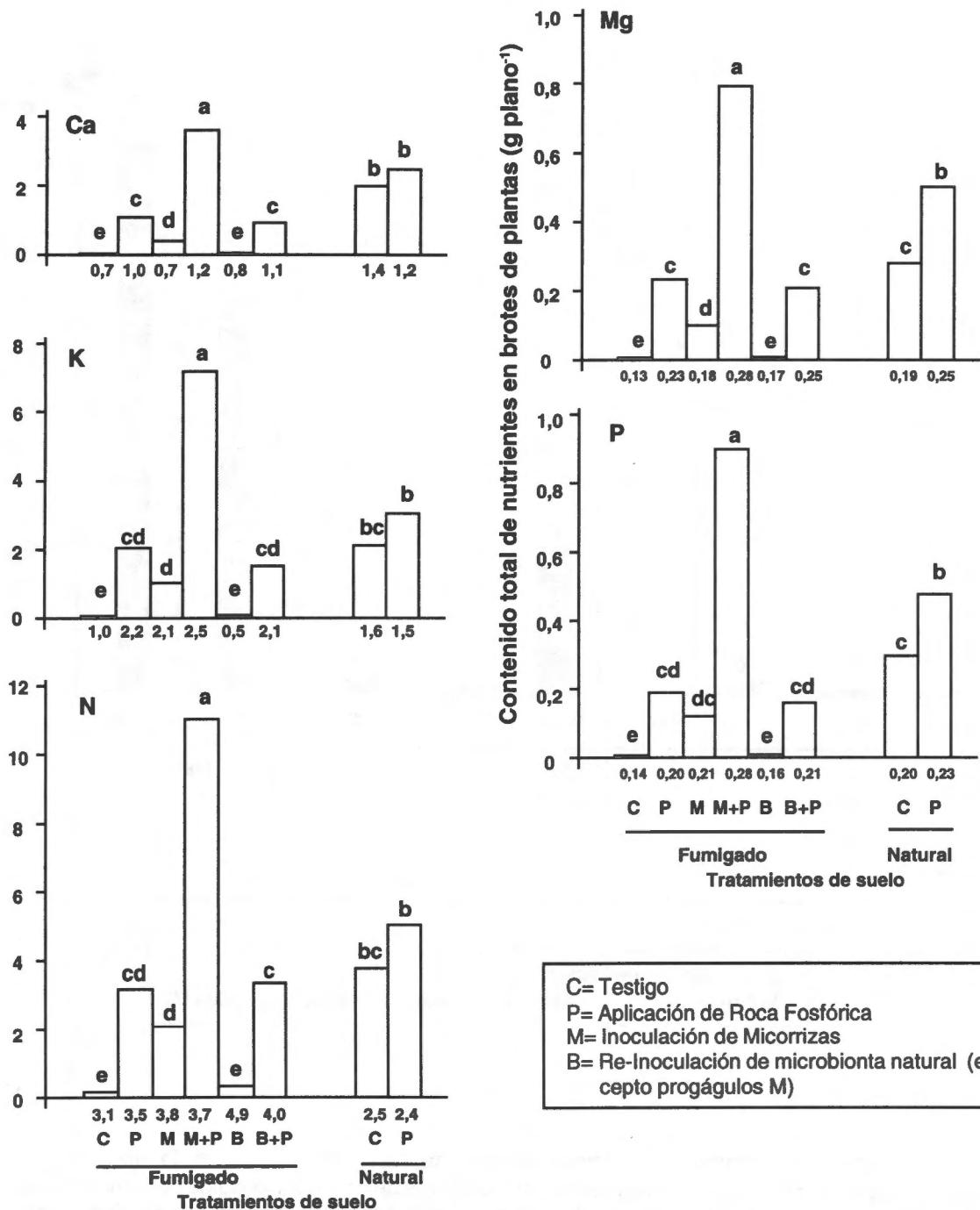


Fig. 3. Efecto de tratamientos microbianos y/o de roca fosfórica sobre la extracción de macro nutrientes por plantas de frijol con módulos desarrolladas en lotes fumigados y no fumigados. Para cada parámetro, los valores medios (cuatro repeticiones), que no comparten la misma letra, difieren significativamente ($P < 0,05$). La concentración de nutrientes, como porcentaje de la materia seca de la planta, se presenta bajo las columnas.

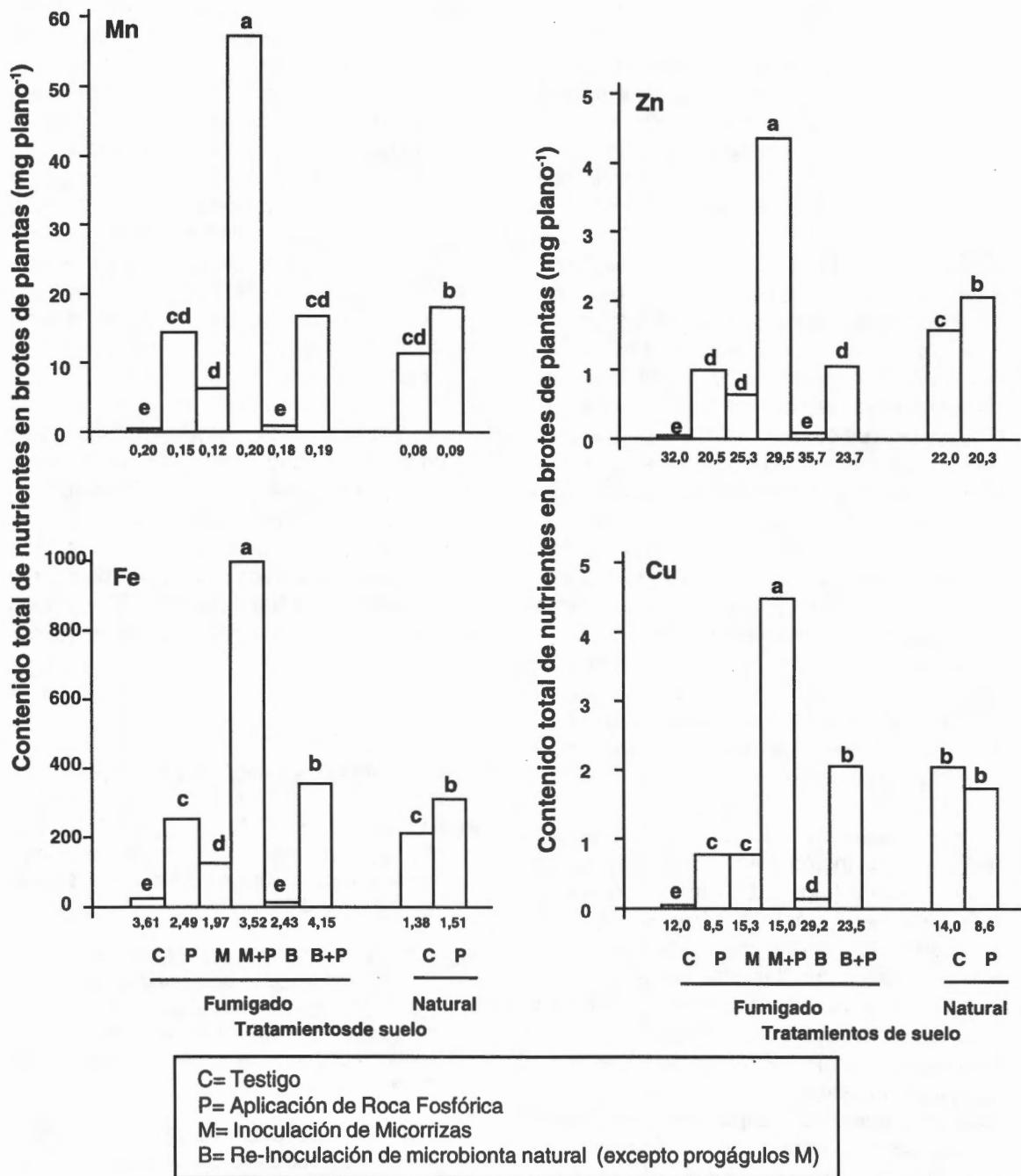


Fig. 4. Efecto de tratamientos microbianos y/o de roca fosfórica sobre la extracción de macro nutrientes por plantas de frijol con módulos desarrolladas en lotes fumigados y no fumigados. Para cada parámetro, los valores medios (cuatro repeticiones), que no comparten la misma letra, difieren significativamente ($P < 0,05$). La concentración de nutrientes, como porcentaje de la materia seca de la planta, se presenta bajo las columnas.

ción de nutrimentos (Figura 3 y 4) del frijol al igual que la adición de solamente la micorriza, sino que el mejor tratamiento fue la mezcla de ambos tratamientos, sin embargo ambos tratamientos por separado también mostraron respuesta si se comparan con el tratamiento control, esto quiere decir que aunque la micorriza de hecho promueve la absorción de P del suelo esta solo podrá tomar el P que sea disponible, si en el suelo no existe P disponible es muy poco el beneficio que pueden dar las micorrizas. En cuanto a la relación parte aérea-parte radical es interesante observar como aunque en los tratamientos con adición de P y micorrizas + P el peso seco es bastante similar hay una gran diferencia en cuanto a la relación siendo de 4 para el tratamiento P y 9,6 para P + M, esto quiere decir que con aproximadamente la misma biomasa radical la planta produjo mas biomasa aérea cuando se aplicó la micorriza junto con el P; dejando de manifiesto el efecto benéfico de la inoculación con micorriza sobre el crecimiento de la planta ya que siendo el P disponible de la misma forma en ambos tratamientos el tratamiento con micorrizas incrementó de una forma muy amplia el crecimiento.

En el suelo sin fumigar y con la aplicación de P se incrementó el % de infección con micorrizas (Figura 2) tanto como con la aplicación de P más micorrizas en el suelo fumigado, sin embargo la respuesta en rendimiento no fue tan grande (Figura 1). Este hecho se puede deber a que las micorrizas nativas se vieron beneficiadas por la aplicación de P; sin embargo estas no fueron tan efectivas como *Glomus manihotis* para promover una respuesta en el crecimiento de la planta ni en la absorción de nutrimentos.

En la Figura 2 se puede observar que las poblaciones naturales de *Rhizobium* específicas para *Phaseolus* son capaces de producir abundantes nódulos pero el *Rhizobium*

leguminosarum inoculado parece ser mucho más efectivo para aumentar los contenidos de N cuando las plantas fueron inoculadas con micorrizas y se suplió una adecuada cantidad de roca fosórica, de aquí se deduce la complementareidad que pueden tener las micorrizas y *Rhizobium*. Sin embargo el aumento en la concentración de N en el tratamiento P+M en suelo fumigado podría ser también interpretado como una consecuencia de la habilidad de las micorrizas para aumentar la absorción de N del suelo, posibilidad que ya ha sido documentado en la literatura.

La microbiota no simbiótica reinoculada en un suelo fumigado parece no tener efecto sobre las variables evaluadas. Sin embargo en la naturaleza es probable que esta interactue positivamente con los hongos micorrícicos, este hecho se puede deducir si se observan los tratamientos C y P en suelo natural y suelo fumigado en las variables evaluadas.

LITERATURA CITADA

- HOWELER, R.; SIEVERDING, E.; SAIF, S. 1987. Practical aspects of mycorrhizal technology in some tropical crops and pastures. *Plant and Soil* 100:249-283.
- ASIMI, S.; GIANINAZZI PEARSON, V.; GIANINAZZI, S. 1979. Influence of increasing soil phosphorus levels on interactions between vesicular-arbuscular mycorrhizae and *Rhizobium* in soybeans. *Canadian Journal Botany* 58:2200-2205.
- BAREA, J.M.; AZCON-AGUILAR, C. 1983. Mycorrhizas and their significance in nodulating nitrogen-fixing plants. *In: Advances in Agronomy* 36:1-54. Academic Press. New York.
- BAREA, J.M. 1991. Vesicular-arbuscular mycorrhizae as modifiers of soil fertility. *Advances in Soil Science*. Vol. 15 40 pag.

- BERTSCH, F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. 75 p.
- BETHENFALVAY, G.; ULRICH, J.; BROWN, M.S. 1985. Plant response to mycorrhizal fungi: Host, endophyte and soil effects. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 49:1164-1168
- HOWELER, R.; SIEVERDING, E.; SAIF, S. 1987. Practical aspects of mycorrhizal technology in some tropical crops and pastures. *Plant and Soil* 100:249-283.
- MOSSE, B.; POWELL, C.; HAYMAN, D.. 1976. Plant growth responses to vesicular arbuscular mycorrhiza. IX. Interactions between VA mycorrhiza, rock phosphate and symbiotic nitrogen fixation. *New. Phitol.* 76:331-342.
- REEVES, M. 1992. The role of VAM fungi in nitrogen dynamics in maize-bean intercrops. *Plant and Soil.* 144: 85-92.
- ROSEMEYER, M.; GLIESSMAN, S. 1992. Modifying traditional and high-input Agroecosystems for optimization of microbial symbioses: A case study of dry beans in Costa Rica. *Agricultural, Ecosystem and Environment* 40:61-70.
- SAIF, S. R. 1987. Growth responses of tropical forage plant species to vesicular arbuscular mycorrhiza. I. Growth, mineral uptake and mycorrhizal dependency. *Plant and Soil* 97: 25-35.
- VINASCO-OSSA, C.; CARRILLO-PACHON, I. 1987. El P en el suelo y su importancia en el cultivo del café. Federación Nacional de Cafetaleros de Colombia. Centro Nacional de Investigación de Café. *Boletín Técnico* # 12. p. 1-34.

SUELOS TROPICALES DEL SURESTE MEXICO: DIAGNOSTICO DE SU POTENCIAL PRODUCTIVO EN FRIJOL ¹

Jesús Uresti ², Ernesto López ²

RESUMEN

Suelos tropicales del sureste de México: Diagnóstico de su potencial productivo en relación al cultivo de frijol. Utilizando la información obtenida por INEGI para clasificar 678 perfiles de suelos localizados en el sureste de México, se describieron 37 subunidades de suelo basados en doce características físico-químicas relacionadas con su fertilidad y capacidad de retención de humedad. Las características de cada suelo fueron contrastadas con los requerimientos edáficos e hídricos del cultivo de frijol lo cual permitió identificar como principales limitantes generales para la producción de frijol a la baja disponibilidad de nutrientes debido a la acidez del suelo, entre los que destaca el fósforo, y a las deficiencias y exceso de humedad. La interacción de estas limitantes permitió agrupar los 37 tipos de suelo en tres potenciales productivos, así como sugerir líneas de investigación para desarrollar tecnología de producción de frijol acorde con las limitantes edáficas en cada nivel de potencial productivo.

ABSTRACT

Tropical soils of southeast Mexico: Potential production diagnostics in relation to dry bean crop production. Using the data obtained by INEGI from 678 soil profiles located in southeast México, 37 soil types were described according to twelve physical and chemical characteristics related to soil fertility and water holding capacity. The characteristics of each of the 37 soils were compared with the dry bean soil and water requirements. From this, it was possible to identify three main broad constraints for bean production: 1) Soil nutrients low availability due to acidity, such as Phosphorus; 2) Excess of soil moisture content and 3) low soil moisture content. The interaction of the fertility and water holding capacity constraints allowed to group the 37 soils in low, medium and high production potential levels for bean production. In order to develop production technology according to the soil constraints, research guidelines are given for each of the three production potential levels.



¹ Parte del proyecto PROFRIJOL en Veracruz, México.

² Investigadores del Campo Experimental Cotaxtla-INIFAP. Apartado Postal 429. CP 91700 Veracruz, Ver. México. Teléfono (29) 34 83 54 Fax (29) 34 85 91.

INTRODUCCION

En las zonas tropicales del sureste de México, se encuentra una gran diversidad de suelos los cuales presentan un amplio rango de variación en sus características Físico-Químicas. Aunque esta variación es deseable, también presenta limitantes para el óptimo desarrollo y obtención de altos rendimientos de cultivos.

Ante esta diversidad y las diferentes necesidades edáficas e hídricas del cultivo de frijol, es inminente que existan áreas con diferente potencial para la producción de esta leguminosa. Estas diferencias originan la necesidad de realizar diferentes programas de investigación con el fin de obtener tecnologías para el mejor manejo del suelo y cultivo según su potencial productivo, que resulten en altos rendimientos de frijol en forma sostenida y económicamente viable. Para lograrlo, es necesario identificar estos potenciales, así como las limitantes de la producción de acuerdo con los requerimientos hídricos y edáficos de la planta de frijol.

La correcta planeación para el uso y manejo del suelo y cultivos, es una de las principales razones por las cuales se han desarrollado sistemas de clasificación de suelos, agrupándolos según características afines relacionadas con la producción de cultivos. En el presente trabajo, los suelos tropicales del sureste de México clasificados según la clasificación FAO-UNESCO, fueron reagrupados considerando doce características Físico-Químicas relevantes para la producción del cultivo de frijol con el objetivo de :

1. Identificar las limitantes edáficas e hídricas para la producción de frijol y definir su potencial de producción.
2. Formular recomendaciones sobre las líneas de investigación a seguir según las limitantes de cada potencial productivo.

MATERIALES Y METODOS

Para integrar el presente trabajo y cumplir con los objetivos planteados, se realizaron las siguientes actividades principales:

- 1) Descripción de los suelos tropicales del sureste de México.
- 2) Identificación de las limitantes edáficas e hídricas y definición de potenciales de producción para el cultivo de frijol.
- 3) Ubicación de las zonas productoras de frijol del estado de Veracruz dentro del marco de los potenciales de producción.
- 4) Formulación de recomendaciones sobre las líneas de investigación a seguir marcadas por las limitantes de la producción en cada potencial productivo.

Descripción de los Suelos Tropicales

La información utilizada para la descripción de los suelos se obtuvo a partir de los datos de campo y analíticos reportados en 24 cartas edafológicas escala 1:250,000 que cubren la mayor parte de la región tropical del sureste de México y fueron editadas entre los años de 1982 a 1989 por el Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). Se utilizó la información de 678 perfiles de suelo distribuidos en 37 subunidades según la clasificación FAO-UNESCO. La descripción de cada subunidad de suelo se basó en las siguientes 12 características físico-químicas: pH, Porcentaje de Saturación de Bases (PSB), K, Ca, Mg, P, Porcentaje de Materia Orgánica (MO), Capacidad de Intercambio Cationico (CIC), Profundidad del suelo, Textura, Drenaje Interno y Estructura.

Definición de Potenciales Productivos

Una vez descritas las 37 subunidades de suelo, que desafortunadamente por falta de

espacio no se presentan en este trabajo, éstas se agruparon según su potencial productivo, considerando la fertilidad, o capacidad de retención de humedad y aireación del suelo. Mediante un cuadro de doble entrada utilizando por un lado los potenciales de fertilidad y por el otro los relacionados con la disponibilidad de humedad se formó un mosaico de interacciones. Las características de los suelos dentro de cada cuadrante fueron contrastados con los requerimientos edáficos e hídricos del cultivo de frijol, lo cual permitió identificar las principales limitantes de la producción en base a las cuales se definieron tres principales potenciales productivos.

Ubicación de Zonas Productoras de Frijol dentro del Marco de los potenciales productivos

Las subunidades de suelo localizadas en las zonas productoras de frijol en el estado de Veracruz, México, dentro del área de influencia de las actividades de PROFRIJOL, se ubicaron dentro del Marco de los Potenciales productivos previamente definidos. Esto permitió identificar las principales limitantes de la producción en éstas áreas así como su importancia.

RESULTADOS Y DISCUSION

Definición de los Potenciales Productivos

De acuerdo con el nivel de fertilidad del suelo se obtuvieron dos grupos con diferente potencial productivo:

- A) Suelos ácidos infértiles.
- B) Suelos neutros fértiles.

Según la capacidad del suelo para almacenar agua, se obtuvieron tres grupos con diferente potencial productivo:

- 1) Suelos con baja capacidad de retención y alta probabilidad que se presente deficiencia de humedad.
- 2) Suelos con capacidad de retención media sin problemas de deficiencia o exceso de humedad.
- 3) Suelos con alta capacidad de retención y alta probabilidad que se presente exceso de humedad.

En el Cuadro 1 se muestran las seis interacciones obtenidas y el potencial productivo asignado según el nivel de fertilidad y capacidad de retención de humedad de los suelos.

Bajo Potencial Productivo (Cuadrantes 1A, 1B, 3A y 3B).

Los suelos con bajo potencial productivo presentan fuertes limitantes para la producción de frijol. En dos de los cuatro ambientes el cultivo es sometido a doble estrés por deficiencia de nutrientes y deficiencias hídricas (Cuadrante 1A) o bien, por deficiencia de nutrientes y deficiencia de oxígeno (Cuadrante 3A) debido a las condiciones anaeróbicas prevalentes en el suelo como resultado del exceso de humedad.

En el caso del Cuadrante 1B, es muy probable que no se presenten en estos suelos problemas asociados al contenido de nutrientes ya que sus niveles, al menos de los macronutrientes con excepción del fósforo, son altos. La principal limitante para la obtención de altos rendimientos de frijol es el estrés hídrico como consecuencia de la baja capacidad de retención de humedad de los suelos de textura gruesa y/o someros.

En el caso de los suelos hidromórficos (Cuadrante 3B), la cantidad de nutrientes en el suelo no presenta problema, éste radica en su

Cuadro 1. Agrupación de los suelos tropicales del sureste de México según su potencial para la producción de frijol.

Nivel de Fertilidad	Capacidad de Baja (1) deficiencia	Retención de Media (2) Optima	Humedad Alta (3) Exceso
Suelos Acidos infértiles (A)	T. húmico T. órtico Q. cámbico B. dístrico B. ferrálico R. dístrico 1A: Potencial bajo	A. húmico A. órtico A. plíntico L. férrico L. plíntico 2A: Potencial medio	B. húmico B. gléyco 3A: Potencial bajo
Suelos neutros fértiles (B)	R. calcárico R. éútrico Rendzina Litosol 1B: Potencial bajo	B. cálcico B. crómico B. éútrico N. éútrico L. crómico L. órtico K. cálcico H. calcárico H. háplico H. lúvico 2B: Potencial alto	G. calcárico G. mólico G. éútrico G. plíntico G. vértico L. gléyco V. crómico V. pélico 3B: Potencial bajo

A: Acrisol
K: Castañozem
G: Gleysol

T: Andosol
H: Feozem
L: Luvisol
V: Vertisol

Q: Arenosol
I: Litosol
R: Regosol

B: Cambisol
N: Nitosol
E: Rendzina

baja disponibilidad y absorción por la planta de frijol debido a las condiciones anaerobicas a que es sometida.

Además del efecto negativo directo que sobre el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo de frijol tiene la acidez del suelo, la deficiencia y el exceso de humedad, éstos influyen en forma negativa sobre otros factores de la producción afectando por lo tanto el rendimiento del frijol.

La acidez del suelo frena el desarrollo de muchos microorganismos como las bacterias *Rhizobium phaseoli* que fijan el nitrógeno

atmosférico, disminuye la cantidad de elementos nutritivos asimilables como el caso del fósforo e incrementa la disponibilidad de elementos tóxicos como Al y Mn. Esto último es particularmente cierto para los suelos ácidos de este potencial productivo con textura gruesa o media, alto contenido de materia orgánica y bajo porcentaje de saturación de bases, pero alta capacidad de intercambio catiónico, indicando una predominancia del Al y Mn.

Debido que las plantas toman los nutrientes de las soluciones coloidales, la deficiencia de humedad limita la disponibilidad de éstos para las plantas.

Bajo condiciones anaerobicas se limita la acción de muchos microorganismos y reacciones en el suelo que limitan la disponibilidad de nutrientes e incrementan la disponibilidad de iones tóxicos, además, se reduce considerablemente la tasa de respiración del cultivo de frijol, limitando su crecimiento, desarrollo y rendimiento. En suelos ácidos el exceso de humedad incrementa el contenido de Fe y Mn pudiendo alcanzar niveles tóxicos para el cultivo de frijol. Las condiciones anaerobicas frenan el desarrollo de las bacterias nitrificantes reduciéndose por lo tanto la disponibilidad de nitrógeno, así mismo, estas condiciones de exceso de humedad incrementó el riesgo de enfermedades radiculares fungosas. En cualquiera de las cuatro condiciones anteriores, el rendimiento de frijol máximo esperado en los suelos de este bajo potencial productivo es igual o menor a 500 kg/ha.

Potencial Productivo Medio (Cuadrante 2A).

En el caso de este potencial (Cuadrante 2A), los suelos tienen baja probabilidad de presentar restricciones de humedad, sin embargo, su baja disponibilidad de nutrientes debido a la acidez, bajo PSB y bajo contenido de K, Ca, Mg y P, limitan la obtención de altos rendimientos. Bajo estas condiciones, el rendimiento de grano máximo esperado puede fluctuar entre 500 y 1000 kg/ha.

Alto Potencial Productivo (Cuadrante 2B).

Los suelos dentro de este potencial productivo no presentan restricciones edáficas o hídricas para la obtención de altos rendimientos de grano de frijol. La disponibilidad de nutrientes es aceptable con excepción del fósforo el cual se encuentra en cantidades que varían de bajo a medio. La textura, profundidad y drenaje de estos suelos ofrecen condiciones para obtener una buena disponibilidad de humedad con bajas probabilidades de que se presenten problemas por deficiencia o

exceso. El rendimiento de grano esperado es mayor de 1000 kg/ha y para lograrlo solo es necesario realizar las labores normales de un buen manejo del suelo y cultivo.

Ubicación de las zonas productoras de frijol en Veracruz dentro del Marco de los Potenciales de Producción

La superficie total de las zonas productoras de frijol en el estado de Veracruz ocupa 1,146,288 ha. El 64% de éstas presenta bajo potencial, integrado por suelos con problemas debido principalmente al exceso de humedad, seguidos por las deficiencias hídricas y baja disponibilidad de nutrientes entre los que destaca el fósforo. El 27% de la superficie la ocupan suelos de alto potencial productivo sin problemas de deficiencia o exceso de humedad y nutrientes y el 9% restante la ocupa el potencial productivo medio, integrada por suelos con problemas de deficiencia de nutrientes debido a la acidez y baja fertilidad del suelo.

De acuerdo con lo anterior, el 73% del área presenta diversos problemas edáficos que por orden de importancia según la superficie ocupada son: 1) Exceso de humedad, 2) deficiencia de humedad y 3) Acidez y baja disponibilidad de nutrientes.

Líneas de Investigación recomendadas

A continuación se sugieren las principales líneas de investigación con el fin de desarrollar tecnologías de producción de frijol acorde con las limitantes edáficas:

1. Líneas de investigación comunes para los tres potenciales de producción.
 - a) Mejor caracterización de cada uno de los potenciales.
 - b) Identificación de otros factores de la producción que hagan más eficiente

- y redituable el uso de los recursos suelo y agua.
- c) Uso, Manejo y Conservación del suelo y agua.
 - d) Manejo de las limitantes impuestas por el bajo contenido y disponibilidad de fósforo en el suelo.
 - e) Selección de tecnologías disponibles para cada potencial productivo y validarlos.
2. Líneas de investigación para potenciales productivos con problemas de exceso de humedad.
 - a) Sistemas de drenaje.
 - b) Manejo del suelo y cama de siembra mediante labranza.
 - c) Control de enfermedades fungosas.
 3. Líneas de investigación para potenciales con problemas de acidez y baja disponibilidad de nutrientes.
 - a) Prácticas que determinen mayor disponibilidad de nutrientes en el suelo como el encalado.
 - b) Uso de variedades tolerantes a la acidez.
 - c) Uso de cepas de *Rhizobium phaseoli*.
 4. Líneas de Investigación para potenciales productivos con problemas de sequía.
 - a) mejorar capacidad de retención de humedad del suelo mediante la labranza de conservación y cultivos de cobertera y abonos verdes.
 - b) Uso de variedades tolerantes a sequía.
 - c) Uso de cepas de *Rhizobium phaseoli*.
 5. Líneas de Investigación para el alto potencial productivo sin limitantes edáficas e hídricas.
 - a) Uso de la labranza de conservación.
 - b) Uso de cepas de *Rhizobium phaseoli*.

CONCLUSIONES

Se identificaron tres limitantes edáficas generales para la obtención de alto rendimiento de grano de frijol, las cuales se relacionan con la baja disponibilidad de nutrientes, debido a la acidez, entre los que destaca el fósforo, y estrés hídrico debido a la deficiencia o exceso de humedad. La interacción de estas limitantes permitió definir tres potenciales productivos así como formular sugerencias sobre las principales líneas de investigación a seguir las cuales en forma general son: 1) Mejoramiento y conservación del suelo, 2) Control de la deficiencia y exceso de humedad, 3) uso de variedades tolerantes a acidez y/o sequía, 4) Sistemas de labranza de conservación, 5) Selección y validación de Tecnologías disponibles según las limitantes de cada potencial y 6) Caracterización más detallada de los potenciales productivos e identificación de otros factores de la producción que hagan más eficiente el uso del suelo y agua.

RECOMENDACIONES DE MANEJO DE LA FERTILIZACION DEL CULTIVO DE FRIJOL EN COSTA RICA

*José Corella*¹

RESUMEN

Recomendaciones de manejo de la fertilización del cultivo de frijol en Costa Rica. Se presenta en este artículo un resumen de algunos logros relevantes en 10 años de investigación en la fertilización del cultivo de frijol en Costa Rica. El artículo se divide: a) en una introducción general, b) requerimientos nutricionales de algunos cultivares en Costa Rica, c) la calibración de los valores de referencia de análisis foliares con las metodologías de extracción que se utilizan en el laboratorio del ministerio de Agricultura y Ganadería y sus comparación con lo reportado por otros autores, d) la respuesta del cultivo de frijol a la fertilización, esta sección es la más extensa y se divide en macronutrientes y micronutrientes. En cuanto al nitrógeno se comenta la variabilidad entre ambientes y cultivares en su respuesta al nitrógeno y la calibración del análisis químico de materia orgánica con la respuesta de nitrógeno en el campo, también se incluye una tabla en la cual se expresan los kg ha⁻¹ de N para un rendimiento dado. En el caso del fósforo se muestra la calibración de Olsen modificado como guía de fertilización fosforada, el uso de fuentes baratas de fósforo y la selección de genotipos que sean más eficientes extrajendo fósforo del suelo. También se mencionan los principales logros en encalado, como el nivel crítico de saturación de aluminio, fórmulas que predicen la cantidad de carbonato de calcio a aplicar y cuales variedades son tolerantes a esta condición. En referencia la potasio, magnesio, azufre y micronutrientes se reportan los valores en el suelo que se pueden utilizar como herramientas de decisión de fertilización en el cultivo de frijol y por último la literatura consultada.

ABSTRACT

Recommendations for bean fertilization in Costa Rica. Presented are relevant examples of fertilization practices in Costa Rica condensed from 10 years of research. Included are nutritional requirements of some bean cultivars in Costa Rica, calibration of reference values of foliar analysis using the extraction methods approved by the Ministry of Agriculture and their comparison with values reported by other authors, and bean responses to fertilization divided into micro- and macronutrient sections. Because of the variability encountered between environments and cultivars for response to N fertilization in the field and the relationship between chemical analysis of organic matter and N response, a table relating kg N ha⁻¹ and yield is also presented. In the case of P, the modified Olsen method is used as a guide to P fertilization, and the use of inexpensive P sources and genotypes efficient for P extraction from soils is discussed. The principles of liming acid soils are also discussed, including critical aluminum saturation levels, formulas to predict applications of calcium carbonate, and varieties tolerant to acid soils. Values of potassium, magnesium, copper and other micronutrients in soils are also discussed as tools for fertilization decisions.

¹ Unidad de suelos, Subdirección de Investigaciones Agrícolas, Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José, costa Rica.

INTRODUCCION

El programa de investigación de la Unidad de Suelos en fertilización del cultivo del frijol, a destinado todos sus esfuerzos hacia el uso de fuentes químicas de nitrógeno. Las investigaciones se han desarrollado en su mayoría en campos de agricultores en diversos agroambientes frijoleros de Costa Rica.

