

## Relación entre el fósforo total y asimilable en tres localidades de Cochabamba

Edgar Gutiérrez Rodríguez<sup>1</sup>; Rufino Santos Mamani<sup>1</sup>; Demis Andrade Foronda<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias - Universidad Mayor de San Simón;

<sup>2</sup> Doctorante AI/ARES-UMSS

*E mail:* egrguty@yahoo.com

**Resumen.** El fósforo (P) es uno de los elementos esenciales para la nutrición vegetal, siendo aprovechado bajo las formas aniónicas solubles  $H_2PO_4^-$  y  $HPO_4^{2-}$ . La relación fósforo disponible/total se utiliza como medida de la capacidad del suelo para enlazar P en escasas formas solubles y de la posibilidad de que las plantas utilicen P añadido. El propósito del presente estudio fue analizar las relaciones entre el P total y el P disponible en suelos de tres localidades (Combuyo, Melga y Aramasí) del departamento de Cochabamba. Según la relación P disponible/total, el P disponible es deficiente en las tres localidades. Existen diferencias significativas para el contenido de P total (Combuyo >Aramasí > Melga), no así para el P disponible. El grado de asociación entre el P total y el P disponible es alto para las tres localidades. De las regresiones entre el P disponible (y) y el P total (x), se obtuvieron las ecuaciones:  $y = 0.0614x - 38.55$  ( $R^2$  0.65),  $y = 0.0264x - 11.427$  ( $R^2$  0.83),  $y = 0.0167x + 6.2746$  ( $R^2$  0.54), para Aramasí, Combuyo y Melga, respectivamente. Para que estos modelos predictivos sean funcionales, se recomienda validarlos con un muestreo auxiliar.

**Palabras clave:** Fertilidad y ciclaje de nutrientes; Fósforo disponible; Relación fósforo disponible / total

**Summary: Relationship between total and assimilable phosphorus in three localities at Cochabamba-Bolivia.** Phosphorus (P) is one of the essential elements for plant nutrition, assimilated under the anionic soluble forms  $H_2PO_4^-$  and  $HPO_4^{2-}$ . The ratio of available/total phosphorus is used as a measure of the soil capacity to bind P in the few soluble forms and the possibility of plants using the added P. The purpose of this study was analyze the relationships between total P and available P in soils from three localities (Combuyo, Melga and Aramasí) in Cochabamba Department. According to the ratio P available/total, the available P is deficient from the three locations. There were significant differences for total P (Combuyo >Aramasí > Melga), but not for available P. The degree of association between total P and available P is high for the three locations. From the linear regressions between available P (y) and total P (x), the following equations were obtained:  $y = 0.0614x - 38.55$  ( $R^2$  0.65),  $y = 0.0264x - 11.427$  ( $R^2$  0.83),  $y = 0.0167x + 6.2746$  ( $R^2$  0.54), for Aramasí, Combuyo and Melga, respectively. For these predictive models to be functional, it is recommended to validate them with an auxiliary sampling.

**Keywords:** Fertility and nutrient cycling; Available phosphorus; Available / total phosphorus ratio

### Introducción

El fósforo (P) es un elemento esencial para la nutrición de las plantas, que lo absorben en su forma soluble. Por su

tendencia a reaccionar, genera compuestos fosforados, es por ello que es necesario determinar el fósforo disponible y su relación con otras formas existentes en el suelo.

El fósforo es un elemento que da calidad y precocidad a las plantas, ya que adelanta la maduración, a diferencia del nitrógeno, que tiende a prolongar el crecimiento vegetativo. Cumple un rol plástico, porque se encuentra en toda la planta, y principalmente en los tejidos jóvenes, interviniendo en la síntesis proteica y contribuyendo al desarrollo radicular y en los órganos de reserva (semillas y tubérculos), formando parte de fosfolípidos y ácidos nucleicos.

Este elemento cumple un rol metabólico y genético, ya que desempeña un papel indispensable como acumulador de energía para todas las actividades bioquímicas de las células vivientes, al formar parte del Adenosín Trifosfato (ATP), Ácido Desoxiribonucleico (ADN) y Ácido Ribonucleico (ARN).

Las plantas absorben este elemento de la solución del suelo, como iones de ortofosfato, no obstante puede encontrarse en diversas formas, asociado a la materia orgánica (fosfoproteínas, fosfolípidos, etc.), precipitado con compuestos de aluminio, hierro o calcio, dependiendo del pH del suelo, o adsorbido a las arcillas del suelo y/o en la estructura mineralógica de los minerales primarios (apatitas).

