

# El suministro de fósforo con la fertilización es esencial para la sostenibilidad de la producción agrícola en Sololá: el caso del brócoli (*Brassica oleracea* var. *italica*)

Rolando Cifuentes<sup>1</sup> & Edwin de León<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Centro de Estudios Agrícolas y Forestales (CEAF), Instituto de Investigaciones

<sup>2</sup>Campus Altiplano, Aldea El Tablón, Sololá Universidad del Valle de Guatemala

**RESUMEN:** El estudio se llevó a cabo en la estación experimental del campus de UVG Altiplano ubicado en Sololá a 2334 msnm. Los objetivos fueron evaluar la respuesta del brócoli a la aplicación de fósforo (P), con y sin la aplicación de potasio (K), así como comparar el efecto de la fertilización química y orgánica con relación al comportamiento del P en el suelo y la planta. Se utilizó un arreglo en parcelas divididas con distribución en bloques al azar. La parcela grande fue la aplicación de K y la sub-parcela fueron los niveles de aplicación de P (0P, 1P, 1.5P y 2P). La fertilización base utilizada fue de 221, 128, 143 kg/ha de N – P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – K<sub>2</sub>O, respectivamente. Adicionalmente se agregaron otros tratamientos para comparar la fertilización química con la orgánica. La cantidad de gallinaza deshidratada utilizada fue de 7,367 kg/ha, y la de compost hecho a partir de subproductos de la industria cañera 17,000 kg b.s./ha. La variedad de brócoli ‘Inspiration’ se plantó en un suelo del orden Inceptisol (Andic Humustepts) con propiedades andicas. Las variables de respuesta incluyeron la producción de materia seca (MS), acumulación de P por la planta, recuperación de P y distribución del P en el perfil del suelo. Los resultados obtenidos indican claramente la alta respuesta del brócoli a la aplicación de P. No se encontró diferencia entre aplicar y no aplicar K. La recuperación (P en MS + P extraíble del suelo) y movilidad del P aplicado fue baja independientemente del tipo de fertilizante aplicado. La mayor cantidad del P aplicado no pudo ser extraído por lo que se considera fijado por el suelo. Los resultados del estudio ponen de relieve la importancia del P en la agricultura, así como la necesidad de orientar adecuadamente a los productores a fin de hacer un manejo adecuado del recurso suelo y de los fertilizantes (orgánicos e inorgánicos). Es necesario hacer un uso eficiente de los nutrientes, particularmente N y P, en la actividad agrícola de la región de Sololá.

**PALABRAS CLAVE:** brócoli, fertilización, fósforo, compost, gallinaza.

**Phosphorus supply with the fertilization program is essential for sustainability of agricultural production in Sololá: the case of Broccoli (*Brassica oleracea* var. *italica*)**

**ABSTRACT:** The study was carried out at the experimental station of the UVG Altiplano Campus located in Sololá at 2334 masl. The objectives were to evaluate the response of broccoli to phosphorus (P) application, with and without including potassium (K), as well as to compare the effect of the chemical and organic fertilization on soil P and its accumulation by the plant. A split plot arrangement in a randomized complete block design was used in the study. The whole plot was the K application and the subplots were the P levels (0P, 1P, 1.5P y 2P). The basic fertilization level was 221, 128, 143 kg / ha of N – P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – K<sub>2</sub>O, respectively. Additional treatments were included to compare the chemical and organic fertilization. Dehydrated laying hen manure was applied at a rate of 7,367 kg/ha and compost made from byproducts of the sugar cane industry at 17,000 kg dwb/ha. Broccoli var. ‘Inspiration’ was planted in an Inceptisol soil (Andic Humustepts) with andic properties. The response variables included dry matter production (DM), P accumulation by the plant, P recovery and P distribution in the soil profile. The results clearly indicated the high response of broccoli to P application. No potassium response was found. The recovery (DM P + extractable soil P) and mobility of the P applied was low independently of the type of fertilizer used. Most of the P applied was unable to be extracted and considered fixed by the soil. The results pointed out the importance of P in agriculture, as well as the need to properly train growers on good practices of soil and fertilizer (organic and inorganic P in the agricultural activity of the Sololá region) management. It is necessary to make an efficient use of plant nutrients, particularly N and P, in the agricultural activity of the Sololá region.

**KEY WORDS:** broccoli, fertilization, phosphorus, compost, laying hen manure.

## Introducción

Todas las plantas superiores requieren de los mismos elementos esenciales para su normal crecimiento y desarrollo. Desde el punto de vista clásico, 16 son los elementos considerados esenciales para las plantas. Estos son C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Zn, Cu, B, Mo, Mn y Cl (Mengel y Kirby, 1987; Marschner, 1986). Recientemente algunos autores también han incorporado el Ni como elemento esencial. El N, P, K, Ca, Mg y S son considerados macro-elementos por ser requeridos por la planta en mayores cantidades, en tanto que el Fe, Zn, Cu, Mn, B, Mo y Cl son micronutrientes porque las plantas los demandan en muy pequeñas cantidades. Algunos de estos elementos son tomados del agua (H y O), el CO<sub>2</sub> de la atmósfera (C y O), el aire del suelo (N<sub>2</sub> en el caso de plantas fijadoras de N gaseoso) y los elementos restantes son tomados de la solución del suelo (Mengel y Kirby, 1987; Marschner, 1986). Algunos otros elementos (Si, Co, V y Na) son considerados benéficos para algunos grupos específicos de plantas.

