

ABSORCIÓN Y EFICIENCIA DE USO DE FÓSFORO EN PAPA CULTIVAR ALPHA CON ³²P

PHOSPHORUS UPTAKE AND USE EFFICIENCY BY POTATO CULTIVAR ALPHA USING ³²P

Juan M. Covarrubias-Ramírez¹, Severiano Castillo-Aguilar², José A. Vera-Núñez², Roberto Núñez-Escobar¹,
Prometeo Sánchez-García¹, Rodrigo Aveldaño-Salazar³ y Juan J. Peña-Cabriales²

¹Edaforología. Campus Montecillo. Colegio de Postgraduados. 56230. Montecillo, Estado de México. (cjuan01@colpos.mx). ²Laboratorio de Microbiología Ambiental. CINVESTAV-IPN. Unidad Irapuato. Km 9.6 Libramiento Norte. Carretera Irapuato-León. Irapuato, Guanajuato. México (jpena@ira.cinvestav.mx). ³Campo Experimental El Batán. CIRCE. INIFAP.

RESUMEN

El fósforo (P) es el fertilizante aplicado en mayor cantidad y es el más limitante para la producción de papa. Para generar una recomendación válida de fertilización fosfatada es necesario conocer la dinámica del P en el suelo y su eficiencia agronómica. Por ello se evaluó la cinética y eficiencia de absorción de P en plantas de papa (*Solanum tuberosum* L.) cv. Alpha, a través de la técnica isotópica de ³²P en suelos con aplicaciones previas continuas de P. Se usó tres formas de suministro de P en invernadero: 1) suelo más ³²P (testigo); 2) ³²P más superfosfato de calcio simple (SS); 3) ³²P más SS, más *Bacillus subtilis* (SS+Bs). La actividad del isótopo ³²P se cuantificó en cuatro etapas de desarrollo: 1) crecimiento vegetativo 25 d después de emergencia (dde); 2) inicio de tuberización (IT) 45 dde; 3) crecimiento de tubérculo (CT) 80 dde; 4) máximo desarrollo de tubérculo (DT) 100 dde. El diseño experimental fue completamente al azar con 12 tratamientos en arreglo factorial y tres repeticiones. Hubo diferencias significativas ($p \leq 0.05$) para materia seca (MS), rendimiento de P total y tasa de absorción de P. El tratamiento SS+Bs produjo el máximo rendimiento de MS (8.96 g planta⁻¹), el mayor P total (14.85 mg P planta⁻¹) y una tasa de absorción de 0.742 mg P planta⁻¹ d⁻¹. El P derivado del fertilizante varió de 44.28 a 55.36% en el ciclo de cultivo que incluyó SS+Bs, equivalente a un rendimiento P-fertilizante de 7.82 mg P planta⁻¹ y una eficiencia P-fertilizante de 17.22%, ambos a los 100 dde y superiores ($p \leq 0.05$) 42.7% respecto a SS. El análisis de la cinética de absorción de P mostró que a partir de la etapa IT, y en DT, se presentó la mayor absorción de P. Las aplicaciones de P no incrementaron los rendimientos debido a que el suelo era rico en P; en cambio la inoculación con *Bacillus subtilis* incrementó la biomasa en 31.7% y la absorción de P en 27.5%.

Palabras clave: *Bacillus subtilis*, cinética P fertilizante, eficiencia P fertilizante, superfosfato simple.

ABSTRACT

Phosphorus (P) is the element applied as fertilizer in the highest quantities, and it is the most limiting factor for potato growth. To generate a valid recommendation for P fertilization, it is necessary to know what the P dynamics in the soil and its agronomic efficiency are. The kinetics and absorption efficiency of P in potato plants (*Solanum tuberosum* L.) cv Alpha was evaluated with the ³²P isotope technique in soils with previous, continuous applications of P. Three methods of P application were used in a greenhouse: 1) soil plus ³²P (control), 2) ³²P plus single calcium superphosphate (SS), 3) ³²P plus SS plus *Bacillus subtilis* (SS+Bs). The activity of ³²P was quantified at four development stages: 1) vegetative growth 25 d after emergence (dae), 2) tuber initiation (IT) 45 dae, 3) tuber growth (CT) 80 dae, 4) maximum tuber development (DT) 100 dae. The experimental design was completely randomized with 12 treatments in a factorial arrangement and three replications. There were significant differences ($p \leq 0.05$) for dry matter (MS), total P yield (P total) and P uptake rate. The SS+Bs treatment produced the highest MS yield (8.96 g plant⁻¹), the highest P total (14.85 mg P plant⁻¹) and the highest P uptake rate (0.742 mg P plant⁻¹ d⁻¹). Uptake of P derived from the fertilizer varied from 44.28 to 55.36% during the crop growth cycle when SS+Bs was included; this was equivalent to a P-fertilizer yield of 7.82 mg P plant⁻¹ and a P-fertilizer efficiency of 17.22%, both at 100 dae, which was 42.7% higher ($p \leq 0.05$) than SS. The analysis of P-uptake kinetics showed that the highest uptake of P occurred IT and DT. P applications did not increase yields since the soil was already P rich, while inoculation with *Bacillus subtilis* increased biomass by 31.7% and P uptake by 27.5%.

Key words: *Bacillus subtilis*, P fertilizer kinetics, P fertilizer efficiency, single superphosphate.

INTRODUCTION

Optimum production of potatoes in México requires the application of P-based fertilizers, the macro-element that is most applied and that is most limiting factor for plant growth (Schachtman *et al.*,

INTRODUCCIÓN

La producción óptima del cultivo de papa en México requiere la aplicación de fertilizantes a base de P, el macroelemento aplicado en mayor cantidad y el más limitante para el crecimiento de las plantas (Schachtman *et al.*, 1998). Esto se debe a la baja disponibilidad de P, que normalmente no excede de $10 \mu\text{M}$ en la solución del suelo (Raghothama, 1999), a su baja difusión en los suelos (10^{-12} a $10^{-15} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$), la menor entre los elementos esenciales en la nutrición de las plantas, y a un alto valor de pH en los suelos, generalmente desfavorable a la solubilidad del P (Havlin *et al.*, 1999).

Los suelos derivados de cenizas volcánicas (Andosoles), en la zona centro del país, son ricos en alófono, están compuestos de materiales amorfos de hidróxido de aluminio entre las capas expandibles del silicato de aluminio, son ácidos, contienen compuestos de óxidos e hidróxidos de aluminio y silicio (Si), que provocan la fijación de P. En los suelos alcalinos derivados de rocas sedimentarias calizas (Calcisoles), característicos de las zonas semiáridas de México, el P se encuentra como fosfato tricálcico que se incrementa durante el desarrollo del cultivo y es insoluble, lo que provoca deficiencias en las plantas. Por lo anterior, más de 80% del P llega a ser inmovilizado y no está disponible para ser absorbido por las plantas (Holford, 1997).

