



Enriquecimiento fosfórico del suelo y su Impacto ambiental

Adriano Cabrera-Rodríguez^{1*} 

Rosmery Cruz-Camacho² 

¹Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas (INCA), carretera San José-Tapaste, km 3½, Gaveta Postal 1, San José de las Lajas, Mayabeque, Cuba. CP 32700.

²Instituto de Investigaciones del Tabaco, carretera Tumbadero, km 8½, San Antonio de los Baños, Artemisa

*Autor para correspondencia: naniadriano1950@gmail.com

RESUMEN

El P es uno de los tres macronutrientes primarios requerido para el crecimiento de las plantas y los animales. Su aplicación excesiva en los agrosistemas ha generado suelos enriquecidos con P en muchas latitudes. La revisión que se presenta tiene como objetivo realizar una valoración abreviada sobre el significado de suelo enriquecido con P y las afectaciones ambientales que ello provoca. Cuando el balance entre el P aplicado menos el exportado resulta positivo, se incrementa el P asimilable y se produce una acumulación de P en el suelo, que con el transcurso de los años origina el enriquecimiento en P de los suelos. El P participa en la eutrofización de los cuerpos de agua, lo que se agudiza cuando el suelo está enriquecido con P. En un suelo enriquecido con P se incrementa el pH, disminuye el contenido de materia orgánica, se descompone la caolinita, se afecta la nutrición de las plantas por efectos de antagonismo y se inhibe el funcionamiento micorrízico.

Palabras clave: fósforo, fósforo en suelo, eutrofización, fertilidad del suelo

Recibido: 22/06/2021

Aceptado: 18/09/2021

INTRODUCCIÓN

El P es uno de los tres macronutrientes primarios requerido para el crecimiento de las plantas y los animales; su aplicación es necesaria para mantener la producción y la rentabilidad de los cultivos, así como la producción animal ⁽¹⁾.

Debido a las aplicaciones fosfóricas durante años con fertilizantes minerales, con fertilizantes orgánicos o con ambos, en ocasiones de manera irracional ⁽²⁾, se han alcanzado concentraciones elevadas de P en muchos suelos agrícolas de diferentes latitudes.

Suelos con concentraciones muy altas de P se han encontrado en Maryland, USA ⁽³⁾, en Holanda ^(4,5), en otros países de la Unión Europea ⁽⁶⁾, en China ⁽⁷⁾, lo que se ha atribuido a que el aporte del nutriente ha sido mayor que la remoción realizada por el producto cosechado ^(1,8,9).

Basado en lo expresado con anterioridad, la revisión que se presenta tiene como objetivo realizar una valoración abreviada sobre el significado de suelo enriquecido con P y las afectaciones ambientales que ello provoca.

Enriquecimiento fosfórico del suelo

Cuando en un área agrícola el balance entre el P aplicado menos el extraído por el producto cosechado (exportado) resulta positivo, se va incrementando la disponibilidad fosfórica del suelo (P asimilable) y a su vez, se va produciendo una acumulación de P en el suelo (residualidad), que con el decursar de los años origina el enriquecimiento fosfórico del medio edáfico ⁽¹⁰⁻¹⁵⁾; es decir, el suelo llega a convertirse en lo que se denomina un “suelo enriquecido con P”; en estos casos, el P asimilable supera al valor considerado como óptimo para los cultivos y estos no responden ante la fertilización fosfórica.

La disponibilidad de P para los cultivos se determina, de manera general, a partir de los resultados obtenidos mediante i) el análisis de suelo, ii) el análisis de la planta o de un tejido indicador de la planta, iii) el balance entre el P aplicado y el exportado por el producto cosechado.

El análisis de suelo brinda información sobre la disponibilidad de P para las plantas ⁽¹⁶⁻¹⁹⁾; mientras que el análisis de un tejido indicador de la planta (generalmente hojas o parte de ellas), aporta información sobre el estado nutricional del cultivo ^(3,20,21). Ambos métodos son válidos y la precisión en la recomendación del nutriente se incrementa si se llevan a cabo los dos análisis.

Por su parte, el método del balance constituye una manera de restituir al suelo lo que se exporta del campo con el producto cosechado, pero para ello se tiene que utilizar el análisis químico de lo cosechado, como pueden ser la planta completa o parte de ella ^(22,23).

Los resultados que se obtienen a partir del análisis foliar o del suelo, se comparan con categorizaciones ya establecidas y se precisa el estado nutricional de la planta o la concentración de P asimilable del suelo. En la Tabla 1 se ejemplifica con análisis de suelo utilizando los métodos de determinación de P asimilable Bray and Kurtz No.1 ⁽²⁴⁾, Olsen ^(25,26), Mehlich 3 ^(26,27) y Oniani ⁽²⁸⁾.