Según Scholz (25), las áreas en donde se siembra frijol, incluyen una gran diversidad de ordenes de suelos que van desde Mollisoles,

Inceptisoles (Eutropepts, Pystropepts y Humitropepts), Andisoles, Alfisoles y Ultisoles; es importante considerar que estos suelos se ubican desde el nivel del mar hasta 1500 msnm. Lo anterior nos da una gran diversidad de agroambientes en los cuales se siembra frijol, por esta razón las investigaciones de respuesta a la fertilización se ubicaron en las zonas que representen cada una de estos agroambientes (Figura 1). Las soluciones extractoras de suelo y foliar para los cuales la Unidad de Suelos ha trabajado para obtener niveles críticos se observan los Cuadros 1 y 2.

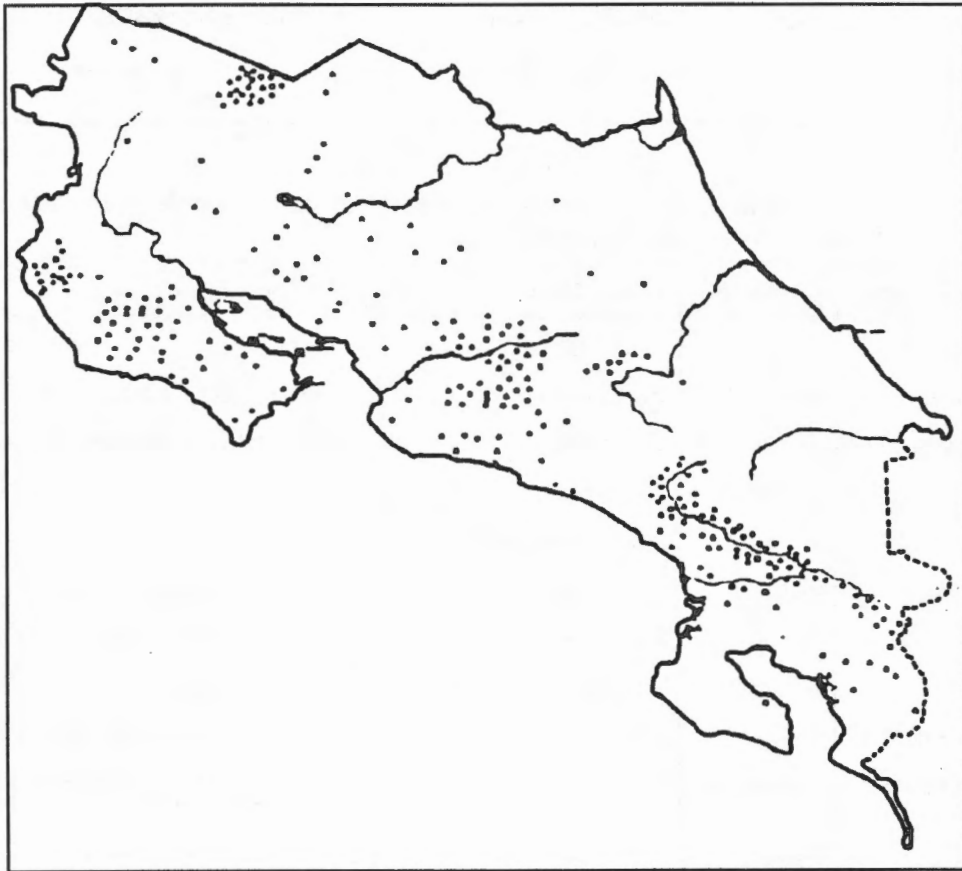


Fig. 1. Principales zonas frijoleras de Costa Rica.

Cuadro 1. Metodología de análisis de tejido vegetal utilizado en el laboratorio de la Unidad de Suelos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (26).

Características	Unidad	Metodología	Determinación
Nitrógeno	dg kg ⁻¹	K ₂ SO ₄ + H ₂ SO ₄ conc.	Titulación H ₂ SO ₄ 0,0200N
P	dg kg ⁻¹	1:30 H ₂ SO ₄ conc.+metanol+ H ₂ SO ₄ conc.	Colorimetrica Azul de molibdeno.
Ca y Mg	dg kg ⁻¹	1:30 H ₂ SO ₄ conc. + metanol + H ₂ O ₂ conc. + La ₂ O ₃ 0,5% y 1%	Espectrofotómetro de absorción atómica.
K	dg kg ⁻¹	1:30 H ₂ SO ₄ conc. + metanol + H ₂ O ₂ conc.	Espectrofotómetro de absorción atómica.
Zn-Mn-Cu-Fe	mg kg ⁻¹	1:30 H ₂ SO ₄ conc. + metanol + H ₂ O ₂ conc.	Espectrofotómetro de absorción atómica.
Azufre	dg kg ⁻¹	Mg(NO ₃) ₂ + metanol	Turbidimetría BaCl ₂ x 2H ₂ O + pvp k30
Boro	mg kg ⁻¹	Mg(NO ₃) ₂ + metanol	Turbidimetría Curcumina + metanol + H ₂ SO ₄ conc.

Cuadro 2. Metodología de análisis de suelos utilizadas en el laboratorio de la Unidad de Suelos del Ministerio de Agricultura y Ganadería (26).

Características	Unidad	Metodología	Determinación
pH (H ₂ O)-pH (KCl)		10:25 H ₂ O ó KCl 1N	Potenciométrica
Acidez extraíble	cmmol(+) L ⁻¹	2,5:25 KCl 1N	Titulación NaOH 0,01N
Calcio-Magnesio	cmmol(+) L ⁻¹	2,5:25 KCl 1N	Espectrofotómetro de absorción atómica
K	cmmol(+) L ⁻¹	2,5:25 Olsen modificado	Espectrofotómetro de absorción atómica
P	cmmol(+) L ⁻¹	2,5:25 Olsen modificado	Colorimetría-Azul de Molibdeno
Zn-Mn-Fe-Cu	mg L ⁻¹	2,5:25 Olsen modificado	Espectrofotómetro de absorción atómica
Azufre	mg L ⁻¹	2,5:25 CaH ₄ (PO ₄) ₂ x 2H ₂ O	Turbidimetría BaCl ₂ x 2H ₂ O + PVP k30
Boro	mg L ⁻¹	2,5:25 CaH ₄ (PO ₄) ₂ x 2H ₂ O	Turbidimetría BaCl ₂ x 2H ₂ O + PVP k30
Materia organica	dg kg L ⁻¹	K ₂ CrO ₇ 1N	Titulación Fe(NH ₄) ₂ (SO ₄) ₂ x 6H ₂ O
CIC y cationes	cmmol(+) L ⁻¹	NH ₄ OAc 1N pH 7,0	Titulación HCl 0,01N y espectrofotómetro de absorción atómica
Análisis mecanico	dg kg L ⁻¹	1:20 agua:suelo	Hidrómetro de Bouyoucos

Olsen modificado= NaHCO₃ 0,5N, EDTA disódico 0,01H y superfloc 127.

Para desarrollar el color azul se utiliza (NH₄)₂MoO₄ ácido y SnCl₂.

REQUERIMIENTO NUTRICIONAL DEL CULTIVAR DE FRIJOL

Para establecer un programa racional de fertilización es imprescindible el conocimiento de la absorción de nutrientes por la planta (extracción de nutrientes, así como la cantidad de nutrimentos que es retirada del campo de cultivo en forma de producto cosechado (exportación de nutrientes).

En el caso del frijol, la mayoría de las veces la exportación de nutrientes es el total de extracción por la planta, debido a que la cosecha es manual, por lo que las plantas son arrancadas y concentradas en una reducida área, donde es aporreado el frijol.

Debe de considerarse, que la extracción y exportación de nutrimentos depende del potencial de producción del cultivar y de la cosecha alcanzada durante la época de cultivo. Por lo tanto la eficiencia de uso de los fertilizantes no va a ser la misma en todos los cultivares.

En un trabajo realizado por Corella (12) se determinó la extracción de Talamanca, Brunca y Porillo Sintético a la y a su madurez fisiológica. En el Cuadro 3, se puede ver que a la floración Talamanca y Porrillo extraen similares cantidades de nitrógeno y magnesio; Porrillo Sintético es más eficiente en la extracción de potasio, cobre, zinc y magnesio.

A la madurez fisiológica (Cuadro 4) Talamanca es una variedad más exigente en cuanto a nitrógeno, fósforo, calcio, zinc y magnesio comparado con el Brunca y Porrillo sintético. A su vez Brunca mostró la mayor necesidad de potasio y magnesio.

De lo anterior se deduce que para producir un kilogramo de frijol Talamanca bajo las condiciones experimentales es necesario 76; 3,5; 59,4; 16,3 y 8,9 gramos de N, P, K, Ca, Mg, respectivamente. Para Brunca y Porrillo Sintético las cantidades necesarias para producir un kilogramo de frijol son las mismas expresadas en el Cuadro 4, pero leyendolas como gramos en ves de kilogramos. También del Cuadro 4, podemos concluir que es de gran importancia conocer los valores de extracción y exportación de nutrimentos de los cultivares más utilizados por los agricultores, en las diversas condiciones ambientales de nuestro país. Esto debido a que existe una absorción diferencial de nutrientes de los cultivares, por ejemplo en el caso de Porrillo Sintético solo se ocupan 0,7 gr de fósforo para producir el kilogramo de grano, mientras que en Brunca y el Talamanca se ocupan 1,3 y 3,4 gr de fósforo respectivamente. Lo cual equivale a 1,85 y 5 veces mas fósforo utilizado por Brunca y Talamanca que Porrillo Sintético. También es interesante observar que Porrillo Sintético requiere la mitad del magnesio que requieren Brunca y Talamanca.

Cuadro 3. Extracción de nutrimentos de dos variedades de frijol común para un rendimiento de 1 t ha⁻¹ de biomasa al 50% de floración.

Variedad	parte de planta	kg ha ⁻¹							
		N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn
Talamanca	toda	60	4,4	14,8	13,6	5,0	0,011	0,029	0,059
Porrillo sintético	toda	62	3,6	22,1	15,5	6,0	0,016	0,049	0,128

Cuadro 4. Extracción de nutrientes de tres variedades de frijol común para un rendimiento de 1 t ha⁻¹ a su madurez fisiológica. ^{*/}

Variedad	Parte de planta	kg ha ⁻¹								% Peso	Indice de cosecha
		N	P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Mn		
Talamanca	Grano ^{*/}	40	2,5	19,8	1,8	2,1	0,009	0,034	0,018	40	0,48
	Paja	21	0,7	26,0	12	4,4	0,009	0,024	0,084	18,6	
	Vaina	15	0,3	13,6	2,6	2,4	0,007	0,005	0,018	41,4	
	total	76	3,5	56,4	16,4	8,9	0,025	0,063	0,120		
Brunca	Grano	37	0,5	16,7	2,0	7,5	0,013	0,025	0,015	28,6	0,54
	Paja	18	0,6	14,1	3,7	3,5	0,011	0,010	0,057	16,2	
	Vaina	12	0,1	29,9	4,4	3,6	0,009	0,009	0,030	55,2	
	total	67	1,3	60,7	10,1	9,6	0,031	0,054	0,096		
Porriño Sintético	Grano	41	0,3	20,2	1,1	1,1	0,013	0,025	0,022	26,7	0,53
	Paja	17	0,2	31,7	3,3	1,7	0,009	0,007	0,030	19,8	
	Vaina	14	0,2	26,4	3,3	1,4	0,009	0,009	0,030	53,4	
	total	72	0,7	54,5	7,7	4,2	0,031	0,041	0,082		

^{*/} Exportación de nutrientes = granos + vainas

^{**/} Temperatura promedio anual = 35°C ± 5°C

Precipitación promedio anual = 1635 mm ± 200 mm.

Promedio anual de horas de sol = 7 horas día ± 2 horas día.

DIAGNOSTICO FOLIAR

El análisis químico de las hojas para la determinación de deficiencias minerales es una excelente herramienta, sin embargo consume más tiempo que el diagnóstico visual. Además del análisis químico foliar es necesario calibrarlo con el rendimiento en pruebas de campo.

Existen pocos estudios en que se procura determinar las bases de diagnóstico foliar del frijol, así como la determinación de niveles críticos. Howeler (19) determinó los siguientes niveles críticos en condición de invernadero (Cuadro 5). Ramírez (22) encontró que el fraccionamiento del nitrógeno foliar es un método más sensible para la determinación de límites de insuficiencia o normalidad; en el caso del fósforo encontraron una mayor sensibilidad en la determinación de fosfatos comparada con el fósforo total. Ramírez (22) también

determinó que el uso de los pecíolos como parte de la planta para determinación de concentración foliar de nutrientes es adecuada para la detección de las necesidades nutricionales del cultivo (Cuadro 6).

Nitrógeno

Corella (3,16) encontró que el valor de nitrógeno en el tercer trifolio al 50% de floración varía, como es de esperarse, con las adiciones de fertilizante nitrogenado y con el agroambiente, presentando los valores más bajos en el experimento de mayor rendimiento de grano y mayor biomasa y los más altos en el agroambiente que presentó menor rendimiento y biomasa, que nos señala la necesidad de interpretar los índices foliares con base en contenido de nutriente en las hojas y no con base en concentración, para

Cuadro 5. Valores de referencia para interpretar los resultados analíticos de tejidos foliares de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) expresados en concentración al inicio de la floración en los folíolos superiores.

Nutriente	Estado nutricional de la planta ^{1/}				
	Deficiente	Bajo	Suficiente	Alto	Tóxico
N (g Kg ⁻¹)	< 3	3,0 - 4,5	4,5 - 5,5	> 5,5	-
P (g Kg ⁻¹)	< 0,25	0,25 - 0,35	0,35 - 0,50	> 0,5	-
K (g Kg ⁻¹)	< 1	1 - 2	2 - 4	> 4	-
Ca (g Kg ⁻¹)	< 1,25	1,25 - 1,30	1,30 - 2,00	> 2	-
Mg (g Kg ⁻¹)	< 0,3	0,30 - 0,35	0,35 - 1,30	> 1,3	-
S (g Kg ⁻¹)	< 0,14	0,11 - 0,20	0,2 - 0,3	> 0,3	-
Cu (mg ml ⁻¹)	< 15	-b	15 - 25	-	-
Zn (mg ml ⁻¹)	< 15	15 - 40	40 - 50	-	-
Mn (mg ml ⁻¹)	< 20	20 - 80	80 - 200	-	> 200
Fe (mg ml ⁻¹)	< 100	-	100 - 800	-	-
B (mg ml ⁻¹)	< 15	15 - 20	20 - 30	30 - 40	> 45

a Deficiencia de \leq 80% del rendimiento máximo; bajo = 80 - 90% del rendimiento máximo; suficiente = 90 - 100% del rendimiento máximo; alto = 100 - 90% del rendimiento máximo; toxico \leq 90% del rendimiento máximo.

b - No se obtuvieron datos

Cuadro 6. Valores críticos de las formas de nitrógeno y fósforo de fosfatos en los peciolo y hojas del cultivo del frijol en Costa Rica.

Nutriente	Parte de la planta	Nivel crítico	Normal
NTSA* (mg L ⁻¹)	HOJAS	800	1287
NOSA** (mg L ⁻¹)		200	919
N-NO ₃ (mg L ⁻¹)		600	368
NTSA* (mg L ⁻¹)	PECIOLO	661	6789
NOSA** (mg L ⁻¹)		253	819
N-NO ₃ (mg L ⁻¹)		408	5970
P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	HOJAS	800	5 ^{1/}
P-PO ₄ (mg L ⁻¹)	PECIOLO	700	4,8 ^{1/}

^{1/} dg kg⁻¹

* Nitrógeno total soluble en agua

** Nitrógeno orgánico soluble en agua.

superar el problema de dilución de nutrientes con el mayor crecimiento vegetativo (Figura 2).

Corella (13, 14, 16) al calibrar en nuestros agroambientes frijoleros el análisis foliar, se muestra en la Figura 3 los niveles encontrados, en donde es necesario que el cultivo tenga valores superiores a 4,5 % para alcanzar el 80 % del rendimiento y arriba de 5,2 % para lograr el 95 % del rendimiento.

En condición de campo Corella (3), reporta (Cuadro 5) que los contenidos foliares de nutrimentos varían con las adiciones de fertilizantes. Al tomar la tercera hoja madura al 50 % de floración se encontró que el nivel de cero nitrógeno presentó el contenido foliar de N mostró un incremento del 0,8 %, pero un incremento del rendimiento del 400 %.

Fósforo

El fósforo junto al nitrógeno son los elementos que más atención han recibido en el

programa de Fertilidad de Suelos de la Unidad de Suelos, es así como Corella (16) encontró (Figura 4) que sólo a niveles de mg/ml o menores, la concentración de fósforo foliar disminuye. El nivel crítico hallado para producir el 90% del rendimiento fue de 0,4 % y el nivel para producir rendimientos inferiores del 40 % del rendimiento relativo fue de 0,22 % (Figura 5). El mismo autor (3, 15), encontró que sin embargo este nivel varía con el cultivar, siendo en algunos 0,45 % para obtener el 90 % del rendimiento mientras en otros con ese valor solo se alcanzó el 80 % del rendimiento máximo; el valor al cual se observaron síntomas de deficiencia de fósforo en el campo varió también con el cultivar, variando desde 0,16 hasta 0,27 % (Figura 6). El fósforo presentó un valor de 0,27 %, con la dosis de cero fósforo adicionado como fertilizante; al adicionar 43 kg/ha de fósforo se incrementó el contenido foliar de fósforo en solo un 0.07 %, pero el rendimiento fue superior en un 327 %.

En la Figura 7 se observa que el contenido foliar de fósforo varía con el cultivar empleado,

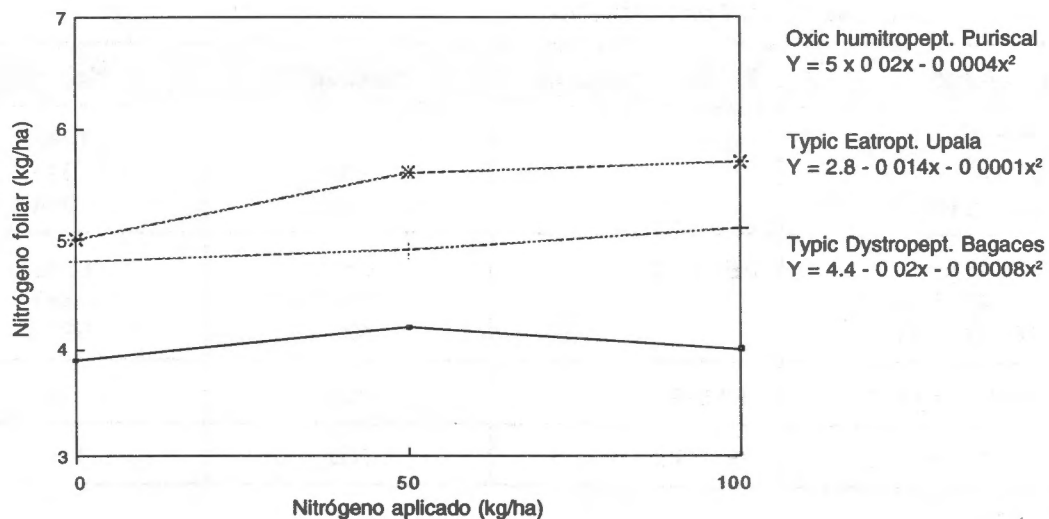


Fig. 2. Efecto del ambiente y dosis de nitrógeno sobre el contenido de nitrógeno foliar en frijol.

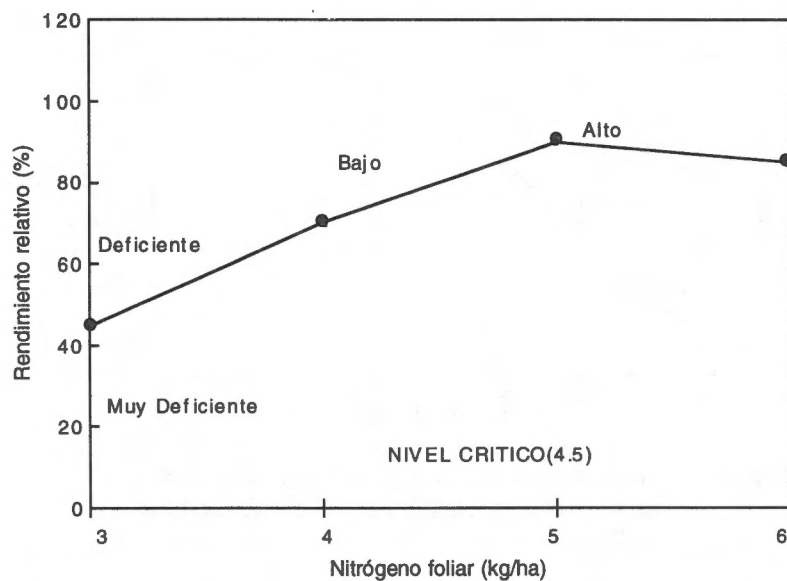


Fig. 3. Efecto del nitrógeno foliar sobre el rendimiento relativo de frijol común.

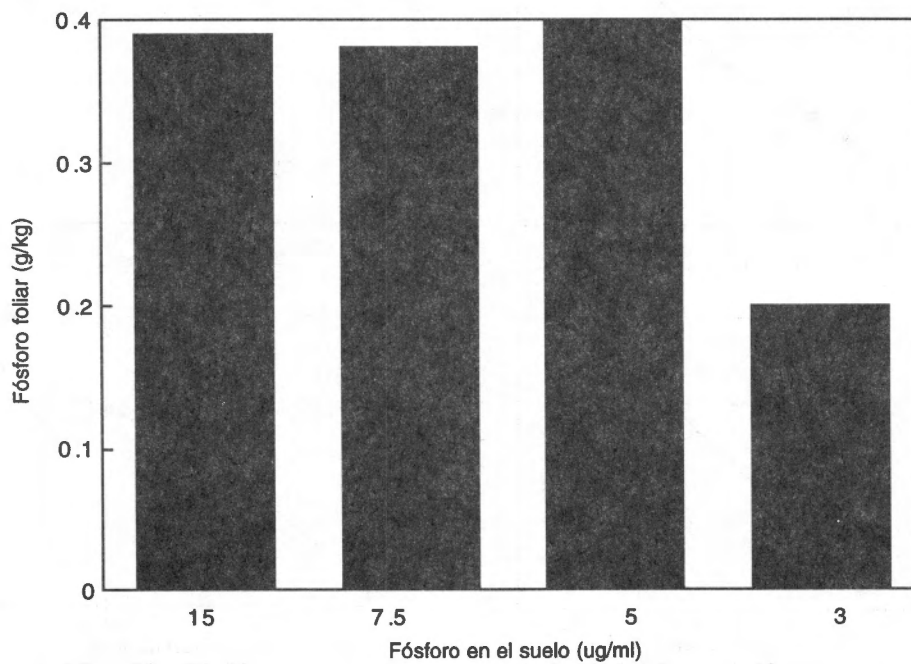


Fig. 4. Efecto del fósforo en el suelo sobre el contenido de fósforo foliar en el cultivo de frijol.

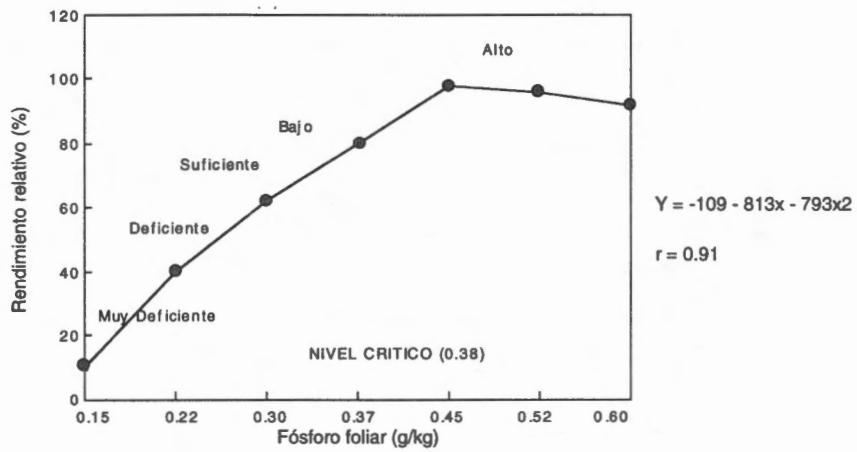


Fig. 5. Relación entre el contenido de fósforo foliar y el rendimiento relativo de frijol común en Costa Rica.

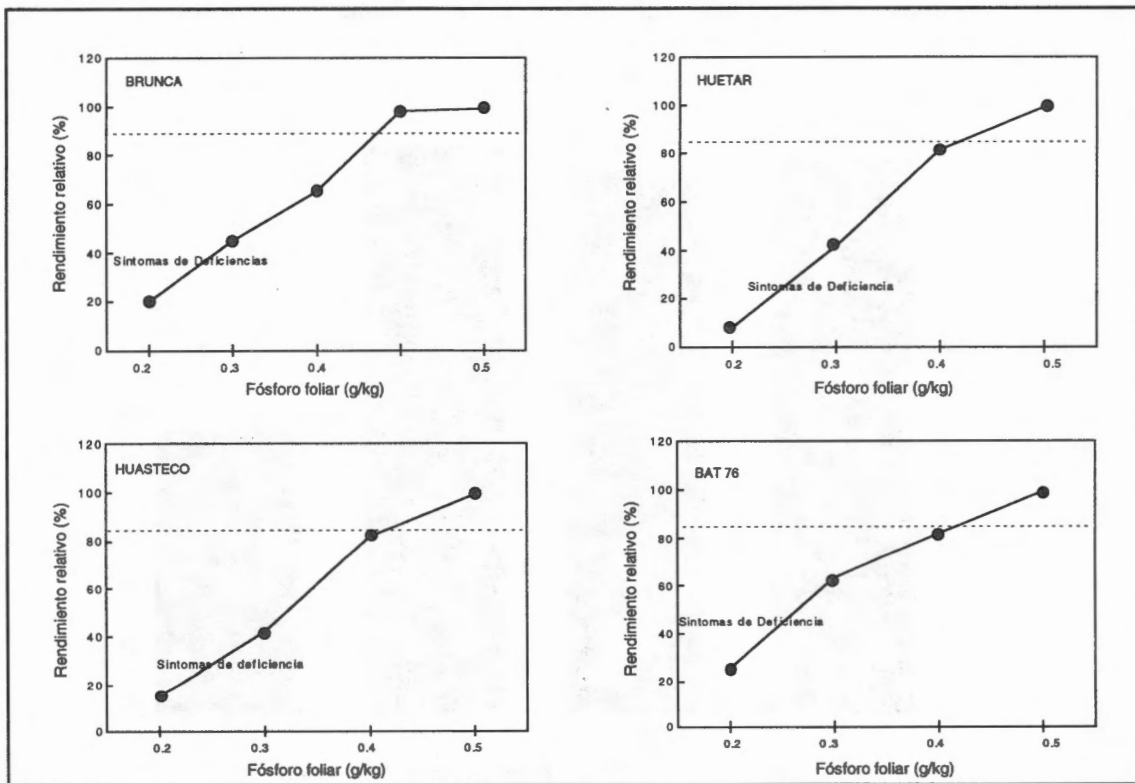


Fig. 6. Niveles críticos de fósforo foliar en diferentes genotipos de frijol negro, en un Ultisol de Pérez Zeledón, Costa Rica.

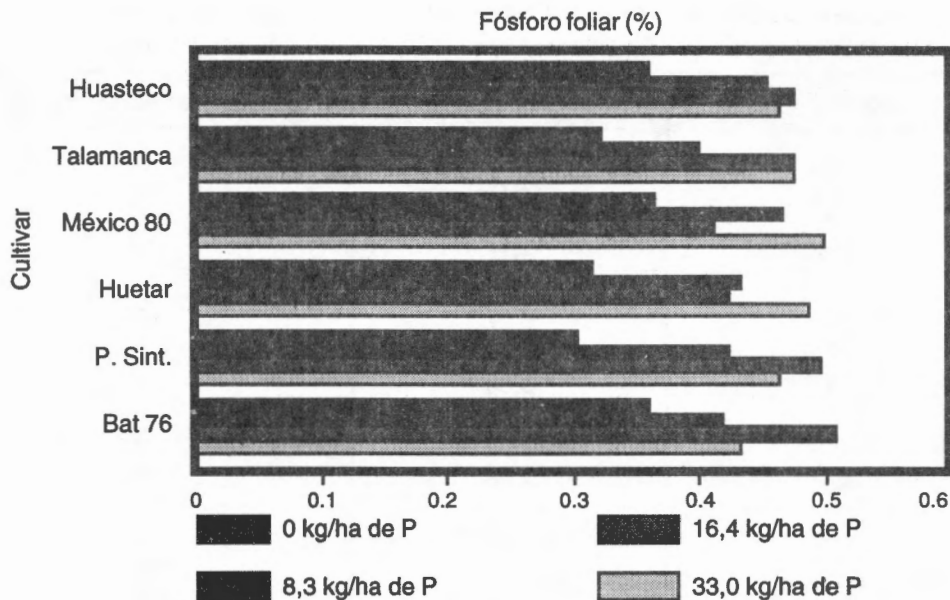


Fig. 7. Efecto de dosis crecientes de abono fosfatado en el contenido foliar de P en seis cultivares de frijol.

por ende los niveles críticos foliares lo harán también. La Figura 7 muestra que con la adición de fósforo al suelo se incrementa el contenido foliar de P y que Huasteco, Talamanca y México 80 absorben más fósforo comparado con los otros cultivares. Se observa que Porrillo Sintético es la variedad que menos absorbe fósforo a bajos niveles de P; es interesante notar que el cultivar BAT 76 presenta una mayor eficiencia de absorción de P en ausencia de su aplicación al suelo, de ahí su gran eficiencia de producir a bajos niveles de fósforo.

Otros Elementos

Corella (3, 16), encontró que el potasio foliar y el rendimiento aumentaron en 0,34% y 16 %, respectivamente, con la adición de 42 kg/ha de potasio. La adición de 10 kg/ha de zinc provocó un aumento del contenido de zinc

foliar de 18,2 mg/ml, pero el aumento en rendimiento fue del 1 %. La adición del manganeso aumentó en un 11 % el rendimiento, y 25 mg/ml el valor foliar de este elemento (Cuadro 7).

Como conclusiones podemos decir: a) que los valores foliares reportados por la literatura (19, 22) coinciden con los encontrados para fósforo, pero en el caso del nitrógeno los valores de deficiencia encontrados son mayores y los rangos de las otras categorías son más estrechos (Cuadro 8), b) muchas veces una planta con poco crecimiento presenta valores mayores que plantas con un crecimiento normal, por lo que en estas situaciones sería útil el uso de contenido de nutrientes en vez de concentración y c) que los valores de nivel crítico varía con los cultivares, lo que indica la necesidad de estar generando los niveles críticos para los nuevos cultivares que son adoptados por un gran número de agricultores.

Cuadro 7. Efecto de la adición de nitrógeno, fósforo, potasio, zinc y magnesio sobre el contenido foliar de frijol común (cv Talamanca), en un Oxic Humitropept de Puriscal.

Nutriente aplicado (kg ha ⁻¹)	Contenido foliar	Rendimiento relativo (%)
Nitrógeno ¹	(%)	
0	5,0	100
50	5,8	410
100	6,0	311
Fósforo ^{2,3}		
0	0,27	100
22	0,39	170
43	0,34	327
Potasio ^{2,4}		
0	2,22	100
42	2,56	116
Zinc ^{2,4}	(mg ml ⁻¹)	
0	48,1	100
5	66,3	101
Manganeso ^{2,4}		
0	125	100
5	150	109

^{1/} Mikrokjeldahl,

^{2/} Digestión húmeda con H₂SO₄ + H₂O,

^{3/} Fósforo por método de Osmond y

^{4/} Absorción atómica.