La papa es uno de los cultivos con menor relación raíz: follaje; poco más de 70% de su raíz crece en los primeros 0.2 m de profundidad de suelo, por lo cual la superficie de exploración de nutrimentos es baja (Curwen, 1993). No obstante, se ha detectado una disminución en la concentración de P alrededor de las raíces, la cual sugiere la presencia de mecanismos activos de absorción en la planta ya que la concentración de P es 100 veces mayor en el xilema y 1000 veces mayor en la vacuola que en la solución del suelo (Raghothama, 1999).

El uso de isótopos para evaluar fertilizantes ha permitido detectar, medir y rastrear la removilización del fertilizante y su destino en suelo y planta (Zapata, 2002). El uso del isótopo ^{32}P como trazador aplicado al suelo con el fertilizante fosfatado, permite determinar los iones fosfato intercambiables en la solución y los absorbidos por la planta, así como el origen del P (Fardeu *et al.*, 1996). El método de dilución isotópica es una alternativa metodológica útil, práctica y económica, cuando no se puede marcar isotópicamente al nutrimento de interés. El método consiste en marcar el suelo con el isótopo para diferenciar el origen del nutrimento: suelo o fertilizante (Zapata, 2000). Por tanto, la hipótesis fue que el uso de una rizobacteria promotora del crecimiento en plantas (PGPR, por sus siglas en inglés) incrementa la cinética de absorción y eficiencia de P en el cultivo de papa. El

1998). This is because P is available in low quantities, normally not exceeding $10 \mu\text{M}$ in the soil solution (Raghothama, 1999), because its diffusion in the soil (10^{-12} to $10^{-15} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$) is very low, the lowest among the elements essential to plant nutrition, and because a high pH in the soils generally does not favor solubility of P (Havlin *et al.*, 1999).

Soils derived from volcanic ash (Andosols) in the central region of the country are rich in allophone, are composed of amorphous aluminum hydroxide materials between the expandable layers of aluminum silicate, are acid, and contain aluminum oxide and hydroxide compounds and silica (Si), which provoke P fixation. In the alkaline soils derived from sedimentary limestone rocks (Calcisols), characteristic of the semiarid zones of México, P is found as tricalcium phosphate, which increases during crop development and is insoluble, provoking deficiencies in the plants. Because of these processes, more than 80% of the P becomes immobilized and is not available for uptake by the plants (Holford, 1997).

Potato is a crop with one of the lowest root:foliage ratios; a little more than 70% of its root grows in the top 0.2 m of soil, and so the nutrient exploration surface area is small (Curwen, 1993). Nevertheless, a reduction in the P concentration around the roots has been detected, suggesting that the plant has active mechanisms of uptake since the P concentration is 100 times higher in the xylem and 1000 times higher in the vacuole than in the soil solution (Raghothama, 1999).

The use of isotopes to evaluate fertilizers has enabled to detect, measure and trace the re-mobilization of the fertilizer and its destination in soil and plant (Zapata, 2002). The use of the ^{32}P isotope as a tracer applied to the soil with phosphate fertilizers permits the detection of exchangeable phosphate ions in the solution and those absorbed by the plant, as well as the origin of P (Fardeu *et al.*, 1996). The method of isotopic dilution is a useful, practical and economical methodological alternative when it is not possible to mark the nutrient of interest isotopically. The method consists in marking the soil with the isotope to differentiate the origin of the nutrient: soil or fertilizer (Zapata, 2000). Therefore, the hypothesis was that the use of plant growth-promoting rhizobacteria (PGPR) increases P uptake kinetics and efficiency in potato crop. The objective of the present study was to determine the uptake kinetics and efficiency of P in potato cv Alpha using the technique of ^{32}P isotope dilution in soils where frequent, high doses of phosphate fertilizers had been applied.

MATERIALS AND METHODS

This trial was conducted in the Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN),

objetivo del presente estudio fue determinar la cinética de absorción y eficiencia de P en el cultivo de papa cv. Alpha usando la técnica de dilución isotópica de ³²P en suelos con aplicaciones altas y frecuentes de fertilizante fosfatado.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se realizó en el Centro de Investigaciones y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV-IPN), Unidad Irapuato, Guanajuato, en invernadero en una cámara de radiactividad con atmósfera controlada entre 15 y 25 °C, humedad relativa 50 a 70% y fotoperíodo de invierno (11 h d/ 13 h noche).

Se seleccionó el cultivar Alpha de papa de un lote comercial y se sembró en macetas con 2.75 kg de suelo vertisol pélico, obtenido de un lote donde se cultiva papa con aplicaciones continuas de P, del rancho San José, en León, Guanajuato. El suelo (Cuadro 1) tiene textura arcillosa (51.1% arcilla) y densidad aparente de 1.05 g cm⁻³; es un suelo fértil con alto contenido de P, K, Ca, Mg, Mn y Cu, intermedio de N, Fe y Zn, y bajo de materia orgánica. La relación Ca Mg⁻¹ fue baja (1.62) y la de Ca+Mg K⁻¹ fue 12.9, lo que sugiere deficiencia de K. Es moderadamente ácido y sin problemas de salinidad para el desarrollo del cultivo de papa.

Diseño experimental

Los factores y niveles fueron: 1) Suministro de P: a) ³²P para determinar el suministro de P desde el suelo (testigo); b) superfosfato de calcio simple (SS) más ³²P para determinar el suministro de P desde el fertilizante (³²P+SS); c) *Bacillus subtilis* (Bs) con SS y ³²P para determinar el efecto de la bacteria en la absorción del P (³²P+SS+Bs). 2) Etapas fenológicas de la papa: a) crecimiento vegetativo (CV) 25 d después de emergencia (dde), cuando el cultivo tuvo 8 a 10 hojas; b) inicio de tuberización (IT) 45 dde, cuando la parte final del estolón empezó a desarrollarse en el tubérculo; c) inicio de crecimiento del tubérculo (CT) 80 dde, cuando el tubérculo inició su crecimiento y su peso es menor que la suma del follaje y la raíz; d) desarrollo del tubérculo (DT) 100 dde, cuando el tubérculo alcanzó su máximo crecimiento y su peso es mayor que la suma del follaje y la raíz.

El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial de (3×4) tratamientos: tres formas de suministro de P y cuatro etapas de muestreo; hubo tres repeticiones para un total de 36 unidades experimentales. Cada unidad experimental tuvo una planta por maceta, y las 36 unidades se ubicaron en una cámara de acrílico diseñada como blindaje a la radiación emitida por el ³²P.