La fuente natural de los 14 elementos esenciales que aporta el suelo son los minerales y la materia orgánica (humus). Aunque todos los elementos están presentes en el suelo, no existe ningún suelo que pueda suministrar todos los elementos en cantidades adecuadas por tiempo indefinido. De acuerdo a Justus Von Liebig, quien formuló la 'ley del mínimo' a mediados del siglo XIX, el nutriente que se encuentra menos disponible es el que limita la producción de las plantas, aún y cuando los demás se encuentren en cantidades adecuadas (Tisdale et al. 1993). El bajo contenido de alguno de ellos debe ser compensado por medio del uso de fertilizantes químicos u orgánicos.

La mayor parte de los fertilizantes químicos utilizados en Guatemala son granulados aplicados directamente al suelo, otros son totalmente solubles en agua para su aplicación con el riego (fertirriego) y algunos, particularmente micronutrientes, son aplicados vía foliar a baja concentración para su absorción por las hojas.

Tanto los fertilizantes químicos como los orgánicos tienen la misma forma de describir el contenido de nutrientes como parte de su presentación. Por convención, todo saco de fertilizante lista primero los elementos primarios: nitrógeno (como % de N), seguido por fósforo (como % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) y luego el potasio (como % de K<sub>2</sub>O). Los diferentes valores son separados por guiones. Enseguida se indica el porcentaje de los elementos secundarios (Mg, Ca, S) y el de micronutrientes, cuyos valores son separados por el signo más (+). Así, un saco de 15-15-15 contiene 15 % de N, 15 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 15 % de K<sub>2</sub>O. Químicamente, el P y el K en los fertilizantes no están presentes en forma de óxidos sino que es una forma de expresión introducida por los geólogos hace muchas décadas (Grupo Disagro, 2001).

Una vez en el suelo, los fertilizantes granulados se disuelven con el agua y los diferentes elementos son liberados. Estos interactúan con las partículas del suelo, particularmente los coloides inorgánicos y orgánicos (humus), hasta alcanzar un equilibrio. El punto central del mismo es la solución o agua del suelo (Tisdale et al., 1993). En el caso de los fertilizantes o enmiendas orgánicas, una vez en el suelo se lleva a cabo un proceso de mineralización para convertir los elementos de una forma orgánica a inorgánica (Alexander, 1981). Una vez en su forma inorgánica, los diferentes elementos interactúan con los coloides y el agua del suelo. Al final, ya sea que se trate de un fertilizante químico o bien orgánico, todos los elementos esenciales son absorbidos por las plantas en forma iónica desde la solución o agua del suelo.

No todo el fertilizante que se aplica es utilizado por las plantas. Una vez en el suelo, los diferentes elementos liberados pueden ser absorbidos por las plantas, pueden ser lixiviados dentro del perfil del suelo por el agua en exceso, volatilizarse bajo condiciones especiales en el suelo (únicamente N como NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O o N<sub>2</sub>), inmovilizados en el suelo o bien ser arrastrados junto con las partículas del suelo como parte del proceso de erosión. En el caso particular de N, P y K, la eficiencia de aplicación varía de 50 – 70 % para N, < 30 – 50 % para P y 60 – 80 % para K (Bertsch, 1998). Esos valores de eficiencia deben de ser tomados en cuenta a la hora de elaborar un programa de fertilización. Debe buscarse un uso eficiente de los nutrientes a fin de evitar la pérdida innecesaria de los mismos.

La mayor parte de las unidades de producción del departamento de Sololá están ubicadas en sitios con pendientes variables. En su mayoría, estas carecen de prácticas efectivas de conservación de suelos para contrarrestar la erosión. De acuerdo al MAGA-DIGEGR (2012), en el departamento se han identificado únicamente 4 órdenes taxonómicos de suelo: Andisoles (47 %), Inceptisoles (30%), Molisoles (9%) y Entisoles (2%). El 12 % de la superficie restante corresponde a los cuerpos de agua y áreas sin suelo. Brevemente, los Andisoles son suelos derivados de material volcánico, presentan colores oscuros, baja densidad aparente, alto contenido de alófono y alta capacidad de inmovilización o fijación de P; los Inceptisoles son suelos de baja evolución genética, presentan el horizonte superior de color oscuro, alta densidad aparente y varios de estos presentan contenidos de materiales amorfos (alófono); los Molisoles se caracterizan por presentar el horizonte superior oscuro, generalmente fáciles de trabajar (friables) y con estructura en bloques subangulares, densidad aparente mayor a 1 g/cc, alta capacidad de cambio y saturación de bases; y los Entisoles son los suelos que presentan el grado evolutivo más bajo, con poco o ningún desarrollo de horizontes. Mayores detalles de la descripción de esos suelos pueden consultarse en Soil Survey Staff (1990).

En la región de Sololá son escasos los estudios sobre fertilidad de suelos y fertilizantes. Sin embargo, se reconoce que en la producción de granos y vegetales, la mayor parte de los productores realiza la práctica de la fertilización. De acuerdo a un estudio realizado por Cifuentes et al (2011), en sitios productores de maíz en el departamento de Sololá, más del 95 % de los productores fertiliza sus plantaciones. La mayor parte utiliza fertilizante químico y un pequeño porcentaje utiliza fertilizante orgánico o una mezcla de ambos. En el caso particular del maíz, la mayor parte utiliza fórmulas completas ya sea 20-20-0 o 15-15-15, y un bajo porcentaje aplica N en forma de urea. En sitios plantados con hortalizas, Cifuentes (2008) encontró que el contenido de N de esos suelos fue usualmente bajo, P variable (desde muy bajo a extremadamente alto) y K de adecuado a alto.