La disponibilidad del fósforo varía dependiendo del tipo de suelo, y usualmente se encuentra como un nutriente limitante para el crecimiento de las plantas, por lo que es considerado un macronutriente primario (Valenzuela 2010).

La fuente original de fósforo es el material parental, constituido por rocas fosfáticas, tales como apatitas, fluorapatita, cloroapatita, hidroxapatita, vivianita, etc. Constituye aproximadamente el 0.12% de la corteza terrestre. Los minerales prima-

rios (que no forman parte del material parental) y secundarios constituyen la reserva inorgánica de P del suelo, constituyendo las fracciones de P lábil y no lábil (Conti 2000). La cantidad de fósforo total de la capa arable de un suelo agrícola, es la suma del *fósforo orgánico e inorgánico*.

La participación del fósforo orgánico puede variar generalmente entre un 5% a 75% del P total, mientras que en muchos suelos la partición es del 50%. El porcentaje dependerá de la actividad biológica, temperatura, humedad, acidez del suelo y el grado de desarrollo del suelo. El P total también depende de la textura del suelo. En líneas generales, tanto en áreas cálidas como templadas, cuanto más fina es la textura, mayor es el contenido de P total (Pellegrini 2017).

En cuanto al *fósforo orgánico*, la principal fuente está constituida por los residuos vegetales y animales que se adicionan al suelo. Los compuestos fosfatados más importantes de la materia orgánica son nucleoproteínas, fosfolípidos, fosfoproteínas y fitinas. La mineralización de la materia orgánica es bioquímica, lenta, requiriendo temperaturas de aproximadamente 25°C a 30°C, pH neutro y humedad cercana a capacidad de campo. Este tipo de fósforo, no es disponible para la planta (Sanzano s/f).

El *fósforo inorgánico*, desde el punto de vista edafológico, interesa clasificarlo de acuerdo a su disponibilidad mediata o inmediata para las plantas, en *fósforo soluble*, intercambiable o lábil y *fósforo insoluble* o estructural.

El *fósforo soluble* (disponible) es aprovechable para las plantas de forma inmediata, como fosfatos en la solución del suelo. Para que los cultivos lo aprove-

chen convenientemente, es necesario que ocurra una renovación del fósforo en la solución edáfica. El equilibrio entre las distintas formas fosfatadas, es lo que asegura la nutrición vegetal. Las formas solubles de fósforo en el suelo son los fosfatos diácidos ( $\text{H}_2\text{PO}_4^-$ ) y monoácidos ( $\text{HPO}_4^-$ ). La concentración de los iones fosfatos en solución, está relacionada con el pH de la misma (Fernández y Mendoza 2008). La adsorción de fosfatos, como toda adsorción aniónica en el suelo, es un fenómeno que depende del pH. A pH ácido, aumentan las cargas positivas de los coloides, y por ende, aumenta la adsorción aniónica. Estos iones forman parte del enjambre de iones que rodean a las partículas coloidales y están en constante movimiento.

El **fósforo insoluble** (no aprovechable) forma parte de los minerales primarios (apatitas) y secundarios (caolinitas) y constituye la gran reserva de fósforo inorgánico en el suelo. La insolubilización se puede deber a la precipitación como fosfatos cálcicos en medio alcalino, o como fosfatos de hierro y aluminio en medio ácido.

Tanto en suelos ácidos como alcalinos, el fósforo tiende a sufrir una cadena de reacciones que producen compuestos fosforados de baja solubilidad. Por lo tanto, durante el largo tiempo que el fósforo permanece en el suelo, las formas menos solubles, y por ende las menos disponibles para la planta, tienden a aumentar. Cuando se agrega fósforo soluble al suelo, usualmente ocurre una rápida reacción -de unas pocas horas- que remueve el fósforo de la solución (fijación) (Martínez 1988).

Para satisfacer las necesidades de los vegetales, durante el período de crecimiento, el suelo debe ser capaz de hacer

disponible una cantidad de fósforo, varias veces mayor que la cantidad presente en la solución del suelo, en un momento dado; esto solamente es posible por la existencia de un equilibrio dinámico entre las diferentes formas de fósforo en el suelo: P insoluble, P lábil y P soluble.

Una vez removido el fósforo de la solución del suelo, el resultado será una transferencia de fosfatos desde la fase sólida del suelo. La relación entre fósforo en solución y fósforo fijado o lentamente soluble, es un ejemplo del balance entre los factores de capacidad e intensidad en cuanto a la fertilidad del suelo.