La aplicación de los tratamientos de ³²P se realizó a la siembra con una solución marcadora de ³²P y una actividad de 10 mCi de ³²P-H₃PO₄ mL⁻¹ (Amersham Biosciences). Se aplicaron 80 μCi ³²P-ácido ortofosfórico kg⁻¹ de suelo, diluidos en una solución de KH₂PO₄ con 5 mg P L⁻¹, para tener 220 μCi ³²P-KH₂PO₄ maceta⁻¹, equivalente a 82.5 μg P kg⁻¹ suelo. El fertilizante SS se aplicó al momento de la siembra con 180 mg kg⁻¹ suelo, equivalente a 16.51 mg P kg⁻¹ suelo, a 45.4 mg P maceta⁻¹ y 378 kg P ha⁻¹, a una profundidad de 5 cm y a

Unidad Irapuato, Guanajuato, in a greenhouse in a radioactive chamber with a controlled atmosphere between 15 and 25 °C, 50 to 70% relative humidity, and a winter photoperiod (11 h d/13 h night).

The potato cultivar Alpha was selected from a commercial lot and was planted in pots with 2.75 kg of pellic vertisol, which was obtained from a plot on the San José Ranch, León, Guanajuato, where potato is cultivated with continuous applications of P. The soil (Table 1) has a clay texture (51.1% clay) and a bulk density of 1.05 g cm⁻³; it is a fertile soil with a high content of P, K, Ca, Mg, Mn and Cu, a medium content of N, Fe and Zn, and a low content of organic matter. The CaMg⁻¹ ratio was low (1.62) and that of Ca+Mg K⁻¹ was 12.9, which suggests a K deficiency. It is moderately acid and salinity does not present a problem for potato growth.

Experimental design

Factors and levels were: 1) Supply of P: a) ³²P to determine the supply of P from the soil (control); b) single calcium superphosphate (SS) plus ³²P to determine the supply of P from the fertilizer (³²P+SS); c) *Bacillus subtilis* (Bs) with SS and ³²P to determine the effect of the bacteria in P uptake (³²P+SS+Bs). 2) Phenological stages of potato: a) vegetative growth (CV) 25 d after emergence (dae) when the plant had 8 to 10 leaves; b) initial tuberization (IT) 45 dae when the end segment of the spur began to develop in the tuber; c) initial tuber growth (CT) 80 dae when the tuber began growth and its weight is less than the sum of that of the foliage and root; d) tuber development (DT) 100 dae when the tuber reached its maximum growth and its weight is more than the sum of that of the foliage and root.

The experimental design was completely randomized with a factorial arrangement of (3×4) treatments: three forms of P supply and four stages of sampling. There were three replications for a total of 36 units. Each experimental unit was composed of one pot, and the 36 units were placed in an acrylic chamber designed to be a shield against the radiation emitted by the ³²P.

Cuadro 1. Características de fertilidad de suelo cultivado con papa usando altas dosis de fósforo, procedente del Rancho San José, León, Guanajuato.

Table 1. Fertility characteristics of soil from the San José Ranch, León, Guanajuato cultivated with potato, using high doses of phosphorus.

Características	Valores
Nitrógeno inorgánico (mg kg ⁻¹)	41.5
Fósforo Bray 1 (mg kg ⁻¹)	180
Potasio intercambiable (me 100 g ⁻¹)	2.6
Calcio intercambiable (me 100 g ⁻¹)	20.7
Magnesio intercambiable (me 100 g ⁻¹)	12.8
Hierro extraído por DTPA (mg kg ⁻¹)	11.2
Zinc extraído por DTPA (mg kg ⁻¹)	4.49
Manganeso extraído por DTPA (mg kg ⁻¹)	52.6
Cobre extraído por DTPA (mg kg ⁻¹)	1.94
Materia orgánica (%)	1.45
pH (relación 1:2 suelo:agua)	6.2
Conductividad eléctrica del extracto de saturación (dS m ⁻¹)	1.23

5 cm del tubérculo-semilla en un solo punto (Alvarez-Sánchez *et al.*, 2001). Para *B. subtilis* se aplicaron 4 mL por maceta de una suspensión con una concentración de 10^3 UFC mL⁻¹ sobre el tubérculo; la cepa de *B. subtilis* fue proporcionada por el laboratorio de Bioquímica Ecológica del Departamento de Biotecnología y Bioquímica de la Unidad Irapuato del CINVESTAV-IPN.

El riego se hizo con agua destilada aplicando el agua al suelo, para llegar a capacidad de campo (33 KPa) y evitar lixiviación del marcador radiactivo de ³²P y demás nutrientes. El resto del manejo fue el adecuado para el cultivo de papa (Rowe, 1993).

Variables

Se hicieron cuatro muestreos de nueve plantas en cada etapa fenológica, a los 25, 45, 80 y 100 dde, para las siguientes variables. Crecimiento en función de la producción de materia seca (MS), extrayendo la planta completa de cada maceta al llegar a la etapa de muestreo; la raíz se lavó para eliminar el suelo, se puso en bolsas de papel estraza perforadas y luego en un horno de calor seco a 70 °C por 72 h. Fósforo total en la planta (P total) se cuantificó tomando aproximadamente 1 g de MS y, después del proceso de digestión, usando la formación del complejo cromógeno amarillo vanadomolibdato-fosfórico (método de vanadio-molibdato) y la medición de la absorbancia de la luz a una longitud de onda de 420 nm con un espectrofotómetro Beckman DU650. Actividad de ³²P en la planta se determinó por el método de Cerenkov (Zapata, 2000), con un equipo de centelleo líquido TRI-CARB 2100TR como cuentas por minuto (cpm) y transformadas a desintegraciones por minuto (dpm).

Una vez cuantificada la actividad de ³²P se determinaron las variables isotópicas. La composición isotópica del P se llama actividad específica (a.e.) y es la relación de la actividad de ³²P (dpm) y la cantidad de P total, la cual se determinó con las siguientes fórmulas:

$$\text{actividad de } ^{32}\text{P (dpm)} = (\text{CA}/\%E) \times 100$$

donde dpm = actividad en desintegraciones por minuto; CA = conteo de la muestra (cpm); %E = eficiencia de conteo del estándar = 54%.

$$\text{actividad específica (dpm/mg P)} = ((\text{dpm}/V_n) \times (V_m/p)) / \text{P total}$$

donde dpm = actividad de ³²P en la muestra; V_n = volumen de solución medido = 20 mL; V_m = volumen de la solución del material vegetal = 20 mL; p = peso del material vegetal en g; P total = mg P g MS⁻¹.