RESPUESTA DEL CULTIVO DE FRIJOL A LA FERTILIZACION

Nitrógeno

El nitrógeno y el fósforo son los nutrientes que mayor énfasis han recibido en el programa de Investigaciones de la Unidad de Suelos, que se inició en 1979. Los objetivos de este programa fue el de encontrar las dosis óptimas de abonado y la correlación con métodos de extracción de laboratorio para poder hacer recomendaciones de abonado con mayor agilidad. Corella (3, 13, 14, 16) encontró una respuesta diferencial entre agroambientes y aplicación de fuentes nitrogenadas (Figura 8), se observó que para obtener el 95 % del rendimiento

máximo en la zona montañosa de la cordillera de Guanacaste se ocupó 105 kg de N/ha, mientras que para Puriscal, Pérez Zeledón y Upala se ocupó cerca de 50 kg de N/ha para obtener el 95 % del rendimiento máximo. Por lo tanto el manejo del nitrógeno debe ser diferente entre estos agroambientes.

Corella (16), determinó que para la eficiencia de uso de nitrógeno con respecto al rendimiento. Se utilizó la misma variedad (Porrillo Sintético) en 4 agroambientes con tipos de suelos diferentes, y se encontró que la eficiencia de uso de nitrógeno en los primeros 50 kg de N/ha aplicados son más eficientes que adiciones posteriores y en algunos agroambientes esta fue negativa (Figura 9). En

Cuadro 8. Valores de referencia encontrados por la Unidad de Suelos para interpretar los resultados analíticos de tejido foliar de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) expresados en concentración al inicio de la floración en los terceros folíolos superiores.

Nutriente	Estado nutricional de la planta ^{1/}				
	Muy deficien.	Deficiente	Bajo	Suficiente	Alto
N (dg Kg-1)	< 3,6	3,7 - 4,3	4,4 - 4,7	4,8 - 5,2	> 5,3
P (dg Kg-1)	< 0,23	0,24 - 0,35	0,36 - 0,40	0,41 - 0,50	> 0,51

^{1/} Muy deficiente =< 40% del rendimiento máximo; Deficiente = Bajo = 40 - 80% del rendimiento máximo; bajo 80 - 90% del rendimiento máximo; Suficiente = 90 -100% del rendimiento máximo; y Alto = 100 - 90% del rendimiento máximo.

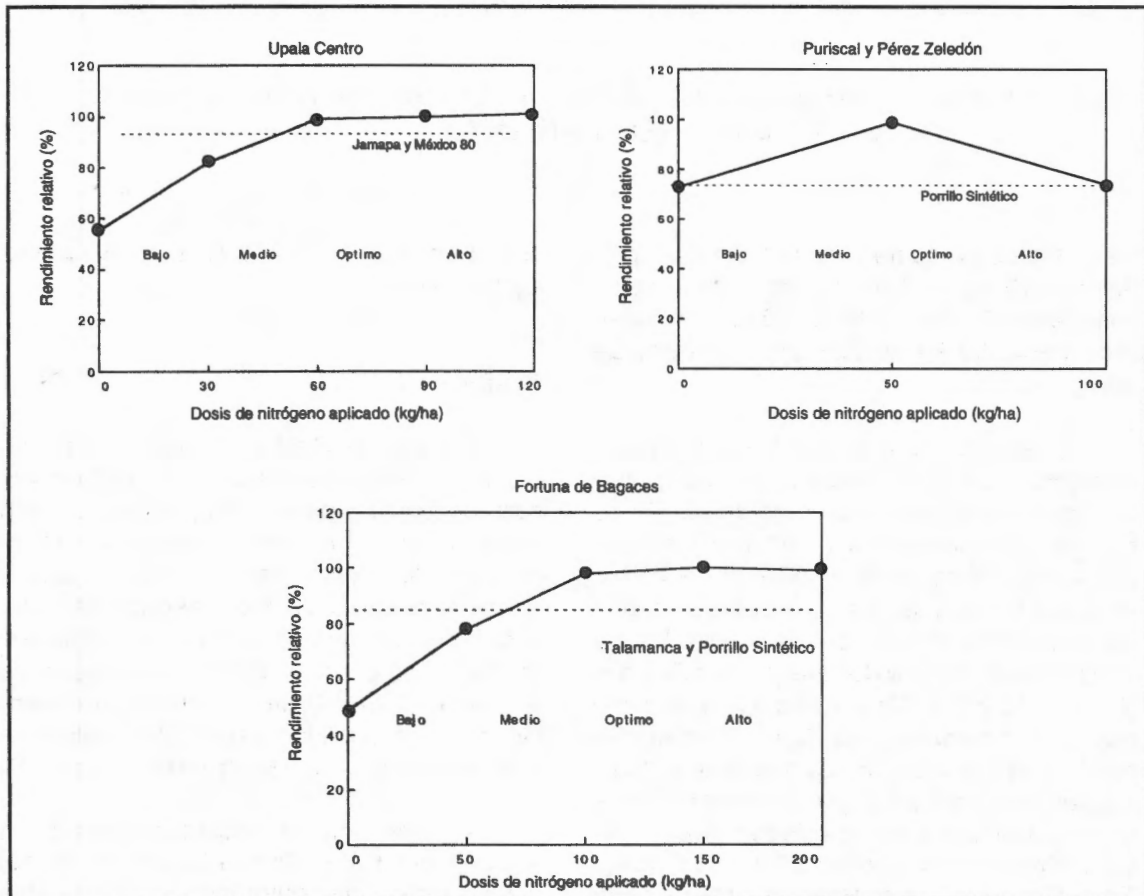


Fig. 8. Efecto del ambiente a la respuesta de nitrógeno en el cultivo de frijol en Costa Rica.

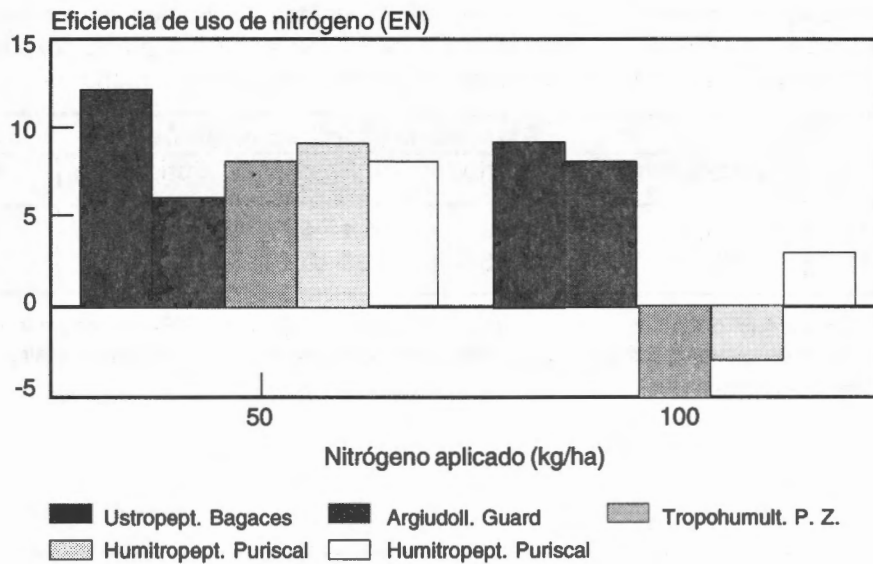


Fig. 9. Utilización de nitrógeno por Porrillo sintético en varios ambientes en $(\text{Rend. } 0 \text{ N}) - (\text{Rend. } + \text{ N}) / \text{N Aplic.}$

los primeros 50 kg de N/ha aplicados se produjeron 10 kg de frijol por kg de nitrógeno, mientras en el nivel de 50 a 100 kg de N/ha se produjeron 2,2 kg de frijol por kilogramo de nitrógeno.

Corella (16), correlacionó la materia orgánica (MO), con el rendimiento de frijol a nivel de campo en tratamiento de no aplicación de nitrógeno; se encontró dos zonas en donde la MO afecta diferente el rendimiento del frijol. Una de ellas es Guanacaste y Upala en donde los contenidos de MO son inferiores a los del Valle Central, Pacífico Central y Pérez Zeledón (Figuras 10 y 11). En el Cuadro 9 se observa que para obtener un 95 % del rendimiento máximo es necesario en Guanacaste y Upala valores de 4,4 a 5,5 dg/kg, mientras en el Valle Central, Puriscal y Pérez Zeledón se es necesario obtener valores entre 11,3 a 13,0 dg/kg. En el Cuadro 11 se muestra la tabla de recomendación de fertilizantes nitrogenados del

cultivo de frijol en Costa Rica en diferentes agroambientes.

Fósforo

La Unidad de Suelos ha estudiado en fósforo con cuatro objetivos básicos: a) Determinación de dosis óptimas de aplicación de este nutriente, b) calibración de la solución extractora del laboratorio con el menor costo y métodos de aplicación y d) selección de variedades de frijol que toleren bajos contenidos de fósforo en el suelo. En lo referente a dosis óptimas Corella (16), ha observado que dependiendo de la fertilidad natural del suelo esta varía entre 13.1 y 26.2 kg de P/ha (Cuadro 11).

La calibración de la solución extractora (Olsen modificado), Corella (3, 13, 14, 15, 16) obtuvo variaciones entre los suelos de carga variable (Andisoles, Ultisoles, y suelos asocia-

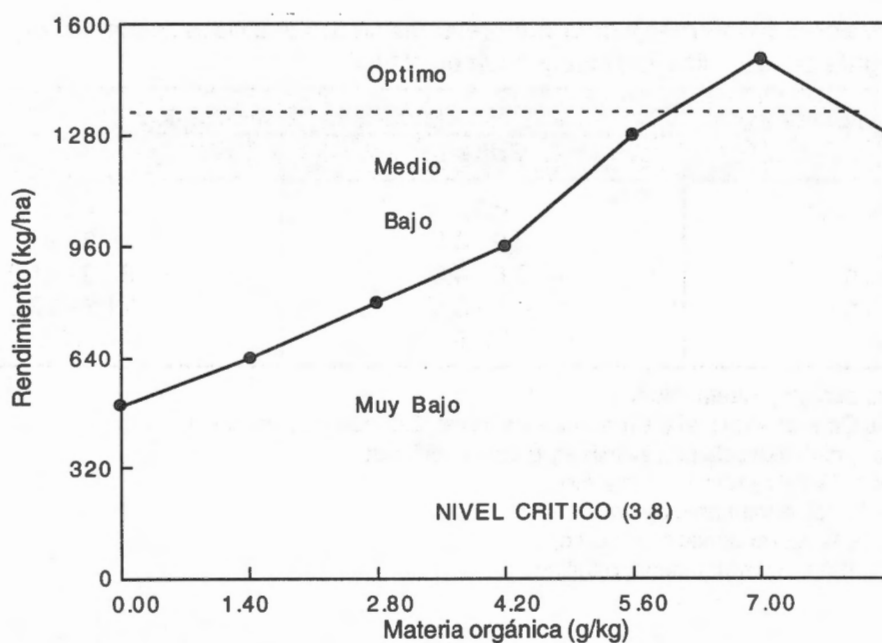


Fig. 10. Nivel crítico de nitrógeno del cultivo de frijol utilizando el contenido de materia orgánica como criterio para la zona de Guanacaste.

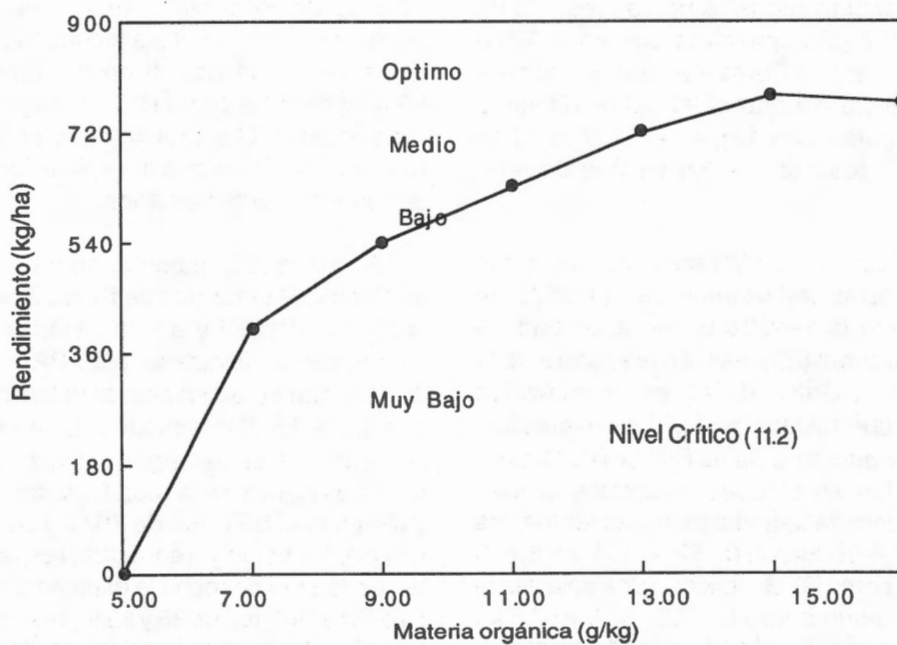


Fig. 11. Nivel crítico de nitrógeno del cultivo de frijol utilizando el contenido de materia orgánica como criterio para la zona sur y pacífico central.

Cuadro 9. Valores de referencia para interpretar resultados analíticos de materia orgánica como guía de la fertilización nitrogenada en el frijol.

Valor en el suelo	Materia orgánica (dg Kg ⁻¹)	
	Zona 1	Zona 2
Muy bajo	< 2,8	< 8,2
Bajo	2,9 - 3,5	8,3 - 9,8
Medio	3,6 - 4,3	9,90 - 11,2
Optimo	4,4 - 5,5	11,3 - 13,0
Alto	>5,5	> 13,1

Zona 1 : Guanacaste y Huetar Norte

Zona 2 : Valle Central, Puriscal y alrededores; y Perez Zeledon y alrededores.

1 = Materia orgánica extraída con Walkley y Black modificado().

Muy bajo = < 40% del rendimiento máximo;

Bajo = 40 -80% del rendimiento máximo;

Medio = 80 - 90% del rendimiento máximo;

Optimo = 90 - 100% del rendimiento máximo.

dos) y los suelos de carga no variable (Molisolles, Eutropepts y suelos asociados). En la región de Guanacaste y Upala para obtener un 90 % del rendimiento máximo se presentó un valor de 12 mg/ml, mientras que en el Valle Central, Puriscal y Pérez Zeledón se necesitan 8 mg/ml para lograr el 90 del rendimiento relativo (Figuras 12 y 13); en el Cuadro 10 se presenta un resumen de los valores de referencia.

El trabajo de la utilización de las rocas fosfóricas como fertilizantes en el cultivo de frijol, ha sido desarrollado por la Unidad de Suelos. Ramírez (23), estudio la eficacia de la roca fosfórica Gafsa (RFG) en combinación con triple superfosfato (SFT), el suelo clasificó como un Paleudult de Santa Rita de Río Cuarto. El diseño fue en bloques completos al azar con un arreglo de factorial de tratamientos, las dosis de fósforo fueron 0, 52,4, 104,8 y 209,6 kg de P/ha como RFG, aplicado una sola vez al inicio del experimento y 0, 17,5, 35,0 y 52,5 kg de P/ha como SFT, aplicado al fondo del surco, en cada siembra. En un tratamiento adicional se probó la influencia de la cal (3 ton de

CaCO₃/ha) sobre la RFG. Los mejores rendimientos obtenidos fueron 104,8 kg de P/ha como RFG + cal y 240 kg de P/ha como RFG + 17,5 kg de P/ha como SFT. Sin embargo, desde el punto de vista económico los mejores rendimientos fueron logrados con 52,4 kg de P/ha como RFG + cal y 52,4 kg de P/ha como RFG + 17,4 kg de P/ha como SFT. El autor considera que las aplicaciones deben de repetirse cada tres años.

Ramírez (23) encontró en otro estudio en un Plinthic Palehumult de Pérez Zeledón, que la eficacia del SFT y la roca fosfórica de Florida parcialmente acidulada (RFFPA) fue de un 86 % y que su aplicación al voleo o en espeque a los 15 días después de la siembra no presentó diferencias significativas. Mientras la eficacia relativa de la roca fosfórica de Florida (RFF) con el SFT, fue de 70 % y 34 % cuando se aplicó al voleo y a espeque, respectivamente. En la 3era cosecha la eficiencia relativa del RFFPA y RFF fue de 85 y 83 %, respectivamente y el método de aplicación al voleo mantuvo su eficiencia de liberar fósforo comparado con la aplicación a espeque.

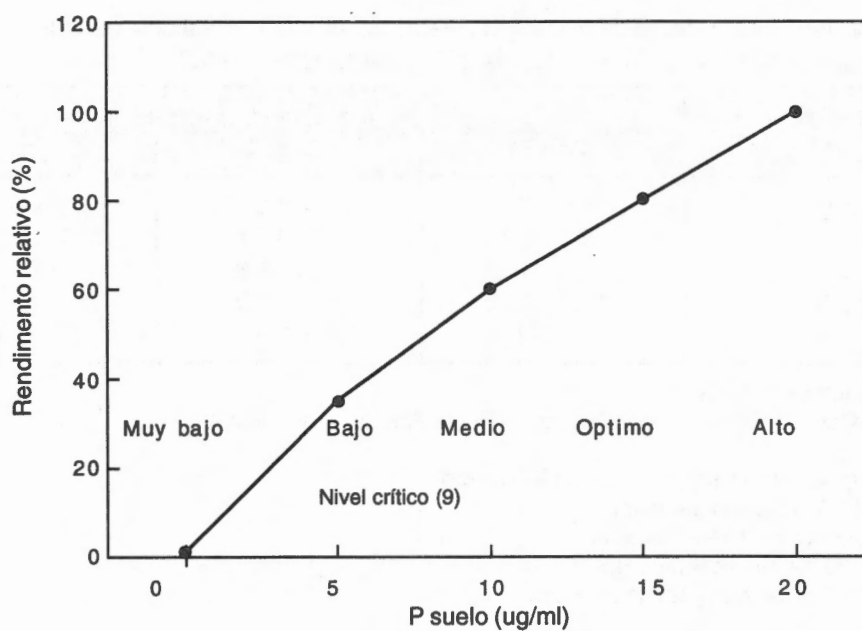


Fig. 12. Nivel crítico de fósforo de experimentos de Upala, Bagaces y Gardia.

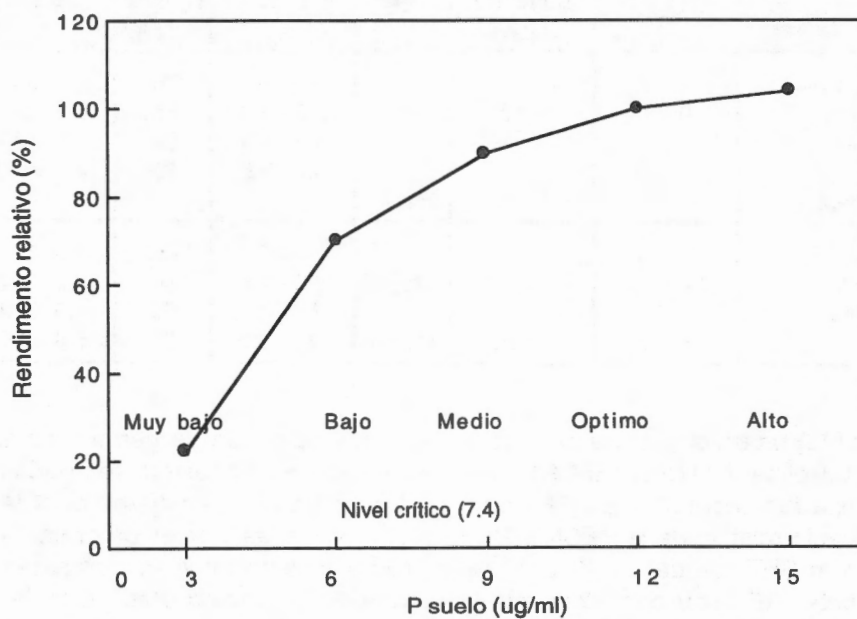


Fig. 13. Nivel crítico de fósforo para suelos ácidos de Pérez Zeledón y Puriscal (cada punto representa un ensayo).

Cuadro 10. Valores de referencia para interpretar resultados analíticos de suelo de fósforo disponible como guía de la fertilización fosforada en el frijol.

Valor en el suelo ¹	Fósforo disponible (dg Kg ⁻¹)		
	Zona 1	Zona 2	Zona 3
Muy bajo	< 6,0	< 5,0	< 7,0
Bajo	6,1 - 9,7	5,1 - 7,4	7,1 - 11,5
Medio	9,8 - 12,6	7,5 - 8,3	11,6 - 14,1
Optimo	12,7 - 15,0	8,4 - 9,0	14,2 - 15,3
Alto	>15,1	> 9,1	> 15,4

Zona 1 : Guanacaste y Huetar Norte

Zona 2 : Valle Central, Puriscal y alrededores; y Perez Zeledon y alrededores.

Zona 3 : ?

1 = Fósforo disponible extraída con Olsen modificado().

Muy bajo = < 40% del rendimiento máximo;

Bajo = 40 - 80% del rendimiento máximo;

Medio = 80 - 90% del rendimiento máximo;

Optimo = 90 - 100% del rendimiento máximo.

Cuadro 11. Criterios para escoger las dosis de nitrógeno y de fósforo para el frijolsemimecanizado en Costa Rica para un rendimiento de 1,4 ton ha⁻¹.

Tipo de suelo	Pendiente (%)	Fertilidad del suelo		Nitrógeno		Fósforo	
		Suma de bases	Tipo	% MO	kg ha ⁻¹ N	ug ml ⁻¹	kg ha ⁻¹ P
Aluvial, moderadamente drenado Udolls, Ustolls Trobepts. Ustalfs, Tropept	0 - 3	> 10	Alta	< 2,8	70	< 6	31
				2,9 - 3,5	60	6,1 - 9,7	26,2
				3,6 - 4,3	50	9,8 - 12,7	19,7
		5 - 10	Media	4,4 - 5,5	30	12,7 - 15,0	13,1
Residual Ustuts, Humult y dystrandeps Andepts	3 - 15	< 5	Baja	< 8,2	100	< 5	32,7
	30 - 80			8,3 - 9,8	80	5,1 - 7,4	28,4
	3 - 15			9,9 - 11	65	7,5 - 8,3	18,0
		5 - 10	Media	11,1 - 13	50	8,4 - 9,0	8,2

Ramírez (23) probó la eficacia de la roca fosfórica de Carolina del Norte (RFCN) y encontró que esta fue superior a la RFF en un 50%. La eficacia relativa de la RFCN y RFF con respecto al SFT fue de un 90 y 74 %, respectivamente. El autor considera que la aplicación de 75 kg de P/ha con RFCN al voleo más 25 kg de P/ha es el tratamiento más rentable.

La selección de germoplasma de frijol a suelos con bajo fósforo se inició en 1984, durante este año se trajeron del CIAT los testigos utilizados por el programa análogo de dicha institución y se compararon con las variedades comerciales. Corella (3, 15, 16) encontró que variedades como BAT 76, Huasteco, Talamanca, Brunca, Puebla 152 y Huetar superaron a los testigos brasileños como

Iguaçu y Río Tibaji (Figura 14); los niveles de selección durante este primer año fueron de 32,75 y 65,5 kg de P/ha. Para el segundo año se hicieron más estrictos los niveles de selección de fósforo, los que fueron 0, 8,2, 16,4 y 32,75 kg de P/ha, en la Figura 15 se observa que cultivares como BAT 76, ICTA 883-2M y Huasteco son productores eficientes al nivel de 8,2 kg de P/ha, es importante observar que variedades como Huasteco y HT-779 aumentan el rendimiento con el aumento de fósforo aplicado como fertilizante y que BAT 76 e ICTA 883-2M decrecen en rendimiento a partir de la dosis de 16,4 kg de P/ha. En el Cuadro 12 se presenta una clasificación de las variedades de frijol y su respuesta a la aplicación de fertilizantes fosfatados.

Respuesta del Cultivo de Frijol al Encalado

Cuando se analiza el efecto del encalado, nos damos cuenta que este es un conjunto de factores, imposible de ser separados, tales como: pH del suelo, disponibilidad de nutrientes y de efectos tóxicos de algunos elementos.

En el caso de las leguminosas, además de estos factores, hay que estudiar el efecto del encalado sobre el frijol y las bacterias nitrificantes. Existen evidencias experimentales, que la planta de frijol soporta pH menores que la bacteria fijadora de nitrógeno (pH 6,0 a 6,5). En general se ha observado que

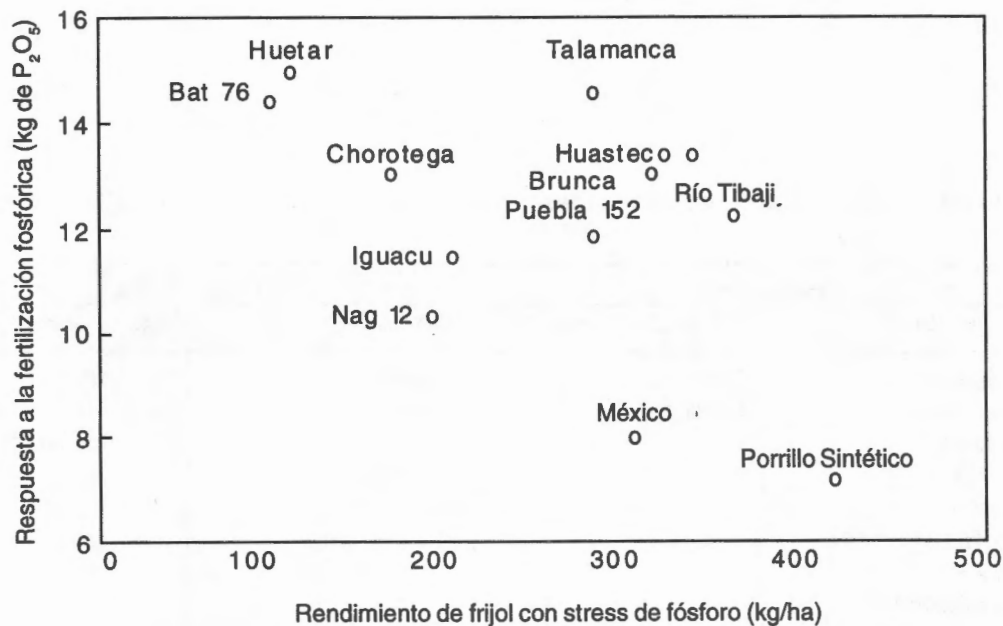


Fig. 14. Selección de variedades de frijol a suelos ácidos durante 1985, en ultisol de Pérez Zeledón.

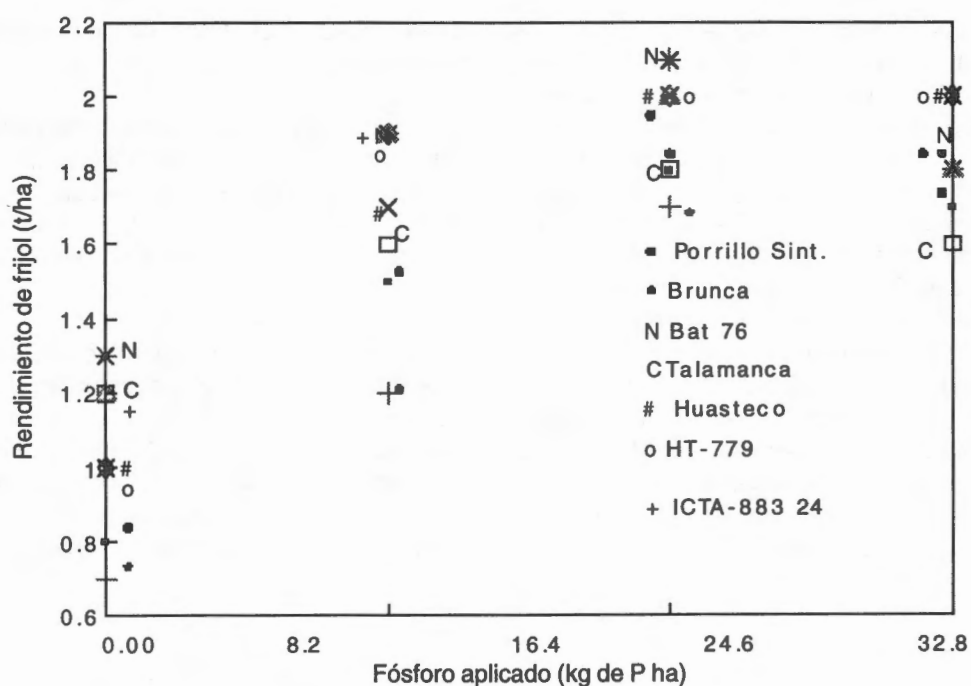


Fig. 15. Respuesta de variedades de frijol negro a dosis crecientes de fósforo en un Ultisol de Pérez Zeledón.

Cuadro 12. Clasificación de las variedades de frijol en cuanto a su respuesta a la aplicación de fósforo.

Eficientes		Ineficientes	
Responsivo	No responsivo	Responsivo	No responsivo
Huasteco*	Porillo Sint.*	Huetar*	Iguaçu*
Talamanca*	México 80*	Chorotega*	Nag 12*
Brunca*		Bat 76*	Porrillo sint.**
HT-779**		Icta 883-2m*	
Puebla 152*		Brunca**	
Río Tibaji*			
Bat 76**			
Icta 883-2M**			
Talamanca**			

* Nivel de selección de 32,75 kg P ha⁻¹

** Nivel de selección de 16,4 kgde P ha⁻¹

con raras excepciones, no se han obtenido respuestas al encalado cuando el pH de suelo es mayor de 5,5. El concepto de encalado en los suelos tropicales ha sufrido una transformación en los últimos 40 años; el concepto inicial fue el de encalar para que el suelo tuviera un pH cercano de 7,0, lo que resultaba en cantidades enormes de enmiendas calcáreas, debido al bajo pH mostrado por muchos suelos altamente meteorizados de los trópicos. Con los trabajos pioneros de Kamprath, Coleman y Thomas y Evans y Kamprath (2, 17, 20) se comenzó a variar el concepto de encalado, relacionado este con el contenido de aluminio en el suelo. Es así como la Unidad de Suelos del Ministerio de Agricultura y Ganadería comenzó un programa de encalado utilizando este concepto. Guzmán (18) estableció experimentos a largo plazo (1979 - 1981) en dos localidades, utilizando la rotación maíz-frijol (Cuadro 5). En el experimento de Santa

Rita de Río Cuarto las aplicaciones CaCO_3 fueron determinadas multiplicando el contenido inicial del Al en el suelo (2,4 cmol (+)/L) por 1, 2, 3, 4, y 5, las cuales se hicieron al inicio del ensayo únicamente. Esto con el objeto de evaluar la hipótesis elaborada por los mencionados autores y evaluar el efecto residual del carbonato de calcio. En 1980 se sembró frijol, el mejor rendimiento fue mostrado por la aplicación inicial de 7,2 t/ha con 52 kg/ha de P. El mismo experimento plantado en Pérez Zeledón mostró como mejor tratamiento la aplicación de 5,4 t de CaCO_3 /ha con 52 kg/ha de P. En el Cuadro 13, se nota el efecto de niveles crecientes de CaCO_3 en Santa Rita de Río Cuarto produjo un aumento lineal con la aplicación de cal aplicada al inicio del experimento. Es importante anotar que el mayor incremento se produjo con el nivel de 2,4 t/ha de CaCO_3 . En La Unión de Pérez Zeledón el efecto del encalado fue menor, quizás debido

Cuadro 13. Efecto de niveles crecientes de carbonato de calcio sobre el rendimiento de frijol común en dos Ultisoles de Costa Rica. (Adaptado de Guzman, P).

CaCO ₃ , aplicado t ha ⁻¹	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	Rendimiento Relativo (%)
Santa Rita de Río Cuarto*		
0	785	100
2,4	1160	147
4,8	1105	141
7,2	1260	160
9,6	1320	186
12,0	1450	185
La Union de Pérez Zeledón**		
0	1510	100
1,35	1585	105
2,70	1565	104
4,05	1530	101
5,40	1750	116
6,75	1610	107

* Fósforo acumulado en tres cultivos 183 kg de P ha⁻¹, % de acumulación de aluminio = 59%.