La relación fósforo disponible/total se utiliza como medida de la capacidad del suelo para enlazar P en escasas formas solubles, y de la posibilidad de que las plantas utilicen P añadido.

Esta relación para muestras de suelo, es el resultado de procesos de adsorción de P en el largo plazo de cultivo, con adición de fertilizantes con P, en contraposición a los estudios de adsorción en laboratorio, en los que se suele utilizar una reacción de corto plazo; debido a su utilidad para estudiar los procesos de adsorción de P a largo plazo, es interesante considerar su relación con las propiedades del suelo (Øgaard 1994)

El objetivo del trabajo fue determinar el fósforo total y fósforo disponible, y analizar las relaciones entre dichas variables, para suelos de tres localidades del departamento de Cochabamba.

Se contempló la relación de regresión con el propósito de desarrollar un insumo de predicción; se debe recalcar que este insumo requiere de una fase posterior de validación.

## Materiales y métodos

Fueron obtenidas un total de 54 muestras de suelo (18 por localidad), a una profundidad de 0 a 20 cm, con sub muestras en zigzag de cada parcela de muestreo, en las siguientes tres localidades del departamento de Cochabamba:

Combuyo (provincia Quillacollo)

Melga (provincia Chapare)

Aramasí (provincia Tapacarí)

El análisis de caracterización química y física se realizó en el *Laboratorio de Suelos y Aguas* de la Facultad de Ciencias Agrícolas y Pecuarias “Dr. Martín Cárdenas” de la Universidad Mayor de San Simón.

### *Características generales de los suelos de las zonas de estudio*

Los suelos de Combuyo son de aptitud agroforestal, de naturaleza coluvio-aluvial, de textura franca a franco arenosa. En algunos lugares con una erosión de moderada a alta, por efecto de las pendientes. Son suelos superficiales con una fertilidad natural baja, con bajo contenido de nitrógeno, fósforo en cantidades moderadas y potasio en cantidades bajas a moderadas; dependiendo de su posición geomorfológica y fisiográfica, estas cantidades de macronutrientes no presentan una variabilidad considerable, determinando bajos rendimientos de los cultivos.

Los suelos de Melga son de origen coluvio-aluvial, producto de los materiales transportados por el agua. En general son suelos poco profundos en las partes altas, y profundos en la parte baja de la cuenca; el contenido de fósforo varía de bajo a

moderado (1 a 10 ppm), debido a la fijación de este elemento.

El municipio de Tapacarí, presenta un paisaje fisiográfico montañoso de topografía accidentada, es por ello que los suelos son de origen coluvio - aluvial, con una textura variable como resultado de los materiales transportados por el agua; siendo suelos con baja fertilidad en las laderas y moderada en los valles interandinos.

### *Variables evaluadas*

**Fósforo total.** Se determinó mediante el *Método Colorimétrico de Vanadato de Amonio*. La fórmula utilizada para los cálculos fue la siguiente:

$$\%P_2O_5\text{ total} = \left( \frac{a * V * 100 * 5}{1000000 * g} \right) * 2.2914$$

donde:

a = ppm de P de la curva

V = ml de alícuota

5 = volumen final (ml) de la digestión ácida

g = gramos de muestra

2.2914 = factor de conversión

**Fósforo disponible.** Se determinó, aplicando la metodología “*Olsen Modificada*”.

**Análisis estadístico.** En base a los análisis de las muestras de suelo y los parámetros determinados, se calculó la relación P disponible / P total. Se realizó un análisis de varianza y comparación de medias con las variables de estudio para las distintas localidades. Adicionalmente se determinó un análisis de correlación y de regresión para el fósforo disponible en función del fósforo total.

## Resultados y discusión

Las tres localidades son contrastantes en términos de clima y geografía (Cuadro 1) y en cuanto al aspecto edafológico.

El Cuadro 2 detalla de manera descriptiva, los valores encontrados de fósforo

(total y asimilable), para los suelos de las tres localidades.

Los valores promedio de pH fueron 6.2, 7.2 y 7.0; y de CE 0.18, 0.32 y 0.26, para Combuayo, Aramasí y Melga, respectivamente.