Cuantificación de la absorción de fósforo

La cantidad de P total en el cultivo durante el experimento (rendimiento P total entre 25 y 100 dde) se obtuvo a partir del rendimiento de MS y el porcentaje de P total en el cultivo (P total), y se determinó de la siguiente manera:

$$\text{rendimiento P total (mg P planta}^{-1}) = (\text{MS} \times \text{P total}) / 100$$

The ³²P treatments were applied at planting with a marker solution of ³²P and a 10mCi activity of ³²P-H₃PO₄ mL⁻¹ (Amersham Biosciences); 80 μCi ³²P-orthophosphoric acid kg⁻¹ of soil was applied. This was diluted in a solution of KH₂PO₄ with 5 mg P L⁻¹, so as to have 220 μCi ³²P-KH₂PO₄ pot⁻¹, equivalent to 82.5 μg P kg⁻¹ of soil. The SS fertilizer was applied at planting with 180 mg kg⁻¹ of soil, equivalent to 16.51 mg P kg⁻¹ of soil, at 45.4 mg P pot⁻¹ and 378 kg P ha⁻¹, applied at a depth of 5 cm at 5 cm from the tuber-seed at a single point (Alvarez-Sánchez *et al.*, 2001). For *B. subtilis*, 4 mL per pot of a suspension with a concentration of 10^3 UFC mL⁻¹ was applied on the tuber. The *B. subtilis* strain was provided by the Biochemistry-ecology laboratory of the Department of Biotechnology and Biochemistry of the Irapuato Unit of CINVESTAV-IPN.

Plants were irrigated with distilled water applied to the soil to field capacity (33 KPa) to avoid leaching of the radioactive ³²P-labeled marker and other nutrients. The rest of the management was adequate for potato (Rowe, 1993).

Variables

Four samples of nine plants were taken in each phenological stage, at 24, 45, 80 and 100 dae, for the following variables. Growth in function of dry matter production (MS) was measured after extracting the entire plant from each pot when it reached the sampling stage; the root was washed to eliminate soil, then placed in perforated brown bags, and later in a dry heat oven at 70 °C for 72 h. Total phosphorus in the plant (P total) was quantified by taking approximately 1 g of MS, and after the process of digestion, using the formation of the yellow chromogen molybdate-vanadium-phosphoric complex (vanadium-molybdate procedure) and the measurement of light absorbance at a wave length of 420 nm with a Beckman DU650 spectrophotometer. ³²P activity in the plant was determined by the Cerenkov method (Zapata, 2000), with TRI-CARB 2100TR liquid scintillation counting equipment as counts per minute (cpm) and transformed to disintegrations per minute (dpm).

Once the ³²P activity was quantified, isotopic variables were determined. The isotopic composition of P is called specific activity (a.e.) and is the relationship between ³²P (dpm) activity and P total, which is determined with the following formulas:

$$^{32}\text{P activity (dpm)} = (\text{CA}/\%E) \times 100$$

where dpm = activity in disintegrations per minute; CA = count of the sample (cpm); %E = efficiency of count of the standard = 54%.

$$\text{Specific activity (dpm/mg P)} = ((\text{dpm}/V_n) \times (V_m/p)) / \text{P total}$$

where dpm = activity of ³²P in the sample; V_n = volume of measured solution = 20 mL; V_m = volume of solution of plant material = 20 mL; p = weight of plant material in g; P total = mg P g MS⁻¹.

Quantification of phosphorus absorption

The quantity of P total in the crop during the experiment (yield of P total between 25 and 100 dae) was obtained from the yield of MS

La tasa de absorción de P diaria se calculó como el incremento de rendimiento de P total entre dos fechas de muestreo en mg P planta⁻¹ d⁻¹.

El porcentaje de fósforo en la planta derivado del ³²P de la marca (% Pddm), se determinó de la siguiente manera:

$$\text{Pddm (\%)} = (\text{a.e. en planta} / \text{a.e. de la fuente marcada}) \times 100$$

La a.e. de la fuente es igual a la a.e. del suelo marcado, condición del método de dilución isotópica (Kato *et al.*, 1995), por lo que se aplicaron 82.5 μg P kg⁻¹ suelo lo cual no modifica significativamente el contenido de P del suelo, y el Pddm se transforma como sigue:

$$\text{Pddm (\%)} = (\text{a.e. en la planta} / \text{a.e. del suelo marcado}) \times 100$$

La a.e. del suelo marcado es igual a la a.e. de la planta en el tratamiento ³²P (testigo), ya que el cultivo tuvo sólo dos fuentes de P (suelo y fertilizante) y la aportación de P por el marcador fue insignificante (82.5 μg P kg⁻¹ suelo); el porcentaje de P derivado del fertilizante (% Pddf) se obtuvo de la siguiente forma:

$$\text{Pddf (\%)} = (\text{a.e. en la planta SS} / (\text{a.e. en la planta control})) \times 100$$

De igual forma para el tratamiento SS+Bs. Así, el porcentaje de P derivado del suelo (% Pdds) se obtuvo por diferencia:

$$\text{Pdds (\%)} = 100 - (\% \text{ Pddf})$$

La cantidad de P-fertilizante extraído por el cultivo (rendimiento P-fertilizante) fue calculado por el producto del rendimiento de P total y el porcentaje de P derivado del fertilizante:

$$\begin{aligned} &\text{rendimiento P-fertilizante (mg P planta}^{-1}\text{)} \\ &= (\text{rendimiento P total} \times \% \text{ Pddf}) / 100 \end{aligned}$$

El P-fertilizante extraído por la planta respecto a la dosis de P aplicado (eficiencia P-fertilizante) se conoce como eficiencia de uso del P:

$$\begin{aligned} &\text{eficiencia P-fertilizante (\%)} \\ &= (\text{rendimiento P-fertilizante} / \text{dosis P aplicado}) \times 100 \end{aligned}$$

El análisis estadístico se hizo para un diseño completamente al azar y arreglo factorial desglosado: suministro de P, etapas fenológicas, e interacción suministro de P × etapas fenológicas. El modelo estadístico fue:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

donde Y_{ijk} = variables de respuesta; μ = efecto promedio; α = efecto del suministro de P; β = efecto de la etapa fenológica del cultivo; $\alpha\beta$ = interacción entre el suministro de P y etapa fenológica con $i = 1, 2, \dots, 3$; $j = 1, 2, \dots, 4$; $k = 1, 2, \dots, 3$; y ε_{ijk} DNI (0, σ^2).

and the percentage of P total in the crop (P total), and was determined in the following manner:

$$\text{P total yield (mg P plant}^{-1}\text{)} = (\text{MS} \times \text{P total}) / 100$$

The daily rate of P absorption was calculated as the increase in P total yield between two dates of sampling in mg P plant⁻¹ d⁻¹.