Tabla 1. Categorización de P asimilable del suelo determinado por diferentes métodos

Solución extractiva	Categoría	P (mg kg ⁻¹)
0,03 M NH ₄ F+0,025 M HCl pH 3,5	Bray and Kurtz No. 1	
	Muy Bajo	< 3
	Bajo	3-7
	Medio	7-20
0,5 M NaHCO ₃ pH 8,5	Adecuado	> 20
	Olsen	
	Bajo	< 5
	Medio	5-10
	Adecuado	> 10
	Bajo	< 10
	Optimo	10-30
	Alto	30-60
	Muy Alto	> 60
	0,2 M CH ₃ COOH+ 0,25 M NH ₄ NO ₃ + 0,015 M NH ₄ F + 0,013 M HNO ₃ + 0,001 M EDTA	Mehlich 3
Bajo		< 15
Optimo		15-50
Alto		50-100
Muy Alto		> 100
0,05 M H ₂ SO ₄	Nivel crítico	30
	Oniani (mg 100 g⁻¹, P₂O₅)	
	Bajo	< 15
	Medio	15-30
	Alto	30-45
Muy Alto	> 45	

Esas categorizaciones en la mayoría de los casos se encuentran referidas como Bajo, Medio, Alto y Muy Alto, también como Muy Bajo, Bajo, Medio, Alto y Muy Alto, o como Muy Deficiente, Deficiente, Medio, Abastecido, Muy Abastecido, entre otras modalidades; en fin, es variable y dependiente de la técnica analítica empleada, de las consideraciones del investigador, de las condiciones edafoclimáticas, de la especie vegetal y del manejo.

En muchas ocasiones para el caso del análisis del suelo, se consideran otras propiedades para precisar aún más la categoría del P asimilable que corresponda, como pueden ser el pH, la textura, el contenido de materia orgánica, la capacidad de intercambio catiónico, entre otras. Para el caso del análisis de planta con frecuencia se considera el porcentaje de humedad de la muestra analizada y la edad de la planta al momento del muestreo. Las categorías definidas tanto para la fertilidad fosfórica del suelo como para el estado nutricional de las plantas, están asociadas a dosis de fertilizantes a aplicar, de donde se selecciona aquella que corresponda a cada condición específica.

A partir de la diferencia entre el P aplicado y el exportado por la cosecha (método del balance), se pretende mantener un estado de fertilidad fosfórica del suelo estable en el tiempo (balance igual a “cero”), siempre que esa fertilidad se considere adecuada (Categoría Medio o Alto).

El método del balance permite incrementar la fertilidad fosfórica en suelos con P asimilable insuficiente (Bajo o Muy Bajo) aplicando más P del que se exporta del campo (“balance positivo”), hasta llevarlo a un estado óptimo de concentración de P asimilable.

Un “balance negativo” es apropiado para disminuir la concentración de P asimilable en suelos enriquecidos con P (Muy Alto), eliminando la aplicación del nutriente hasta tanto el análisis de suelo indique que la categoría fosfórica del suelo haya descendido a un nivel adecuado, momento a partir del cual se tratará de mantener un balance igual a “cero”.

Todo pareciera indicar que existe garantía de que en un agrosistema se aplique al suelo la cantidad de P requerida para el cultivo; sin embargo y desafortunadamente, esto no ha sido así, diversos aspectos han conllevado al enriquecimiento fosfórico del suelo.

Una cuestión muy común en la práctica agrícola, lo constituye el hecho de que al productor le satisface aplicar más nutriente que el recomendado, sin valorar también el impacto económico negativo que tiene esta práctica. Puede mencionarse también el hecho de aplicar fertilizante fosfórico químico o alguna enmienda con contenido de P apreciable y además, fertilizante orgánico. Esto es un comportamiento que se ha practicado por años en áreas ganaderas, sobre todo en países desarrollados ⁽²⁹⁾, donde las excretas del ganado son llevadas e incorporadas a los campos, pero casi siempre son los mismos campos los que reciben este tratamiento, ya que el traslado de excretas desde su origen a áreas alejadas de esta, encarece en demasía el proceso productivo. Otra cuestión que merece mencionarse está relacionada con la utilización de fórmulas de fertilizantes para el uso en la agricultura, con las que resulta complejo garantizar la dosis de alguno de los nutrientes sin exceder las necesidades de otro y casi siempre es el P el que se sobreestima. Algunas fórmulas utilizadas en la agricultura son:

10-10-10	17-17-17
12-12-12	21-7-14
15-15-15	9-13-17

Otra forma de aportar P al horizonte cultivable del suelo es mediante la acumulación biogénica o reciclaje del nutriente, el que se produce mediante la incorporación de raíces, las hojas senescentes, ramas, flores, frutos y los residuos de cosecha, que aportan en superficie parte del P que la planta extrae de los horizontes más profundos.