**Cuadro 1.** Características generales de tres localidades de Cochabamba donde se tomaron muestras de suelo para análisis de fósforo

| Parámetro                    | Localidades              |                          |                          |
|------------------------------|--------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                              | Combuayo                 | Aramasí                  | Melga                    |
| Altura media (msnm)          | 2756                     | 3000                     | 3200                     |
| Temperatura media (°C)       | 18 a 25                  | 12 a 18                  | 11 a 17                  |
| Precipitación media (mm/año) | 400 a 700                | 600 a 800                | 800 a 1000               |
| Ubicación geográfica         | 17°21' LS /<br>66°21' LO | 17°23' LS /<br>66°02' LO | 17°21' LS /<br>65°50' LO |

**Cuadro 2.** Valores medios y de dispersión, para fósforo total, fósforo disponible y la relación fósforo disponible / fósforo total en los suelos de las tres localidades

| Parámetro   | Localidades |            |            |
|---|-------------|------------|------------|
|   | Combuayo    | Aramasí    | Melga      |
| <b>Fósforo total (ppm)</b>                                |             |            |            |
| Promedio  | 1347.17     | 895.90     | 546.78     |
| Rango   | 658 - 2296  | 586 - 1363 | 255 - 1020 |
| Coefficiente de variación                                 | 40.34       | 18.26      | 43.09      |
| <b>Fósforo disponible (ppm)</b>                           |             |            |            |
| Promedio  | 24.08       | 16.47      | 15.39      |
| Rango   | 6 - 51      | 4 - 58     | 6 - 22     |
| Coefficiente de variación                                 | 65.43       | 75.75      | 34.58      |
| <b>Relación fósforo disponible / fósforo total (en %)</b> |             |            |            |
| Promedio  | 1.7         | 1.7        | 2.9        |
| Rango   | 0.6 - 2.7   | 0.5 - 4.3  | 1.6 - 4.1  |
| Coefficiente de variación                                 | 38.94       | 55.16      | 26.21      |

### ***Fósforo total***

El ANVA para esta variable refleja diferencias altamente significativas ( $P < 0.01$ ) entre las localidades. La concentración de fósforo total, está relacionada con los materiales parentales (Engelstad y Terman 1980); afirmación que se traduce en un posible factor que contribuye a dichas diferencias.

Los resultados obtenidos muestran mayor cantidad de fósforo total (1347 ppm) en la comunidad de Combuayo (Vinto), se presume en función a su naturaleza aluvial. Los suelos de Melga (Chapare) con 547 ppm debido a que son suelos degradados; finalmente, los suelos de Aramasí (Tapacará) con 8960 ppm, probablemente debido al material geológico con apatitas (Cuadro 3).

Si bien los valores de P total son extraordinariamente altos, los mismos son posibles cuando existen adiciones considerables de materia orgánica y/o fertilizantes ricos en fósforo, o por fijación, entre otros factores; no obstante, el estudio no cuenta con otros parámetros, por tanto, no es posible contar con una afirmación sólida al respecto.

### ***Fósforo soluble o disponible***

Según el ANVA (Cuadro 3), para el contenido de fósforo disponible, no es significativo entre localidades, probablemente debido a que los tres tipos de suelos son neutros a levemente ácidos (el pH varía de 6.2 a 7.2); al respecto, *SMART Fertilizer Management* (s/f), señala que el rango de pH óptimo para la disponibilidad máxima del fósforo, es de 6.0 a 7.0; rango coincidente con los valores encontrados en las tres localidades del estudio. El mismo autor indica que en muchos suelos, la descomposición de la materia or-

gánica y los residuos de cultivos, contribuyen al fósforo disponible.

En cuanto al P disponible, Campitelli *et al.* (2010), señalan que el contenido de este elemento en el suelo es una variable dinámica, fuertemente influenciada por las propiedades del suelo, la planta y las características ambientales.

Según una evaluación de la fertilidad de suelos en Bolivia (FAO-FERTISUELOS, 1993), en los valles 29.9% y en las punas 41% de los suelos muestreados, contienen más de 10 ppm de P asimilable; esta afirmación concuerda con los valores de P disponible para las tres localidades del estudio, en las eco regiones correspondientes.

La misma fuente indica los siguientes parámetros para condiciones de Bolivia, en relación al contenido de P disponible: suelos con menos de 10-12 ppm de P son considerados BAJOS; entre 10 y 20 ppm se asume como ADECUADOS, y más de 20 ppm, ALTOS.