The percentage of phosphorus in the plant derived from soil ³²P-labeled marker (% Pddm) was determined in the following manner:

$$\text{Pddm (\%)} = (\text{a.e. in plant} / \text{a.e. from the marked source}) \times 100$$

The a.e. from the source is equal to the a.e. from the marked soil, a condition of the method of isotopic dilution (Kato *et al.*, 1995); thus, 82.5 μg P kg⁻¹ of soil were applied, without modifying significantly the content of P in the soil, and the Pddm is transformed as follows:

$$\text{Pddm (\%)} = (\text{a.e. in the plant} / \text{a.e. from the marked soil}) \times 100$$

The a.e. from the marked soil is equal to the a.e. of the plant in the ³²P treatment (control) because the crop had only two sources of P (soil and fertilizer) and the contribution of P by the marker was insignificant (82.5 μg P kg⁻¹ of soil); the percentage of P derived from the fertilizer (% Pddf) was obtained in the following manner:

$$\text{Pddf (\%)} = (\text{a.e. in the SS plant} / (\text{a.e. in the control plant})) \times 100$$

In the same manner for treatment SS+Bs. Thus, the percentage of P derived from the soil (% Pdds) was obtained by difference:

$$\text{Pdds (\%)} = 100 - (\% \text{ Pddf})$$

The amount of P fertilizer extracted by the crop (P-fertilizer yield) was calculated by multiplying the yield of P total and the percentage of P derived from the fertilizer:

$$\text{P-fertilizer yield (mg P plant}^{-1}\text{)} = (\text{P total yield} \times \% \text{ Pddf}) / 100$$

The P-fertilizer extracted by the plant relative to the dose of P applied (efficiency P-fertilizer) is known as P use efficiency:

$$\begin{aligned} &\text{P-fertilizer efficiency (\%)} \\ &= (\text{P-fertilizer yield} / \text{dose of P applied}) \times 100 \end{aligned}$$

The statistical analysis was done for a completely randomized design and a fractionated factorial arrangement: P supply, phenological stages, and interaction P supply × phenological stages. The statistical model was:

$$Y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \varepsilon_{ijk}$$

where Y_{ijk} = response variables; μ = average effect; α = effect of P supply; β = effect of phenological stage of crop; $\alpha\beta$ = interaction

Los factores y el modelo fueron considerados fijos, por lo cual el denominador para realizar la prueba de F fue el error (ϵ). El efecto promedio de cada tratamiento se determinó mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$; SAS, 1988). Con el valor de Pddf, el factor suministro de P se calculó sólo con SS y SS+B_s dado que ^{32}P se utilizó para evaluar la actividad específica en la planta testigo.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La producción de MS (Cuadro 2) fue mayor ($p \leq 0.05$) para el suministro de P con SS+B_s respecto a SS y ^{32}P ; además, aumentó significativamente al transcurrir cada etapa fenológica. En la etapa CV no hubo diferencias para las tres formas de suministro de P; a partir de la etapa IT la aplicación de SS+B_s causó una producción de MS 44.7% mayor que ^{32}P ($p \leq 0.05$). El tratamiento SS+B_s tuvo 25% más ($p \leq 0.05$) producción de MS respecto a SS en la etapa CT y 26.3% más que SS y ^{32}P en la etapa DT. La producción de MS fue diferente ($p \leq 0.05$) entre etapas fenológicas dentro de cada forma de suministro de P. Además, el efecto benéfico de B_s se presentó a partir de la etapa IT. Estos resultados son congruentes con la naturaleza PGPR de B_s, la cual puede aportar fitohormonas que incrementan la producción de MS en las plantas, en especial en la raíz (Bowen y Rovira, 1999; Vessey, 2003).

El rendimiento de P total (Cuadro 2) con SS+B_s (8.71 mg P planta⁻¹) fue significativamente mayor a SS, pero no hubo diferencia ($p > 0.05$) entre ^{32}P y SS (7.49 vs 6.83 mg P planta⁻¹) porque el contenido inicial de P en el suelo fue elevado (180 mg kg⁻¹), lo cual se debe a las constantes aplicaciones de fertilizante fosfatado en los suelos donde se siembra papa en León, Guanajuato. La disponibilidad de P para los tratamientos con SS fue 196.5 mg P kg⁻¹ suelo (180 y 16.51 mg P kg⁻¹ suelo aportado por el suelo y fertilizante); por tanto, la aportación de P por el SS no afectó significativamente su absorción por las plantas de papa, pero con B_s se incrementó

between P supply and phenological stage with $i = 1, 2, \dots, 3; j = 1, 2, \dots, 4; k = 1, 2, \dots, 3$; and ϵ_{ijk} DNI ($0, \sigma^2$).

The factors and model were considered fixed, and therefore, the denominator used to conduct the F test was the error (ϵ). The average effect of each treatment was determined using the Tukey test ($p \leq 0.05$; SAS, 1988). With the Pddf value, the factor P supply was calculated only with SS and SS+B_s, given that ^{32}P was used to evaluate the specific activity in the control plant.

RESULTS AND DISCUSSION

Dry matter production (Table 2) was greater ($p \leq 0.05$) for supply of P with SS+B_s than with SS and ^{32}P ; besides, it increased significantly as each phenological stage developed. In the CV stage there were no differences among the three forms of P supply; as of the IT stage, the application of SS+B_s caused a production of MS 44.7% higher than ^{32}P ($p \leq 0.05$). The SS+B_s treatment had a 25% higher production of MS than SS in the CT stage, and 26.3% higher than SS and ^{32}P in the DT stage. The production of MS was different ($p \leq 0.05$) among the phenological stages within each form of P supply. Also, the beneficial effects of B_s appeared as of the IT stage. These results are congruent with the PGPR nature of B_s, which may contribute plant hormones that increase the production of MS in plants, especially in the root (Bowen and Rovira, 1999; Vessey, 2003).

P total yield (Table 2) with SS+B_s (8.71 mg P plant⁻¹) was significantly greater than SS, but there were no differences ($p > 0.05$) between ^{32}P and SS (7.49 vs 6.83 mg P plant⁻¹) because the initial content of P in the soil was high (180 mg kg⁻¹ of soil) due to the constant applications of phosphate fertilizers in the soils where potato is planted in León, Guanajuato. The availability of P for the treatments with SS was 196.5 mg P kg⁻¹ of soil (180 and 16.51 mg P kg⁻¹ of soil contributed by soil and fertilizer).