** Fósforo acumulado en tres cultivos 177 kg de P ha⁻¹, % de acumulación de aluminio = 48,5%.

al menor porcentaje de saturación de aluminio y mayor contenido de materia orgánica del suelo.

Kass *et al.* (21) obtuvieron resultados similares en experimentos realizados en Pital de San Carlos, utilizando el cultivar Talamanca. Los citados autores encontraron que el que se debe aplicar 2 t ha⁻¹ de CaCO₃ cuando el % de saturación de aluminio es mayor del 20%. En el Cuadro 14, se observa que el % de saturación del aluminio tuvo mayor efecto en la reducción del rendimiento que las cantidades de cal aplicadas al suelo.

A la luz de los resultados de Guzman, Kass *et al.*, Cochran *et al.* (1, 18, 21) y Spain *et al.* (24), se reorientó el trabajo de encalado en el país. Este nuevo enfoque consistió en determinar el % de saturación de aluminio en donde el se alcanza el 95% del rendimiento relativo del frijol y seleccionando cultivares tolerantes a las condiciones de alta saturación de aluminio. En el Cuadro 15 se muestran los resultados obtenidos por Corella (3,16), en donde se observa el efecto de diferentes niveles de saturación de aluminio sobre el rendimiento de cultivares de frijol. En este experimento que en el nivel de 5% de saturación de aluminio se obtuvieron los rendimientos más altos en todos los cultivares. En otro experimento realizado en un Ultisol de Pérez Zeledón se observó (Figura 16), que el rendimiento se ve afectado por el % de saturación de aluminio del suelo y que los cultivares

tienen una respuesta diferencial. En esta Figura sobresalen el Bat 76, Bat 1500 y el Alajuela 1, de estos experimentos se obtuvo la información para clasificar los cultivares de frijol y su capacidad de respuesta al encalado (Cuadro 16). La clasificación divide los cultivares de frijol en eficientes e ineficientes productores con cal o sin cal y su respuesta a la aplicación de cal.

Como se observa en el Cuadro 15 y Figuras 17 y 18, solo Ica Pijao, Nag 12, Alajuela 1, Río Tibají, Puebla 152, Bat 76 y Bat 1500 son eficientes con respuesta. Al analizar el conjunto el Cuadro 15 y la Figura 17, se deduce que existe una interacción genotipo*ambiente en la respuesta al encalado de los cultivares Ica Pijao y Nag 12 pudieron mejorar el nivel de 9% de saturación de aluminio en Puriscal, en cambio México 80, Puebla 152 e Iguazu mostraron mayor rendimiento en Pérez Zeledón al mismo nivel de saturación de aluminio.

Corella (16) encontró que la ecuación de regresión que mejor ajusta a los datos experimentales de saturación de aluminio versus rendimiento relativo del cultivo de frijol es la expresada en la Figura 19. las regiones que se definieron son las que siguen: a) muy bajo => 80% RR, b) bajo = < 80% a > 65% RR; c) medio = < 65% a > 40% RR; d) alto = < 40% a > 20% RR; e) muy alto < 20% RR. En la misma Figura se observa el nivel crítico de saturación de aluminio, seleccionado al 75% de ren-

Cuadro 14. Efecto de niveles de carbonato de calcio en el rendimiento del cultivar Talamanca en el Ultisol de San Carlos (Adaptado de Kass *et al.*).

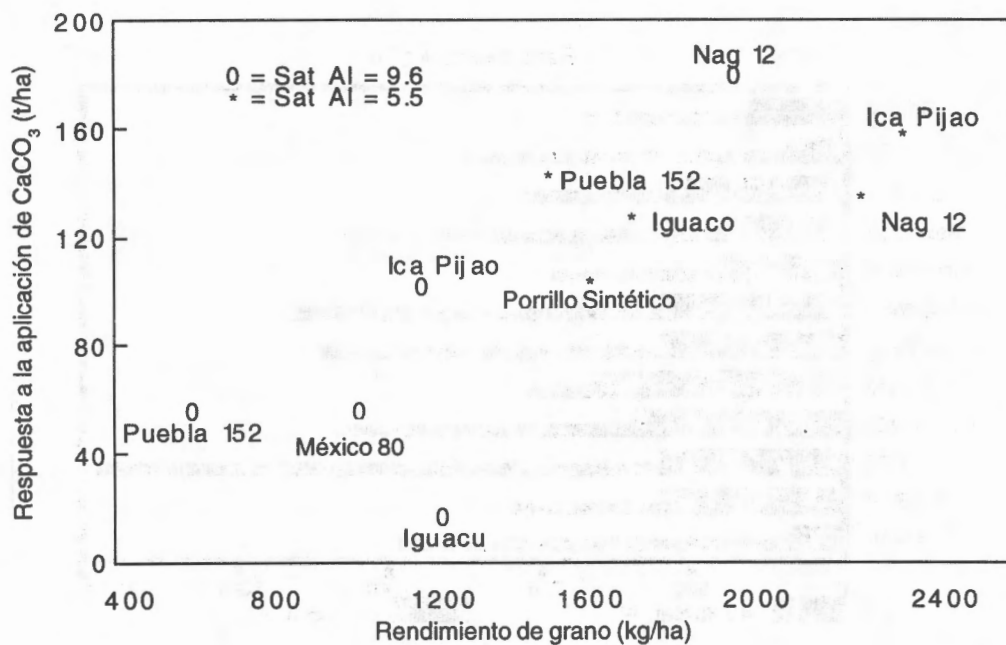
CaCO ₃ Aplicado* t ha ⁻¹	Rendimiento (kg ha ⁻¹)	% de saturación de aluminio
0	385	41,3
2	682	25,3
4	591	33,6

* Dos semanas antes de la siembra.

Cuadro 15. Evaluación de cultivares de frijol a niveles decrecientes de saturación de aluminio y carbonato de calcio en un Oxic Humitropept de Puriscal.

CaCO ₃ aplicado (t ha ⁻¹)	0,0	0,5	1,0
% Saturación de aluminio	15,0	9,6	5,5
% de materia orgánica	10,3	9,5	10,5
P en el suelo (mg ml ⁻¹)	11,0	13,0	10,0
Cultivar	Producción (kg ha ⁻¹)		
Ica Pijao	935a	990b	2227a
Nag 12	715b	1705a	2255a
Iguaçu	385d	935b	1705b
Puebla 152	220e	440d	1595b
México 80	550c	770d	—
Porillo sintético	780b	—	1617b
Promedio	597	968	1880

* Duncan al 5% de significancia

**Fig. 16.** Evaluación de materiales para su eficiencia y su respuesta al encalado.

Cuadro 16. Clasificación de las variedades de frijol en cuanto a su respuesta a la aplicación de carbonato de calcio.

Eficientes		Ineficientes	
Responsivo	No responsivo	Responsivo	No responsivo
Nag 12* Ica Pijao* Bat 1500 Bat 76 Puebla 152** Río Tibají Alajueta 1	Ica Pijao** Iguaçu** Porrillo Sint. Nag 12**	IguaÁu* Puebla 152* R 79 México 80** Huetar	Brunca Corobicí Chorotega México 80*

* Puriscal

** Pérez Zeledón

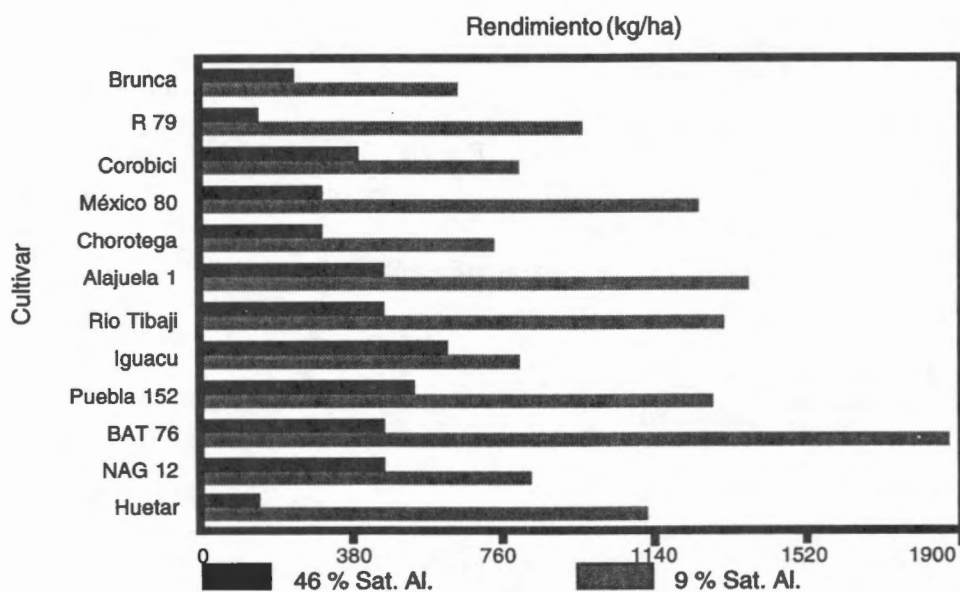


Fig. 17. Comportamiento de cultivares de frijol evaluados a dos niveles de saturación de aluminio.

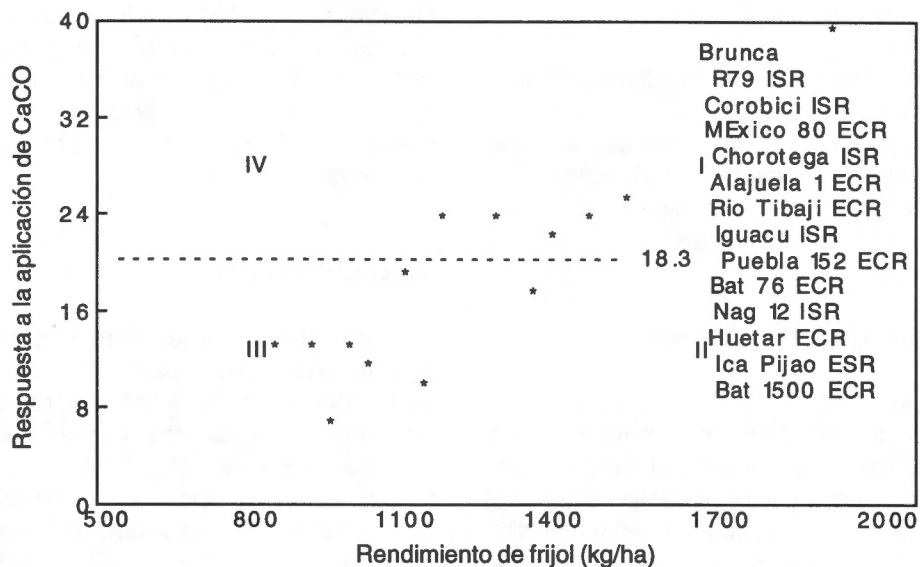


Fig. 18. Evaluación de materiales para su eficiencia y su respuesta al encalado.

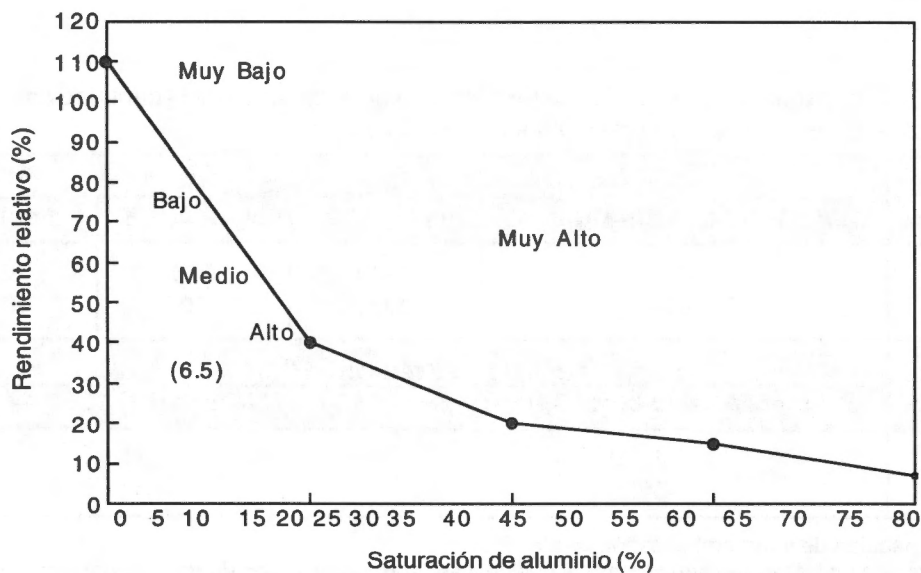


Fig. 19. Efecto de niveles de saturación de aluminio sobre el rendimiento relativo de frijol.

dimiento relativo; utilizando la metodología de Cate y Nelson.

Corella (16) utilizó algunas de las formulas para predecir encalado que se encuentran en la literatura (Cuadro 17), de todas ellas la que mejor predijo las necesidades de encalado fue la de cmol (+) L^{-1} de Al^{*1} , algunas formulas sobreestimaron o subestimaron.

Potasio, Magnesio y Azufre

La respuesta a estos nutrimentos está muy poco documentada en el cultivo de frijol en Costa Rica, de los tres el potasio es el que mas ha recibido atención. Corella (3, 11, 16) encontró que el nivel al cual se obtiene el 80% del rendimiento máximo es con $0,22 \text{ cmol (+) L}^{-1}$, y para obtener el 95% del rendimiento máximo es necesario contar con cerca de $0,30 \text{ cmol (+) L}^{-1}$ (Figura 20). En el caso del magnesio y el azufre solo se ha podido discernir puntos de respuesta y no respuesta, pero no existe la cantidad de información necesaria

para generar ninguna curva de ajuste. En el Cuadro 18 se observan los valores de referencia para el cultivo de frijol de potasio, magnesio, azufre y saturación de aluminio y en los Cuadros 19 y 20 se observan las recomendaciones de abonado para los citados nutrientes.

Micronutrientes

La investigación de la respuesta del frijol a micronutrientes es escasa, la Unidad de Suelos ha conducido alrededor de 10 experimentos de campo en esta area, la mayoría de ellos con respecto al zinc. Corella (3, 11, 16) encontró que el nivel de zinc en el suelo para obtener el 95% del rendimiento relativo fue de $1,8 \text{ mg ml}^{-1}$, el 60% del rendimiento relativo se obtuvo con valores de $1,0 \text{ mg ml}^{-1}$ (Figura 21). Con respecto a Boro solo se han efectuado tres experimentos que han presentado resultados de respuesta y no respuesta. En los Cuadros 20 y 21 se presentan los valores de referencia en azufre, boro y encalado.

Cuadro 17. Comparación entre las diferentes fórmulas de estimación de la cantidad de carbonato de calcio a aplicar y la respuesta real en el campo.

CaCO ₃ aplicado	Fórmulas de Predicción (kg ha ⁻¹)			
	$1,8 \cdot (\text{Al} - \text{RAS}(\text{Al} + \text{Ca} + \text{Mg})) / 100$	cmol Al^{*2}	$\text{cmol Al}^{*1,5}$	cmol Al^{*1}
500	43	1300	970	650
1000	197	2000	1500	1000
CaCO ₃ aplicado	Fórmulas de Predicción (kg ha ⁻¹)			
	$\text{cmol Al}^{*2} + (2 - \text{cmol Ca} + \text{Mg})$	$[\text{CICE}(\text{V2} - \text{V1}) / 100] \cdot \text{fx}$		
500	-2570	420		
1000	-3600	1011		

CICE = Capacidad de intercambio catiónico efectiva.

V2 = Saturación de bases deseadas para el cultivo a ser sembrado, obtenido de experiencias anteriores.

V1 = Saturación de bases obtenida de dividir $(\text{Ca} + \text{Mg}) / \text{CICE}$.

1 = Factor de corrección para PRNT = 100%.

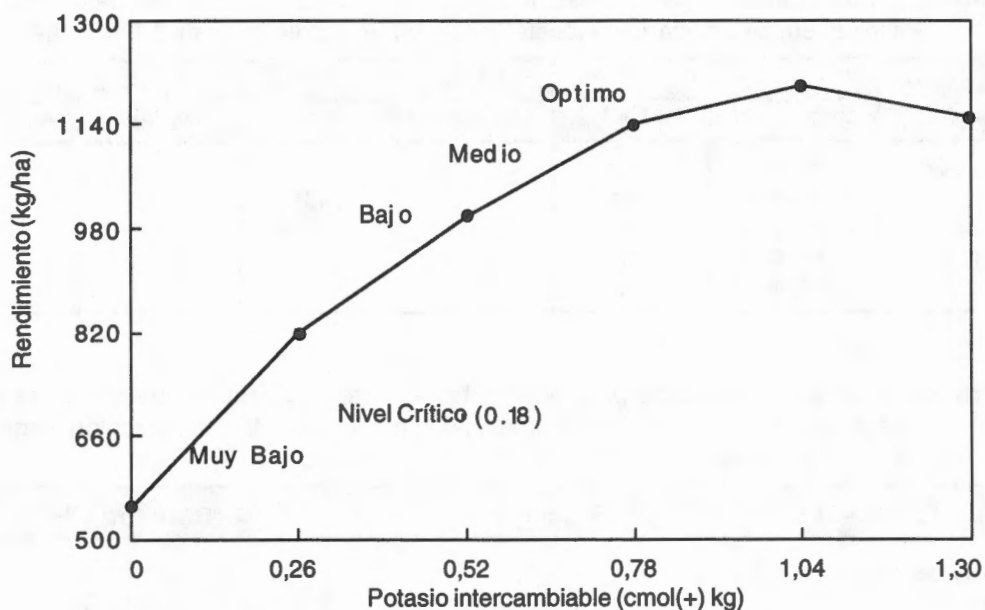


Fig. 20. Nivel crítico de potasio en el cultivo de frijol extraído con KCL 1 N.

Cuadro 18. Valores de referencia para interpretar resultados analíticos de suelo de potasio, magnesio, azufre y saturación de aluminio como guía de la fertilización y enmiendas del frijol en Costa Rica.

Valor en el suelo	Potasio cmol (+) L-1	Magnesio cmol (+) L-1	Azufre mg ml-1	% de saturación de Aluminio mg ml-1
Muy bajo	< 0,09			< 2,5
Bajo	0,10 - 0,19		2,6 - 5,1	
Medio	0,20 - 0,29		5,2 - 8,0	
Óptimo	0,30 - 0,34			
Alto	> 0,35		8,1 - 15,0	
Muy alto		>15,1		

Muy bajo = < 40% del rendimiento máximo
 Bajo = 40 - 80% del rendimiento máximo
 Medio = 80 - 90% del rendimiento máximo
 Óptimo = 90 - 100% del rendimiento máximo
 Alto = 100 - 90%
 Muy alto = 90 - 75%

Cuadro 19. Criterios para escoger las dosis de potasio, magnesio, azufre y carbonato de calcio para el frijol semimecanizado en Costa Rica para un rendimiento de 1,5 ton ha⁻¹

Nivel en el suelo	Potasio		Magnesio		Azufre	
	cmol (+)L ⁻¹	kg ha ⁻¹ K	cmol (+)L ⁻¹	kg ha ⁻¹ Mg	mg ml ⁻¹	kg ha ⁻¹ S
Muy bajo	< 0,09	80	< 1,3	24,2	< 4.0	14
Bajo	0,10 - 0,19	70				
Medio	0,20 - 0,29	50				
Optimo	0,30 - 0,34	25				
Alto	> 0,35	10				

Cuadro 20. Valores de referencia para interpretar resultados analíticos de suelo de potasio, magnesio, azufre y saturación de aluminio como guía de la fertilización y enmiendas del frijol en Costa Rica.

Valor en el suelo	Zinc (µg ml ⁻¹)	Boro (µg ml ⁻¹)
Muy bajo	< 0,4	< 1,03
Bajo	0,5 - 1,0	
Medio	1,1 - 1,8	
Optimo	1,9 - 3,1	
Alto	> 3,2	

Muy bajo = < 40% del rendimiento m-ximo

Bajo = 40 - 80% del rendimiento m-ximo

Medio = 80 - 90% del rendimiento m-ximo

Optimo = 90 - 100% del rendimiento m-ximo

Alto = 100 - 90%

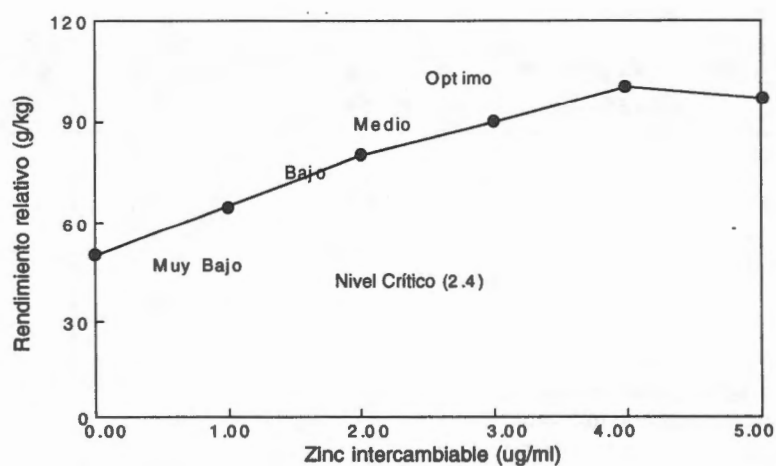


Fig. 21. Nivel crítico de Zinc en el cultivo de frijol extraído con EDTA.

Cuadro 19. Criterios para escoger las dosis de Zinc, Boro, y carbonato de calcio para el frijol semimecanizado en Costa Rica para un rendimiento de 1,4 t ha⁻¹

Nivel en el suelo	Zinc		Boro		SATAL	
	mg ml ⁻¹	kg ha ⁻¹ Zn	mg ml ⁻¹	kg ha ⁻¹ B	(%)	kg ha ⁻¹ CaCO ₃
Muy bajo	< 0,4	8	< 1,3	1	< 2,5	0
Bajo	0,5 - 1,0	6			2,6 - 5,1	0
Medio	1,1 - 1,8	4			5,2 - 8,0	500
Optimo	1,9 - 3,1	2				
Alto	> 3,2	—			8,1 - 15	1000
Muy Alto					> 15,1	2000

LITERATURA CITADA

- COCHRAN, T.T.; SALINAS, J.G.; SANCHES, P.A. 1980. An equation for liming acid mineral soils to compensate Al tolerance. *Trop. Agric.* 57: 133-140.
- COLEMAN, N.T.; THOMAS, G.W. 1967. The basic chemistry of soil acidity. *En* R.W. Pearson y F. Adams (ed). *Soil acidity and liming*. *Agronomy* 12: 1-41.
- CORELLA, J.F. 1981, 1982, 1983, 1984 Y 1985. Informe anual de labores. Unidad de Suelos, Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José, Costa Rica.
- CORELLA, J.F. 1982. Respuesta del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) a la fertilización nitrogenada y fosforica en un typic Eutrocept de Costa Rica. *En* Memorias de la XXVIII reunion anual de PCCMCA, San José, Costa Rica, 200p.
- CORELLA, J.F. 1982. Efecto de diferentes dosis de fertilizantes (al suelo y foliar), sobre el rendimiento del frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) en un typic Eutrocept de Costa Rica. *In*: Memorias de la XXVIII reunion anual de PCCMCA, San José, Costa Rica, 200p.
- CORELLA, J.F. 1982. Efecto de diferentes dosis de 10-30-10 al suelo y fuente de abono foliar, en el rendimiento del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.). *En* Memorias del V Congreso Agronómico Nacional, San José, Costa Rica, 176p.
- CORELLA, J.F. 1983. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno y fósforo en cinco ensayos de frijol, (en diversas localidades en el cantón de Upala, Alajuela). *En* Memorias del 29 Reunion Anual del PCCMCA, Ciudad Panamá, Panamá, 170p.
- CORELLA, J.F. 1983. Efecto de dosis crecientes de nitrógeno sobre dos distancias de siembra y dos variedades de frijol común. *En* Memorias del 29 Reunion Anual del PCCMCA, Ciudad Panamá, Panamá, 170p.
- CORELLA, J.F. 1983. Aspectos de fertilización del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) en Costa Rica. *En* Memorias Segundo Curso Intensivo de Capacitación de frijol. MAG-UCR-CIAT-FAO. Coronado, San José, IICA, 22p.
- CORELLA, J.F. 1983. El cultivo de frijol en Costa Rica, clasificación y manejo de suelo. *En* Memorias del VI Foro Internacional sobre Taxonomía de Suelos. CATIE, Costa Rica, 24p.
- CORELLA, J.F. 1986. Respuesta de los granos básicos al azufre y micronutrientes en algunos suelos de Costa Rica. *En* Memorias del VII Congreso Agronómico Nacional, San José, Costa Rica.
- CORELLA, J.F. 1986. Extracción de nutrimentos en algunos granos básicos en dos épocas de crecimiento del cultivo. *En* Memorias del VII Congreso Agronómico Nacional, San José, Costa Rica.

13. CORELLA, J.F. 1986. Fertilización nitrofosforica en el rendimiento de frijol común en dos ambientes de Guanacaste. *En* Memorias del VII Congreso Agronómico Nacional, San José, Costa Rica.
14. CORELLA, J.F. 1986. Respuesta del frijol comun a la fertilización nitrofosforica en el canton de Upala, Alajuela. *En* Memorias del VII Congreso Agronómico Nacional, San José, Costa Rica.
15. CORELLA, J.F. 1986. Selección de cultivares de frijol en suelos con bajos contenidos de fósforo nativo. *En* Memorias del VII Congreso Agronómico Nacional, San José, Costa Rica.
16. CORELLA, J.F. 1990. Datos sin publicar.
17. EVANS, C.E.; KAMPRATH, E.J. 1970. Lime response as related to percent Al saturation, solution Al, and Organic matter content. *Soil Sci. Amer. Proc.* 34: 893-896.
18. GUZMAN, P. 1980, 1981 y 1982. Informe anual de labores. Unidad de Suelos, Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José, Costa Rica.
19. HOWELER, R.H. Análisis de del tejido vegetal en el diagnóstico de problemas nutricionales en algunos cultivos tropicales. Programa de Yuca, CIAT, Cali, Colombia. 28p.
20. KAMPRATH, E.J. 1967. Exchangeable aluminium as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Sci. Soc. Am Proc.* 24: 252-254.
21. KASS, D.L., M. JIMENEZ, W. BERMUDEZ Y L.G. CEDEÑO. 1985. Respuesta del frijol común (*Phaseolus vulgaris* L.) var. Talamanca a aplicaciones de caliza y fósforo en suelos con altos niveles de aluminio y manganeso en la zona Atlántica de Costa Rica. *En* Memorias de la 31ª reunion del PCCMCA, San Pedro Sula, Honduras.
22. RAMIREZ, G.F. 1969. Síntomas de deficiencia de minerales en plantas de frijol (*Phaseolus vulgaris* L.) y sus relaciones nutritivas específicas. Tesis de grado, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
23. RAMIREZ, G.F. 1987. Evaluación de la eficacia de rocas fosfóricas como fuentes de fósforo para los cultivos en suelos de Costa Rica. *En* Memorias de Alternativas sobre el Uso como Fertilizantes de Fosfatados Nativos en América Tropical y Subtropical. CIAT, Colombia, 99-114p.
24. SPAIN, J.M.; FRANCIS, C.A.; HOWELER, R.H.; CALVO, F. 1974. Diferencias entre especies y variedades de cultivos y pastos tropicales en su tolerancia a la acidez del suelo. *En* Manejo de suelos en la América Tropical, CIAT, Colombia, 313-335.
25. SCHOLZ, U. 1983. Identification and analysis of Agroproduction zones by the overlay-correlation method. The case of Costa Rica. CIAT, Agroecological Studies Unit. Cali, Colombia, 102p.
26. SCHWEIZER, S.; COWARD, H.; VASQUEZ, A.. 1980. Metodología para suelos, plantas y aguas. Boletín técnico # 68, 1ª edición, Ministerio de Agricultura y Ganadería, San José, Costa Rica.

MANEJO DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y NIVELES DE STRESS EN SUELOS PARA LA EVALUACION DE TOLERANCIA DEL FRIJOL A BAJO FOSFORO

Douglas Beck¹, Fernando Muñoz²

RESUMEN

Manejo de la variabilidad espacial y niveles de stress en suelos para la evaluación de tolerancia del frijol a bajo fósforo. La posibilidad de identificar variedades de plantas tolerantes a bajo P, se hace realidad al aumentar el entendimiento de las relaciones suelo planta y la variabilidad genotípica en frijol. Cuando el objetivo de la investigación es identificar cultivares potenciales para ser liberados por los Programas Nacionales, las variedades tolerantes deberían desempeñarse bien en ausencia del "stress", y el proceso de selección debería permitir la expresión y consideración de las buenas características agronómicas y del rendimiento potencial. Cuando el objetivo es identificar padres con altos niveles de tolerancia, o mecanismos específicos, los cuales podrían ser incluidos en otro germoplasma agronómicamente deseable, puede ser más eficiente seleccionar bajo niveles severos de "stress". Sin importar los objetivos del programa, es necesario mantener un nivel conocido del "stress" con el mínimo de variabilidad espacial, de manera que las diferencias observadas tengan mayor probabilidad de ser estadísticamente significativas y repetibles. Varios puntos principales deben ser tenidos en cuenta en el manejo de un programa de investigación para tolerancia a un "stress". Entre estos están: el tipo y nivel de "stress", características y manejo del suelo, adaptación genotípica y evaluación de la tolerancia.

ABSTRACT

Management of soil spatial variability and stress levels in evaluation of plant tolerance to low soil P availability. With improved understanding of genotypic variability in bean and of soil-plant interactions, the possibility of identifying plant varieties tolerant to low P has become a reality. Where the aim of research is to identify potential cultivars to be released by National Programs, tolerant varieties should perform well in the absence of stress, and the screening process should allow expression and consideration of good agronomic characteristics and yield potential. Where the aim is to identify parents with high levels of tolerance or specific mechanisms which could be combined into other agronomically desirable germplasm, it may be more efficient to screen at severe levels of stress. Regardless of the objectives of the program, it is necessary to maintain a known level of stress with minimum spatial variability so that observed differences are more likely to be statistically significant and repeatable. In managing a stress tolerance research program then, several major issues must be addressed. Among these are the type and level of stress, soil characteristics and management, and genotypic adaptation and tolerance evaluation.

¹ CIAT, Apdo. 55-2200, Coronado, San José, Costa Rica .

² CIAT, AA 6713, Cali, Colombia

INTRODUCCION

Hasta ahora los problemas limitantes de la producción agrícola asociados con deficiencia de nutrimentos, han sido enfrentados tratando de modificar las condiciones del suelo. Esta manera de afrontar estos problemas tiene inconvenientes tales como:

- solución del problema en un sitio muy específico, debido a la variación del suelo entre sitios y aún en el mismo sitio.
- alto costo de los insumos necesarios, que en la mayoría de los casos pone la solución del problema fuera del alcance del pequeño agricultor.
- uso poco eficiente de los recursos, puesto que la cuantificación real del limitante es muy difícil y existe mucha probabilidad de sub o sobreestimar las cantidades de insumos necesarias para modificar las condiciones del suelo limitantes de la producción.
- efectos adversos para el ambiente, causados por el uso intensivo de los subsidios químicos utilizados para mejorar la productividad de los cultivos, principalmente en los países desarrollados; hecho que va en contra del principal punto de acuerdo mundial en la última década, la sostenibilidad de los sistemas de producción.