Impacto ambiental del enriquecimiento fosfórico del suelo

Efecto sobre fuentes de agua: Eutrofización

La eutrofización es definida de forma simple, como el sobre enriquecimiento con nutrientes de ecosistemas acuáticos que conlleva al crecimiento de las algas y a eventos anóxicos ^(2,30) o como el proceso de enriquecimiento orgánico o productividad biológica de un cuerpo de agua, acelerado por mayores aportes de nutrientes ⁽³¹⁾.

En respuesta al sobre enriquecimiento con nutrientes, el fitoplancton se modifica hacia una proliferación molesta de algas, que al descomponerse producen un olor fétido y provoca la disminución de oxígeno provocando la muerte de los peces ⁽¹¹⁾.

Otros problemas asociados con la eutrofización son la presencia de toxinas en el agua, pérdida de transparencia del agua y disminución de la luz que llega en profundidad, mal sabor del agua potable, desaparición de las plantas nativas y pérdida de la biodiversidad ⁽³²⁾.

La eutrofización es un problema también en muchas áreas costeras marinas, lo que viene provocando la muerte de los arrecifes coralinos.

Finalmente, la eutrofización tanto en fuentes de agua dulce como de agua salada, conlleva a la pérdida de los valores estéticos, ecológicos y económicos de los ecosistemas acuáticos.

Muchos ecosistemas acuáticos del mundo han estado sometidos a la eutrofización (América del Sur ⁽³³⁻³⁵⁾, Cuba ⁽³⁶⁻³⁸⁾, Europa ⁽³⁹⁾, China ⁽⁴⁰⁾, Australia ⁽⁴¹⁾, Africa del Sur ⁽⁴²⁾, India ⁽⁴³⁾, Estados Unidos ^(44,45)) (Tabla 2).

Tabla 2. Ejemplos de ecosistemas acuáticos que se han encontrado afectados por la eutrofización

Ecosistema
Río Santa Lucía, Uruguay
Lago Titikaka. Bolivia
Embalse La Juventud, Pinar del Río. Cuba; embalse Marenga, Ceará. Brasil
Río Los Guaos, Santiago de Cuba. Cuba
Río Ariguanabo, Artemisa. Cuba
Golfo de Batabanó, Mayabeque. Cuba
Mar Báltico, Mar Negro, Mar Mediterráneo, Atlántico Noreste. Europa
Lago Taihu, Lago Chaohu, Lago Dianchi, Río Yangtze. China
Estuario Peel-Harvey, Lago Mokoan, Río Darling. Australia
Reservorio Albert Falls, Reservorio Midmar, Reservorio Hartbeespoort, Lago costero Sibhayi, Lago costero Kuhlange entre otros. Sur Africa
Lago Sukhna. India
Everglades, Florida. Estados Unidos
Bahía Chesapeake, región Atlántico Medio, Estados Unidos

Además del N, el P es considerado como un componente clave que limita la calidad del agua dulce y causa la eutrofización en muchos lagos y en otras fuentes de agua ^(2,46,47). El incremento de la concentración de P en los cuerpos de agua se produce, entre otras causas, por la incorporación del nutriente por medio de la escorrentía que ocurren en suelos agrícolas ⁽⁴⁸⁻⁵⁰⁾.

De lo anterior se desprende que en la medida que las aplicaciones de P resulten más elevadas innecesariamente, tanto más riesgo de enriquecimiento fosfórico del suelo se tiene y a la vez, más riesgo de participar en los procesos de eutrofización de las fuentes de aguas. De ahí, la importancia de conocer cuánto P se requiere en cada condición, para suministrar el nutriente que satisfaga las exigencias y no más.

Efectos en el suelo

Es reconocido que el P posee baja solubilidad y poca movilidad en los suelos y este solo se puede reponer mediante la fertilización ^(51,52).

Cuando el fertilizante fosfórico se aplica y sus gránulos se disuelven con la humedad del suelo, se desarrollan reacciones entre el fosfato, los constituyentes del suelo y los compuestos no fosforados del fertilizante, las cuales remueven al nutriente de la fase líquida y lo convierten menos soluble ⁽⁵³⁾. Este fenómeno se conoce desde hace más de siglo y medio y es conocido como fijación o retención de P. Entre los constituyentes del suelo que participan en la fijación o retención del P, son reconocidos el carbonato de Ca y los óxidos y óxidos hidratados de Fe y Al, sugiriéndose que el P precipita como fosfato de Ca, de Fe o de Al, o que se enlaza químicamente a estos cationes en la superficie de los minerales del suelo ⁽⁵⁴⁾.

La retención de P con los cationes mencionados se le denomina adsorción y se considera una reacción de intercambio entre los iones fosfatos y los iones hidroxilos asociados con el metal.

En la medida que aumenta la concentración de aniones fosfatos, se incrementa el intercambio con los aniones $(OH)^-$, lo que hace aumentar la densidad de carga negativa del coloide y así, el pH de la solución ⁽⁵⁵⁾.