Cuadro 2. Materia seca, rendimiento de P total y absorción de P total durante el desarrollo de plantas de papa. Table 2. Dry matter, P total yield and P total uptake during potato plant development.

Etapa fenológica	Materia seca [†]				Rendimiento de P total [‡]				Tasa de absorción de P [§]			
	³² P	SS	SS+B _s ^P	\bar{x}	³² P	SS	SS+B _s	\bar{x}	³² P	SS	SS+B _s	\bar{x}
	g planta ⁻¹				mg P planta ⁻¹				mg P planta ⁻¹ día ⁻¹			
Crecimiento vegetativo	1.26 a,z	1.48 a,z	1.80 a,z	1.51	3.17	2.62	2.88r	2.89 z	0.127	0.105	0.115	0.115 y
Inicio de tuberización	2.35 b,y	2.72 ab,y	3.40 a,y	2.82	4.98	4.46	7.22r	5.55 y	0.249	0.223	0.361	0.240 x
Crecimiento de tubérculo	4.43 ab,x	4.07 b,x	5.12 a,x	4.54	7.85	7.46	9.89r	8.40 x	0.224	0.213	0.282	0.277 x
Desarrollo de tubérculo	7.23 b,w	6.39 b,w	8.96 a,w	7.53	13.96	12.81	14.85r	13.87 w	0.698	0.64	0.742	0.694 w
\bar{x}	3.82	3.66	4.82		7.49 ab	6.83 b	8.71 a		0.325	0.295	0.375	

[†] CV = 13.4%; [‡] CV = 23.2%; [§] CV = 25.1%; ^PSS = superfosfato de calcio simple; B_s = *Bacillus Subtilis*.

a, b: valores con literales diferentes en una hilera son diferentes ($p \leq 0.05$).

w, x, y, z: valores con literales diferentes en una columna son diferentes ($p \leq 0.05$).

27.5%. Respecto a etapas fenológicas, el rendimiento de P total y la etapa desarrollo del tubérculo fue superior ($p \leq 0.05$) a las otras (13.87 mg P planta⁻¹); lo que se relacionó con el mayor valor de MS (7.53 g planta⁻¹) en esta etapa (Rocha *et al.*, 1997).

En la tasa de absorción de P (Cuadro 2) sólo hubo diferencia significativa ($p \leq 0.05$) en etapas fenológicas. La etapa fenológica con el valor máximo (0.694 mg P planta⁻¹ d⁻¹) fue desarrollo de tubérculo, que fue sólo 35% del valor (1.99 mg P planta⁻¹ d⁻¹) reportado por Kolbe y Stephan (1997) en hidroponia.

La actividad específica de P en la planta (Cuadro 3) del testigo (28.26 dpm mg P⁻¹ × 10⁵) fue superior ($p \leq 0.01$) a las otras dos formas de suministro en la etapa CT; en la etapa IT el testigo fue mayor ($p \leq 0.01$) en 99% a SS+Bs; en la etapa DT no hubo diferencias ($p > 0.05$) para las tres formas. Las tres formas de suministro de P tuvieron valores de actividad específica superiores ($p \leq 0.01$) en la primera etapa de desarrollo de las plantas; las etapas inicio de tuberización y crecimiento de tubérculo no fueron diferentes ($p > 0.05$), y sólo en el testigo se redujo significativamente la actividad específica al pasar a la etapa de desarrollo de tubérculo. Estos resultados denotan el efecto de la dilución de la actividad específica en la planta, que disminuye conforme ésta se desarrolla (Larsen, 1952; Morel y Fardeau, 1991).

La absorción de P (Cuadro 3) derivado del suelo (Pdds) y P derivado del fertilizante (Pddf) no cambió ($p > 0.05$) por forma de suministro de P, etapa de desarrollo de la papa o su interacción, lo cual sugiere que la fertilización fosfatada no mejoró la absorción de P edáfico ni P fertilizante por la planta, debido al alto contenido de P inicial en el suelo (Hochmuth *et al.*, 2002).

El rendimiento P-fertilizante en la planta (Cuadro 4) fue mayor ($p \leq 0.01$) para SS+Bs (47.4% más) respecto a SS; además, en la etapa de desarrollo de tubérculo hubo 6.65 mg P planta⁻¹ ($p \leq 0.01$).

Therefore, the contribution of P by SS did not significantly affect uptake by the potato plants, but with Bs it increased 27.5%. Regarding phenological stages, P total yield and the tuber stage of development was higher ($p \leq 0.05$) than the others (13.87 mg P plant⁻¹), which was related to the higher value of MS (7.53 g plant⁻¹) in this stage (Rocha *et al.*, 1997).

In rate of P uptake (Table 2) there was significant difference ($p \leq 0.05$) only in phenological stages. The phenological stage with the highest value (0.694 mg P plant⁻¹ d⁻¹) was tuber development, which was only 35% of the value (1.99 mg P plant⁻¹ d⁻¹) reported by Kolbe and Stephan (1997) in hydroponics.

The specific activity of P in the plant (Table 3) of the control (28.26 dpm mg P⁻¹ × 10⁵) was higher ($p \leq 0.01$) than the other two forms of supply in the CT stage; in the IT stage the control was higher ($p \leq 0.01$) by 99% than SS+Bs; in the DT stage there were no differences ($p > 0.05$) for the three forms. The three forms of P supply had values for specific activity that were higher ($p \leq 0.01$) in the first growth stage of the plants; the stages of initial tuberization and tuber growth were not different ($p > 0.05$), and only in the control did the specific activity decreased significantly when it passed to the tuber development stage. These results denote the effect of the dilution of specific activity in the plant, which decreases as the plant develops (Larsen, 1952; Morel and Fardeau, 1991).

The uptake of P (Table 3) derived from soil (Pdds) and P derived from fertilizer (Pddf) were not affected ($p > 0.05$) by form of P supply, stage of potato development or their interaction, suggesting that phosphate fertilization did not improve uptake of P from soil or fertilizer due to the initially high content of P in the soil (Hochmuth *et al.*, 2002).

P-fertilizer yield in the plant (Table 4) was higher ($p \leq 0.01$) for SS+Bs (46.4% higher) than SS; also, in the

Cuadro 3. Actividad específica de P en la planta y absorción de P del suelo y P del fertilizante durante el desarrollo de plantas de papa.
Table 3. Specific activity of P in the plant and P uptake from soil and P uptake from fertilization during potato plant development.