Los fertilizantes aplicados tienen alto contenido de N y P que son elementos conocidos por tener un rol activo en la eutricación de los lagos (Pierzynski et al. 2000). En el caso particular del lago de Atilán, esto no es la excepción. Estudios realizados por Dix et al (2012) indican que en su momento en el lago de Atilán se observó un incremento de los niveles de N y P en el agua, con un exceso relativo de P que favoreció el florecimiento de la cianobacteria. La noticia del florecimiento de cianobacteria en el lago de Atilán en el año 2009 fue ampliamente conocida en el país. El mal manejo de los suelos y los fertilizantes (orgánicos o químicos) en la agricultura junto a las descargas domésticas e industriales, forman parte de los

factores que contribuyen a la contaminación de los cuerpos de agua.

El presente estudio nace de la preocupación de los autores y de algunos personeros del sector privado por la importancia estratégica que el Lago de Atitlán representa para el país, así como por la importancia de los fertilizantes y del recurso suelo para el sostenimiento de la producción agroalimentaria de la región. Los objetivos fueron a) evaluar la respuesta del brócoli a la aplicación de fósforo, con y sin la aplicación de potasio, así como b) comparar el efecto de la fertilización química y la orgánica con relación al comportamiento del P en el suelo y su acumulación por la planta.

## Metodología

### Sitio experimental

El ensayo de campo se llevó a cabo en la estación experimental de UVG en campus Altiplano, aldea el Tablón, Sololá. El sitio se ubica en las coordenadas geográficas N 14° 47' 08.6" y W 091° 11' 12.6" a una altitud de 2,334 msnm. El suelo utilizado, de textura franco - arenosa, pertenece al orden Inceptisol y ha sido clasificado taxonómicamente a nivel de subgrupo como Andic Humustepts (MAGA-DIGEGR, 2012). Algunas características de este subgrupo incluyen: suelos que se han desarrollado sobre materiales piroclásticos no consolidados (ceniza y pómez), en pendientes ligeramente inclinadas (3-7%) y moderadamente inclinadas (7-12%) correspondientes al paisaje de altiplano hidro-volcánico en relieve de terraza. En general, los Inceptisoles son de baja evolución genética.

Las características químicas del sitio experimental se presentan en el Cuadro 1.

**Cuadro 1.** Características químicas del sitio experimental.

Parámetro de suelo <sup>1</sup>	Profundidad (cm)			Rango adecuado
	0 - 15	15 - 30	30 - 45	
pH	5.9	5.7	6.1	5.5 – 7.2
Al <sup>3+</sup> + H <sup>+</sup> intercambiables (%)	0	0	0	< 20
Conductividad eléctrica (dS/m)	0.10	0.71	0.08	0.2 – 0.8
Materia orgánica (%)	5.35	5.89	5.52	2.0 – 4.0
CIce (meq/100 ml)	7.6	9.2	8.6	5 - 15
Fósforo (mg P/L)	11	10	10	30 - 75
Potasio (mg K/L)	175	340	186	150 - 300
Calcio (mg Ca/L)	1100	1240	1240	1000 - 2000
Magnesio (mg Mg /L)	196	254	226	100 - 250
Cobre (mg Cu/L)	1.4	1.6	1.4	1 - 7
Hierro (mg Fe/L)	45.2	46.2	45.5	40 - 250
Manganeso (mg Mn/L)	10.7	12.0	11.0	10 - 250
Zinc (mg Zn/L)	2.7	2.4	2.1	2 - 25

<sup>1</sup> No se analizó el contenido de N (NO<sub>3</sub> - N + NH<sub>4</sub> -N) disponible en el suelo ya que debido a su alta movilidad, al régimen de lluvia de nuestro país y el alto nivel de demanda por los cultivos se le considera usualmente bajo en los suelos de Guatemala.

El suelo utilizado en el estudio es considerado no salino, pH ácido pero sin problemas de acidez intercambiable (Al<sup>3+</sup> + H<sup>+</sup>) por lo que no necesita la aplicación de cal (Stauder, 2010), alto contenido de materia orgánica (MO), adecuada capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE), bajo nivel de N y P pero con adecuado contenido del resto de elementos.

### Plan experimental

Los factores evaluados incluyeron la aplicación de los elementos fósforo y potasio. Se utilizó un arreglo en parcelas divididas con distribución en bloques al azar. La parcela grande fue la presencia o ausencia del elemento potasio y la sub-parcela fue el nivel de aplicación de fósforo. Se utilizaron 4 repeticiones por tratamiento.

Cada unidad experimental consistió de 4 surcos de brócoli var. 'Inspiration' con una longitud de 4 m. Las plantas se sembraron el 10 de febrero de 2011 a una distancia de 0.60 m entre surcos y 0.50 m entre plantas, colocando una plántula por postura. Se cosecharon los 2 surcos centrales.