Se ha demostrado que soluciones concentradas de P descomponen a la caolinita, propiciando la precipitación de un compuesto Al-P ⁽⁵⁶⁾. También se ha encontrado que la adsorción de P propicia la liberación de $(SO_4)^{2-}$ y $(SiO_4)^{4-}$ y una elevación del pH de la solución, indicativo del reemplazo de los aniones mencionados y de los grupos $(OH)^-$; al incrementar la concentración de P, se produce un incremento abrupto en la liberación de $(SiO_4)^{4-}$ y no así de $(SO_4)^{2-}$, lo que sugiere que los minerales arcillosos silicatados se desorganizan y se desplaza el $[(SiO_4)^{4-}]$ ⁽⁵⁷⁾.

Se han presentado evidencias sobre la solubilización de la materia orgánica del suelo ocasionada por el fosfato mono y di amónico en los micro sitios de aplicación de las fuentes fosfóricas ⁽⁵⁸⁾.

El mecanismo propuesto para la explicación del comportamiento descrito antes, consiste en que el amonio de los fertilizantes reemplaza a varios iones metálicos di y tri valentes de los complejos estables de la materia orgánica, haciendo de esta manera que los complejos formados resulten más solubles, propiciando el movimiento de la materia orgánica por el perfil del suelo ⁽⁵⁹⁾.

Ante el exceso de P en el suelo, las plantas suelen manifestar suficiencia o exceso de P. Cuando esto ocurre, los contenidos de clorofila se reducen drásticamente debido a la manifestación de antagonismo con aniones como el NO_3^- , ya que la capacidad fotosintética y, por ende, la clorofila, están relacionadas directamente con el contenido de P y de N en la planta ⁽⁶⁰⁾.

Altas concentraciones de P en el suelo causan disminución en la absorción de Zn, bien por la formación de precipitados en el suelo o por procesos metabólicos en las plantas, que impiden la translocación del nutriente desde la raíz al resto de la planta ⁽⁶¹⁾.

Se ha demostrado que elevadas concentraciones de P en el suelo, hacen decrecer los niveles de colonización micorrízica ⁽⁶²⁻⁶⁵⁾, conducen a una supresión rápida del desarrollo del arbusculo e inhibe temporalmente el crecimiento de la colonización radical ⁽⁶⁶⁾.

CONSIDERACIONES GENERALES

La necesidad del uso del P en la agricultura es innegable; sin embargo, ese uso debe ser racional, en correspondencia con las necesidades del suelo y de la planta.

Aplicaciones excesivas de P traen aparejadas situaciones adversas para el ambiente y para la producción agrícola.

En esta revisión se ha tratado de ilustrar de forma breve, el origen del enriquecimiento fosfórico del suelo y los daños ambientales que vienen asociados a este fenómeno, entre los que se han destacado la eutrofización y en el suelo, el incremento del pH, la disminución del contenido de materia orgánica, la dispersión y descomposición de la caolinita, el antagonismo con otros nutrientes y la inhibición del funcionamiento micorrízico.

A partir de lo expuesto, se desprende que constituye una obligación actuar con eficiencia en el uso de los fertilizantes en general y de los fosfóricos en particular, que, además de lo costoso que resultan, proceden de fuentes agotables de la naturaleza, ya muy deprimidas.

Se impone entonces, establecer el mejor método de análisis de P asimilable para cada condición, conocer el estado actual de los suelos en cuanto a su disponibilidad fosfórica, actualizar los requerimientos externos e internos de P que poseen los cultivos, establecer nuevas categorizaciones de la disponibilidad fosfórica de los suelos, utilizar el método del balance (aporte menos exportación) acompañado del análisis del suelo para poder ajustar con mayor precisión las dosis de P a aplicar en cada condición y finalmente, investigar en condiciones de campo los efectos que pudiera tener el enriquecimiento en P sobre la fertilidad del suelo.

CONCLUSIONES

- Aplicaciones de fertilizantes con fósforo en los agrosistemas en el tiempo que superan las exportaciones realizadas por el producto cosechado provoca el enriquecimiento del suelo con el nutriente.
- El enriquecimiento del suelo con fósforo propicia que el nutriente participe en la eutrofización a partir de fenómenos erosivos.
- Elevadas concentraciones de fósforo en el suelo incrementan el pH, disminuyen el contenido de materia orgánica, dispersan y descomponen la caolinita, provocan el antagonismo con otros nutrientes e inhiben el funcionamiento micorrízico.