Etapa fenológica	Actividad específica de P en la planta [†]				Pdds [‡]			Pddf [§]		
	³² P	SS	SS+Bs ^P	\bar{x}	SS	SS+Bs	\bar{x}	SS	SS+Bs	\bar{x}
	dpm mg P ⁻¹ × 10 ⁵				%					
Crecimiento vegetativo	28.26 a,x	14.60 b,x	12.00 b,x	18.28	46.14	55.72	50.93	53.86	44.28	49.07
Inicio de tuberización	8.55 a,y	5.49 ab,y	4.29 b,y	6.11	34.26	50.84	42.55	65.74	49.16	57.45
Crecimiento de tubérculo	8.40 a,y	2.20 b,y,z	3.74 b,y	4.78	73.63	55.46	64.55	26.37	44.54	35.45
Desarrollo de tubérculo	2.25 a,z	0.95 a,z	1.21 a,y	1.47	57.44	44.64	51.04	42.56	55.36	48.96
\bar{x}	11.86	5.81	5.31		52.87	51.67		48.33	47.13	

[†] CV = 31.1%; [‡] CV = 26.5%; [§] CV = 29.1%; ^P SS = superfosfato de calcio simple; Bs = *Bacillus Subtilis*; Pdds = fósforo derivado del suelo; Pddf = fósforo derivado del fertilizante.

a, b: valores con diferente literal en una hilera son diferentes ($p \leq 0.05$).

x,y,z: valores con diferente literal en una columna son diferentes ($p \leq 0.05$).

La interacción suministro de P por etapas fenológicas fue significativa, y las formas de suministro de P dentro de las etapas fenológicas fueron superiores para SS+Bbs respecto a SS en las etapas CT y DT, donde se presenta la mayor cinética de absorción de P (Rausch *et al.*, 2001).

En las etapas fenológicas dentro de las formas de suministro, el tratamiento SS+Bbs, tuvo incrementos significativos en rendimiento de P fertilizante (Cuadro 4), al pasar de CV a IT y de CT a DT; en cambio, en el tratamiento SS sólo hubo incremento significativo al pasar de CT a DT. Esto posiblemente se debió al efecto de Bbs que permitió generar un mayor volumen de exploración de la raíz en el suelo a partir de la etapa IT y una absorción constante durante el resto del ciclo del cultivo (Ashad y Frankenberger, 1998; Vessey, 2003). Además, la capacidad amortiguadora de P del suelo influye, al no mantener los niveles adecuados de concentración de los iones fosfato en el suelo y al producir un efecto de dilución que disminuye el Pddf a partir de la etapa CT (Fardeau *et al.*, 1996).

La eficiencia final de P-fertilizante se cuantificó a los 100 dde, pero para conocer la cinética de absorción de P durante el ciclo del cultivo, aquélla se analizó en las cuatro etapas de desarrollo (Cuadro 4). Para formas de suministro de P, etapas fenológicas y la interacción entre estos dos factores hubo diferencia significativa ($p \leq 0.01$).

La interacción entre formas de suministro de P dentro de etapas fenológicas se debió a que la superioridad del tratamiento SS+Bbs sólo se manifestó en forma significativa en las dos últimas etapas fenológicas. Al comparar las etapas fenológicas dentro de las formas de suministro de P, se observó que con SS el incremento de la eficiencia de P fertilizante sólo fue significativo al pasar de CT a DT; en cambio con SS+Bbs hubo incremento significativo al pasar de CV a IT y de CT a DT, similar a lo obtenido con el rendimiento de P-fertilizante (Krasilnikoff *et al.*, 2003).

tuber development stage there was 6.65 mg P plant⁻¹ ($p \leq 0.01$).

The interaction between P supply and phenological stage was significant, and the forms of P supply within the phenological stages were higher for SS+Bbs than SS in the CT and DT stages where there is greater P uptake kinetics (Rausch *et al.*, 2001).

In the phenological stages within the forms of supply, the SS+Bbs treatment had significant increases in P fertilizer yield (Table 4) when going from CV to IT and from CT to DT; on the other hand, for treatment SS there was significant increase only when going from CT to DT. This may be due to the effect of Bbs, which permitted the generation of a greater volume of root exploration in the soil as of the IT stage and a constant uptake during the rest of the crop cycle (Ashad and Frankenberger, 1998; Vessey, 2003). Also, the buffer capacity of soil P has an influence by not maintaining the adequate concentrations of phosphate ions in the soil and by producing an effect of dilution that reduces Pddf as of the CT stage (Fardeau *et al.*, 1996).

The final efficiency of P fertilizer was quantified 100 dae, but in order to determine the kinetics of P uptake during the crop cycle, this was analyzed in the four development stages (Table 4). For P supply forms, phenological stages and interaction between these two factors there were significant differences ($p \leq 0.01$).

The interaction among the supply forms within phenological stages was due to the fact that the SS+Bbs treatment showed to be significantly superior only in the last two phenological stages. Comparing the phenological stages within the P supply forms, it was observed that with SS an increase in P fertilizer efficiency was significant only from CT to DT. In contrast, with SS+Bbs there was a significant increase in efficiency during the passage from CV to IT and from CT to DT, similar to that obtained with P fertilizer yield (Krasilnikoff *et al.*, 2003).

Cuadro 4. Eficiencia de P-fertilizante por plantas de papa.
Table 4. P-fertilizer efficiency of potato plants.

Etapa fenológica	Rendimiento P-fertilizante [†]			Eficiencia P-fertilizante [‡]		
	SS	SS+Bbs [§]	\bar{x}	SS	SS+Bbs	\bar{x}
	mg P planta ⁻¹			(%)		
Crecimiento vegetativo	1.36 a,y	1.29 a,z	1.33	3.00 a,y	2.85 a,z	2.93
Inicio de tuberización	2.67 a,y	3.44 a,y	3.05	5.89 a,y	7.58 a,y	6.73
Crecimiento de tubérculo	1.97 b,y	4.37 a,y	3.17	4.34 b,y	9.62 a,y	6.98
Desarrollo de tubérculo	5.48 b,x	7.82 a,x	6.65	12.08 b,x	17.22 a,x	14.65
\bar{x}	2.87	4.23		6.33	9.32	

[†] CV = 17.4%; [‡] CV = 17.4%; [§] SS = superfosfato de calcio simple; Bbs = *Bacillus Subtilis*.

a, b: valores con diferente literal en una hilera son diferentes ($p \leq 0.05$).

x,y,z: valores con diferente literal en una columna son diferentes ($p \leq 0.05$).

Durante el desarrollo del tubérculo los valores de eficiencia en el uso de P en papa tuvieron una variación de 10 a 15%, en condiciones de campo, determinada con técnicas no isotópicas. Para estudios en invernadero con un contenido inicial de 7.8 a 12.4 mg P kg⁻¹ de suelo y dosis de P entre 18 y 90 kg ha⁻¹, la eficiencia de uso de P varió de 2.5 a 26% (Alvarez-Sánchez *et al.*, 1997).