Con el mejoramiento del entendimiento de la variabilidad genotípica en frijol y de las interacciones suelo-planta, la posibilidad de identificar variedades tolerantes a bajo fósforo se ha vuelto una realidad. Pueden ser varios los objetivos para un programa de investigación de tolerancia a un "stress". Si la meta es identificar cultivares potenciales para ser liberados por Programas Nacionales, las variedades tolerantes deberían desempeñarse bien en ausencia del "stress", y el proceso de selección debería permitir la expresión y consideración de características agronómicas buenas y del rendimiento potencial. Si la meta es identi-

ficar padres con altos niveles de tolerancia o mecanismos específicos los cuales podrían ser introducidos en germoplasma agronómicamente deseable, quizás sea más eficiente seleccionar con niveles severos del "stress". Independientemente de los objetivos del programa, es necesario mantener un nivel conocido del "stress" con mínima variabilidad espacial de manera que las diferencias observadas tengan mayor probabilidad de ser estadísticamente significativas y repetibles.

La selección del sitio para investigación de tolerancia a un "stress" es extremadamente importante por varias razones. Es importante que el sitio sea bien caracterizado y manejado, además deben conocerse el nivel de "stress" aproximado, las presiones de plagas y enfermedades y el rendimiento potencial promedio. Por estas razones, es atractivo usar como sitio las estaciones de investigación, pero estas tienden a haber recibido fertilización por mucho tiempo por lo que usualmente no son apropiadas para la investigación de "stresses" por nutrimentos. Los sitios en fincas a menudo tienen la ventaja de tener el nivel de "stress" deseado, pero pueden tener otros "stresses" asociados, los cuales prevalecen sobre el nivel de P. Es esencial pero quizás difícil mantener en fincas distantes un programa activo de manejo de enfermedades y plagas, de manera que los genotipos promisorios para tolerancia a bajo P, pero susceptibles a presión de plagas locales no sean pasados por alto. Los suelos deberían ser bien caracterizados, de manera que "stresses" adicionales al de P sean conocidos y si se desea, neutralizados. Si es posible, deberían colectarse datos meteorológicos especialmente precipitación de manera que la relación entre tolerancia y adaptación pueda ser mejor definida. Debido a la variabilidad de las condiciones ambientales y para asegurar la estabilidad de la tolerancia identificada, son necesarios varios ciclos de cultivo para la evaluación de los genotipos para tolerancia a bajo P. El proceso de caracterización y homogenización del sitio es importante si se

quieren lograr buenos resultados, pero estos requieren considerables recursos y la inversión hecha debería ser conservada a través de buenas prácticas de manejo del suelo y del cultivo.

Entonces, en el manejo de un programa de investigación de tolerancia a "stresses", deben ser señalados varios puntos principales. Entre estos están: el tipo y nivel de "stress", características del suelo y su manejo, y evaluación de la adaptación genotípica y de la tolerancia. Estos son discutidos en las siguientes secciones.

Tipo y nivel de "stress"

Mientras los problemas de fertilidad del suelo comunmente son complejos de dos o más "stresses", los complejos son altamente variables y las combinaciones de "stresses" son casi siempre diferentes de un suelo a otro. Los suelos con pH por debajo de 5,0 son especialmente propensos a exhibir un complejo de "stresses", los cuales podrían incluir toxicidad por Al y/o Mn, bajo Ca y/o Mg, y deficiencias de micronutrientes (p.ej Mo, Cu) además del "stress" por bajo P. Los suelos con pH alto (>7.5) son más propensos a presentar deficiencias de B y Zn en adición al bajo P. La selección para tolerancia a complejos puede tener aplicación directa si el objetivo primario es identificar genotipos adaptados que puedan ser usados por los agricultores que producen frijol bajo tal complejo. Sin embargo, los complejos de "stresses" son altamente variables y las interacciones genotipo por complejo de "stresses" son propensas a ser muy problemáticas en la selección para tolerancia al complejo. Las ventajas de seleccionar para tolerancia a complejos son que los cultivares adaptados a tales condiciones de producción son fácilmente identificados con pocos viveros de selección y por lo tanto menos recursos son requeridos. Las desventajas son que la representatividad del "stress" es cuestionable

y el complejo variaría grandemente de sitio en sitio y aún dentro de un sitio, y genotipos individuales con alta tolerancia específica (a P, en este caso) serían pasados por alto.

Si el objetivo de la investigación es identificar genotipos que tengan genes de tolerancia a "stresses" específicos tales como bajo P, entonces el énfasis debería hacerse en selección bajo el "stress" individual, tales genotipos pueden ser utilizados como líneas parentales en un programa de mejoramiento para generar viveros para el "stress" específico y poder también tener tolerancia moderada a algún número de otros "stresses". En el manejo de un suelo para un "stress" específico tal como bajo P, es relativamente simple modificar el suelo para aliviar otros "stresses". En el caso de suelos de bajo pH, se puede añadir cal para llevar el pH a valores de 5.2-5.3. (Liming acid soils), lo cual neutralizará el exceso de Al y Mn en el suelo, previniendo deficiencias de micronutrientes y aumentando el contenido de Ca del suelo para prevenir su deficiencia. Esto no afecta la disponibilidad de P pero asegurará que otros "stresses" no estén presentes.

Nivel de "stress" para selección vs búsqueda de mecanismos

Si la meta es identificar cultivares potenciales para ser liberados por Programas Nacionales, las variedades tolerantes deberían también comportarse bien en ausencia del "stress". Las variedades deben responder bien a los nutrientes disponibles, así sean estos bajos o adecuados. El proceso de selección debería, por lo tanto, considerar y permitir la expresión de características agronómicas deseables y del rendimiento potencial. El seleccionar solamente bajo niveles de "stress" severos no permite esta expresión, y los genotipos seleccionados podrían ser aquellos de alta tolerancia pero de poco rendimiento potencial. Hay dos opciones:

- los genotipos pueden ser evaluados bajo condiciones de "stress" severo y sin "stress" simultaneamente, seleccionando aquellos que se comportan bien en ambas situaciones.
- los genotipos pueden ser evaluados bajo condiciones moderadas de "stress" (50% de reducción del rendimiento sin "stress") durante la primera etapa de selección y despues bajo "stress" severo (70-80% de reducción) en la etapa avanzada.

Donde el objetivo es identificar padres con altos niveles de tolerancia o que exhiban mecanismos especificos de tolerancia es más eficiente seleccionar a niveles severos de "stress". Hemos encontrado útil, sin embargo, acompañar el tratamiento de "stress" severo con un tratamiento sin stress para entender los efectos adicionales del ambiente tales como distribución de las lluvias, enfermedades, etc.

Variabilidad espacial en los stress de suelo

Es muy común que el nivel de P disponible para las plantas tenga un gran grado de variación dentro de un campo experimental. Esto es debido a varios factores incluyendo la concentración y tipo de minerales cristalinos, los cuales fijan P a formas no disponibles, patrones previos de fertilización fosforada, especialmente bandas residuales de fertilizantes fosforados provenientes de fertilizaciones previas dirigidas al surco, y diferencias espaciales en profundidad del suelo, pH, y en los niveles de materia orgánica. Un ejemplo de esta variabilidad espacial es ilustrado en la Figura 1, donde se representan la distribución de P, pH, y materia orgánica en un campo en Perez Zeledón donde investigadores de la Universidad de Costa Rica y CIAT conducen un trabajo de tolerancia a bajo P. El suelo en este

campo fue muestreado formando cuadrículas de 5 m de lado y en cada vértice se tomó una muestra hasta una profundidad de 25 cm y cada muestra fue analizada separadamente para mapear la distribución espacial de los diferentes nutrimentos. A partir de las muestras colectadas y usando análisis de co-varianza en un programa geoestadístico, es posible determinar la probabilidad de las concentraciones de los diferentes nutrimentos del suelo del área del campo muestreada.

El efecto de esta variabilidad del suelo es un gran incremento del coeficiente de variación en los datos experimentales, especialmente cuando el P disponible es muy bajo y valores ligeramente superiores sobre este nivel crítico promueven una gran respuesta de la planta. Esta variabilidad es aún más importante cuando se usan pequeñas parcelas tales como surcos sencillos. Una replicación con 4 ppm de P disponibles en el suelo puede producir 3-4 veces más biomasa de planta y mayor extracción de P que una con 1-2 ppm de P disponibles. En esta situación, con 2 de 3 replicaciones a un nivel superior de P, la tolerancia de un cultivar a bajo P será muy sobreestimada, y las diferencias observadas en tal campo serán muy difíciles de repetir en los siguientes ciclos.

Similarmente, la variabilidad entre sitios puede causar grandes diferencias en el desempeño de un cultivar y crear incertidumbre sobre su verdadero valor. Los sitios pueden tener valores similares de P disponible de acuerdo a un análisis de P en el suelo en particular (Bray II u Olsen) pero producir diferente comportamiento de la planta debido a diferencias en el P realmente disponible en el suelo (ver próxima sección). Hay muchas formas de tener en cuenta esta variabilidad intra- o inter-sitios de experimentación con stress de nutrimentos, algunas de las cuales son discutidas en la siguiente sección.

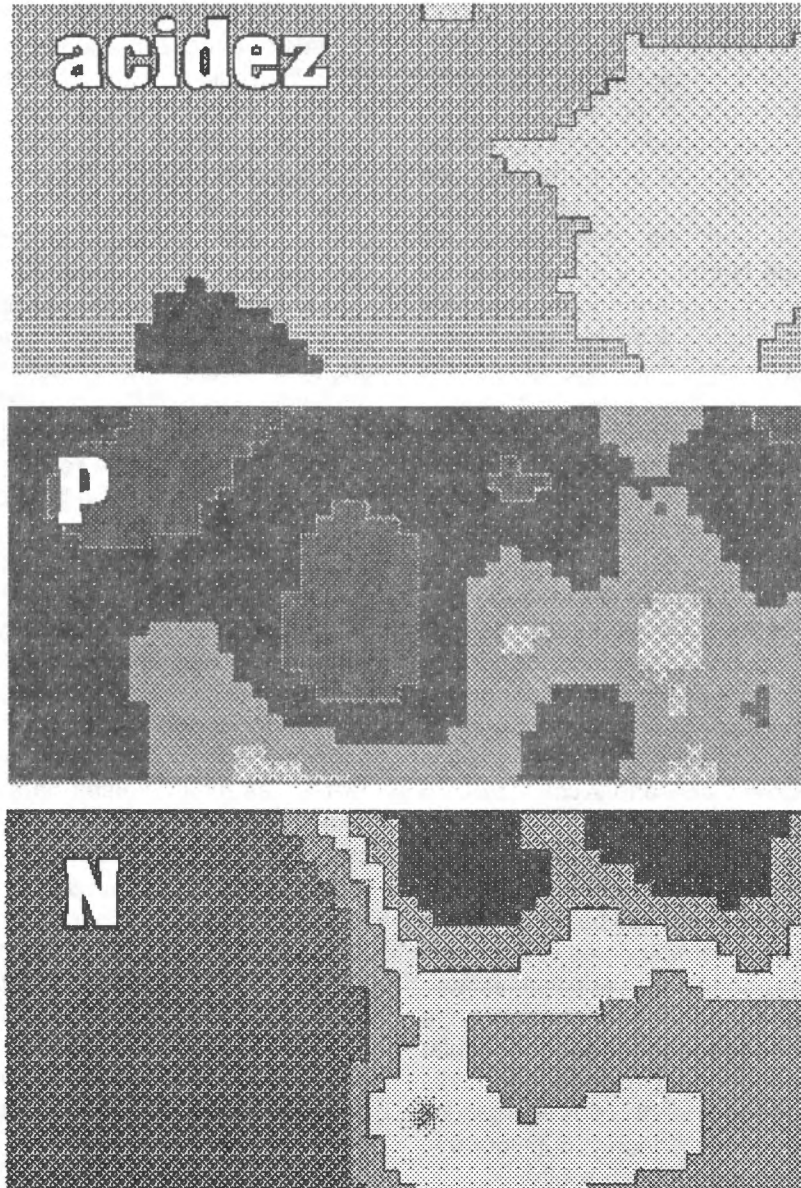


Fig. 1. Mapas del campo experimental (Pérez Zeledón, Costa Rica), demostrando la variabilidad espacial de los factores del suelo afectando la productividad del frijol.

Interacción del fósforo y la fijación biológica del nitrógeno

Los suelos con baja fertilidad y con bajo P, a menudo son también caracterizados por deficiencia de N, la excepción son los suelos volcánicos, los cuales pueden tener alto contenido de materia orgánica pero una muy alta fijación de P debido a su alto contenido de alófono, y por lo tanto una relativamente alta disponibilidad de N con muy alto "stress" de P. El frijol no es completamente dependiente del N del suelo, debido a su capacidad para fijar N atmosférico en formas utilizables por la planta, usando sus nódulos radiculares que contienen bacterias rhizobium. Sin embargo, debe considerarse que el proceso de fijación de N en la planta tiene un alto requerimiento de P y por lo tanto la fijación de N es muy limitada en suelos bajos en P. En nuestra investigación en CIAT (1995, CIAT) hemos encontrado que cultivares eficientes en el uso interno de P (g semilla/g P) a bajo P son también más eficientes en la fijación de N a bajo P, probablemente debido a su capacidad para particionar P a varias partes de la planta (tales como nódulos o vainas) cuando es necesario. A causa de esto es deseable seleccionar tanto para fijación de N como para tolerancia a bajo P, por lo tanto, recomendamos que no se deben aplicar fertilizantes nitrogenados a suelos bajos en P usados para selección de materiales tolerantes a bajo P, a menos que el N aplicado sea necesario para obtener expresión de diferencias entre cultivares. En este caso, la nodulación radicular debería ser observada en la etapa intermedia de la floración. Si hay ausencia de nódulos o los hay en muy bajo número, debería considerarse la inoculación con cepas de rhizobium.

Manejo del suelo

Los suelos generalmente contienen varios miles de veces más P que el que es realmente disponible a la planta, ya que la gran mayoría del P en el suelo está fuertemente sujeto por

enlaces químicos o electrostáticos al componente cristalino del suelo. El único P realmente disponible es aquel contenido en la solución del suelo, el cual es mantenido en equilibrio por la fase sólida. En los andosoles volcánicos, el cristal prevalente que compone esta fase sólida es el alófono, el cual tiene una muy alta capacidad de adsorber P y por lo tanto mantenerlo fuera de la solución del suelo y de la planta. En muchos suelos tropicales meteorizados, tales como los ultisoles, el P está adsorbido al hierro o a cristales de óxido de aluminio, en los cuales el enlace del P a los cristales incrementa su intensidad cuando el pH decrece o cuando la concentración relativa de cristales en el suelo se incrementa. La capacidad del suelo para resistir a cambios en la concentración de P en la solución del suelo cuando se añade o se remueve P es llamada "capacidad de amortiguación de fosfatos". Esta es una propiedad intrínseca del suelo muy importante para la nutrición de plantas. Algo del P del suelo, y algunos argumentan que es el componente más importante disponible para las plantas en suelos con alta fijación de P, es mantenido en forma orgánica (Stewart y Tiessen, 1987). Las metodologías para medir el P del suelos usan varios extractores para estimar la cantidad de P que estaría disponible para las plantas en la siguiente estación de cultivo. La exactitud de los métodos dependerá del tipo de suelo, la fuerza de la reacción de la fase sólida y el P en solución (lo cual depende de muchos factores que incluyen pH), y cantidades de P orgánico disponible. Los métodos nuevos usan una cinta impregnada de resina u óxido de hierro cuya fuerza de absorción se aproxima mucho a la de las raíces de las plantas (Cooperband and Logan, 1994). Los métodos usados más comúnmente en Latinoamérica son el Bray II y Mehlich II, pero estos no son los métodos más exactos (Tiessen *et al.*, 1994). Los diferentes suelos mostrarán por lo tanto diferentes características con respecto al P disponible, tal como sean indicadas por los resultados de análisis de suelos. Es normal que una aplicación dada de P a diferen-

tes suelos resulta en una muy diferente cantidad de P disponible para las plantas en la solución del suelo. Este punto debe ser considerado cuando uno usa valores de análisis de suelo para comparar comportamiento de plantas en diferentes suelos bajos en P.

En nuestra experiencia la identificación y manejo de un sitio apropiado en el campo, es uno de los componentes más dificultosos de la experimentación de tolerancia de plantas a bajo P, así que una vez un sitio apropiado es identificado será importante mantenerlo durante varios ciclos de cultivo. En el manejo de un campo para experimentación en condiciones de bajo P, deben ser consideraciones primarias la caracterización del nivel de stress de P y el mantenimiento de la homogeneidad de la disponibilidad de P en el área de los ensayos. En una sección previa describimos como el muestreo de suelo a intervalos, sobre el área de ensayos, permite mapear la variabilidad espacial. Con esta información, el diseño experimental puede ser modificado para tomar en cuenta esta variabilidad espacial, y los tratamientos pueden ser bloqueados y tener la ventaja de áreas uniformes de alto y bajo P. Una alternativa para el extensivo muestreo y análisis de suelo, es la siembra de un cultivo indicador, tal como maíz, el cual responde claramente a las diferencias en P disponible para la planta. En este caso, todos los factores limitantes excepto P (tales como N con 150-200 N/ha) debe ser removido, de manera que la producción de biomasa de las plantas refleje claramente la disponibilidad de P. La cosecha de las plantas en un arreglo geométrico (2-3 plantas cada 1 m²) con registro de peso fresco permitirá el mapeo de la variabilidad del campo (usando de nuevo análisis de covarianza) y mejorar el manejo de los ensayos.

Para ajustar los niveles de disponibilidad de P en un campo, ya sea para todo el campo o en pequeños "parches" y para homogenizar la disponibilidad de P, es importante tener una idea del comportamiento de un cultivar cono-

cido o un buen testigo dado el nivel no ajustado del P disponible en el suelo. Esto puede lograrse fácilmente incluyendo la variedad testigo como un surco simple o bordes entre cada dos parcelas experimentales o el campo puede ser sembrado con anterioridad a la iniciación del trabajo de selección. Esto dará una idea del nivel general de stress, además de servir de ayuda para identificar áreas donde el P es especialmente alto o bajo.

En el caso de un suelo con muy alto stress, puede aplicarse P en cada ciclo de cultivo de acuerdo al nivel de stress deseado. Sin embargo, la práctica agrícola común de fertilizar con P en bandas no se recomienda, simplemente por el hecho de que el efecto de la banda persiste durante varios ciclos e incrementará la variabilidad espacial en el campo. Las bandas de fertilizaciones previas pueden afectar fuertemente plantas individuales o surcos, y por lo tanto incrementar los coeficientes de variabilidad. Nuestra experiencia nos ha mostrado que las aplicaciones al voleo de 5-10 kg de P/ha, incorporadas al suelo con un arado rotativo (rototiller) a una profundidad de 25 a 30 cm, nos da un nivel apropiado de P disponible para hacer selección en un ciclo de cultivo sin efecto residual para el siguiente semestre (dependiendo del tipo de suelo y su capacidad de amortiguación). Donde se determina que el nivel de P en el suelo es muy alto para selección bajo stress, el P disponible en el suelo puede ser reducido sembrando un cultivo extractor tal como maíz o sorgo por uno o más ciclos. Con una relativamente alta aplicación de N y con una alta densidad de siembra de maíz, este podría extraer P desde el suelo de acuerdo a su disponibilidad y tendría el efecto adicional de reducir la variabilidad espacial de la disponibilidad de P.

La heterogeneidad de la intensidad del stress de un nutrimento en el suelo también puede ser tenida en cuenta para el ajuste y análisis experimental. El uso de variedades testigo es una opción obvia. La alta variabili-

dad entre los sitios de selección implica la necesidad de que el testigo ocurra frecuentemente, incrementando considerablemente el tamaño del ensayo. Al momento del análisis de los datos, mucha gente encuentra dificultad en el uso de los testigos para el ajuste de los valores de parcela. El ajuste de los valores de parcela con la media de los "vecinos próximos" ha trabajado bien. El uso de la media de los cuatro vecinos próximos (dos en cada lado) como covariable en el análisis de varianza es generalmente el método más efectivo para parcelas de surco sencillo. Para el mantenimiento de un campo para selección de tolerancia a bajo P en frijol, es muy importante un manejo agronómico apropiado. El cultivo continuo de frijol tiende a favorecer la acumulación de enfermedades (particularmente enfermedades radiculares), nemátodos y poblaciones de insectos plaga. El incremento en las poblaciones de patógenos puede ser especialmente destructivo en este tipo de selección, ya que las plantas con nutrición pobre tienden a ser más susceptibles a patógenos. La solución es simple: rotar cultivos. La inclusión de una rotación de maíz en el sistema anual del cultivo frecuentemente significa que una menor área experimental puede ser sembrada en cada ciclo, pero tiene el doble efecto de reducir patógenos y plagas y también homogeniza el campo en términos de variabilidad espacial del P. Por lo tanto, habrá menor oportunidad de que los resultados experimentales sean afectados adversamente por efectos ambientales.

Tolerancia y adaptación

La tolerancia a problemas relacionados con la fertilidad del suelo es muy afectada por la adaptación de una variedad al ambiente. Por lo tanto genotipos rechazados en un sitio pueden ser tolerantes en otro. Como ejemplo, sitios de bajo P en el este de Africa resultaron inútiles para selección de tolerancia de materiales de gran altitud identificados en Colom-

bia. Este efecto de adaptación en cultivares de frijol hace de la escogencia del sitio de selección algo muy importante. El sitio debe ser representativo del área en la cual característica deseada (tolerancia a bajo P) será aplicada, o los genotipos tendrán que ser seleccionados en el número de sitios diferentes que representen el rango de agro-ambientes donde los cultivares pueden ser cultivados. Los ensayos multi-localidad son una posibilidad, pero dados la complejidad y costo de la selección para tolerancia a bajo P, es limitado el éxito potencial de los ensayos multi-localidad para identificar cultivares potenciales o padres. La cuidadosa elección de un sitio que represente un gran ambiente agroecológico tiene mejor oportunidad de éxito, especialmente si se tiene el cuidado de manejar apropiadamente el sitio. Es esencial en cualquier caso incluir además del tratamiento de bajo P, un tratamiento alto u óptimo de P para determinar la adaptación de los cultivares al ambiente, el potencial estacional y los efectos ambientales sobre la productividad. Por ejemplo, donde la precipitación es una limitación primaria del rendimiento durante una estación en particular, esto será reflejado en la reducción del rendimiento, tanto de los tratamientos en alto como en bajo P, dándonos una útil información a partir de lo que de otra manera hubiera sido un semestre muy pobre. Si un cultivar produce alto rendimiento a alto P pero poco o ninguno a bajo P, este obviamente no es tolerante a bajo P. Pero si el rendimiento a bajo y alto P es bajo, la adaptación puede ser el problema y la variedad puede ser muy tolerante al stress bajo un ambiente diferente.

Los tipos de medidas y muestreos, conducidos para evaluar tolerancia a bajo P, variaran obviamente con los objetivos. Donde la meta es identificar cultivares potenciales para ser liberados por Programas Nacionales, las variedades tolerantes deberían rendir bien bajo stress por bajo P y el rendimiento de semilla sería el principal criterio de selección. En este caso, el diseño experimental debería permitir

suficiente área de cosecha para tener en cuenta la variabilidad espacial del stress. Donde están siendo investigados mecanismos para mejorar la eficiencia en la extracción y uso de P con la meta de obtener padres potenciales, puede ser útil muestrear biomasa de planta y/o extracción de P en varios estados. Para medir extracción total de P en la planta (necesario si van a ser calculadas las eficiencias de extracción de P o de uso de P) debe ser cosechada la biomasa aérea de la planta en madurez fisiológica, la muestra uniformemente molida, y submuestreada para digestión y contenido de P. Es esencial que la submuestra contenga la proporción correcta de materiales de hoja, tallo y vainas ya que algunas partes tendrán mayor concentración de P que otras, y un submuestreo pobre resultaría en valores de P total no confiables. Las raíces pueden ser muestreadas efectivamente en el estado de llenado de vainas en frijol, dado su cultivo en un suelo suelto donde la recuperación de las raíces es posible. Hemos encontrado raíces de cerca de 1 m de longitud en este estado de la planta y su extracción completa puede ser tediosa. Debido a la fuerte interacción entre bajo P y la fijación biológica de nitrógeno, puede ser importante anotar presencia y grado de nodulación, en el estado intermedio de la fase de floración. Esto es especialmente importante en suelos bajos en N donde la deficiencia de N debida a una pobre fijación de N puede afectar las evaluaciones para tolerancia a bajo P.

Actualmente estamos en el proceso de evaluar el efecto remanente del crecimiento en condiciones de bajo P sobre el contenido de P en la semilla y como este afecta el crecimiento subsiguiente en suelos de bajo P. Hemos encontrado que en general la semilla procedente de un ambiente bajo en P tiene una concentración muy similar a la de semilla cultivada en alto P, pero la semilla de plantas de bajo P tiende a ser mas pequeña y por lo tanto contiene menos reservas de P total (y de otros nutrimentos). Hemos encontrado que el efecto

de tamaño de semilla es importante para algunas características para la extracción de P (tal como masa radicular) hasta floración, pero tal correlación desaparece en el estado de llenado de vainas. Sin embargo, recomendamos usar semilla cultivada en condiciones de alto P hasta que este efecto remanente pueda ser caracterizado.

Esfuerzos cooperativos de selección

Debido a que las discusiones están actualmente enfocadas en el desarrollo de un esfuerzo regional Centroamericano para la selección para tolerancia a bajo P en frijol, se describe el ejemplo del BILFA (Bean Improvement for Low Fertility soils in Africa). El BILFA es un esfuerzo pan-Africano de selección para tolerancia a baja disponibilidad de los mas importantes nutrimentos del suelo para el crecimiento del frijol, principalmente P y N pero incluyendo el complejo de bajo pH y Ca, por selección independiente para cada uno de los tres "stresses" mas que para tolerancia a complejos de "stresses". Entradas de buen tipo agronómico y/o reacción conocida a problemas de fertilidad de suelos son colectadas de los programas nacionales y de los programas de mejoramiento de CIAT para ser seleccionadas para los "stresses". La selección de aproximadamente 300 entradas es hecha en sitios primarios (dos por cada "stress" mayor en dos ambientes diferentes) por dos ciclos, rechazando 50% de las entradas basandose en los resultados del primer ciclo y otro 30-40% basandose en los resultados del segundo ciclo. La prueba de confirmación de los materiales remanentes es hecha en sitios de stress adicionales. La selección se efectúa a niveles de stress moderados que permitan 40-50% del rendimiento bajo condiciones sin stress, debido a la expresión de rendimiento potencial y buena adaptación, junto con tolerancia.

En una reciente reunión de trabajo (Wortmann, 1995) se reorientó el flujo de se-

Cuadro 1. Procedimiento recomendado para evaluación de germplasma frijol a tolerancia a bajo fertilidad en suelos. El objetivo de la etapa I es a identificar genotipos tolerante para ser liberados; la etapa II puede operar concurrente con la etapa I, para estudios sobre mecanismos. Wortmann, 1994.

Estación	Detalles	Tamaño parcela/repes	Nivel stress
Etapa I			
A	360 entradas, solo sitios primarios. Criterio: redimiento bajo stress. Selecciona mejor 50%	Surcos indiv, 2 reps	Moderado
B	180 entradas, sitios primarios. Criterio: redimiento bajo stress. Selecciona 40-50 líneas	parc de 2 surcos, 2 reps	Moderado
C	50 líneas, sitios primarios y secundarios. Criterio: rendimiento	parc de 2-4 surcos, 3 reps	Moderado y sin stress
D	20-35 líneas, sitios primarios y secundarios. Criterio: rendimiento, biomasa a madurez, extracción total de nutrientes	parc de 4 surcos, 3 reps	Moderado y sin stress
Etapa II			
C2	50 líneas, sitios primarios. Criterio: rendimiento, biomasa, extracción total de nutrientes	parc de 2-4 surcos, 3 reps	Alto stress

lección como se muestra en el Cuadro 1 para incluir identificación de padres potenciales en los esfuerzos de mejoramiento. Durante la primera etapa, variedades de buen tipo agronómico son identificadas con lo cual quedan disponibles como cultivares o como padres en mejoramiento. En la segunda etapa, los materiales promisorios son evaluados a altos niveles de stress para identificar padres superiores para mejoramiento. La primera etapa requiere de cuatro ciclos, mientras que la segunda etapa requiere solamente un ciclo adicional, pero este puede ser hecho concurrentemente con el tercer o cuarto ciclo de la etapa 1.

LITERATURA CITADA

- ADAMS, F. 1984. Soil Acidity and Liming. pp 358-365. ASA No.12. Madison.
- CIAT. 1995. Programa Frijol Informe Anual.
- COOPERBAND, L.R.; LOGAN, T.J. 1994. Measuring the changes in labile soil phosphorus using anion-exchange membranes. Soil Sci. Soc. Am. J. 58:105-114.
- STEWART, J.W.B.; TIESSEN, H. 1987. Dynamics of soil organic phosphorus. Biogeochemistry 4:41-60.

TIESSEN, H.; STEWART, J.W.B.; OBERSON, A. 1994. Innovative phosphorus availability indices. *In*: SSSA (ed.) Soil testing: Prospects for improving nutrient recommendations SSSA Spec. Publication.

WORTMANN, C.S. 1994. Bean Improvement for Low Fertility Soils in Africa: Proceedings of a Working Group Meeting, Kampala, Uganda, 23-26 May, 1994. Network on Bean Research in Africa, Workshop Series No. 25, CIAT.

EFFECTO DE LA EROSION Y FERTILIZACION DEL SUELO SOBRE EL RENDIMIENTO DEL FRIJOL EN VERACRUZ, MEXICO ¹

Jesús Uresti, Ernesto López ²

RESUMEN

Efecto de la erosión y fertilización del suelo sobre el rendimiento de frijol en la zona central de Veracruz, México. El presente trabajo se estableció durante el ciclo otoño-invierno 1994 en dos suelos (Luvisol órtico y Feozem háplico) de la zona central de Veracruz con 00, 10, 20 y 30 centímetros erosionados y con y sin la aplicación de fertilizante, resultando en ocho tratamientos que identifiquen, los factores edáficos que limitan la producción de frijol, así como definir la relación erosión-productividad. Los resultados muestran que la erosión redujo la productividad de los dos suelos estudiados encontrándose una relación erosión-productividad bien definida de naturaleza exponencial. En el Luvisol órtico las causas de la reducción de la productividad son la baja disponibilidad de nutrimentos y condiciones físicas adversas relacionadas con la reducción de la capacidad de exploración de raíces, mientras que en el Feozem háplico son principalmente de índole física relacionadas con la disminución de la capacidad del suelo para almacenar agua. El fertilizante afectó la relación erosión-productividad incrementando el rendimiento de grano. En la fase sin erosión de ambos suelos el fertilizante incrementó en forma significativa el rendimiento de frijol, sin embargo, este disminuyó en forma paralela con la erosión del suelo hasta un mínimo cuando el horizonte "A" de ambos suelos se erosionó 30 cm.

ABSTRACT

Effect of soil erosion and fertilization on bean yielding in the central region of the state of Veracruz, México. This research was carried out during the 1994 winter season in the tropical central region of the state of Veracruz, México. The aim was to identify the main soil constraints for bean production in two soils (Orthic luvisol and haplic phaeozem) with 00, 10, 20 and 30 centimeters of topsoil lost, as well as to evaluate the soil erosion-soil productivity relationship with and without the use of fertilizer. Results showed that on both soil, erosion reduced productivity that could be explained by an exponentially well defined relationship. In the orthic Luvisol bean yield reduction was due to nutrients low availability of nutrients and poor soil physical conditions related to root exploration capacity in the "B" horizon. In the haplic Phaeozem yield drop was caused by the reduction of the soil water holding capacity. Fertilizer affected the soil erosion-soil productivity relationship by increasing yield. The higher yield increment was achieved in the no-eroded phase of both soils and it was drastically reduced as the complete "A" horizon was eroded away.

¹ Parte del proyecto Manejo del Suelo y Agua para conservar su productividad. CIRGOC-INIFAP.

² Investigadores del Campo Experimental Cotaxtla-INIFAP.