Los tratamientos evaluados se presentan en el Cuadro 2. La fertilización base de N – P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – K<sub>2</sub>O que se utilizó se obtuvo de la literatura y consistió en la aplicación de 221, 128, 143 kg/ha de cada elemento, respectivamente (Bertsch, 2003). El contenido de N – P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> – K<sub>2</sub>O de los diferentes tratamientos se presenta en el Cuadro 3. La inclusión de tratamientos adicionales fue para comparar la fertilización inorgánica con el uso de fuentes orgánicas considerando una sustitución completa del N inorgánico por N orgánico. La cantidad de gallinaza deshidratada (3 % de N en base seca) y de compost (1.3 % en base seca) se estimó con base en el contenido de N de esos materiales para satisfacer una aplicación de 221 kg N/ha. Esos materiales orgánicos también difieren en su contenido de P y K (Cuadro 3).

La distribución de la aplicación de NPK se hizo de la siguiente manera: a) a los 8 días después del trasplante (ddt): 20 % de N, 60 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 0 % de K, b) a los 25 ddt: 60 % de N, 40 % de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 50 % de K<sub>2</sub>O y c) a los 50 ddt: 20 % de N, 0 % P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> y 50 % de K<sub>2</sub>O. La fuente utilizada de N fue urea (46-0-0), la de P fue fosfato diamónico (18-60-0) y la de potasio fue KCl (0-0-60). La aplicación de fertilizante se hizo alrededor de las plantas y el fertilizante fue posteriormente cubierto con suelo.

**Cuadro 2.** Tratamientos evaluados en el ensayo de campo.

No.	Tratamiento
1	---
2	N 0.5P K
3	---
4	N 1.5P K
5	N 2P K
6	N P <sub>0</sub>
7	N 0.5P
8	---
9	N 1.5P
10	N 2P
<b>Tratamientos adicionales</b>	
11	Agricultor
12	Gallinaza
13	Compost
14	0 - 0 - 0

**Cuadro 3.** Contenido de NPK de los diferentes tratamientos evaluados.

Tratamiento	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
NP	221	128	0
NPK	221	128	143
Agricultor	187	296	117
Gallinaza <sup>1</sup>	221	295	222
Compost <sup>2</sup>	221	561	110

<sup>1</sup> 7,367 kg. gallinaza deshidratada/ha

<sup>2</sup> 17,000 kg. compost/ha

Las variables de respuesta fueron a) biomasa total (t materia seca / ha), b) acumulación de P por la planta (kgP/ha), c) % de recuperación del P aplicado y d) distribución del P residual extraíble (disponible) en el perfil de suelo.

La producción de biomasa integró el total de los componentes de la planta: raíces, tallo, hojas e inflorescencia.

Una vez registrado el peso fresco, se colectaron muestras de cada una de las partes de la planta y se trasladaron al laboratorio para deshidratarlas a 70 °C hasta alcanzar un peso constante.

El material seco fue posteriormente analizado para N, P y K total en un laboratorio comercial.

### Análisis de suelo y planta

El análisis de suelo se hizo antes e inmediatamente después del estudio. Se colectaron muestras de los estratos 0 – 15, 15 – 30 y 30 – 45 cm de profundidad. Para el análisis realizado antes del estudio, se colectaron 2 submuestras de cada una de los 4 bloques (un total de 8 sub-muestras) las cuales se combinaron para formar una muestra compuesta para cada estrato (Cuadro 1). El muestreo al finalizar el estudio se hizo para cada uno de los tratamientos y posteriormente se combinaron las 4 sub-muestras (una sub-muestra por tratamiento por repetición) de cada estrato para formar una muestra compuesta. Los análisis de fertilidad de suelos fueron realizados en un laboratorio comercial siguiendo la metodología descrita por Sparks (1996) y en el caso del análisis de fijación de P se utilizó la metodología descrita por Hunter (1980). El análisis de textura del suelo se hizo por el método del hidrómetro utilizando la metodología basada en Black et al. (1969).

El análisis de tejido vegetal también se hizo en un laboratorio comercial siguiendo la metodología descrita por Gablak et al. (1998).

### Análisis estadístico

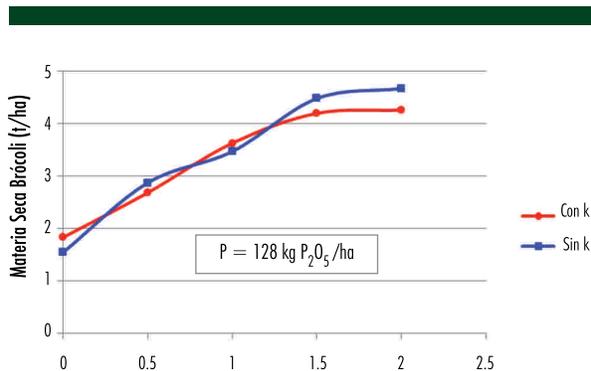
El análisis estadístico consistió en un análisis de varianza para un diseño en parcelas divididas con distribución en bloques al azar. Se utilizó MSTATC (MSU, 1988) como herramienta estadística.

## Resultados

### Producción de materia seca

La producción de materia seca (Gráfica 1) se incrementó significativamente ( $p < 0.05$ ) con el incremento en la aplicación de P. La contribución de P en la producción de biomasa fue obvia a nivel de campo (Gráfica 2). Para el sitio experimental

en particular, la aplicación de 1.5 veces el nivel base utilizado resultó con una producción máxima estable. No se encontró diferencia entre aplicar y no aplicar K como parte del programa de fertilización ( $p > 0.05$ ).