BIBLIOGRAFÍA

1. Sharpley AN, Daniel T, Sims T, Lemunyon J, Stevens R, Parry R. Agricultural phosphorus and eutrophication [Internet]. Second Edition. U.S: Department of Agriculture, Agricultural Research Service; 2003. Available from: <https://naldc.nal.usda.gov/download/26693/PDF>

2. Lee GF. Role of phosphorus in eutrophication and diffuse source control. In: *Phosphorus in Fresh Water and the Marine Environment* [Internet]. Elsevier; 1973. p. 111–28. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780080176970500134>
3. Delorme TA, Angle JS, Coale FJ, Chaney RL. Phytoremediation of phosphorus-enriched soils. *International Journal of phytoremediation* [Internet]. 2000;2(2):173–81. Available from: <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/15226510008500038>
4. Reijneveld JA, Ehlert PAI, Termorshuizen AJ, Oenema O. Changes in the soil phosphorus status of agricultural land in the Netherlands during the 20th century. *Soil use and management* [Internet]. 2010;26(4):399–411. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1475-2743.2010.00290.x>
5. Van Middelkoop JC, Van der Salm C, Ehlert PAI, De Boer IJM, Oenema O. Does balanced phosphorus fertilisation sustain high herbage yields and phosphorus contents in alternately grazed and mown pastures? *Nutrient Cycling in Agroecosystems* [Internet]. 2016;106(1):93–111. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10705-016-9791-0>
6. Tóth G, Guicharnaud R-A, Tóth B, Hermann T. Phosphorus levels in croplands of the European Union with implications for P fertilizer use. *European Journal of Agronomy* [Internet]. 2014;55:42–52. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1161030113001950>
7. Li M, Hu Z, Zhu X, Zhou G. Risk of phosphorus leaching from phosphorus-enriched soils in the Dianchi catchment, Southwestern China. *Environmental Science and Pollution Research* [Internet]. 2015;22(11):8460–70. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11356-014-4008-z>
8. Sharpley AN, Chapra SC, Wedepohl R, Sims JT, Daniel TC, Reddy KR. *Managing agricultural phosphorus for protection of surface waters: Issues and options*. 1994; Available from: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/54>
9. MacDonald GK, Bennett EM, Potter PA, Ramankutty N. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [Internet]. 2011;108(7):3086–91. Available from: <https://www.pnas.org/content/108/7/3086.short>
10. Daniel TC, Sharpley AN, Lemunyon JL. *Agricultural phosphorus and eutrophication: A symposium overview*. 1998; Available from: <https://pubag.nal.usda.gov/catalog/20276>
11. Bennett EM, Carpenter SR, Caraco NF. Human impact on erodible phosphorus and eutrophication: a global perspective: increasing accumulation of phosphorus in soil threatens rivers, lakes, and coastal oceans with eutrophication. *BioScience* [Internet]. 2001;51(3):227–34. Available from: <https://academic.oup.com/bioscience/article/51/3/227/256199?login=true>
12. Bruulsema TW. *Soil Fertility in the Northeast Region*. *Better Crops* [Internet]. 2006;90(1):8. Available from: [http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/0/AA3D55510F6A6E82852579800081DEC5/\\$FILE/Better%20Crops%202006-1%20p08.pdf](http://www.ipni.net/publication/bettercrops.nsf/0/AA3D55510F6A6E82852579800081DEC5/$FILE/Better%20Crops%202006-1%20p08.pdf)

13. Catma S, Collins A. Phosphorus Imbalances in the Chesapeake Bay Watershed: Can Forestland and Manure Processing Facilities Be the Answers? *Agricultural and Resource Economics Review* [Internet]. 2011;40(1):116–32. doi:<https://doi.org/10.1017/S106828050000455X>
14. Fischer P, Pöthig R, Venohr M. The degree of phosphorus saturation of agricultural soils in Germany: Current and future risk of diffuse P loss and implications for soil P management in Europe. *Science of The Total Environment* [Internet]. 2017;599:1130–9. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969717306629>
15. Hirte J, Richner W, Orth B, Liebisch F, Flisch R. Yield response to soil test phosphorus in Switzerland: Pedoclimatic drivers of critical concentrations for optimal crop yields using multilevel modelling. *Science of The Total Environment* [Internet]. 2021;755:143453. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720369849>
16. Cabrera A, Arzuaga J, Mojena M. Desbalance nutrimental del suelo y efecto sobre el rendimiento de tomate (*Lycopersicon solanum* L.) y pepino (*Cucumis sativus* L.) en condiciones de cultivo protegido. *Cultivos Tropicales* [Internet]. 2007;28(3):91–7. Available from: <https://www.redalyc.org/pdf/1932/193215844015.pdf>
17. Calderón Puig A, Lara Franquis D, Cabrera Rodríguez A. Confección de mapas temáticos para evaluar la fertilidad del suelo en las áreas agrícolas del Instituto Nacional de Ciencias Agrícolas. *Cultivos Tropicales* [Internet]. 2012;33(1):11–8. Available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258-59362012000100002&script=sci_arttext&tlng=en
18. Scheffe CR, Barlow KM, Robinson NJ, Crawford DM, McLaren TI, Smernik RJ, et al. 100 Years of superphosphate addition to pasture in an acid soil—current nutrient status and future management. *Soil Research* [Internet]. 2015;53(6):662–76. Available from: <https://www.publish.csiro.au/SR/SR14241>
19. Buczko U, van Laak M, Eichler-Löbermann B, Gans W, Merbach I, Panten K, et al. Re-evaluation of the yield response to phosphorus fertilization based on meta-analyses of long-term field experiments. *Ambio* [Internet]. 2018;47(1):50–61. Available from: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s13280-017-0971-1.pdf>
20. Gagnon B, Ziadi N. Papermill biosolids and alkaline residuals affect crop yield and soil properties over nine years of continuous application. *Canadian Journal of Soil Science* [Internet]. 2012;92(6):917–30. Available from: <https://cdnsiencepub.com/doi/full/10.4141/cjss2012-026>
21. Almeida FM de, Noval WT la, Cabrera-Rodríguez JA, Arzuaga-Sánchez J. Crecimiento de plantas de papa (*Solanum tuberosum* L. cv Romano), en la provincia de Huambo, Angola, bajo dos densidades de plantación. *Cultivos Tropicales* [Internet]. 2018;39(3):31–40. Available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S0258-59362018000300005&script=sci_arttext&tlng=pt