### ***Relación entre fósforo disponible y fósforo total***

La relación de P disponible/P total, refleja una baja disponibilidad de fósforo para la planta, es probable debido a la baja mineralización y/o baja solubilización del P, y/o alta fijación del P en los lugares de muestreo; adicionalmente, se advierte que en la localidad de Melga existe casi el doble de P disponible en relación al P total, con respecto a las localidades de Combuayo y Aramasí (Cuadro 3); los resultados contrastan con lo evaluado por Øgaard (1994), quién obtuvo una relación de 17.6, 19.1 y 7.1 para suelos arenosos, limosos y arcillosos, respectivamente.



**Cuadro 3.** Análisis de varianza (ANVA) y comparaciones de medias (Tukey < 0.05) para las variables del estudio en las tres localidades

| Variable                               | F     | P(>F)       | Aramasí         | Combuayo         | Melga           |
|--|-------|-------------|-----------------|------------------|-----------------|
| <b>Fósforo disponible (PD)</b>         | 2.8   | 0.067 .     | <b>16.47 a</b>  | <b>24.08 a</b>   | <b>15.39 a</b>  |
| <b>Fósforo total (PT)</b>              | 23.02 | 7.49e-8 *** | <b>895.90 b</b> | <b>1347.17 a</b> | <b>546.78 c</b> |
| <b>Relación P disponible / P total</b> | 14.32 | 1.16e-5 *** | <b>0.017 b</b>  | <b>0.017 b</b>   | <b>0.029 a</b>  |

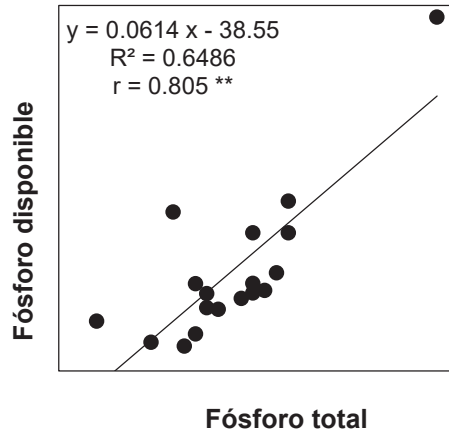
**Correlación y regresión entre P disponible y P total**

Según el análisis de correlación entre el P disponible y P total, se advierte una asociación fuerte y positiva entre dichas variables, para las tres localidades, por tanto, es congruente proceder con el análisis de regresión correspondiente.

Mediante el análisis de regresión (figuras 1 a 3), se determinó la relación referencial entre el P disponible y el P total, para generar un modelo matemático que permita predecir o estimar la cantidad de fósforo disponible (variable dependiente) a partir del fósforo total (variable independiente); dicho modelo está sujeto a una validación posterior.

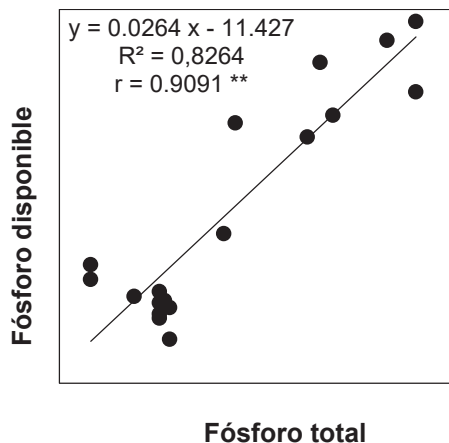
En general, la pendiente de la recta (B1) indica que, en promedio, a cada unidad incremental de fósforo total (Xi), le corresponde cierto incremento de fósforo disponible (Yi).

Según la Figura 1, en la localidad de Aramasí existe una relación positiva y relativamente alta ( $R^2 = 0.6486$ ) entre las variables fósforo total y fósforo disponible, señalando que, a mayor cantidad de P total, mayor es el contenido de P disponible.



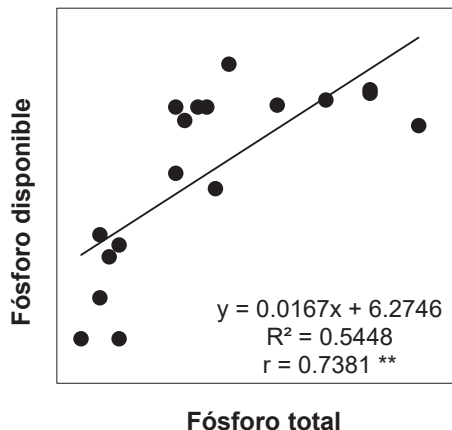
**Figura 1.** Relación P disponible en función del P total en Aramasí

En la Figura 2 se observa un coeficiente de determinación alto ( $R^2 = 0.8264$ ), lo que confirma el potencial de esta relación para emplearse como modelo predictivo de la localidad de Combuayo.