**Gráfica 1.** Producción de materia seca de brócoli en función del nivel de P aplicado.



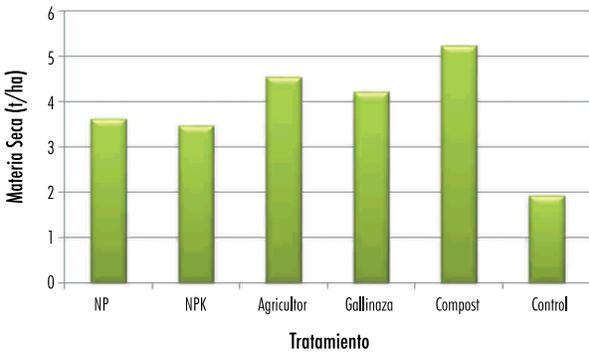
**Gráfica 2.** Apariencia de las plantas con (izquierda) y sin aplicación (derecha) de P.

Todos los tratamientos que recibieron la aplicación de fertilizante orgánico o inorgánico incrementaron significativamente la producción de biomasa en comparación con el control sin fertilizar (Gráfica 3). El tratamiento a base de compost, que contenía una mayor cantidad de P, resultó con el mayor rendimiento de biomasa ( $p < 0.05$ ). Esto implica que independientemente de la fuente P, la aplicación de este elemento conlleva a un cambio positivo.

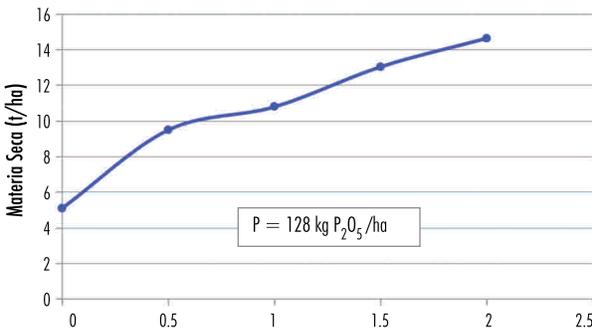
### Acumulación de P por la planta

La acumulación de P en la planta se presenta en la Gráfica 4. Las cantidades de P acumulados en la planta se incrementaron a medida que se incrementó la cantidad de P en el suelo. No se alcanzó una acumulación máxima estable.

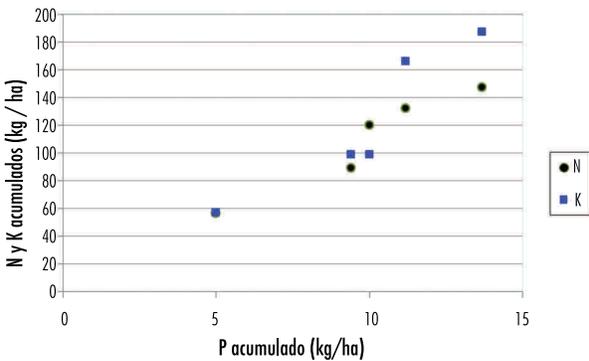
La acumulación de P también influyó positivamente en la acumulación de nitrógeno y potasio (Gráfica 5). A mayor acumulación de P, los niveles de acumulación de N y K por la planta se incrementaron.



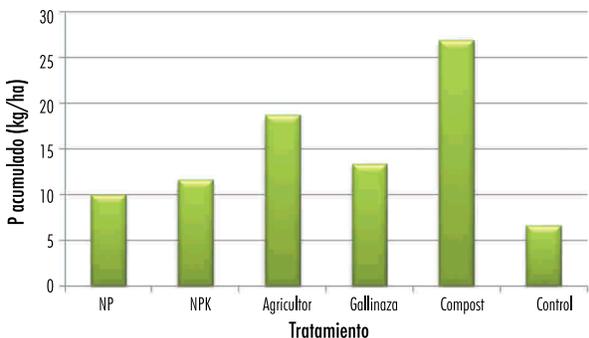
Gráfica 3. Producción de materia seca según tratamiento de fertilización.



Gráfica 4. Acumulación de P en la planta en función de la cantidad de P aplicado.



Gráfica 5. Relación entre la acumulación de P y la acumulación de N y K por la planta.

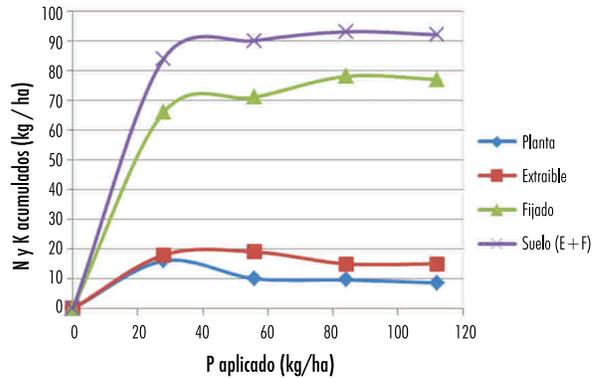


Gráfica 6. Acumulación de P por la planta en función del programa de fertilización.

La aplicación de compost superó significativamente la acumulación de P por la planta en comparación con los otros tratamientos (Gráfica 6).