22. Cañizares PJG. Manejo efectivo de la simbiosis micorrízica arbuscular vía inoculación y la fertilización mineral en pastos del género *Brachiaria* [Internet]. Editorial Universitaria; 2014. Available from: <http://dx.doi.org/DOI: 10.13140/RG.2.2.27770.95685>
23. Espinosa CA. Factibilidad y beneficios de la inoculación micorrízica arbuscular en la producción de boniato (*Ipomoea batatas* (L.) Lam.) [Doctorado]. Universidad Agraria de la Habana, Mayabeque, Cuba; 2021. 100 p.
24. Bray RH, Kurtz LT. Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils. *Soil science* [Internet]. 1945;59(1):39–46. Available from: https://journals.lww.com/soilsci/Citation/1945/01000/Determination_of_Total,_Organic,_and_Available.6.aspx
25. Olsen SR. Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate [Internet]. US Department of Agriculture; 1954. Available from: https://books.google.es/books?hl=es&lr=&id=doam88x5agC&oi=fnd&pg=PA3&dq=Estimation+of+available+phosphorus+in+soils+by+extraction+with+sodium+bicarbonate&ots=zZYnTFkPTC&sig=Y_pfYNmPPs86TM41Udnz_PrC4dg#v=onepage&q=Estimation%20of%20available%20phosphorus%20in%20soils%20by%20extraction%20with%20sodium%20bicarbonate&f=false
26. Reid K, Schneider K, Joosse P. Addressing imbalances in phosphorus accumulation in Canadian agricultural soils. *Journal of environmental quality* [Internet]. 2019;48(5):1156–66. Available from: <https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.2134/jeq2019.05.0205>
27. Mehlich A. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* [Internet]. 1984 [cited 8/12/2021];15(12):1409–16. doi:10.1080/00103628409367568
28. Oficina Nacional de Normalización. NORMA CUBANA NC 52. Calidad del suelo. Análisis químico. Determinación de las formas móviles de fósforo y potasio. 1999.
29. Sharpley AN, McDowell RW, Kleinman PJ. Phosphorus loss from land to water: integrating agricultural and environmental management. *Plant and soil* [Internet]. 2001;237(2):287–307. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1013335814593>
30. Carpenter SR. Eutrophication of aquatic ecosystems: bistability and soil phosphorus. *Proceedings of the National Academy of Sciences* [Internet]. 2005;102(29):10002–5. Available from: <https://www.pnas.org/content/102/29/10002.short>
31. Sharpley A, Tunney H. Phosphorus research strategies to meet agricultural and environmental challenges of the 21st century. 2000; Available from: <https://acess.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq2000.00472425002900010022x>
32. Fernández-Marcos ML. Contaminación por fósforo procedente de la fertilización orgánica de suelos agrícolas. *Gestión de residuos orgánicos de uso agrícola*, no. May [Internet]. 2011;25–31. Available from: https://www.researchgate.net/profile/Lugo-Ibader/publication/338544738_Lopez_Mosquera_ME_Sainz_Oses_MJ_Coords_2011_Guia_de_residu