**Figura 2.** Relación de P disponible en función del P total en Combuayo

La relación entre el P disponible y P total en Melga, presenta un grado de ajuste moderado ( $R^2 = 0.5448$ ), probablemente debido a la aleatoriedad y variabilidad de los puntos de muestreo (Figura 3).



**Figura 3.** Relación de P disponible en función del P total en Melga

## Conclusiones

- Existen diferencias significativas para el contenido de P total (Combuyo > Aramasí > Melga); no así para el P disponible.
- La relación P disponible/total, refleja una deficiencia de P disponible, probablemente debido a la baja mineralización / solubilización, y/o fijación del fósforo en el suelo.
- El grado de correlación entre el P total y el P disponible es alto y positivo, para las tres localidades.
- Los modelos referenciales de regresión lineal, del P disponible en función del P total, para las tres localidades, fueron:

$$\text{Aramasí: } y = 0.0614x - 38.55 \\ (R^2 = 0.6486^{**})$$

$$\text{Combuyo: } y = 0.0264x - 11.427 \\ (R^2 = 0.8264^{**})$$

$$\text{Melga: } y = 0.0167x + 6.2746 \\ (R^2 = 0.5448^{**})$$

- Para que sea factible predecir el P disponible, con los modelos generados, se recomienda incrementar el número de muestras para mejorar el  $R^2$ , y validarlos con un muestreo auxiliar.

## Referencias citadas

- Campitelli P., Aoki A., Gudelj O., Rubenacker A., Sereno R. 2010. Selección de indicadores de calidad de suelo para determinar los efectos del uso y prácticas agrícolas en un área piloto de la región central de Córdoba. *Ciencia del Suelo* 28 (2): 223-231.
- Conti M. 2000. Principios de Edafología, con énfasis en suelos argentinos. 2da. edición. Facultad de Agronomía. Universidad de Buenos Aires. Argentina. 430 p.
- Engelstad O., Terman G. 1980. Agromonic effectiveness of phosphate fertilizers. p. 311-332. In: Khasawneh *et al.* (eds). *The Role of Phosphorus in agriculture*. ASA, CSSA, SSSA. Madison, Wisconsin, USA. 910 p.
- FAO - FERTISUELOS. 1993. Evaluación de la fertilidad de los suelos del Altiplano, Valle Central y Llanos de Bolivia. José Valente Moraes (FAO) / Robert Oliver (CIRAD-CA). Cochabamba, Bolivia. 96 p + 63 p. de anexos.



- Fernández L., Mendoza R. 2008. Evaluación del fósforo disponible mediante tres métodos en distintos suelos y manejos productivos. HAACS. p. 13-27.
- Øgaard A. 1994. Relationships between the Ratio of Plant-Available Phosphorus (P-AL) to Total Phosphorus and Soil Properties. Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science. 44:3, 136-141. *En línea*. Disponible en: [www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09064719409410236](http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09064719409410236) Consultado en julio de 2020.
- Pellegrini A. 2017. Fósforo en el suelo. *En línea*. Disponible en: [https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/35407/mod\\_resource/content/1/TEMA%2013%20-%20F%C3%93SFORO.pdf](https://aulavirtual.agro.unlp.edu.ar/pluginfile.php/35407/mod_resource/content/1/TEMA%2013%20-%20F%C3%93SFORO.pdf) Consultado en mayo de 2020.
- Sanzano A. El fósforo del suelo. *En línea*. Disponible en: [www.academia.edu/30243808/EL\\_FÓSFORO\\_DEL\\_SUELO](http://www.academia.edu/30243808/EL_FÓSFORO_DEL_SUELO) Consultado en noviembre de 2019.
- SMART Fertilizer Management. El fósforo en suelo y agua. *En línea*. Disponible en: [www.smart-fertilizer.com/es/articulos/phosphorus/](http://www.smart-fertilizer.com/es/articulos/phosphorus/) Consultado en noviembre de 2019
- Valenzuela J. 2010. Formas y distribución del fósforo en el perfil de suelo en diferentes condiciones de uso y manejo en un Andisol de Chiloé, Chile. Tesis de grado. Facultad de Ciencias Agrarias, Escuela de Agronomía. Universidad Austral de Chile. 66 p.

*Agradecimientos al Laboratorio de Suelos y Aguas de la FCyP-UMSS.*

*Trabajo recibido el 10 de febrero de 2020 - Trabajo aceptado el 16 de agosto de 2020*