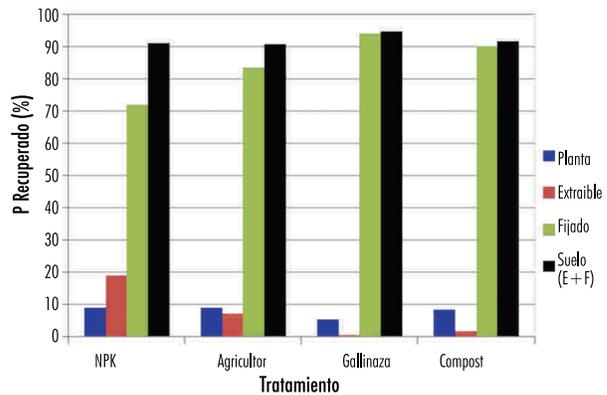
### Recuperación de P

El porcentaje de recuperación de P se presenta en las Gráficas 7 y 8. Se puede apreciar que alrededor del 9 - 15 % del P aplicado fue aprovechado por las plantas, en tanto que el P restante se queda en el suelo, ya sea en forma disponible (15 - 20 %) o químicamente inmovilizado (70 - 80 %) (Gráfica 7) en los primeros 30 cm de suelo.



Gráfica 7. Porcentaje de recuperación del P aplicado.

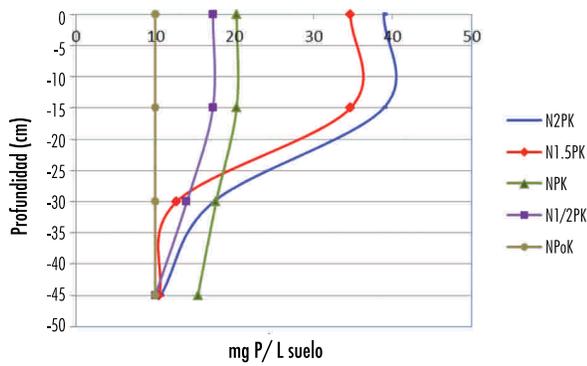
Aunque la cantidad de P acumulado por la planta dependió del tratamiento, la cantidad acumulada fue mucho menor que la cantidad que se quedó en el suelo, ya sea en forma extraíble o en forma inmovilizada o fijada (Gráfica 8). Una mayor cantidad de P residual fue extraído de los tratamientos que recibieron una fertilización química en comparación con la aplicación de gallinaza y de compost.



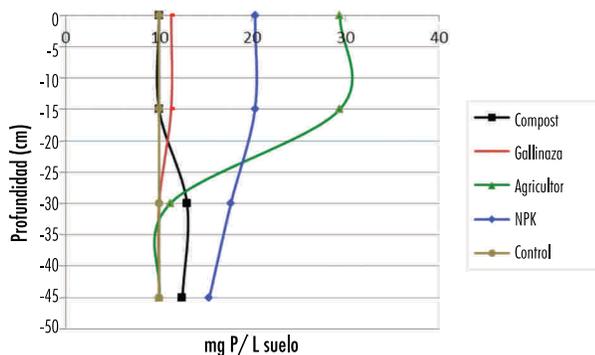
Gráfica 8. Recuperación de P en función del tratamiento de fertilización.

### Distribución del P residual en el suelo

La mayor cantidad de P residual extraíble se acumuló en los primeros 15 cm de suelo (Gráfica 9). La cantidad acumulada dependió de la cantidad de P aplicado. A mayor cantidad de P, mayor fue la cantidad de P acumulada en forma extraíble en el suelo.



Gráfica 9. Distribución del P residual en el perfil del suelo.



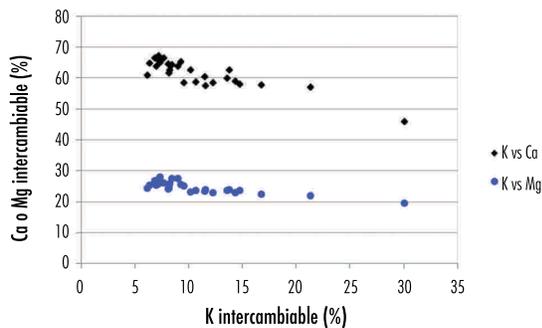
Gráfica 10. Distribución de P residual extraíble en el perfil del suelo según la fertilización.

## Discusión y conclusiones

Los resultados del estudio indican claramente que la adición de potasio al ensayo de brócoli fue innecesaria. Esto como resultado de la condición inicial del suelo, el cual contenía un nivel adecuado de K (Cuadro 1). De un muestreo de 105 sitios productores de maíz en Sololá, Cifuentes et al. (2011) encontraron un bajo nivel de K únicamente en el 10 % de los sitios, en 20 % de los sitios el K estaba a un nivel adecuado y en el 70 % restante el K estaba alto. En un muestreo realizado en 2008, Cifuentes también determinó que en suelos de uso hortícola el nivel de K se encontraba de adecuado o alto. De acuerdo a Sbaraglia (1993), de un análisis de 50 sitios muestreados dentro de la cuenca del lago de Atitlán, solamente el 11 % de los sitios muestreados requería aplicar K para fines de mantenimiento de la fertilidad del suelo, ya que el 89 % de los sitios presentó alto nivel de ese elemento. Esto como resultado del origen de los suelos de Sololá, en donde aproximadamente el 52 % son suelos Andisoles de origen volcánico (MAGA-DIGEGF, 2012). Con base en los resultados anteriores, no se recomienda incluir K como parte del programa de fertilización en la mayor parte de suelos de Sololá, a menos que se tenga evidencia de un bajo nivel de dicho elemento en el sitio.