INTRODUCCION

La erosión hídrica del suelo es uno de los principales problemas en las zonas tropicales del sureste de México. Los suelos de estas zonas generalmente presentan un horizonte "A" superficial con mayor capacidad productiva que los horizontes "B" o "C" subsuperficiales, por lo que es de esperarse que en la medida que éste se erosione y queden expuestos los horizontes "B" o "C" con condiciones adversas para el desarrollo de los cultivos, se reduzca la productividad del suelo. Al respecto, Vazquez (1986), indicó una reducción promedio de 33 por ciento, mientras que Uresti *et. al.* (1994), estimaron una reducción en la productividad del suelo de 44 y 13 por ciento para áreas con alto y bajo riesgo de erosión respectivamente en la zona tropical del centro del estado de Veracruz. Debido a causas de diversa índole, entre las que sobresalen las socioeconómicas, el cultivo de frijol en el estado de Veracruz está siendo desplazado a estas zonas marginales con suelos erosionados o con alto riesgo de erosión, en los cuales generalmente se espera que el rendimiento de grano sea bajo.

El presente trabajo se estableció con el objetivo de obtener información para definir los factores edáficos que limitan la producción de frijol en suelos con diferentes grados de erosión, así como definir la relación que existe entre ésta y la productividad del suelo. Esta información es necesaria para la correcta selección de las prácticas de conservación del suelo y agua y manejo del suelo y cultivos.

MATERIALES Y METODOS

Suelos, tratamientos y variables estudiadas

El experimento se estableció en la zona central de Veracruz durante el ciclo otoño-

invierno 1994 en un suelo Luvisol órtico y en un Feozem háplico. El primero se trata de un suelo profundo que en su fase sin erosión presenta un horizonte "A" franco-arenoso y un horizonte "B" franco-arcilloso. El Feozem háplico presenta sólo el horizonte "A" franco-arenoso con fase lítica a menos de 40 cm. de profundidad. En el Cuadro 1 se presentan otras características importantes de ambos suelos.

En cada suelo se evaluó la respuesta del frijol, variedad Negro Cotaxtla 91, a cuatro grados de erosión: 0, 10, 20 y 30 cm. erosionados con y sin fertilización, resultando en ocho tratamientos los cuales se repitieron tres veces en un diseño experimental completamente al azar. El tamaño de las parcelas fue de 7 surcos de 7.5 metros de largo. Para medir el efecto de la erosión en la productividad del suelo se utilizó la variable rendimiento de grano de frijol por hectárea como lo sugirió el National soil erosion-soil productivity research planning committee (1981). Además, se midió la densidad de población al momento de la cosecha y la precipitación pluvial durante el ciclo del cultivo.

Metodología para ubicar en campo las parcelas experimentales o tratamientos estudiados

Para ubicar las parcelas en los terrenos experimentales según los cuatro grados de erosión se procedió como sigue:

- 1) Localización en área aledaña al terreno experimental del perfil típico sin disturbar de cada suelo y definición de la profundidad de referencia, que en el caso del Luvisol órtico fue hasta el límite superior del horizonte "B" y para el Feozem háplico hasta el horizonte "C" o roca.
- 2) Cuadrulado del terreno a 5 x 5 metros y muestreo en cada vertice de los cuadros la profundidad o espesor del horizonte

Cuadro 1. Características de los 20 centímetros superficiales de los suelos estudiados en la zona central de Veracruz, México.

Erosión (Cm)	Prof.	Textura	pH	% M.O.	P* ppm	K ppm	Ca ppm	Mg ppm
Lo-00	00-10	Am	5,50	2,35	19,5	169	692	234
	10-20	Am	5,60	1,74	12,5	73	716	240
Lo-10	00-10	Ma	5,81	1,49	19,0	100	954	491
	10-20	Mrl	6,04	1,08	25,0	46	1010	542
Lo-20	00-10	Mrl	5,83	3,08	2,5	123	1216	651
	10-20	Mrl	6,14	1,31	4,0	57	1582	784
Lo-30	00-10	Mrl	6,35	0,83	2,5	65	1379	786
	10-20	Ra	6,73	0,58	15,0	60	1674	852
Hh-00	00-10	Ma	5,67	2,77	40,5	239	1014	277
	10-20	Ma	5,56	1,99	21,0	147	820	200
Hh-10	00-10	Ma	5,44	3,56	28,0	166	1069	289
	10-20	Am	5,48	1,74	25,0	98	944	261
Hh-20	00-10	Ma	5,69	2,70	107,0	170	1032	275
Hh-30	00-05	Ma	5,43	1,79	125,0	152	774	264

El Fósforo se analizó mediante el método de Carolina del Norte.

Lo: Luvisol órtico. Hh: Feozem háplico.

A: Arena, M: Franco, R: Arcilla

a: arenoso, l: limoso, r: arcilloso, m: migajonoso.

“A” hasta la profundidad de referencia previamente definida, según cada suelo.

- 3) Con la información sobre el espesor del horizonte “A” se mapearon las áreas con 0, 10, 20 y 30 cm de suelo erosionados y se ubicaron las parcelas experimentales según cada tratamiento.

Metodología similar a la anterior fue usada por Bramble-Brodahl *et al.* (1984) para evaluar el efecto de la erosión en el rendimiento de cultivos.

Manejo del cultivo

En ambos suelos el frijol se estableció después del cultivo de maíz, para lo cual se

removieron de los lotes experimentales los residuos de cosecha y maleza. La siembra se realizó en la primera semana de octubre en cero labranza y en forma manual con espeque. La separación entre hileras fué de 40 cm y entre golpes o matas de 15 a 20 cm, depositando de 2 a 3 semillas por golpe. En ambas localidades los tratamientos con fertilización se aplicaron en banda y en forma superficial con la fórmula 46-46-00 quince días después de la siembra (DDS). El control de malezas se realizó en forma manual entre los 20 y 25 DDS. Durante el ciclo del cultivo se presentó como plaga la Diabrotica, la cual se controló oportunamente. No se presentaron enfermedades y se cosechó la parcela experimental completa entre los 97 y 99 DDS.

RESULTADOS Y DISCUSION

Relación erosión-productividad

En la Figura 1 se muestra el rendimiento promedio de grano (14% de humedad) obtenido con cada tratamiento. Como se puede ver, en ambos suelos y tanto en los tratamientos fertilizados como en los no fertilizados el rendimiento de grano de frijol disminuyó con la erosión del suelo, observándose una relación bien definida de naturaleza exponencial. Cuando ambos suelos experimentan la erosión de los primeros 10 cm, la tasa de reducción del rendimiento de grano es mayor y después de este valor umbral de 10 cm disminuye a medida que el suelo continua erosionan-

dose. Esta relación es muy similar y válida para los tratamientos con y sin fertilizar. En la Figura 2 se muestra la relación que existe entre el porcentaje de reducción de la productividad y la erosión, la cual es muy similar para ambos suelos con y sin fertilizante.

En el suelo Luvisol órtico la forma de esta relación erosión-productividad se relaciona estrechamente con la distribución y cambio de las características físico-químicas en el perfil del suelo. En la fase sin erosión los 20 centímetros superiores presentan las mejores condiciones del perfil para el desarrollo del frijol. A partir de esta profundidad el contenido de materia orgánica, fósforo y potasio disminuye a niveles bajos; se incrementa el contenido de arcilla que en combinación con el limo for-

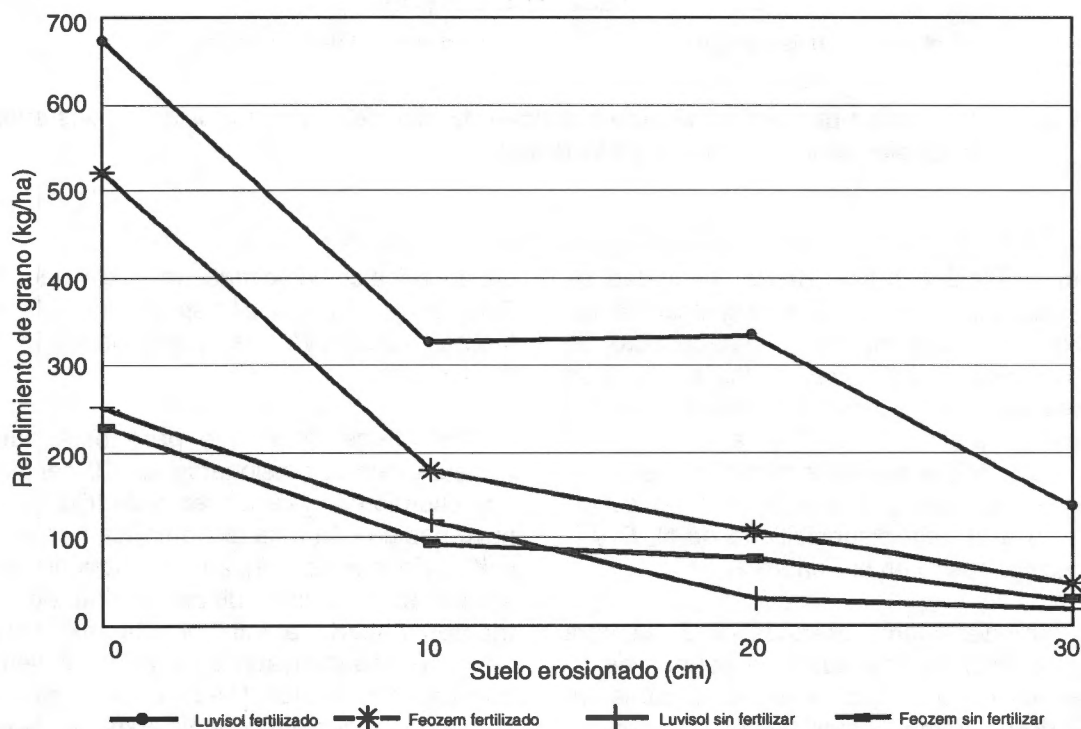


Fig. 1. Relación Erosión-Productividad para el cultivo de frijol en dos suelos tropicales de la zona centro de Veracruz, México.

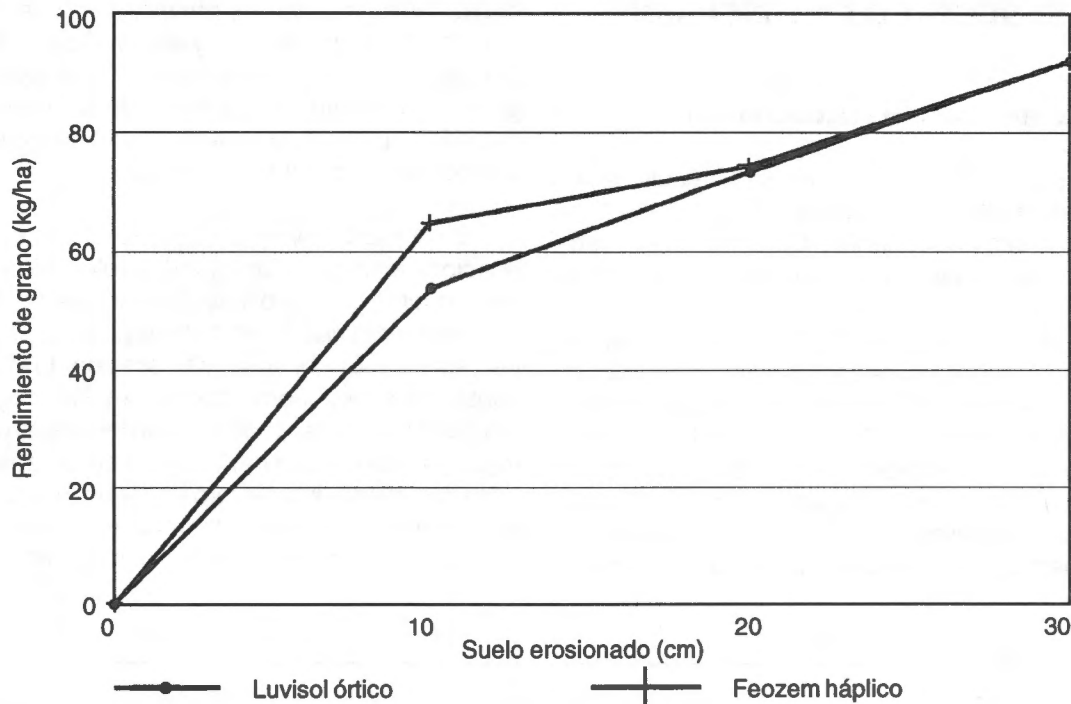


Fig. 2. Reducción promedio de la productividad de frijol debido a la erosión de dos suelos tropicales de la zona centro de Veracruz, México.

man una capa que al perder humedad se compacta impidiendo la emergencia de las plantulas y restringiendo la capacidad de exploración de las raíces. Una vez que se erosionan los 10 centímetros superiores del suelo las raíces entran en contacto con condiciones químicas adversas reduciendo el crecimiento, desarrollo y rendimiento del cultivo debido a la baja disponibilidad de N, P y K como se mostró en el Cuadro 1.

Inmediatamente después de la siembra se presentó en este suelo un período de 15 días sin lluvia lo que ocasionó la cementación del horizonte "B" arcillo-limoso, retardando la emergencia y disminuyendo drásticamente la densidad de población, sobre todo en los cuatro tratamientos con 20 y 30 centímetros

erosionados como se muestra en el Cuadro 2. Esto, aunado a la baja disponibilidad de nutrientes, contribuyó a la mayor reducción del rendimiento.

Se puede decir que para este suelo Luvisol órtico al erosionarse los 10 centímetros superiores el rendimiento de frijol disminuye debido a la baja disponibilidad de N, P, y K. En suelos con 20 y 30 centímetros erosionados la baja disponibilidad de nutrientes aunada a las condiciones físicas adversas reducen aún más el rendimiento, aunque en menor tasa, debido probablemente a que las condiciones del suelo son muy similares sin cambios significativos en sus características a estas dos profundidades.

Cuadro 2. Densidad de población del cultivo de frijol al momento de la cosecha, en dos suelos con cuatro grados de erosión en la zona central de Veracruz, México.

Suelo erosionado (cm)	Luvisol ortico		Feozem Haplico	
	Con fertilizante	Sin fertilizante	Con fertilizante	Sin fertilizante
00	205,000	55,000	254,000	186,000
10	175,000	135,000	177,000	145,000
20	109,000	72,000	215,000	176,000
30	49,000	25,000	94,000	81,000

En los Feozems háplicos la disponibilidad de nutrientes y características físicas son muy similares a través de todo el perfil y pueden ser aceptables, por lo que la forma de la relación erosión-productividad tiene más relación con la capacidad del suelo para almacenar agua disponible para los cultivos, lo cual depende principalmente de su profundidad, ya que la textura y materia orgánica son muy similares a través de todo el perfil.

La erosión de los 10 centímetros superficiales del suelo representan una reducción de la humedad aprovechable disponible para el cultivo de 35 por ciento aproximadamente, por lo que es muy probable que ésta haya sido la causa principal que redujo fuertemente el rendimiento de grano de frijol. La reducción de la humedad aprovechable disponible debido a la erosión de los 20 y 30 centímetros superiores del suelo originaron que el rendimiento de frijol continuara disminuyendo, aunque a una tasa menor. En cualquier caso, la reducción de la humedad redujo la densidad de población como se muestra en el Cuadro 2, particularmente en el caso mas severo de erosión, lo cual influyó en forma definitiva en la reducción del rendimiento de grano.

Se puede decir que para este suelo, Feozem háplico, la pérdida de los 10 centímetros superficiales afecta considerablemente su capacidad de almacenar agua disponible para el cultivo de frijol, causa principal de la

fuerte reducción en su productividad. La erosión posterior de los 20 y 30 centímetros del suelo origina la pérdida casi total de su productividad.

Efecto de la fertilización en la relación erosión-productividad

De la Figura 1 se puede decir que la fertilización afectó en forma general la relación erosión-productividad de los dos suelos estudiados y que la forma de ésta, aunque de diferente magnitud, es similar con y sin fertilizante, obteniéndose mayor rendimiento en los cuatro grados de erosión con la fertilización. Así mismo, se observa que la respuesta al fertilizante fué mayor en el Luvisol órtico debido probablemente a la menor fertilidad de éste, mientras que en el Feozem háplico con mayor fertilidad pero menor humedad disponible la respuesta al fertilizante fué menor.

Desde el punto de vista de la productividad del suelo, la fertilización presentó mayor efecto en la fase sin erosión de ambos suelos, incrementando significativamente el rendimiento de grano. A medida que el suelo se erosiona y queda expuesto el horizonte "B" infertil en el luvisol órtico y reduce la humedad aprovechable disponible en el Feozem háplico, el efecto de la fertilización en el rendimiento se reduce considerablemente hasta casi desaparecer cuando el suelo ha perdido

los 30 centímetros superiores. Este hecho prueba que el uso del fertilizante no restituye completamente la productividad de estos suelos y es incosteable utilizarla cuando el suelo ha perdido más de 10 centímetros de su capa superficial.

CONCLUSIONES

En ambos suelos estudiados la erosión redujo significativamente la productividad a través de una relación exponencial bien definida. En el Luvisol órtico las causas principales de esta reducción son de índole físico-químico, mientras que en el Feozem háplico son sólo de índole físico relacionado con la reducción de su capacidad para almacenar humedad disponible. El fertilizante incrementó significativamente el rendimiento sólo en el suelo sin erosión y no restituyó la pérdida de productividad en las fases erosionadas.

LITERATURA CITADA

- BRAMBLE-BRODAHL, M.; FOSBERG, M. A.; WALKER, D. J.; FALEN, A. L. 1984. Changes in soil productivity related to changing topsoil depths on two Idaho Palouse soils. *In: Erosion and Soil Productivity. Proceedings of the National Symposium on Erosion and Soil Productivity. Dec. 10-11, 1984. New Orleans, Louisiana, USA. p 18-27.*
- NATIONAL SOIL EROSION-SOIL PRODUCTIVITY RESEARCH PLANNING COMMITTEE. 1981. Soil erosion effects on soil productivity: A research perspective. *Journal of Soil and Water Conservation. 39:82-90.*
- URESTI, G. J.; CADENA, Z. M.; JACOME, M.S.M.; DÍAZ, F. V. H.; DEL ANGEL, P. A. L. 1994. Riesgo potencial de erosión y sistemas de producción en el Distrito de Desarrollo Rural 006 La Antigua, Veracruz. *In: Memoria de la VII Reunion Científica del Sector Agropecuario y Forestal del estado de Veracruz. Veracruz. Ver. México. diciembre de 1994. p 268-278.*
- VAZQUEZ, A. V. 1986. La erosión y conservación del suelo en México: Realidades y perspectivas. *Terra. 4:158-179.*
-

EFICIENCIA DE APLICACIONES DE FOSFORO EN LOS SISTEMAS FRIJOL TAPADO Y ESPEQUEADO A TRAVES DE TRES AÑOS

Martha E. Rosemeyer¹

RESUMEN

Eficiencia de aplicaciones de fósforo en los sistemas frijol tapado y espequeado a través de tres años. Los factores culturales, tales como la presencia de un mantillo, puede influenciar la capacidad de la planta para tolerar condiciones de suelos bajos en fósforo (P). El objetivo de este experimento de tres años fue comparar la eficiencia en el uso de fósforo, en sistemas de siembra con mantillo, "frijol tapado" (FT), y sin mantillo, "frijol espequeado" (FE). El fósforo se aplicó como 10(N)-30(P)-10(K) al voleo a los tratamientos de FT en dosis de 0, 14,58, 29,16 y 43,86 kg de P/ha. Estudios factoriales previos muestran que en el FT no hubo respuesta al N y al K cuando se usaron estas dosis. En el FE, se aplicó fertilizante de la fórmula comercial 10-30-10 en banda, en dosis de 0 y 325 kg/ha (equivalente a 43.74 kg P/ha). La Eficiencia en el Uso del Fósforo sobre Rendimiento (EUFR) se define como el Rendimiento con fertilizante - Rendimiento sin fertilizante / Kg P/ha aplicado. La EUFR del FT con aplicaciones de 29,16 kg P/ha fue significativamente mayor que el del FE con 43.86 kg P/ha en todos los años. La EUFR en el sistema de FT usando los dos niveles más bajos de P es significativamente mayor que el del FE usando la dosis de fertilización recomendada más alta. Parece que la aplicación de dosis discretas de fertilizante al mantillo de FT es más eficiente que la aplicación de mayores cantidades al suelo en el sistema espequeado, debido a la mayor disponibilidad de P en el mantillo que un suelo Andisol con alta fijación de P.

ABSTRACT

The phosphorus use efficiency of the slash mulch vs. conventional bean production systems. Cultural factors, such as presence of a mulch layer, can influence plant ability to tolerate low P soil conditions. An objective of this three-year experiment was to compare the nutrient use efficiency, especially of phosphorus, under slash mulched ("frijol tapado," FT) and unmulched ("frijol espequeado," FE) cropping systems. Phosphorus was applied broadcast to the FT treatments at 0, 14.58, 29.16 and 43.74 kg elemental P/ha in 10(N)-30(P)-10(K) fertilizer. Previous studies had shown that in FT there was no response to N and K at these rates. Under FE, 10-30-10 fertilizer was band applied at 0 and the recommended rate of 43.74 kg P/ha in a hole near the seeds. The Phosphorus Use Efficiency of the Yield (PUEY) is defined as = Yield with fertilization - yield without fertilization / kg P applied. The PUEY of FT with 29.16 kg P/ha applied was significantly higher than that of FE with 43.74 kg P/ha in all years. Integrated over 3 years, FT PUEYs are

¹ Organización para Estudios Tropicales, Jardín Botánico Wilson, Aptdo 73, San Vito de Coto Brus, Costa Rica. Dirección actual: Programa de Agricultura con Cobertura de América Central de la Universidad de Cornell, Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica, San Pedro.

significantly higher at the lower two P levels than the FE at the higher recommended fertilization rate. Applying judicious amounts of fertilizer to the FT mulch appears to be more P efficient than applying larger amounts to the FT soil due to the higher P availability in the mulch layer than in the P-fixing Andisol soil below it.



INTRODUCCION

Las condiciones de suelo de baja disponibilidad de fósforo son el mayor problema de nutrimentos en el cultivo de frijol en América Latina (Swartz and Galvez 1980). Para poder superar los problemas de deficiencia de P en frijol, existen varias formas de enfrentarlos, que pueden apoyarse mutuamente: producir variedades tolerantes a bajos niveles de P y cambiar el sistema bajo el cual se cultivan los frijoles para evitar las condiciones de bajo fósforo o aumentar la disponibilidad de P.

El sistema de labranza cero, donde los residuos de cosecha se dejan sobre la superficie del suelo, muestran un aumento en la disponibilidad del fósforo aplicado y otros nutrimentos en comparación con labranza convencional. La absorción de P fue mayor en maíz con cero labranza que con labranza convencional, probablemente debido a la mayor disponibilidad de agua. El maíz fertilizado bajo cero labranza mostró una mayor respuesta a los fertilizantes, especialmente en niveles bajos de fertilización, y el maíz sin fertilizante bajo cero labranza produjo rendimientos significativamente mayores que cuando se usó labranza convencional en la costa Atlántica de Costa Rica (Weed Control Systems 1981). En Africa, Kang y Yunasa (1977) encontraron que hubo una mayor absorción de P en maíz con aplicaciones de fertilizante en la superficie del suelo que cuando el fertilizante fue incorporado al suelo en sistemas convencionales de labranza.

El sistema de frijol tapado es un sistema tradicional de cero labranza común en América Central y la parte norte de América del Sur. En Costa Rica en 1994, contribuía en un 30% de la producción nacional de frijol (estimación de Consejo Nacional de Producción). El aspecto clave del sistema es un mantillo de vegetación secundaria. Después de cortar pasillos en la vegetación de uno o dos años, las semillas se volean y la vegetación se corta y se repica. La semilla germina en el mantillo y emerge a través de él.

Investigadores han reportado que los fertilizantes (10-30-10) aumentaron el rendimiento (Corella 1982; Alfaro y Waaijbergen 1992; Rosemeyer y Gliessman 1992), pero en otros estudios hubo respuesta a los fertilizantes pero no fue significativa (von Platen y Rodríguez 1982; Araya y Kass 1984). Aunque en Bijagua de Upala se reportó una respuesta a N, P y K (Corella 1982), en experimentos en el sur de Costa Rica, se encontró que el fósforo es el nutrimento limitante, sin respuesta a N y K o interacción con N en suelos de más de 20% de materia orgánica (Rosemeyer y Gliessman 1992).

La eficiencia de los Nutrimentos en la Planta se ha definido de varias formas por muchos autores, pero puede dividirse en 2 categorías: las que enfatizan productividad por unidad de nutrimentos absorbido y las que enfatizan la demanda interna de nutrimentos de la planta (Gourley *et al.*, 1994). Se realizaron estudios de la primera categoría para determinar cuáles niveles de aplicación de nutri-

mentos en el sistema de frijol tapado serían los más eficientes para estimular rendimientos y comparar estos niveles con el nivel recomendado para el sistema de frijol espequeado, el cual no usa martillo.

MATERIALES Y METODOS

El sitio experimental, Finca Loma Linda, Coto Brus, Costa Rica está localizado a una elevación de 1200 m y tiene una precipitación anual promedio de 3600 mm. El suelo es un Andisol que fijan un promedio de 86% de fósforo (Rosemeyer 1990). Los experimentos que aquí se reportan se llevaron a cabo en un período de 3 épocas de cultivo de frijol, octubre-enero 1990-91, 1991-92 y 1992-93.

Un experimento de bloques completos al azar con seis repeticiones se inició después de 1.75 años en barbecho. La parcela experimental de 4 x 4 m tiene un área de muestreo de 3 x 3 m permitiendo 0,5 m de borde. La semilla es una variedad local tradicional de frijol negro Tipo II (López *et al.* 1985), "Chimbolo negro," usada por los agricultores en los sistemas de tapado y espequeado. El sistema de frijol tapado se modificó para obtener una distribución uniforme en parcelas experimentales pequeñas de la siguiente manera: En lugar de volear la semilla en la vegetación secundaria, la vegetación se cortó y picó, retirándola toda de la parcela menos una capa de 2-3 cm. Las semillas y el fertilizante se volearon y la materia vegetativa se devolvió a su sitio. En otros experimentos (que no se reportaron aquí) con parcelas más grandes, el frijol tapado se sembró normalmente, la vegetación se cortó y el fertilizante se aplicó encima del mantillo, obteniendo resultados similares (Schlather 1995).

Los tratamientos con el frijol tapado incluyeron aplicaciones de 10-30-10 a los siguientes niveles: 0, 108, 216, 325 kg/ha. Estos niveles

son equivalentes a 0, 14,58, 29,16 y 43,74 kg/ha de P elemental. La densidad de siembra fue de 36 semillas/m². No se efectuaron labores culturales hasta la cosecha, cuando se arrancaron las plantas dentro de la área de muestreo para luego ser aporreadas. Una muestra de las semillas se secó para obtener un peso constante a 65 °C por 48 horas. Las parcelas se dejaron en barbecho hasta la siguiente temporada de siembra.

Para los tres tratamientos de espequeado, el terreno se limpió de vegetación. En uno de los tratamientos, se sembraron 3-4 semillas a una profundidad de 3 cm con un espeque a una distancia 30 x 30 cm. Esto proporcionó la misma densidad de semilla que las parcelas de frijol tapado. Los 325 kg 10-30-10/ha (43,86 kg P/ha) se colocaron en 2 huecos a 2 cm de las semillas al tiempo de la siembra. El segundo tratamiento espequeado, recomendado por el Consejo Nacional de Producción, se sembró usando una separación de 30 x 50 cm, raleando a 2 plantas y fertilizando con 325 kg 10-30-10/ha, colocado en la misma manera que se señaló con anterioridad. El tercer tratamiento espequeado fue sin fertilizante con distancia de siembra de 30 x 30 cm raleando a tres plantas. Las parcelas espequeadas se deshierbaron a mano a los 30 días. No se realizaron otras prácticas culturales y no se presentaron brotes de enfermedades o plagas severas, excepto conejos en algunas parcelas. El rendimiento se registró como perdido para estas parcelas y el experimento se cercó el segundo año. El procedimiento de cosecha fue similar al del tratamiento de frijol tapado.

El análisis estadístico de los datos involucró probar la homogeneidad de las varianzas (Prueba de BarHett) para no significancia, análisis de varianza (ANDEVA) con la prueba de rango múltiple de Duncan para separar las medias.

La EUFR se definió como el rendimiento con fertilización - el rendimiento sin fertilización

/ kg P/ha aplicado. Donde la homogeneidad de las varianzas lo permitió (con o sin una transformación de raíz cuadrada), las ANDEVAS con rango múltiple de Duncan compararon los EUFR para cada año y durante los 3 años. Los contrastes ortogonales compararon los tratamientos tapados agrupados y los tratamientos espequeados agrupados. Donde no fue posible realizar ANDEVAS, los tratamientos se compararon con pruebas T.

RESULTADOS Y DISCUSION

Los rendimientos de todos los tratamientos, excepto el espequeado sin fertilizante, mostraron un incremento en el período de 3 años (Cuadro 1, Figura 1). En todos los años, los rendimientos del sistema de frijol tapado sin fertilizantes fueron equivalentes a los rendimientos del sistema espequeado con 325 kg/ha 10-30-10 (43,86 kg P/ha). También, en todos los años, los rendimientos del sistema de frijol tapado con 216 y 325 kg/ha de 10-30-10 (29,16 y 43,86 kg/ha) fueron significativamente mayores que el espequeado con 325 kg/ha 10-30-10. En el primer año el tratamiento

tapado con 108 (14,58 kg P/ha) no fue significativamente diferente al espequeado, pero en los años siguientes fue mayor, debido probablemente a la acumulación de fertilizantes residuales.

La EUFR aumentó con el tiempo en todos los tratamientos (Cuadro 2). Esto puede deberse a una combinación de condiciones climatológicas favorables y al P residual en la vegetación o el suelo. Para los 3 años, las EUFR en frijol tapado son significativamente mayores en los 2 niveles menores de P que en el frijol tapado y espequeado con las dosis altas de fertilización recomendadas. Esto también fue sustentado por las pruebas T cada año. La EUFR del sistema de frijol tapado con 29,16 kg P/ha fue significativamente mayor que el del espequeado con 43,86 kg P/ha para ambas densidades de siembra todos los años (1990 $p=0,00034$, $p=0,025$; 1991 $p=0,045$, $p=0,031$; 1992 $p=0,0476$, $p=0,0282$). Probablemente esto es tanto un efecto del sistema como un efecto del nivel de fertilización. Las pruebas de contraste ortogonal separaron significativamente los sistemas tapado y espequeado en un período de 3 años (Cuadro 2). Un estu-

Cuadro 1. El rendimiento de frijol bajo los sistemas de tapado y espequeado, con fertilizante. Coto Brus, Costa Rica. 1990-1992.

Sistema	P aplicado kg/ha ¹	1990-91	1991-92	1992-92
Tapado	0	717 b	710 c	1094 c
Tapado	14.58	944 b	990 b	1565 b
Tapado	29.16	1431 a	1265 a	2093 a
Tapado	43.86	1324 a	1306 a	2226 a
Espequ.	0	300 c	317 e	220 d
Espequ. 30x30 ²	43.86	753 b	726 c	1041 c
Espequ. 30x50 ²	43.86	726 b	521 d	878 c

¹ El P fue aplicado como componente de 10(N)-30(P)-10(K).

² El espacio entre sitios de siembra en cm.