- os_organicos_de_uso_agricola_Santiago_de_Compostela_Servizo_de_Publicacions_Universidade_de_Santiago_de_Compostela/links/5e1b81ae4585159aa4cb51ec/Lopez-Mosquera-ME-Sainz-Oses-MJ-Coords-2011-Guia-de-residuos-organicos-de-uso-agricola-Santiago-de-Compostela-Servizo-de-Publicacions-Universidade-de-Santiago-de-Compostela.pdf#page=27
33. Aubriot L, Delbene L, Haakonsson S, Somma A, Hirsch F, Bonilla S. Evolución de la eutrofización en el Río Santa Lucía: influencia de la intensificación productiva y perspectivas. *Innotec* [Internet]. 2017;(14):7–16. Available from: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/6061/606164031001/606164031001.pdf>
34. Fontúrbel Rada F. Indicadores fisicoquímicos y biológicos del proceso de eutrofización del Lago Titikaka (Bolivia). *Ecología aplicada* [Internet]. 2005;4(1–2):135–41. Available from: http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-22162005000100018&script=sci_arttext&tlng=en
35. Wiegand MC, Piedra JIG, Araújo JC de. Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil). *Engenharia Sanitária e Ambiental* [Internet]. 2016;21:415–24. Available from: <https://www.scielo.br/j/esa/a/8NnDjzZqCmRGfDhqjGcGVXD/?format=html>
36. Marañón-Reyes AM, Pérez-Pompa NE, Dip-Gandarilla AM, González-Marañón A, Pérez-Silva RM, Ruiz-Estrella A. Evaluación temporal de la calidad de las aguas del río Los Guaos de Santiago de Cuba. *Revista Cubana de Química* [Internet]. 2014;26(2):115–25. Available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2224-54212014000200004
37. Miravet Sánchez BL, García Rivero AE, López Del Castillo P, Alayón García G, Salinas Chávez E. Calidad de las aguas del río Ariguanabo según índices físico-químicos y bioindicadores. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental* [Internet]. 2016;37(2):108–22. Available from: http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1680-03382016000200009&script=sci_arttext&tlng=pt
38. Montalvo JF, López García DB, Perigó E, Blanco M. Nitrógeno y fósforo en las aguas del Golfo de Batabanó, Cuba, entre los años 1999 y 2000. 2017; Available from: <https://aquadocs.org/handle/1834/12938>
39. Agency EE. Nutrient Enrichment and Eutrophication in Europe's Seas. Moving Towards a Healthy Marine Environment [Internet]. Publications Office of the European Union Luxembourg; 2019. Available from: <https://www.eea.europa.eu/publications/nutrient-enrichment-and-eutrophication-in>
40. Gao C, Zhang T. Eutrophication in a Chinese context: understanding various physical and socio-economic aspects. *Ambio* [Internet]. 2010;39(5):385–93. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13280-010-0040-5>
41. Davis JR, Koop K. Eutrophication in Australian rivers, reservoirs and estuaries—a southern hemisphere perspective on the science and its implications. *Hydrobiologia* [Internet]. 2006;559(1):23–76. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10750-005-4429-2>

42. Matthews MW, Bernard S. Eutrophication and cyanobacteria in South Africa's standing water bodies: A view from space. *South African journal of science* [Internet]. 2015;111(5):1–8. Available from: <https://journals.co.za/doi/abs/10.10520/EJC170780>
43. Arora SK. A Study of Eutrophication Phenomenon of a Lake of a Modern City of India. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)* [Internet]. 2016;5(Issue 06):470–3. Available from: <http://dx.doi.org/10.17577/IJERTV5IS060602>
44. Noe GB, Childers DL, Jones RD. Phosphorus biogeochemistry and the impact of phosphorus enrichment: Why is the Everglades so unique? *Ecosystems* [Internet]. 2001;4(7):603–24. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10021-001-0032-1>
45. Cramer S. An examination of levels of phosphorus and nitrogen in the chesapeake bay before and after the implementation of the chesapeake 2000 program. *The Public Purpose* [Internet]. 2014;12:65–77. Available from: <https://observer.american.edu/spa/publicpurpose/upload/2014-public-purpose-chesapeake-sam-cramer.pdf>
46. Dougherty WJ, Fleming NK, Cox JW, Chittleborough DJ. Phosphorus transfer in surface runoff from intensive pasture systems at various scales: A review. *Journal of environmental quality* [Internet]. 2004;33(6):1973–88. Available from: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq2004.1973>
47. Reid K, Schneider K, McConkey B. Components of phosphorus loss from agricultural landscapes, and how to incorporate them into risk assessment tools. *Frontiers in Earth Science* [Internet]. 2018;6:135. Available from: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/feart.2018.00135/full>
48. Hart MR, Quin BF, Nguyen ML. Phosphorus runoff from agricultural land and direct fertilizer effects: A review. *Journal of environmental quality* [Internet]. 2004;33(6):1954–72. Available from: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/jeq2004.1954>
49. Fischer P, Pöthig R, Gücker B, Venohr M. Estimation of the degree of soil P saturation from Brazilian Mehlich-1 P data and field investigations on P losses from agricultural sites in Minas Gerais. *Water Science and Technology* [Internet]. 2016;74(3):691–7. Available from: <https://iwaponline.com/wst/article-abstract/74/3/691/19426/Estimation-of-the-degree-of-soil-P-saturation-from>
50. Hayes MA, Jesse A, Tabet B, Reef R, Keuskamp JA, Lovelock CE. The contrasting effects of nutrient enrichment on growth, biomass allocation and decomposition of plant tissue in coastal wetlands. *Plant and Soil* [Internet]. 2017;416(1):193–204. Available from: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11104-017-3206-0>
51. McDowell RW, Sharpley AN. Phosphorus solubility and release kinetics as a function of soil test P concentration. *Geoderma* [Internet]. 2003;112(1–2):143–54. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016706102003014>