CONCLUSIONES

Con el uso del isótopo ³²P la mayor absorción de P por el cultivo de papa ocurrió a partir de la etapa de inicio de tuberización hasta la etapa de desarrollo del tubérculo. El empleo de la bacteria Bs causó una mayor cinética de absorción de P, e influyó en el crecimiento de la planta de papa, lo cual sugiere que Bs contribuyó a obtener mayor materia seca, rendimiento de P-fertilizante y eficiencia P-fertilizante. Cuando el suministro de P por el suelo es elevado, debido a aplicaciones previas constantes, los requerimientos de fertilización fosfatada son menores y el uso de bacterias promotoras de crecimiento es una alternativa para aumentar el vigor de la planta y su eficiencia en la absorción de fósforo.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, que financió este estudio a través del proyecto 38999.

LITERATURA CITADA

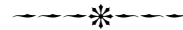
- Álvarez-Sánchez, E., J. D. Etchevers B., A. Martínez G., R. Núñez E., V. Volke H., J. Ortiz C., y L. Tijerina Ch. 1997. Recuperación del fertilizante fosfatado por el cultivo de papa. *Terra* 15: 219-227.
- Álvarez-Sánchez, E., J. D. Etchevers B., J. Ortiz C., R. Núñez E., A. Martínez G., and J.Z. Castellanos. 2001. Phosphorus nutrition of potato and maize seedlings. *Terra* 19: 55-65.
- Ashad, M., and W. T. Frankenberger. 1998. Plant growth regulating substances in the rhizosphere: microbial production and functions. *Adv. Agron.* 62: 45-151.
- Bowen, G. D., and A. D. Rovira. 1999. The rhizosphere and its management to improve plant growth. *Adv. Agron.* 66: 1-102.
- Curwen, D. 1993. Water management. *In: Potato Health Management*. Rowe, R. C. (ed.). APS Press. St. Paul, MN, USA. pp: 67-75.
- Fardeu, J. C., G. Guiraud, and C. Marol. 1996. The role of isotopic techniques in the evaluation of the effectiveness of P fertilizers. *Fert. Res.* 45: 101-109.
- Havlin J. L., J. D. Beaton, S. L. Tisdale, and W. L. Nelson. 1999. *Soil Fertility and Fertilizers*. 6th Ed. Prentice Hall, Inc. New Jersey, U.S.A. 499 p.
- Hochmuth, G., P. Weingartner, C. Hutchinson, A. Tilton, and D. Jesseman. 2002. Potato yield and tuber quality did not respond to phosphorus fertilization of soil testing high in phosphorus content. *HorTechnology* 12(3): 420-422.
- Holford, I. C. R. 1997. Soil phosphorus: its measurement and its uptake by plants. *Aust. J. Soil Res.* 35: 227-239.
- Kato, N., F. Zapata and H. Axmann. 1995. Evaluation of agronomic effectiveness of neutral and partial acidulated phosphate rock in

During the development of the tuber the values of efficiency utilization of P by potato had a variation from 10 to 15%, in field conditions, determined by non-isotopic techniques. For studies in greenhouse with an initial content of 7.8 to 12.4 mg P kg⁻¹ of soil and doses of P between 18 and 90 kg ha⁻¹, the P use efficiency varied from 2.5 to 26% (Alvarez-Sánchez *et al.*, 1997).

CONCLUSIONS

With the use of ³²P isotope, it was determined that the greatest P uptake by potato occurred as of the initial tuber formation stage up to the stage of tuber development. The use of the bacteria Bs promoted greater P uptake kinetics and had an influence in the growth of the potato plant, suggesting that Bs contributed to the production of more dry matter, higher P fertilizer yield and P fertilizer efficiency. When the P supply in the soil is high, because of previous constant applications, phosphate fertilization requirements are lower and the use of growth-promoting bacteria is an alternative for increasing the vigor of the plant and its phosphorus uptake efficiency.

—End of the English version—



- several soils using ³²P isotopic dilution techniques. *Fert. Res.* 28: 1-9.
- Kolbe, H., and S. Stephan B. 1997. Development, growth and chemical composition of the potato crop (*Solanum tuberosum* L.). II. Tuber and whole plant. *Potato Res.* 40: 135-153.
- Krasilnikoff, G., T. Gahoonia, and N. E. Nielsen. 2003. Variation in phosphorus uptake efficiency by genotypes of cowpea (*Vigna unguiculata* L.) due to differences in root and root hair length and induced rhizosphere processes. *Plant and Soil* 251: 83-91.
- Larsen, S. 1952. The use of ³²P in studies on uptake of phosphorus by plants. *Plant and Soil* 4: 1-10.
- Morel C., and J. C. Fardeau. 1991. Phosphorus bioavailability of fertilizers: a predictive laboratory method for its evaluation. *Fert. Res.* 28: 1-9.
- Raghothama, K. G. 1999. Phosphate acquisition. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 50: 665-693.
- Rausch, C., P. Daram, S. Brunner, J. Jansa, M. Laloi, G. Leggewie, N. Amrheink, and M. Bucher. 2001. A phosphate transporter expressed in arbuscule-containing cells in potato. *Nature* 14: 462-466.
- Rocha, F. A. A., P. C. R. Fontes, R. L. F. Fontes, and F. P. Reis. 1997. Critical phosphorus concentrations in potato plant parts at two growth stages. *J. Plant Nutr.* 20: 573-579.
- Rowe, R. C. 1993. *Potato Health Management*. APS Press. St. Paul, MN, USA. 178 p.
- SAS. 1988. *SAS/STAT User's guide*, Release 6.03 Ed. SAS Institute Inc. Cary, N. C. USA. pp: 125-154.
- Schachtman, D. P., R. J. Reid, and S. M. Ayling. 1998. Phosphorus uptake by plants: from soil to cell. *Plant Physiol* 116: 447-453.
- Vessey, J. K. 2003. Plant growth promoting rhizobacteria as biofertilizers. *Plant and Soil* 255: 571-586.
- Zapata, F. 2000. Metodologías isotópicas para estudios de la eficiencia de la fertilización nitrogenada y otros del ciclo de N. *In: Manejo eficiente de la fertilización nitrogenada de cultivos*

anuales en América Latina y el Caribe. Urquiaga, S. y F. Zapata (eds). ARCAL-EMBRAPA, Agrobiología. Río de Janeiro, Brasil. pp: 25-29.

Zapata, F. 2002. Contribuciones de las técnicas nucleares al desarrollo de prácticas de manejo integrado del suelo, agua y nutrimentos para el incremento de la producción agrícola. Terra 20(1): 1-6.