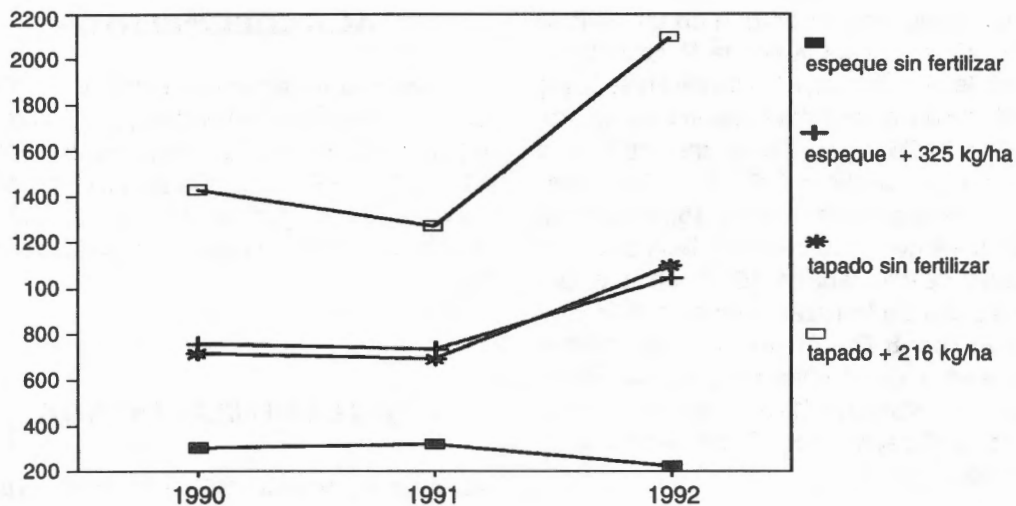


Fig. 1. El rendimiento de frijol en los sistema tapado y espequeado, 1990-1992.

Cuadro 2. La eficiencia en el uso de fósforo por el rendimiento (EUFR)¹ a través de tres años en ensayos de Coto Brus, Costa Rica.

Sistema kg/ha	P aplicado	1990-91	1991-92	1992-93	1990-92
Tapado	14.58	15.50	20.64	36.60	24.25 a
Tapado	29.16	23.88	21.24	39.88	28.33 a
Tapado	43.86	12.58	13.92	23.96	16.82 b
Espequ. 30x30 ²	43.86	10.05	10.06	27.96	16.02 b
Espequ. 30x50 ²	43.86	8.58	5.22	25.15	12.98 b
F a través de los 3 años					p = .0004
Contraste ortogonal de tapado vs. espequeado					p < .0001

¹ La EUFR se define como el Rendimiento con fertilización - Rendimiento sin fertilización del mismo sistema / kg P/ha aplicado

² El espacio entre sitios de siembra en cm.

dio previo en el mismo sitio comparó las EUFR del sistema espequeado con 162 y 325 kg 10-30-10/ha (21,67 y 43,86 kg P/ha, respectivamente). Las EUFR de 8,25 y 8,33 respectivas no son diferentes significativamente (Rosemeyer, manuscrito en preparación) lo que implica que los niveles más bajos

de aplicación de fertilizante no confiere eficiencia en el uso de los nutrimentos. Otros autores mencionan la eficiencia de cero labranza y sistemas de mantillo de residuos especialmente a niveles bajos de aplicación de fertilizantes (Kang y Messan 1983, Shenk y Locatelli 1980).

Las medias muestran que en un período de tres años, por cada kg de P aplicado al sistema de frijol tapado, a los niveles más bajos de fertilización, el rendimiento aumenta un promedio de 24,25 kg/ha. Si asumimos que la semilla de frijol contiene 0,6% de P, la eficiencia de P recuperado promedia 15,75% en las dos aplicaciones más bajas de fertilizante en el sistema de frijol tapado, 10,1% en la aplicación más alta de fertilizante en el tapado y un promedio de 8,7% en los 2 tratamientos esquelados en el nivel más alto de fertilización. Fassbender (1969) reporta eficiencias de fertilización con P de 5-10% para Andisoles.

CONCLUSIONES

En un experimento de tres años, el sistema de frijol tapado con 14,58 y 29,16 kg P/ha fue más eficiente para canalizar los nutrimentos hacia mayores rendimientos que los tratamientos de frijol tapado o frijol esquelado con 43,86 kg P/ha. Esto es una combinación del efecto del sistema y el nivel de fertilización.

El sistema de frijol tapado puede obtener su eficiencia de la aplicación del fertilizante en la capa de mantillo. Estudios colaborativos han mostrado que hay menos fijación por el mantillo que el suelo y hay más fósforo en una forma "bio-disponible" en el suelo y hojarasca del sistema tapado (Schlather 1995). La mayor parte de las raíces de frijol están en esta hojarasca y mantillo (Rosemeyer 1990). La vegetación en descomposición liberó 5-6 kg/ha en estudios preliminares (Rosemeyer 1990). De este modo, las raíces están bien colocadas para absorber el P disponible y evitar la fijación de P del suelo. La sincronización de la liberación de P de la vegetación con las necesidades de absorción de la liberación del frijol o el uso de cultivares tolerantes a bajos niveles de P (experimentos en proceso) pueden hacer el sistema de frijol tapado aún más eficiente.

AGRADECIMIENTOS

Expreso mi agradecimiento al Sr. Darryl Cole, Roman y Leonel Gómez, Julieta Méndez y Ken Schlather por su colaboración. Al Ing. Mario Gadea-Rivas por la traducción del manuscrito; y la Organización para los Estudios Tropicales por el financiamiento del experimento.

LITERATURA CITADA

- ALFARO, R.; WAAIJENBERG, H. 1992. El cultivo de frijol tapado en Costa Rica: Un resumen de investigaciones 1978-91. Serie Técnica, Informe Técnico No. 190, CATIE.
- ARAYA, R.; KASS, D. 1984. Respuesta de dos variedades de frijol tapado a la fertilización con 10-30-10. En: Memorias de IV Congreso Agronómico Nacional (1984). San José, Costa Rica. pp 155-175.
- CORELLA, F. 1982 Frijol común (*Phaseolus vulgaris* L). En: Evaluación Departamento de Fertilidad de Suelos y Nutrición de Plantas, 1983. Dirección General de Investigación Agrícola (DGIA), Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG). San José, Costa Rica. pp 16-24.
- FASSBENDER, H.W. 1969. Estudio de fósforo en suelos de América Central. Capacidad de fijación de fósforo y su relación con características edáficas. Turrialba (C.R.) 19. En: López, M.; Fernández, F.; Van Schoonhoven, A. (Eds.) 1985. Frijol: Investigación y Producción. CIAT, Cali, Colombia.
- GOURLEY, C.J.P.; ALLAN, D.L.; RUSSELLE, M.P. 1994. Plant nutrient efficiency: A comparison of definitions and suggested improvement. Plant and Soil 158: 29-37.
- KANG, B.T.; YUNASA, M. 1977. Effect of tillage methods and phosphorus fertilization on maize in the humid tropics. Agron. J. 69: 291-294.

- KANG, B.T.; MESSAN, A.D. 1983. Fertilizer management for no-tillage crop production. I: Akobundu, I.O.; Deutsch, A.E. (eds). No-tillage Crop Production in the Tropics. Symposium proceedings. Published by the West African and International Weed Science Societies by the International Plant Protection Center, Oregon State University, Corvallis OR, 97331
- KUNISHI, H.; BANDEL, B.; MULFORD, F.R. 1986. Seasonal P uptake under no-till and conventional till management. *Commun. in Soil Sci. Plant Anal.* 17(6): 591-600.
- LOPEZ, M.; FERNANDEZ, F.; VAN SCHOONHOVEN, A. (Eds.) 1985. Frijol: Investigación y Producción. CIAT, Cali, Colombia.
- ROSEMEYER, M.E. 1990. The effect of different management strategies on the tripartite symbiosis of bean (*Phaseolus vulgaris* L) with *Rhizobium* and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi in two agroecosystems in Costa Rica. Tesis de Doctorado. Universidad de California-Santa Cruz.
- ROSEMEYER, M.E.; GLIESSMAN, S.R. 1992. Modifying traditional and high-input agroecosystems for optimization of microbial symbioses: a case study of dry beans in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 40: 61-70.
- SCHLATHER, K. 1995. Eficiencia del fósforo en frijol tapado vs. frijol espequeado. *En: Garcia, J.E.; Nájera, J.M. (Eds.) Memorias del Simposio Centroamericano sobre Agricultura Orgánica 6-11 de marzo de 1995, San José, Costa Rica.* pp 163-176.
- SHENK, M.D.; LOCATELLI, E.A. 1980. Three years of research with minimum and zero-tillage systems for small farmers in Central America. *Weed Science Society of America. Abstracts of Papers Presented at the Annual Meeting.* pp 119-120.
- SWARTZ, H.F.; GALVEZ, G.E. 1980. Bean Production Problems. CIAT, Cali, Colombia.
- VON PLATEN, H.; RODRÍGUEZ, G. 1982. La producción de frijol tapado en la región de Acosta-Puriscal, Costa Rica. CATIE, Turrialba, Costa Rica. Documento presentado en la 28a Reunión Anual de PCCMCA(1982), San José, Costa Rica.
- WEED CONTROL SYSTEMS. 1981. Annual Report 1979-1980. Report # 33-C-80. pp 14-16.

FOSFORO EN EL SISTEMA DE FRIJOL TAPADO

Gloria Meléndez¹

RESUMEN

Fósforo en el sistema de frijol tapado. Se evaluó el efecto de la aplicación de roca fosfórica sobre la disponibilidad de fósforo en el suelo y la producción y calidad de la biomasa vegetal en el cultivo de frijol tapado. Se determinaron los contenidos de nutrimentos y los patrones de liberación de fósforo en algunas plantas presentes en los tapaderos: Paira (*Melanthera aspera*), Mirasol (*Baltimora recta*), Helecho (*Pteridium aquilinum*), Escobilla (*Sida rhombifolia*), Calingüero (*Melinis minutiflora*), Prima Hermana (*Elvira biflora*), Santa Lucía (*Ageratum conizoides*) y Moriseco (*Bidens pilosa*). El experimento se realizó en Bajo Los Arias, cantón de Acosta, Costa Rica. A corto plazo, los resultados muestran una respuesta a la aplicación de roca fosfórica (RF) tanto en el mantenimiento de niveles más altos de fósforo disponible en el suelo, como en el mayor rendimiento de frijol por unidad de fósforo agregado, comparado al tratamiento sin RF. A largo plazo, el efecto residual de la RF incide sobre la regeneración de la vegetación en términos de mayor producción de residuos vegetales, mejor aprovechamiento del fósforo y mayor absorción de nutrimentos. Los patrones de liberación de fósforo en las plantas estudiadas no muestran la misma tendencia que los contenidos totales de este elemento en la vegetación. Este trabajo indica que no todas las plantas descomponen y mineralizan fósforo rápidamente pese a sus altos contenidos de fósforo total y viceversa. Esta conclusión lleva importantes implicaciones al reciclaje de fósforo y a la selección y enriquecimiento de las especies presentes en el barbecho para frijol tapado.

ABSTRACT

Phosphorus in the slash/mulch bean system. Rock phosphate effect on soil phosphorus availability and vegetation biomass was evaluated in the slash/mulch bean (frijol tapado) system. Nutrient content and release of inorganic phosphorus pattern was studied in some of the plants frequently found in the field under the slash/mulch bean system: Paira (*Melanthera aspera*), Mirasol (*Baltimora recta*), Helecho (*Pteridium aquilinum*), Escobilla (*Sida rhombifolia*), Calingüero (*Melinis minutiflora*), Prima Hermana (*Elvira biflora*), Santa Lucía (*Ageratum conizoides*) and Moriseco (*Bidens pilosa*). This study was performed in Bajo Los Arias, Acosta county, Costa Rica. Results, in a short period, show there is an answer to rock phosphate treatment both in the maintenance of higher levels of soil available phosphorus and a higher yield of bean seed for unit of phosphorus added as compared to the control without rock phosphate. The residual effect, in a more extended period, deals with fallow regeneration in the sense of enhanced production of biomass,

¹ Esta investigación fue realizada con una donación otorgada por el Centro Internacional de Investigaciones para el Desarrollo (CIID), Ottawa, Canadá.

² Centro de Investigaciones Agronómicas, Universidad de Costa Rica.

better utilization of phosphorus and nutrient intake for the bean plant. the phosphorus release patterns of the studied plants are not related to the total content of the element in such plants. This study show that not all the plants decompose and mineralize organic phosphorus fast or slowly despite their high or low contents. This conclusion leads to important considerations respect to the phosphorus cycling and the selection and enrichment of the fallow with some of the species normally present in the slash/mulch system.



El fósforo es considerado el elemento más limitante en muchos suelos del trópico húmedo, debido a la pequeña cantidad total, a su alta retención y poca disponibilidad en el suelo, y a la extracción relativamente alta por los cultivos (Palm *et al.*, 1991). Algunos autores (Bowman & Cole, 1978; Hedley *et al.*, 1982) consideran que para entender mejor la dinámica de P en los suelos tropicales, es fundamental evaluar cambios en sus formas, especialmente en las cantidades y formas orgánicas de P que están más relacionadas con la productividad sostenida de los suelos (Adepetu y Corey, 1976).

La producción de frijol en América Latina está generalmente limitada por P (Schwartz and Gálvez 1980), especialmente en sistemas de bajos insumos que dependen de la fijación de N (Graham, 1981; Singleton *et al.*, 1985). En Costa Rica, hay una larga tradición de cultivar el frijol bajo el sistema "tapado", donde la semilla está sembrada al voleo y cubierta por una capa de restos orgánicos conformada por vegetación secundaria recientemente cortada. Este es uno de los pocos sistemas que aprovecha la vegetación secundaria ("tacotal" o "charral") para formar una capa de mantillo o "mulch" que cubre la superficie del suelo y que a través de procesos de descomposición y mineralización provee al frijol de los nutrimentos necesarios, especialmente fósforo.

Actualmente, la presión por el uso de la tierra está obligando a los agricultores de frijol

tapado a reducir el período de barbecho, lo que se traduce en una menor recuperación de la fertilidad de los suelos, menor producción de biomasa y por ende menor reciclaje de los nutrimentos, especialmente fósforo (Bellows, 1992). El fósforo es el principal limitante del sistema, pues aún adiciones pequeñas de este elemento aumentaron considerablemente los rendimientos de frijol (Rosemeyer, 1992; Schlatter, 1995).

Ensayos preliminares realizados por el proyecto "Mejoramiento de Sistemas con Cobertura: Frijol Tapado" y la experiencia de los agricultores, corroboraron que la limitación del fósforo era un problema inherente a la biodiversidad vegetal. Por lo tanto era necesario trazar estrategias adecuadas de manejo que permitieran usar eficientemente el fósforo nativo, así como el fósforo aplicado en el cultivo de frijol tapado, combinando una serie de recursos agronómicos y ecológicos.

En investigaciones llevadas a cabo por el proyecto trabajando en parcelas de agricultores en los cantones de Acosta y Coto Brus, Costa Rica, se obtuvo respuesta del frijol a fertilización con roca fosfórica (Briceño *et al.*, 1994; Meléndez *et al.*, 1994; Meléndez, 1995). Los resultados muestran que la aplicación de fósforo tiene un efecto residual prolongado sobre el crecimiento de plantas en el próximo período de barbecho, hay una mayor producción de biomasa y una mayor

eficiencia en el reciclaje de nutrientes que se traduce en mayores rendimientos (Meléndez, 1995).

Los agricultores que practican la tapa de frijol generalmente son de bajos recursos, localizados en zonas de ladera, con problemas de no tenencia de la tierra y con insuficiente acceso a mercado o a capital. Estos y otros factores culturales imposibilitan el uso de insumos externos como roca fosfórica, que hace que pongamos mayor énfasis en la reducción de los costos de producción, especialmente los relacionados a los insumos comprados y las técnicas para aumentar la rentabilidad económica.

PRODUCCION DE BIOMASA Y APORTE DE NUTRIMENTOS

Para determinar el efecto de la aplicación de fósforo sobre la producción y la calidad de la biomasa, se intentó construir un balance de fósforo en el sistema frijol-barbecho-suelo en parcelas que recibieron y no recibieron roca fosfórica. Se determinaron los contenidos de fósforo disponible en el suelo, en la biomasa recién adicionada o "mulch", en la biomasa muerta o "litter" proveniente de tapas anteriores, en el rastrojo y en el grano de frijol. Además se determinó la producción de biomasa adicionada al sistema en 2 ciclos de producción de frijol.

Caracterización del área

El ensayo se localizó en Bajo Los Arias, región de Acosta, en las laderas del valle del río Candelaria, a 800 msnm, con una vegetación en barbecho de 1 año, donde se ha estado tapando frijol en los últimos 80 años. El suelo está clasificado como un ANDIC DYSTROPEPTS, bien drenado de origen

sedimentario, con evidencias de erosión severa en algunos sectores, con una fertilidad de media a baja.

Características del Experimento

El diseño fue de bloques completos al azar en parcelas de 4 m * 4 m, con cuatro repeticiones y cuatro tratamientos: roca fosfórica (RF) 200 kg ha⁻¹; Rhizobium; roca fosfórica + Rhizobium y testigo sin insumos. Los tratamientos fueron instalados en el ciclo 1993-1994 y en los ciclos sucesivos se continuó midiendo el efecto residual de los mismos.

Muestras

En cada parcela de los tratamientos: testigo y roca fosfórica (RF) se tomaron cinco muestras de los primeros 15 cm del suelo de posiciones aleatorizadas, para el análisis de fósforo disponible. La determinación se realizó en húmedo usando membranas intercambiadoras aniónicas (MIA) impregnadas con cloruros. Se optó por el uso de MIA, debido a que las estimaciones convencionales con extractantes químicos para P disponible son ampliamente usados pero su modo de acción y selectividad para la extracción de fósforo no están bien definidas (Curtin *et al.*, 1987).

Para determinar el "mulch" o biomasa adicionada al sistema, se sacó dos muestras por parcela, usando cuadrantes de 0,25 m² de área y se separó entre "mulch" (biomasa viva) y "litter" (biomasa muerta). De la misma forma, a la cosecha se evaluó la cantidad de rastrojo de frijol producido. Las muestras fueron secadas en estufas de aire forzado para su determinación en base seca. Se analizó los contenidos de nutrientes en: la biomasa viva, biomasa muerta, en el rastrojo y en el grano de frijol.

Fósforo disponible en el suelo

Las cantidades de fósforo disponible en el suelo son mayores con la aplicación de RF. La Figura 1 nos muestra que los niveles de fósforo encontrados (4,1 - 8,7 mg P kg⁻¹) en solución en el tratamiento con RF (1993-1994) y donde se evaluó su efecto residual (1994-1995) son mayores que en el testigo sin insumos y para lo reportado en frijol tapado donde la RF fue aplicada directamente al suelo (Meléndez *et al.*, 1994). Estos datos sugieren que la aplicación de la RF sobre el mantillo mantiene niveles altos de P disponible en el suelo resultando en una mayor eficiencia a corto plazo. A largo plazo la regeneración de la vegetación podría estar tomando parte del P residual disponible después de la cosecha de frijol que lo restituye en la próxima tapa (1994-

1995). Resultados similares fueron encontrados por Schlather, (1995) trabajando en cultivos de frijol tapado en el sur de Costa Rica.

Fósforo total en la biomasa

El Cuadro 1 muestra la cantidad de biomasa que se adicionó al sistema en los dos cultivos. La aplicación de RF incrementa en más de 2 t ha⁻¹ la adición de "mulch", mientras que el litter no evidencia cambios notorios en los dos primeros años, porque este material procede de "tapas" anteriores cuando no se había aplicado fósforo. Como las adiciones orgánicas en el primer año fueron similares en todos los tratamientos (Cuadro 1), el aumento en el rendimiento de frijol (Cuadro 2) es atribuido a la mayor pro-

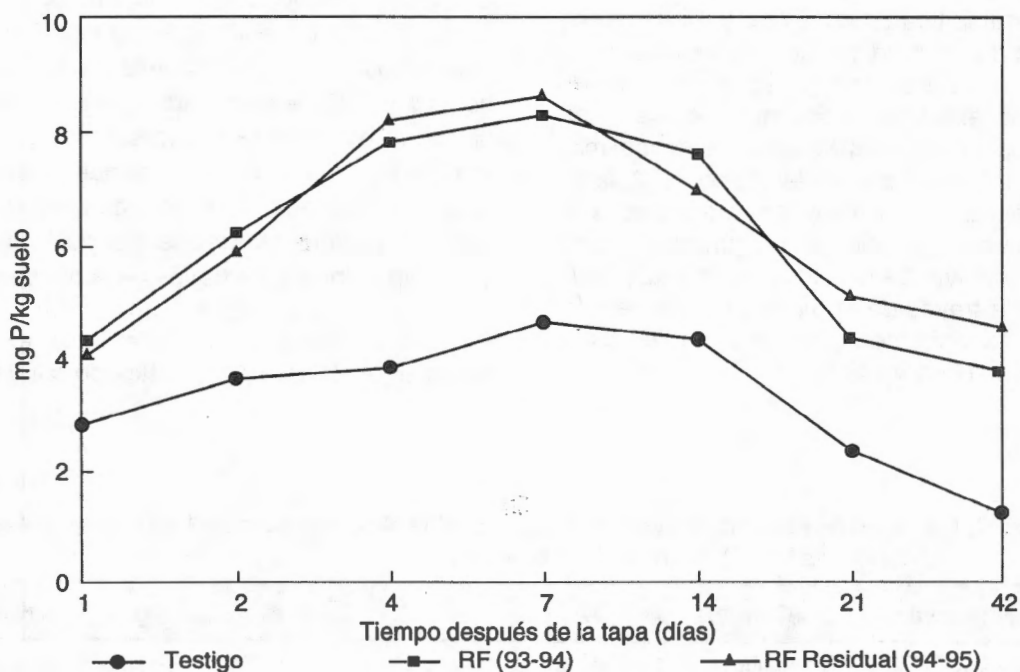


Fig. 1. Fósforo disponible en el suelo.

Cuadro 1. Cantidad de biomasa (ton ha⁻¹) adicionada al cultivo.

Tratamiento	Ciclo (1993-1994)		Ciclo (1994-1995)	
	"mulch"	"litter"	"mulch"	"litter"
Testigo	5,99	2,65	6,18	2,39
Roca fosfórica	6,11	2,21	8,02	2,18

Cuadro 2. Rendimiento de frijol tapado (kg ha⁻¹) en Bajo Los Arias de Acosta.

Tratamiento	Ciclo (93-94)	Ciclo (94-95)
Testigo	870 a	849 b
Roca fosfórica	1024 a	1228 a

ducción de biomasa por efecto de la roca fosfórica.

Investigaciones pasadas sostienen, que la sostenibilidad ecológica y el mantenimiento de los rendimientos a través del tiempo en el sistema de frijol tapado se debe al reciclaje eficiente de los nutrientes incorporados a través del sistema y a las mínimas exportaciones a través del grano. El Cuadro 3 muestra los nutrientes adicionados al sistema sin aplicación de ningún tratamiento. En el cultivo 94-95, los nutrientes reciclados a través de la biomasa se incrementaron especialmente en fósforo, calcio y nitrógeno (Cuadro 4).

Las cantidades de fósforo recicladas a través del "mulch" en el segundo año donde se midió el efecto residual del fósforo, son el equivalente a la adición de fósforo en el primer año en forma de roca fosfórica lo que se traduce en un mantenimiento de los rendimientos y en una mayor disponibilidad de fósforo del suelo.

Los nutrientes también son devueltos al sistema a través del rastrojo. El Cuadro 5 indica las cantidades de calcio y fósforo devueltos en los dos años de cultivo. En el segundo año los niveles de fósforo aumentaron considerablemente en el tratamiento con RF. Si estimamos que retiramos todos los residuos, como en el frijol espequeado o semi-mecanizado, es evidente la necesidad del uso de fertilizantes químicos, mientras que en el frijol tapado o en cualquier sistema con uso de residuos los nutrientes requeridos por la planta son proporcionados a través de la biomasa.

Las cantidades de nutrientes exportados en el sistema de frijol tapado son míni-

Cuadro 3. Cantidad de nutrientes (kg ha⁻¹) adicionados al cultivo de frijol (1993-1994, antes de aplicación de la RF) a través de la biomasa.

Tratamiento	Biomasa	N	P	Ca	Mg	K
Testigo	"MULCH"	56,9	9,2	19,2	13,6	123,3
	"LITTER"	8,0	1,9	7,6	4,3	5,1

Cuadro 4. Cantidad de nutrimentos (kg ha⁻¹) adicionados al cultivo (1994-1995) a través de la biomasa.

Tratamiento	Biomasa	N	P	Ca	Mg	K
Testigo	"MULCH"	60,9	8,2	25,2	12,6	125,6
	"LITTER"	9,6	2,2	9,6	4,8	4,0
Roca fosfórica	"MULCH"	68,2	22,8	32,1	14,4	166,8
	"LITTER"	23,1	2,6	23,5	9,8	17,9

Cuadro 5. Cantidad de P y Ca (kg ha⁻¹) adicionados al cultivo de frijol, a través del rastrojo.

Tratamiento	Ciclo	Produc. rastrojo	Ca	P
Testigo	93-94	384	0,79	1,89
	94-95	346	0,14	2,01
Roca fosfórica	93-94	497	0,64	1,93
	94-95	576	1,99	4,50

mas, como se muestra en el Cuadro 6 excepto para nitrógeno. Aunque haya mayor exportación en el tratamiento con roca fosfórica, aparentemente hay una mayor nodulación que puede aumentar la fijación simbiótica de nitrógeno y aumentar la disponibilidad para la planta (Briceño *et al.*, 1994).

En el sistema de frijol tapado con cero insumos, el mantenimiento de los rendimientos (aunque sean bajos) a través del tiempo

están relacionados con las adiciones de los residuos orgánicos provenientes del barbecho. Las adiciones de RF incrementan la producción de la biomasa y por lo tanto aumentan los contenidos de nutrimentos devueltos al sistema a través de la deposición de los residuos.

Los resultados encontrados nos permiten concluir, que hay una respuesta a la aplicación de RF resultando en mejores rendi-

Cuadro 6. Cantidad de nutrimentos (kg ha⁻¹) exportados en el grano de frijol.

Tratamiento	Ciclo	Produc. grano (kg/ha)	N	P	Ca	Mg	K
Testigo	93-94	774	29,1	3,2	3,3	2,1	13,0
	94-95	676	26,5	3,9	3,7	1,8	11,0
Roca fosfórica	93-94	1024	41,1	4,5	4,7	2,9	28,4
	94-95	1 228	43,8	5,1	4,6	2,2	26,5

mientos de frijol por unidad de P agregado. A largo plazo el efecto residual de la RF incide sobre la regeneración de la vegetación en términos de mayor producción de residuos, mejor aprovechamiento de fósforo y mayor absorción de nutrimentos.

DISPONIBILIDAD DE FOSFORO Y CONTENIDO DE NUTRIMENTOS DE ALGUNAS PLANTAS DEL TAPADERO

El barbecho contiene una diversidad de especies con diferentes tasas de descomposición y de absorción de P del suelo, con una serie de mecanismos involucrados en la adquisición de P por especies adaptadas a condiciones de baja disponibilidad de P. Al cortarse el barbecho, se libera el fósforo a través de múltiples procesos como lixiviación (Swift *et al.*, 1981) y mineralización (Nye y Greenland, 1958; Swift *et al.*, 1981) entre otros.

La experiencia tradicional de los agricultores ha permitido identificar plantas del

tapadero que ellos consideran favorables o desfavorables de acuerdo a sus observaciones (Cuadro 7). Nuestros estudios están dirigidos hacia una sistematización de las especies predominantes en los tapaderos, sus contenidos de nutrimentos y las tasas de descomposición.

Los contenidos totales de nutrimentos en algunas plantas del tapadero se muestran en el Cuadro 8. Las variaciones en los contenidos de los nutrimentos dependen de la especie. Si tomamos en cuenta únicamente el fósforo, los resultados muestran la presencia de plantas extractoras y/o acumuladoras de fósforo, encontrándose valores, bajos, medios y altos. Lamentablemente estos contenidos totales únicamente indican la cantidad potencial que determinada planta puede suministrar al sistema, pero no dicen mucho de la capacidad de liberar este elemento.

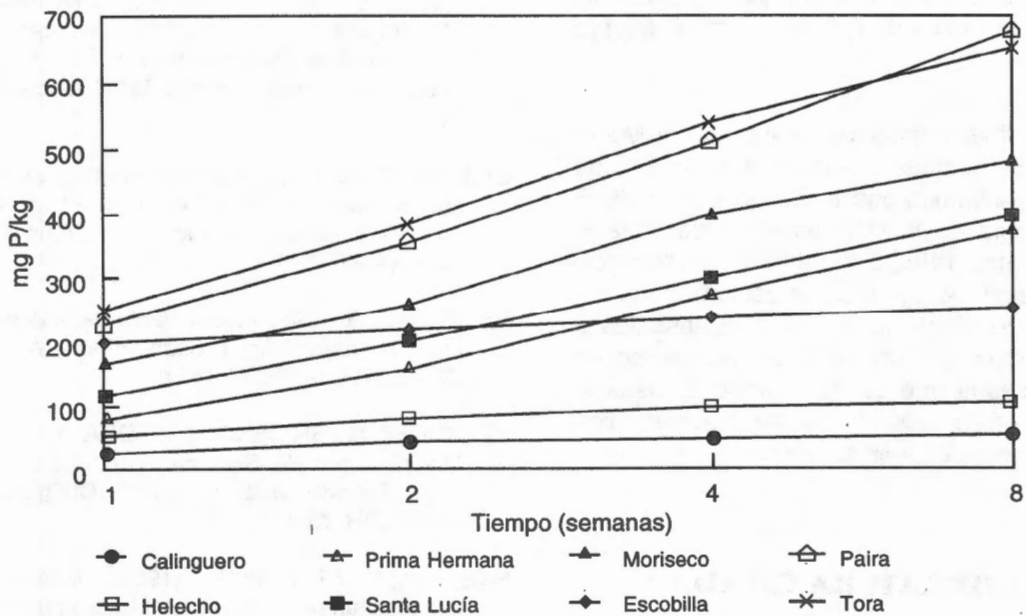
Un ensayo de mineralización a nivel de invernadero permitió conocer los patrones de liberación de fósforo de las plantas estudiadas. Como se muestra en la Figura 2, las plantas tienen diferente comportamiento con respecto a su aporte de fósforo en el tiempo,

Cuadro 7. Plantas frecuentes en los tapaderos (Ocampo, 1984).

Nombre científico	Nombre vulgar	Característica	Observaciones
<i>Melanthera aspera</i>	Paíra	Favorable	Fácil manejo, Buen suelo
<i>Baltimora recta</i>	Mirasol	Favorable	Fácil manejo, Buen suelo
<i>Melampodium divaricatum</i>	Botoncillo	Favorable	Fácil manejo
<i>Bidens pilosa</i>	Moriseco	No-favorable	Hospedero de patógenos
<i>Rynchelytrum repens</i>	Seda	No-favorable	Suelo pobre
<i>Hyparrhenia rufa</i>	Jaragua	No-favorable	Rebrote rápido
<i>Sida rhombifolia</i>	Escobilla	Favorable	Buen suelo
<i>Melinis minutiflora</i>	Calinguero	No-favorable	
<i>Elvira biflora</i>	Prima hermana	Favorable	Fácil manejo, Buen suelo
<i>Ageratum conizoides</i>	Santa Lucía	Favorable	Buen suelo
<i>Pteridium aquilinum</i>	Helecho	No-favorable	Rebrote rápido, suelos ácidos

Cuadro 6. Contenido de nutrimentos en algunas plantas del tapadero.