La aplicación de K también tiene un efecto directo sobre los cationes Ca y Mg (bases del suelo), los cuales son cationes intercambiables que están unidos a los coloides del suelo por medio de enlaces electrostáticos (Bohn et al., 1985). Un exceso

de K en el suelo puede reducir la concentración de Ca o Mg intercambiables en los coloides del suelo pasándolos a formar parte de la solución del suelo de donde pueden ser fácilmente lixiviados. En este estudio también se determinó una relación inversa entre los tres cationes intercambiables en el suelo (Gráfica 11). Mantener un equilibrio entre estos elementos en el suelo es importante para una adecuada nutrición de las plantas.



Gráfica 11. Relación entre K, Ca y Mg intercambiables en el suelo.

La producción de materia seca estuvo asociada a la aplicación de P por lo que la respuesta del brócoli a la aplicación de ese elemento fue evidente (Gráfica 2). Una mejor nutrición de las plantas con P también incidió en una mayor demanda de los otros elementos (Figura 5). Esto como resultado de un incremento en la capacidad de enraizamiento y tamaño de las plantas. El rol del P como elemento esencial para las plantas está ampliamente descrito en la literatura (Mengel y Kirby, 1987; Marschner, 1986).

Debido al bajo nivel inicial de P en el suelo, se esperaba respuesta positiva a la aplicación de ese elemento. De acuerdo al MAGA-DIGEGF (2012), arriba del 50 % de los suelos de Sololá pertenecen al orden Andisol, y el sitio utilizado en el ensayo de campo aunque es un Inceptisol, también tiene propiedades ándicas. Muchos de estos suelos se caracterizan por presentar bajos niveles de P disponible para las plantas como resultado de una alta inmovilización (fijación) química (Bertsch, 1998; Sánchez, 1981) de ese elemento. De acuerdo a la caracterización de algunos suelos productores de maíz en Sololá realizada por Cifuentes et al. (2011), alrededor de un 70 % de los sitios presentaron bajos niveles de P extraíble. Por su parte, el análisis de 50 sitios evaluados por Sbaraglia (1993) indica que el 82 % de las muestras presentó un nivel bajo o muy bajo de P. Esto implica que la aplicación de P a los cultivos de la región es necesaria y debe ser considerada en la elaboración de los planes de fertilización junto al nitrógeno que es un elemento considerado bajo en todos los suelos del país. Cifuentes et al. (2011) reportan que arriba del 85 % de los suelos analizados presentó bajos niveles de  $\text{NO}_3\text{-N}$ .

La recuperación de P como parte de la biomasa colectada fue baja (9 – 15 % de recuperación (Gráfica 7). El resto del P aplicado quedó en el suelo, ya sea en forma disponible (15 – 20 %) o químicamente inmovilizado (70 – 80 %). De acuerdo a las Gráficas 9 y 10, la mayor parte del P extraíble quedó en los primeros 15 cm de suelo. Esto concuerda con lo indicado

en la literatura en que el P es un elemento relativamente inmóvil con muy poco desplazamiento dentro del perfil del suelo (Tisdale et.al., 1993; Sánchez, 1981; Barrow, 1,980). Del análisis químico del sitio experimental utilizado en este estudio se determinó que este suelo tiene una capacidad de fijación de P de un 94 %. Esto implica, que de cada 100 Kg de P aplicado por hectárea, únicamente 6 kg de P estarían disponibles para las plantas. La alta inmovilización de P en suelos de Sololá es de esperarse ya que como se indicó anteriormente, arriba del 50 % de los sitios son clasificados como Andisoles, con una alta capacidad de inmovilización de P por medios químicos. La alta fijación de P en suelos con propiedades ándicas y ricos en alofano está ampliamente documentada en la literatura (Bertsch, 1998; Sánchez, 1981; Sample et.al. 1980).

En Sololá prevalece la actividad agrícola en sitios con diferente grado de pendiente. Aunque agronómicamente esto no es recomendable, debido a la situación socioeconómica de los agricultores de la región, estos se ven en la necesidad de cultivar bajo esas condiciones. En ese sentido, es necesario capacitar adecuadamente a los agricultores a fin de utilizar prácticas de conservación de suelo que reduzcan la pérdida del mismo por efectos de la erosión.

Tomando en consideración que la mayor cantidad de P queda en los sólidos del suelo, es de esperarse que el destino final de los sedimentos arrastrados por el agua de escorrentía sea a los cuerpos de agua, llevando consigo nitrógeno, fósforo y el resto de elementos que formaban parte de la constitución del suelo. El impacto negativo de la contaminación de los cuerpos de agua con N y P es ampliamente conocido, incluyendo la contaminación del lago de Atitlán. Sin embargo, se esperaría que el fósforo químicamente atado a los sólidos del suelo, no esté disponible para alimentar la vida acuática dentro del lago.

Es recomendable orientar a los agricultores en hacer un uso eficiente de los fertilizantes a fin de no sobredosificar sus cultivos y reducir así la contaminación de los cuerpos de agua por el arrastre de las partículas de suelo. El P utilizado en la agricultura depende de los yacimientos de minerales que se explotan en el mundo. Estos tienen un tiempo finito y por lo tanto el hacer un uso eficiente de este elemento para la producción de alimentos es importante (Vacannir, 2009; James and Carthcart, 1980).