52. Takahashi S, Anwar MR. Wheat grain yield, phosphorus uptake and soil phosphorus fraction after 23 years of annual fertilizer application to an Andosol. *Field Crops Research* [Internet]. 2007;101(2):160–71. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378429006002097>
53. Sample EC, Soper RJ, Racz GJ. Reactions of phosphate fertilizers in soils. The role of phosphorus in agriculture [Internet]. 1980;263–310. Available from: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/1980.roleofphosphorus.c12>
54. Wild A. The retention of phosphate by soil. A review. *Journal of Soil Science* [Internet]. 1950;1(2):221–38. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/j.1365-2389.1950.tb00734.x>
55. Rajan SSS, Perrott KW, Saunders WMH. Identification of phosphate-reactive sites of hydrous alumina from proton consumption during phosphate adsorption at constant pH values. *Journal of Soil Science* [Internet]. 1974;25(4):438–47. Available from: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1974.tb01139.x>
56. Kittrick JA, Jackson ML. Electron-microscope observations of the reaction of phosphate with minerals, leading to a unified theory of phosphate fixation in soils. *Journal of Soil Science* [Internet]. 1956;7(1):81–9. Available from: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1956.tb00865.x>
57. Rājan SSS, Fox RL. Phosphate adsorption by soils: II. Reactions in tropical acid soils. *Soil Science Society of America Journal* [Internet]. 1975;39(5):846–51. Available from: <https://doi.org/10.2136/sssaj1975.03615995003900050019x>
58. Bell LC, Black CA. Comparison of methods for identifying crystalline phosphates produced by interaction of orthophosphate fertilizers with soils. *Soil Science Society of America Journal* [Internet]. 1970;34(4):579–82. Available from: <https://doi.org/10.2136/sssaj1970.03615995003400040013x>
59. Giordano PM, Sample EC, Mortvedt JJ. Effect of ammonium ortho- and pyrophosphate on Zn and P in soil solution. *Soil Science* [Internet]. 1971;111(2):101–6. Available from: https://journals.lww.com/soilsci/citation/1971/02000/effect_of_ammonium_ortho__and_pyrophosphate_on_zn.4.aspx
60. Singh SK, Reddy VR. Response of carbon assimilation and chlorophyll fluorescence to soybean leaf phosphorus across CO₂: Alternative electron sink, nutrient efficiency and critical concentration. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* [Internet]. 2015;151:276–84. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2015.08.021>
61. Malavolta E. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações/Eurípedes Malavolta, Godofredo Cesar Vitti, Sebastião Alberto de Oliveira.—2. ed., ver. e atual. Piracicaba: Potafos [Internet]. 1997; Available from: <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=sibur.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=003461>
62. Nagy R, Drissner D, Amrhein N, Jakobsen I, Bucher M. Mycorrhizal phosphate uptake pathway in tomato is phosphorus-repressible and transcriptionally regulated. *New Phytologist* [Internet].

- 2009;181(4):950–9. Available from: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1469-8137.2008.02721.x>
63. Breuillin F, Schramm J, Hajirezaei M, Ahkami A, Favre P, Druege U, et al. Phosphate systemically inhibits development of arbuscular mycorrhiza in *Petunia hybrida* and represses genes involved in mycorrhizal functioning. *The Plant Journal* [Internet]. 2010;64(6):1002–17. Available from: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/j.1365-313X.2010.04385.x>
64. Balzergue C, Puech-Pagès V, Bécard G, Rochange SF. The regulation of arbuscular mycorrhizal symbiosis by phosphate in pea involves early and systemic signalling events. *Journal of experimental botany* [Internet]. 2011;62(3):1049–60. Available from: <https://academic.oup.com/jxb/article/62/3/1049/478338?login=true>
65. Balzergue C, Chabaud M, Barker DG, Bécard G, Rochange SF. High phosphate reduces host ability to develop arbuscular mycorrhizal symbiosis without affecting root calcium spiking responses to the fungus. *Frontiers in plant science* [Internet]. 2013;4:426. Available from: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2013.00426/full?utm_source=newsletter&utm_medium=web&utm_campaign=Plant_Science-w48-2013
66. Kobae Y, Ohmori Y, Saito C, Yano K, Ohtomo R, Fujiwara T. Phosphate treatment strongly inhibits new arbuscule development but not the maintenance of arbuscule in mycorrhizal rice roots. *Plant Physiology* [Internet]. 2016;171(1):566–79. Available from: <https://academic.oup.com/plphys/article/171/1/566/6115000?login=true>