Planta	g/kg						mg/kg			
	N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn
Paíra (<i>Melanthera aspera</i>)	9,0	2,5	8,1	2,1	20,3	1,1	66	8	27	44
Mirasol (<i>Baltimora recta</i>)	19,4	3,5	12,7	3,0	46,2	1,2	58	8	62	38
Botoncillo (<i>Melampodium divaricatum</i>)	34,9	2,4	10,0	3,1	48,9	1,7	314	9	34	60
Moriseco (<i>Bidens pilosa</i>)	7,5	1,9	7,4	2,8	14,8	1,3	144	8	32	89
Seda (<i>Rynchelytrum repens</i>)	4,7	1,4	3,3	1,4	10,0	0,9	69	7	37	33
Jaragua (<i>Hyparrhenia rufa</i>)	6,6	1,2	5,7	2,0	12,3	0,9	103	7	32	95
Escobilla (<i>Sida rhombifolia</i>)	9,6	1,1	13,4	3,5	11,7	0,8	363	9	30	115
Calinguero (<i>Melinis minutiflora</i>)	10,5	2,0	3,3	1,5	19,6	1,0	80	7	2	28
Prima Hermana (<i>Elvira biflora</i>)	19,4	1,6	9,9	3,0	26,1	1,3	51	15	46	199
Santa Lucía (<i>Ageratum conizoides</i>)	8,7	3,6	10,1	3,2	23,7	2,6	174	14	68	28
Helecho (<i>Pteridium aquilinum</i>)	5,2	3,1	15,4	3,5	34,9	0,9	118	8	73	124

**Fig. 2.** Mineralización de P, a partir de algunas especies de los tapaderos.

encontrándose especies de muy lenta liberación como helecho (*Pteridium aquilinum*) y calingero (*Melinis minutiflora*) y otras de muy rápida liberación como paira (*Melanthera aspera*) y mirasol (*Baltimora recta*). Merece recalcar la importancia de la cantidad de especies presentes en los tapaderos así como la calidad de las mismas, especialmente en términos de descomposición y liberación de sus nutrimentos.

Después de dos meses de evaluación las especies usadas en la mineralización, únicamente liberaron un máximo del 20 % del P en el caso de la paira y de sólo 1,6 % en el helecho en relación a sus contenidos totales. El conocimiento de los patrones de liberación de fósforo en la vegetación nos da la posibilidad de manipular la vegetación enriqueciéndola con especies extractoras de fósforo e intentar buscar la sincronización entre la liberación de nutrimentos desde la diversidad vegetal en el tapadero y la absorción en el momento que la planta de frijol lo necesite.

Las investigaciones futuras del proyecto van encaminadas hacia el estudio de los factores involucrados en la absorción de P (morfología de la raíz, partición de materia seca entre raíces y tallo, formación de micorrizas). A una profundización en los aspectos de biodiversidad vegetal, insectos y organismos y a un mejor entendimiento de los procesos que se dan dentro el sistema que han permitido su viabilidad agronómica y su permanencia en el tiempo.

LITERATURA CITADA

- ADEPETU, J.H.; COREY, R.B. 1976. Organic phosphorus as a predictor of plant available phosphorus in soil of southern Nigeria. *Soil Science* 122:159-164.
- BELLOWS, B.C 1992. Sustainability of Steep Land Bean (*Phaseolus vulgaris*) Farming in Costa Rica: an Agronomic and Socio-economic Assessment. Ph.D. University of Florida.
- BOWMAN, R.A.; COLE, C.V. 1978a. Transformations of organic phosphorus substrates in soil evaluated by NaHCO₃ extraction. *Soil Science* 125:49-54.
- BOWMAN, R.A. COLE, C.V. 1978b. An exploratory method for fractionation of organic P from grassland soil. *Soil Science* 125:95-101.
- BRICEÑO, J.; GADEA, A.; MATA, R.; MELENDEZ, G.; SOTO, G.; ROSEMEYER, M.; AMADOR, M.; SALAS, R.; ARIAS, F.; MIRANDA, E. MADRIGAL, A.; SALAZAR, J. 1994. Estudio de Sistemas de Producción Tradicionalmente Sostenibles: el caso de frijol tapado. Resúmenes de la XL Reunión Anual del Programa Cooperativo Centroamericano para el Mejoramiento de Cultivos y Animales, 13-19 de marzo, 1994, San José, Costa Rica. Número 20.
- CURTIN, D.; SYERS, J.K.; SMILLIE, G.W. 19987. The importance of exchangeable cations and resin-sink characteristics in the release of soil phosphorus. *Journal Soil Science*. 38: 711-716
- GRAHAM E. 1981. Some problems of nodulation and symbiotic nitrogen fixation in *Phaseolus vulgaris* L: *Annual Review. Field Crops Research* 4:93-112.
- MELENDEZ, G. 1995. Mejoramiento de Sistemas con Cobertura: Frijol Tapado. Informe Anual. CIID-UCR-UGUELPH. 145 p.
- MELÉNDEZ, G.; BRICEÑO, J.; GADEA, A. 1994. Mejoramiento de Sistemas con Cobertura: Frijol Tapado. Informe Anual. CIID-UCR-UGUELPH. 78 p.
- NYE, P.H.; FOSTER, W.N.M (1958)., A study of the mechanism of soil phosphate uptake in relation to plant species. *Plant and Soil*,9,338-351.
- OCAMPO, R. 1994. Metodología para la identificación de plantas presentes en Costa Rica.

- In*: A. Soto; W. Koch; G. Jürgens y J. García (eds). Resúmenes del Seminario Integrado de Malezas. *Plits* 3(2):105-114.
- PALM, C.A.; MCKERROW, A.J.; GLASENER, K.M.; SZOTT, L.T. 1991. Agroforestry Systems in the Lowland Tropics: Is phosphorus important? *In*: H. Tiessen, D. López-Hernández, and I. Salcedo (eds.). Phosphorus Cycles in Terrestrial and Aquatic Ecosystems. Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE).
- ROSEMEYER, M.E.; GLIESSMAN, S.R. 1992. Modifying traditional and high-input agroecosystems for optimization of microbial symbioses: a case study of dry beans in Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 40:61-70.
- SCHWARTZ, H.F.; GÁLVEZ, G.E. 1980. Bean Production Problems. CIAT, Cali, Colombia.
- SCHLATHER, K. 1995. Eficiencia del fósforo en frijol tapado vs frijol espequeado. Simposio Centraamericano sobre Agricultura Orgánica. pp 163-176.
- SINGLETON, P.W.; MAGID, H.M.A.; TAVARES, J.W. 1985. Effect of phosphorus on the effectiveness of strains of *Rhizobium japonicum*. *Soil Science. Soc. Annual Journal* 49: 613-616.
- SWIFT, M.J.; RUSSEL-SMITH, A.; PERFECT, T.J. 1981. Decomposition and mineral-nutrient dynamics of plant litter in a regenerating bush-fallow in sub-humid tropical Africa. *Journal Ecology* 69: 981-995.

EL MODELO CROPGRO COMO UNA HERRAMIENTA DE INTEGRACION DEL CONOCIMIENTO

*Walter Bowen*¹

RESUMEN

El modelo CROPGRO como una herramienta de integración del conocimiento. Un principal objetivo de la investigación agrícola es el de lograr un mejor entendimiento de como funcionan los agrosistemas. Para lograr este objetivo es necesario que los resultados de la investigación de diferentes disciplinas sean integrados, de tal forma que la eficiencia del sistema pueda ser examinada. El desarrollo y aplicación de modelos de simulación basados en computación es un medio que proporciona un marco de referencia cuantitativo para integrar y organizar el conocimiento adquirido de la experimentación. Este método estimula la investigación basada en los procesos y el estudio de mecanismos, en lugar de la experimentación de campo fundamentada en prueba y error. Dado que la red PROFRIJOL está llevando a cabo un importante esfuerzo para formular una estrategia de investigación para mejorar la producción de frijol en suelos bajos en fósforo. Es imperante que dentro de esta estrategia se reconozca el potencial del importante papel que un modelo de simulación del crecimiento de un cultivo, como el CROPGRO, puede desempeñar como una herramienta para la integración del conocimiento, para el establecimiento de prioridades de investigación y para probar hipótesis. La información práctica requerida para trabajar con el modelo CROPGRO está puntualizada en este documento.

ABSTRACT

The Model CROPGRO as a tool for integrating knowledge. A major objective of agricultural research is to better understand how agroecosystems function. To meet this objective, research results from different disciplines need to be integrated so that system performance can be examined. An approach that provides a dynamic, quantitative framework for integrating and organizing knowledge gained from experimentation is one based on the construction and application of computer-based simulation models. This approach encourages process-based research and the study of mechanisms rather than field experimentation based on trial and error. A research strategy is presently being developed by the PROFRIJOL network to improve bean production on low-P soils. This strategy needs to recognize the potentially powerful role a crop growth model such as CROPGRO can play as a tool for integrating knowledge, for setting research priorities, and for testing hypotheses. The practical data needs for working with CROPGRO are outlined in this paper.



¹ IFDC, P.O. Box 2040, Muscle Shoals, AL (USA).

INTRODUCCION

Los esfuerzos científicos para cubrir la demanda de alimentos de la creciente población, sin el continuo deterioro del ambiente, requiere de un método que reconozca la complejidad del mundo real. Esta complejidad surge no solamente de consideraciones de naturaleza físico-químicas-biológicas, sino también de consideraciones de naturaleza socio-económicas-culturales-políticas. Tal complejidad ha contribuido a abrumar de igual forma a los tomadores de decisiones como a los científicos, resultando con frecuencia en una inhabilidad para definir claramente los problemas y para buscar soluciones viables. Mediante el agrupamiento por disciplinas específicas, los científicos han tenido éxito en el entendimiento de muchos conceptos básicos de los sistemas agrícolas, sin embargo han sido lentos en la integración y organización de estos conocimientos, de tal forma que pudieran ser usados para pronosticar las consecuencias de estrategias de producción alternativas o de los cambios en los recursos.

Un método que incrementa la comprensión de los conceptos básicos y que al mismo tiempo organiza este conocimiento dentro de un marco dinámico y cuantitativo, es comúnmente conocido como Análisis de Sistemas o Investigación de Sistemas (Systems Analysis or Systems Research). Como consecuencia de los avances en tecnología de computación y de la ciencia de la informática, en la actualidad se dispone de las herramientas de apoyo para la integración del conocimiento adquirido a nivel disciplinario, de tal forma que este entendimiento pueda ser usado para analizar la complejidad de la agricultura y de los sistemas ecológicos. Estas herramientas incluyen los modelos de simulación del crecimiento de las plantas y de los procesos del suelo, los modelos de sistemas sociales y económicos, los Sistemas de Información Geográfica (GIS), y los sistemas de manejo

de base de datos. Cuando estos medios, basados en computación, son usados para auxiliar a los tomadores de decisiones en el análisis de asuntos complejos, con frecuencia se les denomina Sistemas de Apoyo para la Toma de Decisiones (DSS).

El papel de los modelos simulación de cultivos en la investigación

Para entender como funcionan los ecosistemas, los científicos necesitan tener acceso a herramientas tales como los modelos de simulación del crecimiento de los cultivos. Conceptualmente, una estrategia de investigación basada en el desarrollo, evaluación y uso de los modelos del crecimiento de cultivos, permite enfatizar la investigación basada en los procesos y en el estudio de mecanismos, en lugar del método de prueba y error de la experimentación de campo. Los modelos de simulación son un importante medio para aumentar la eficiencia de la investigación, ya que éstos pueden auxiliar a los investigadores en la asimilación del conocimiento adquirido mediante la experimentación, proporcionan un marco de referencia para aportaciones de carácter multidisciplinaria, así mismo, promueven el método de sistemas para la solución de problemas y facilitan una organización sistemática del conocimiento existente sobre los genotipos de cultivos y los recursos naturales.

El valor de los modelos de simulación para incrementar la eficiencia de la investigación solamente podrá visualizarse si el método de modelación se constituye como una parte integral de la investigación. Se requiere que la investigación y el desarrollo de modelos caminen simultáneamente; mientras que los nuevos conocimientos son utilizados para refinar y mejorar los modelos, los modelos son usados para identificar fisuras en el conocimiento, lo cual a su vez puede contribuir a establecer prioridades en la investigación.

Para tener éxito, el método de modelación requiere que regularmente se evalúe su progreso, así mismo es necesario un continuo refinamiento de objetivos y prioridades. También se necesita de un equipo de investigadores e instituciones comprometidas con el desarrollo de programas (software) y estándares de datos, los cuales faciliten un entendimiento funcional de como operan los ecosistemas.

Una meta de este taller es la de desarrollar una estrategia de investigación para mejorar la producción del cultivo del frijol en suelos de bajo contenido de fósforo. Al formular esta estrategia, es necesario que reconozcamos el papel que los modelos pueden jugar como una herramienta para integrar conocimientos, para establecer prioridades de investigación, y para probar hipótesis. Con el propósito de estimular la discusión hacia esta meta, me voy a permitir describir brevemente un conjunto comprensivo de modelos de simulación, así como algunos esfuerzos recientes para desarrollar el submodelo fósforo, como un componente de dichos modelos.

Un sistema de apoyo para la toma de decisiones de transferencia de agrotecnología (DSSAT)

Durante la última década, un grupo internacional de científicos cooperantes han estado desarrollando modelos de simulación de cultivos, enfocados a proporcionar estimaciones realistas del comportamiento de los cultivos bajo diferentes estrategias de manejo y condiciones ambientales. Estos modelos utilizan un juego estandar de datos de acceso (inputs) y producen un juego estandar de datos de salida (outputs), aun cuando estos modelos pueden describir procesos de crecimiento de diferentes maneras, todos ellos usan el mismo procedimiento para simular los procesos del suelo, del agua y del nitrógeno (Jones, 1993; Jones *et al.*, 1994). Estos mo-

delos han sido puestos en un paquete, como parte de un programa cúpula (software shell) conocido como el Sistema de Apoyo Para Decisiones de Transferencia de Agrotecnología (DSSAT). El DSSAT permite que los usuarios puedan: 1. acceder, organizar y almacenar datos sobre cultivos, suelos, clima y precios; 2. retraer, analizar y desplegar datos; 3. validar y calibrar modelos de crecimiento de los cultivos; 4. evaluar diferentes estrategias de producción en un lugar dado o dentro de una región; y 5. analizar el riesgo asociado con la variabilidad del clima (Jones, 1993) .

Actualmente, el DSSAT incluye modelos de cultivos para simular el crecimiento del frijol, soya, maní, maíz, arroz, sorgo, milo, trigo, avena, yuca y papa. Modelos adicionales para girasol, caña de azúcar, tomate, piña, pastos y taro se encuentran en varios fases de desarrollo. El DSSAT y los modelos de cultivos han sido evaluados, modificados y mejorados continuamente. La versión del DSSAT más recientemente puesta en circulación (Version 3.0) contiene versiones mejoradas de los modelos, un programa para el manejo de archivos del clima, así como mejores programas de análisis, incluyendo la capacidad para simular y analizar rotaciones de cultivos de largo plazo (Tsuji *et al.*, 1994) . La aplicación potencial de los modelos del DSSAT, la manera en que los procesos son simulados, así como los requerimientos de acceso de datos para correr los modelos, son cubiertos en los programas de entrenamiento conducidos anualmente por los creadores de los modelos (Thornton *et al.*, 1995)

Simulando el crecimiento de los cultivos a niveles crecientes de complejidad

Los modelos de simulación del DSSAT son capaces de simular resultados a medida que se incrementa el nivel de complejidad. Los más simples o de primer nivel asumen que el

crecimiento está limitado solamente por la cantidad de radiación, temperatura y por el potencial genético, el agua y los nutrientes se asume que no son limitantes. La simulación a este nivel proporciona una estimación del rendimiento potencial. El segundo nivel asume que el desarrollo del cultivo puede ser además limitado por la disponibilidad del agua, pero los nutrientes no son limitantes. El tercer nivel incluye la disponibilidad de nitrógeno como una posible limitante, mientras que el cuarto nivel incluye la disponibilidad del fósforo, además de las limitantes de los niveles anteriores.

Al aumentar el nivel de complejidad de la simulación del crecimiento de un cultivo, la demanda de acceso de datos también aumenta (Figura 1). Los requerimientos de acceso de datos son acumulativos, por lo tanto los datos necesarios a un nivel, también lo son al siguiente nivel superior. Para todos los niveles de complejidad, los modelos de simu-

lación requieren valores diarios de radiación solar, temperatura máxima del aire, temperatura mínima del aire y precipitación pluvial. Estas cuatro variables determinan los procesos que son descritos dentro de los modelos.

El nivel de complejidad a que un usuario quiera simular, dependerá de los objetivos, así como de la disponibilidad de datos de acceso. Por ejemplo, el modelo puede ser usado para comparar el rendimiento potencial de diferentes cultivares de frijol en base a radiación, temperatura y fotoperíodo en diferentes sitios. En este caso, el usuario asume que el agua y los nutrientes existen en cantidades suficientes, por lo tanto cualquier diferencia en rendimiento puede ser atribuida solamente a una interacción entre el genotipo y el ambiente. Para simular rendimiento potencial, el único acceso de datos requerido es para las variables de clima, fecha de siembra, población de plantas, espaciamiento entre surcos y un conjunto de parámetros específicos para cada

		Incremento de la complejidad →			
		Producción potencial	Disponibilidad de agua	Disponibilidad de agua, N	Disponibilidad de agua, N, P
Incremento de datos de acceso ↓	Radiación solar Temp. máxima Temp. mínima Precipitación	Radiación solar Temp. máxima Temp. mínima Precipitación	Radiación solar Temp. máxima Temp. mínima Precipitación	Radiación solar Temp. máxima Temp. mínima Precipitación	Radiación solar Temp. máxima Temp. mínima Precipitación
	Cultivar	Cultivar	Cultivar	Cultivar	Cultivar
	Prácticas de manejo	Prácticas de manejo Manejo de irrigación	Prácticas de manejo Manejo de irrigación	Prácticas de manejo Manejo de irrigación	Prácticas de manejo Manejo de irrigación
		Propiedades físicas del perfil del suelo	Propiedades físicas del perfil del suelo Manejo del Fert. N y los residuos Propiedades químicas del perfil del suelo	Propiedades físicas del perfil del suelo Manejo del Fert. N y los residuos Propiedades químicas del perfil del suelo	Propiedades físicas del perfil del suelo Manejo del Fert. N y los residuos Propiedades químicas del perfil del suelo Manejo del Fert. P y los residuos

Fig. 1. La relación entre el nivel de complejidad de la simulación y la demanda de datos.

cultivar; no se requiere información del suelo. Sin embargo, se requiere de datos del perfil del suelo cuando se amplía el objetivo para incluir la simulación del efecto de la disponibilidad del agua y de los nutrientes (N, P) sobre el rendimiento, o de otros componentes tales como la fijación de nitrógeno o la absorción del fósforo.

Integración de las actividades de la experimentación y del modelaje

El nivel de simulación que mayormente nos interesa dentro de este taller es indudablemente el cuarto nivel, el nivel de complejidad que incluye al fósforo, así como al agua y al nitrógeno, de tal manera que el modelo de simulación para el frijol es el más relevante para nuestra meta de desarrollar una estrategia para mejorar la producción del frijol en suelos bajos en fósforo.

El modelo para frijol fue primeramente liberado con el nombre de BEANGRO (Hoogenboom *et al.*, 1994). Posteriormente, el código para el modelo BEANGRO fue combinada con el de los modelos SOYGRO y PNUTGRO, con el fin de crear un modelo para el desarrollo de leguminosas denominado CROPGRO (Hoogenboom *et al.*, 1993). Este modelo mejorado incluye opciones para simular fotosíntesis a nivel hoja, la intercepción de la luz por el follaje de los surcos contiguos (Boote y Pickering, 1994), la dinámica del nitrógeno del suelo, la absorción del nitrógeno, la fijación de nitrógeno y el daño causado por las plagas (Batchelor *et al.*, 1993).

En este punto, debo de enfatizar que el submodelo fósforo para CROPGRO está aún en proceso de desarrollo. Recientemente fue ensamblada una versión del CROPGRO, la cual incorpora varios componentes del submodelo fósforo, así que cuando menos una versión preliminar del modelo está disponible para proveer una estructura que permita

el mejoramiento y prueba del modelo. El hecho disponer de esta estructura deberá ayudarnos a desarrollar una estrategia de investigación que facilite el enlace lógico de las actividades experimentales y de modelaje.

El mejoramiento y las pruebas del submodelo fósforo requieren de experimentos de campo bien conducidos. Estos datos pueden provenir de experimentos previos, o también pueden provenir de nuevos experimentos los cuales pudieran ser implementados en este taller. De cualquier forma, los mismos datos son requeridos para correr el modelo CROPGRO, así como para probar su validez contra datos de experimentos reales. Consecuentemente surge la pregunta, ¿Que clase de datos necesitamos?.

Requerimiento de datos para el modelo CROPGRO

El requerimiento mínimo de datos de acceso (input) para correr el modelo CROPGRO fue mostrado anteriormente en la Figura 1. Estos datos son suficientes para correr el modelo, sin embargo, para probar críticamente la eficiencia del CROPGRO bajo las condiciones de Centro América, se requiere de datos adicionales. Esta información adicional incluye mediciones hechas durante el curso de los experimentos, y pueden incluir variables tales como la acumulación de biomasa, el contenido de agua del suelo o el contenido de nitrógeno de la planta durante varias fechas del ciclo del cultivo. Estas mediciones, así como muchos otros valores medidos pueden ser comparados con los resultados simulados (output) para evaluar la eficiencia del modelo.

En seguida se presentan algunas notas relacionadas con el conjunto mínimo de datos de acceso para simular condiciones similares a las que ocurrem durante los experimentos de campo.

Variables del Clima

Se requiere que una estación meteorológica esté ubicada cerca de los experimentos de campo, con el fin de registrar datos diarios de precipitación pluvial, temperatura máxima, temperatura mínima y radiación solar. Estas cuatro variables constituyen el motor de los modelos. La radiación recibida también puede medirse como el número de horas de luz del día. En la mayor parte de las áreas, una estación meteorológica dentro de una distancia de 500 metros puede proporcionar medidas confiables. A distancias mayores los patrones de lluvia pueden ser significativamente diferentes. Como una alternativa, en caso de que la temperatura y la radiación fueran medidas a una distancia mayor de 500 metros, para registrar la lluvia se hace necesario colocar un pluviómetro en el mismo lugar del experimento.

Características del Perfil del Suelo

Los modelos simulan los procesos del suelo basándose en propiedades definidas por los diferentes horizontes del suelo, a una profundidad de cuando menos la longitud de las raíces al final del ciclo del cultivo. Las propiedades más importantes de cada horizonte incluyen: la profundidad desde la superficie del suelo hasta el límite inferior de cada horizonte, el punto de marchitamiento permanente (PMP), la capacidad de campo (CC), la densidad aparente, el contenido de carbón y nitrógeno, el pH del suelo y el fósforo aprovechable. Las constantes de humedad PMP y CC son mejor estimadas en el campo, sin embargo, se pueden obtener estimaciones iniciales a partir de la textura, la densidad aparente y el contenido de carbón orgánico.

Coefficientes Específicos del Cultivar

El modelo CROPGRO simula el efecto tanto de la temperatura como del fotoperíodo durante el desarrollo vegetativo, el desarrollo reproductivo y los procesos de crecimiento. Para lograr lo anterior, se proporcionan

coeficientes específicos del cultivar, los cuales describen la sensibilidad a la temperatura y el fotoperíodo para cada cultivar, y definen los valores de inicio para la germinación, la floración y la madurez fisiológica. También se dan otros coeficientes específicos, tales como la tasa de aparición de las hojas, el tamaño promedio de las hojas, el espesor de las hojas, la tasa de aparición de las flores, la tasa de aparición de las vainas, la tasa de crecimiento de la semilla individual y la cáscara, así como el número de semillas por vaina (Hoogenboom *et al.*, 1992; Hoogenboom *et al.*, 1993). Estos coeficientes son por lo general calculados de la información de experimentos de campo, en los cuales las condiciones de crecimiento han sido optimizadas. Si éstos son calculados cuidadosamente, los coeficientes de los cultivos podrán ser los mismos para todas las localidades.

Variables de las Prácticas de Manejo

En seguida se definen algunas de estas prácticas de manejo:

- Fecha de siembra, profundidad de siembra, población de plantas y la distancia entre surcos.
- Fechas de riego, cantidad de agua aplicada y la clase de sistema de riego.
- Fecha de aplicación del fertilizante nitrogenado, cantidad aplicada, método de aplicación, profundidad de aplicación y clase de fertilizante nitrogenado.
- Cantidad de residuos del cultivo anterior, el contenido de nitrógeno y fósforo de los residuos, profundidad de incorporación y fecha de incorporación.
- Fecha de aplicación del fertilizante fosfórico, cantidad aplicada, método de aplicación, profundidad de aplicación y clase de fertilizante fosfórico.

- Contenido total y soluble de P_2O_5 de la de roca fosfórica cuando se usa como fuente de fósforo.

Condiciones Iniciales

Los modelos necesitan iniciar la simulación con algunas estimaciones iniciales del agua del suelo, nitratos, amonio y fósforo disponibles. De ser posible estas variables deberán ser medidas a diferentes profundidades al momento de la siembra o con anterioridad a la siembra. Por ejemplo, las condiciones iniciales podrán ser determinadas para cada capa de suelo de 10 a 15 cm hasta una profundidad de 120 cm. Si estas variables son medidas, deberán registrarse las fechas en que

las muestras de suelo fueron tomadas, así como los intervalos de profundidad correspondientes.

Variables Medidas

Estas variables no son necesarias para corre el modelo CROPGRO, pero son muy útiles para evaluar la eficiencia del modelo. Una lista parcial de las variables para las cuales el modelo proporciona valores (output) simulados se proporciona en la Cuadro 1. Las mediciones de campo de cualquiera de estas variables podrá ser comparada fácilmente con los valore simulados utilizando la interfase gráfica desarrollada por el DSSAT. Un ejemplo de la comparación entre datos

Cuadro 1. Una lista parcial de las variables para las cuales el modelo proporciona valores.

Calculado diariamente
Contenido volumétrico de agua por capa del suelo ($m^3 m^{-3}$)
Contenido de nitrógeno mineral por capa del suelo ($mg kg^{-1}$)
Contenido de fósforo por capa del suelo ($mg kg^{-1}$)
Contenido de nitrógeno total por capa del suelo ($kg ha^{-1}$)
Contenido de carbono orgánico por capa del suelo ($t ha^{-1}$)
Densidad de raíces por capa del suelo ($cm cm^{-3}$)
Indice de área foliar ($m^2 m^{-2}$)
Peso seco de biomasa, sin raíces ($kg ha^{-1}$)
Peso seco de raíces ($kg ha^{-1}$)
Peso seco de tallos ($kg ha^{-1}$)
Peso seco de hojas ($kg ha^{-1}$)
Peso seco de vainas ($kg ha^{-1}$)
Peso seco de semillas ($kg ha^{-1}$)
Peso seco de nódulos ($kg ha^{-1}$)
Número de vainas (vaina m^{-2})
Número de semillas (semilla m^{-2})
Cantidad de N, P en cada componente de la planta ($kg ha^{-1}$)
Cantidad de N fijo ($kg ha^{-1}$)
Calculado una vez
Las etapas de desarrollo fenológico (fecha)
R1 - 50% de las plantas con una flor en cualquier nudo
R3 - 50% de las plantas con primera vaina
R5 - 50% de las plantas con granos que inician crecer
R7 - 50% de las plantas con madurez fisiológica
Rendimiento ($kg ha^{-1}$)

simulados y datos medidos se presenta en la Figura 2.

CONCLUSIONES

El uso de un método cuantitativo para el análisis de sistemas ha sido facilitado mediante el desarrollo de herramientas de simulación tales como los modelos de crecimiento de cultivos. En virtud de que la red PROFRIJOL está intentando mejorar la producción de frijol en suelos de bajo contenido de fósforo, considero que un modelo de simulación de crecimiento como el CROPGRO podría proporcionar un marco de referencia crítico para la asimilación de conocimiento y para el establecimiento de las prioridades de investigación. A medida que el modelo se continúe desarrollando y mejorando, también podría ser una

herramienta confiable para la evaluación de la respuesta del cultivo a la aplicación de fósforo, así como para determinar en que forma dicha respuesta es afectada por las complejas interacciones del clima, tipo de suelo, genotipo y prácticas de manejo.

Solamente ha sido posible presentar una breve introducción al modelo CROPGRO, sin embargo, espero que se haya reconocido la importancia del potencial beneficio que podría ser obtenido si se logra la integración de las actividades experimentales con las de modelaje.

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mi agradecimiento a Gildardo Carmona por su participación en la traducción de este documento.

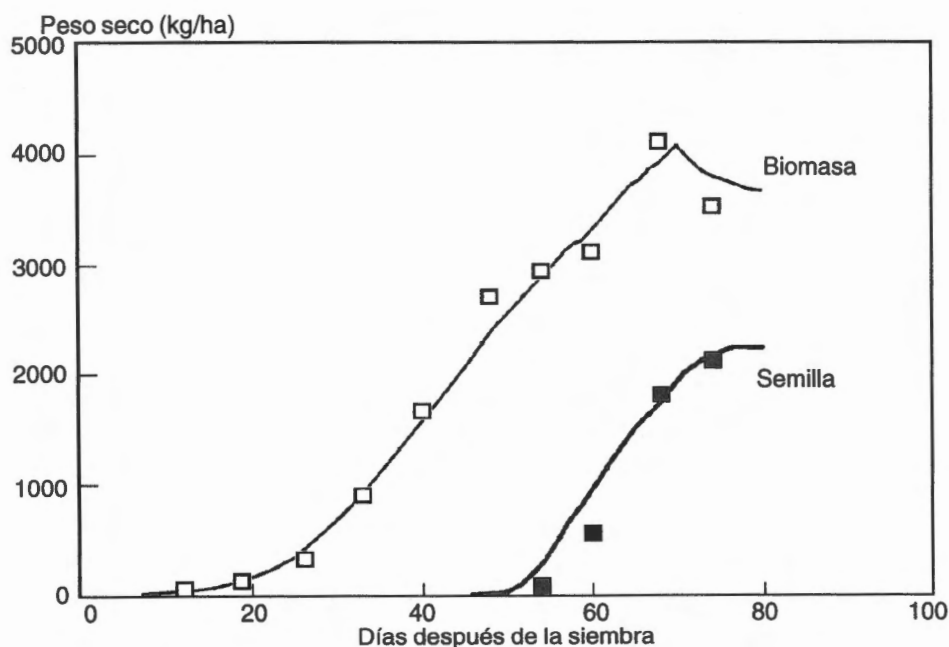


Fig. 2. Un ejemplo de la comparación entre datos simulados (las líneas) y datos medidos (los símbolos) para un experimento de frijol.

LITERATURA CITADA

- BATCHELOR, W. D.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J.; PINNSCHMIDT, H. O. 1993. Extending the use of crop models to study pest damage. *Transactions of the ASAE* 36(2):551-558.
- BOOTE, K. J.; PICKERING, N. B. 1994. Modeling photosynthesis of row crop canopies. *HortScience* 29(12):1423-1434.
- HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J. 1992. Modeling growth, development, and yield of grain legumes using SOYGRO, PNUTGRO, and BEANGRO: a review. *Transactions of the ASAE* 35(6):2043-2056.
- HOOGENBOOM, G.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J.; BOWEN, W. T.; PICKERING, N. B.; BATCHELOR, W. D. 1993. Advancement in modeling grain legume crops. ASAE Paper No. 93-4511. St. Joseph, MI, American Society of Agricultural Engineers. 21 p.
- HOOGENBOOM, G.; WHITE, J. W.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J. 1994. BEANGRO: a process-oriented dry bean model with a versatile user interface. *Agronomy Journal* 86:182-190.
- JONES, J. W. 1993. Decision support systems for agricultural development. p. 459-471. *Systems approaches for agricultural development*. Ed. por F. W. T. Penning de Vries, P. S. Teng, K. Metselaar. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.
- JONES, J. W.; HUNT, L. A.; HOOGENBOOM, G.; GODWIN, D. C.; SINGH, U.; TSUJI, G. Y.; PICKERING, N. B.; THORNTON, P. K.; BOWEN, W. T.; BOOTE, K. J.; RITCHIE, J. T. 1994. Input and output files. p. 1-94. *DSSAT version 3*. Ed. por G. Y. Tsuji, G. Uehara, S. Balas. Vol. 2. Honolulu, University of Hawaii.
- THORNTON, P. K.; BOWEN, W. T.; WILKENS, P. W.; JONES, J. W.; BOOTE, K. J.; HOOGENBOOM, G. 1995. Applying crop models and decision support systems. IFDC Special Publication 22. Muscle Shoals, International Fertilizer Development Center. 57 p.
- TSUJI, G. Y.; UEHARA, G.; BALAS, S. 1994. *DSSAT version 3*. Vol. 1-3. Honolulu, University of Hawaii.