### Las principales conclusiones emanadas de este estudio incluyen:

- No se determinó respuesta a la aplicación de K debido a la condición natural del suelo utilizado.
- Se determinó alta respuesta a la aplicación de P, con un nivel óptimo de 1.5 veces la base aplicada (128 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> / ha).
- El compost dio un aporte significativo de P, dando como resultado una alta productividad del brócoli.
- El porcentaje de recuperación y movilidad de P fue bajo debido a la alta capacidad de inmovilización química de dicho elemento por el suelo.

- Se debe impulsar un uso eficiente de los nutrientes, ya sea por medio de la fertilización orgánica o inorgánica, entre los productores de la región.
- Utilizar prácticas efectivas de conservación de suelos para reducir el arrastre de sedimento y nutrientes a los cuerpos de agua como parte del proceso de erosión.

### Agradecimientos

1. Al Grupo FARNER, por su interés en apoyar la búsqueda de soluciones integrales orientadas a reducir la contaminación del Lago de Atitlán así como procurar la producción agroalimentaria de la región.
2. Al Grupo DISAGRO, por el aporte de los agroquímicos para la realización de este estudio.
3. A Soluciones Analíticas, por el apoyo con los análisis de suelo.
4. A UVG Altiplano por su apoyo con el sitio experimental así como por el apoyo de personal técnico y de campo en el manejo del ensayo de finca.

### Bibliografía

- Alexander M (1981) *Introducción a la Microbiología del Suelo* AGT Editor, S.A. México
- Barrow NJ (1980) *Evaluation and utilization of residual phosphorus in soils* In: *The Role of Phosphorus in Agriculture* Khasawneh FE, EC Sample, EJ Kamprath (eds) American Society of Agronomy Madison, Wisconsin, USA, pp. 333-359
- Bertsch F (1998) *La Fertilidad de los Suelos y su Manejo* Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo San José, Costa Rica
- Bohn H, B McNeal, G O' Connor (1985) *Soil Chemistry* Wiley, New York, USA
- Catchart JB (1980) *World phosphate reserves and resources* In: *The Role of Phosphorus in Agriculture* Khasawneh FE, EC Sample, EJ Kamprath (eds) American Society of Agronomy Madison, Wisconsin, USA, pp. 1-18
- Cifuentes R, LA Arévalo, C Beteta, AC Sierra (2011-2012) *Resultados preliminares de la caracterización de la fertilidad de algunos suelos productores de maíz en Sololá* Food for Progress Project (FFP10) Universidad del Valle de Guatemala, pendiente de publicación
- Cifuentes R (2008) *Evaluation of soil fertility demo plots with vegetables in Sololá* In: Food for Progress Guatemala Project Universidad del Valle de Guatemala, Final Report
- Dix M, M Dix, M Orozco, D Cabrera, E Bocel, A Toledo, E Symonds (2012) *El Lago de Atitlán. Su estado ecológico octubre 2009-diciembre 2011* Este número de la Revista UVG agosto 2012
- Gavlak RG, DA Horneck, RO Miller (1998) *Western States Laboratory Proficiency Testing Program* Soil and Plant Analytical Methods, USA
- Grupo Disagro (2001) *Consejero Agrícola: Fertilizantes* Departamento de Investigación Agrícola, Guatemala
- MAGA-DIGEGR (2012) *Estudio Semidetallado de Suelos del Departamento de Sololá*, Guatemala, En publicación
- Marschner H (1986) *Mineral Nutrition of Higher Plants* Academic Press, San Diego, USA
- Mengel K, EA Kirkby (1987) *Principles of Plant Nutrition* International Potash Institute 4<sup>th</sup> ed. Bern, Switzerland
- Michigan State University (MSU) (1988) *MSTAC/Crop and Soil Sciences. Users Guide: Statistics* East Lansing, Michigan, USA

- Pierzynsky GM, JT Sims, GF Vance (2000) *Soil and Environmental Quality* CRC Press 2<sup>nd</sup> ed. Boca Raton, USA
- Sample EC, RJ Soper, GJ Racz (1980) Reactions of phosphate fertilizers in soils In: *The Role of Phosphorus in Agriculture The Role of Phosphorus in Agriculture* Khasawneh FE, EC Sample, EJ Kamprath (eds) American Society of Agronomy Madison, Wisconsin, USA, pp. 263-310
- Sánchez PA (1981) *Suelos del Trópico: Características y Manejo* Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA San José, Costa Rica.
- Sbaraglia M (1993) *Análisis de Suelo y Uso de Fertilizantes* Programa de Desarrollo Autosostenido en la Cuenca del Lago de Atitlán, Proyecto ALA 88/22, Informe Final.
- Soil Survey Staff (1990) *Keys to Soil Taxonomy* SMSS Technical Monograph No. 6. 4<sup>th</sup> ed. Blacksburg, Virginia, USA
- Stauder N (2010) *Guía para Diseñar Programas Efectivos de Fertilización* Laboratorio de Soluciones Analíticas, S.A. Guatemala
- Tisdale SL, WL Nelson, JD Beaton, JL Havlin (1993) *Soil Fertility and Fertilizers* 5<sup>th</sup> ed. Macmillan, New York, USA
- Vaccari DA (2009) *Phosphorus: A Looming* Scientific American Inc. USA



(de izquierda a derecha)

**Rolando Cifuentes**  
rcifuen@uvg.edu.gt

**Edwin de León**  
edeleon@altriplano.uvg.edu.gt

---