

Artículo de investigación

Efecto del tiempo de inundación sobre la disponibilidad del fósforo (P) en un suelo arrocero de los Llanos Occidentales, Venezuela

Effect of flood time on the availability of phosphorus (P) in a rice soil in the Western Plains, Venezuela

González-Pedraza Ana Francisca, Orellana Ricardo², González-Lanza Rafael³

¹Programa de Ingeniería Agronómica, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad de Pamplona, Colombia Email: anagonzalez11@gmail.com. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-4392-3724> ²Subproyecto de Edafología, Vicerrectorado de Producción Agrícola, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora, Guanare, Venezuela. 3350. Correo: rjorellana@unellez.edu.ve. ³Vicerrectorado de Producción Agrícola, Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora, Guanare, Venezuela. 3350.

RESUMEN

Se evaluó la influencia del tiempo de inundación sobre la disponibilidad de fósforo (P) en suelos cultivados con arroz provenientes del sector Potrero de Armo, municipio Araure, estado Portuguesa, Venezuela. Bajo condiciones controladas de laboratorio se llevó a cabo un experimento con un diseño de bloques al azar con tratamientos y 5 repeticiones por tratamiento en los cuales los suelos fueron sometidos a cinco períodos de inundación: T1: suelo seco (T1), T2: 2 horas, T3: 2 días, T4: 10 días y T5: 20 días. Se determinó el P disponible a través de las metodologías de Olsen y Bray 1. Los datos fueron sometidos a un análisis de la varianza, cuando éste resultó significativo ($p < 0,05$) se aplicó la prueba de comparación de medias de rangos múltiples de Duncan. Se observó un efecto significativo ($p < 0,05$) del tiempo de inundación sobre la disponibilidad de P por el método de Bray 1, mientras que en Olsen no fue significativo. Sin embargo, la concentración más alta de P se obtuvo por Olsen, indicando que esta metodología resultó ser más eficiente en la extracción del P disponible en estos suelos calcáreos bajo inundación. Se observó una disminución del P disponible durante el ensayo que posiblemente se debió a reacciones secundarias tales como la precipitación y/o readsorción del P por: i) minerales arcillosos del suelo; ii) oxihidróxidos ferrosos poco cristalinos y compuestos de Fe(II)-Fe(III) recién precipitados y iii) formación de fosfatos de calcio insolubles, en este último caso asociado a los altos niveles de carbonato de calcio encontrado en esos suelos.

Palabras clave: fósforo disponible, suelos inundados, métodos de extracción de P, óxidos de hierro.

ABSTRACT

The influence of the flood period on the availability of phosphorus (P) in soils cultivated with rice from the Potrero de Armo sector, Araure municipality, Portuguesa state was evaluated. Under controlled laboratory conditions, an experiment was carried out with a randomized block design with 5 treatments and 5 repetitions per treatment in which the soils were subjected to five flood periods: T1: dry soil (T1), T2: 2 hours, T3: 2 days, T4: 10 days and T5: 20 days. The available P was determined through the methodologies of Olsen and Bray 1. The data were subjected to an analysis of variance, when this was significant ($p < 0.05$), a Duncan multiple range mean comparison comparison test was applied. A significant effect ($P < 0.05$) of flood time on P availability was observed by the Bray 1 method, while in Olsen it was not significant. However, the highest concentration of P was obtained by Olsen, indicating that this methodology turned out to be more efficient in the extraction of the P available in these calcareous soils under flooding. A decrease in available P was observed during the test that was possibly due to secondary reactions such as precipitation and / or readsorption of P by: i) clay minerals from the soil; ii) slightly crystalline ferrous oxyhydroxides and recently precipitated Fe (II) -Fe (III) compounds and iii) formation of insoluble calcium phosphates, in the latter case associated with the high levels of calcium carbonate found in these soils.

Keywords: available phosphorus, flooded soils, P extraction method, calcareous soils, iron oxides.

Recibido: 28-04-2019

Aceptado: 30-05-2019

Publicado: 30-05-2019

Introducción

El fósforo (P) en suelos inundados está presente en formas orgánicas, inorgánicas y como sólidos ligeramente solubles, siendo el estado inorgánico es el más importante. En sus diferentes formas, el P en el suelo puede formar uniones orgánicas mediante la adsorción o formación de enlaces

químicos u orgánicos con otros minerales del suelo, y puede estar presente como: i) fosfatos disueltos en la solución del suelo, ii) adherido a las partículas del suelo, especialmente las arcillas, iii) fosfatos fijados a los minerales del suelo y precipitado como uniones químicas inorgánicas, y iv) fósforo ligado orgánicamente (Tian *et al.*, 2017; Xiao *et al.*, 2017).

Autor de correspondencia: González-Pedraza Ana F. Universidad de Pamplona, Facultad de Ciencias Agrarias. Pamplona, Colombia, Correo electrónico: anagonzalez11@gmail.com

El P no está directamente implicado en las reacciones de óxido-reducción del suelo inundado, pero debido a su poder de reacción con cierto número de elementos reducidos, forma parte también de los procesos derivados de la inundación (Sahrawat, 2012).

Cuando un suelo se inunda ocurren una serie de procesos microbiológicos y químicos que generan cambios sustanciales en las características físicas y químicas del suelo (Tian *et al.*, 2017; Shoja *et al.*, 2017). Bajo condiciones de inundación el intercambio de gases entre el suelo y el aire es reducido drásticamente, y unas pocas horas después de inundar un suelo, los microorganismos usan todo el oxígeno presente en el agua y en el suelo, proporcionando un ambiente prácticamente desprovisto de oxígeno molecular (Tian *et al.*, 2017).

Una vez que el O₂ ha sido agotado, la descomposición microbiana de la materia orgánica conlleva a la transferencia de electrones a aceptores alternativos como NO₃⁻, Fe₃⁺, Mn₂⁺, SO₄²⁻ y CO₂ (Sun *et al.*, 2007; Chacón *et al.*, 2006a; b; StemmLer y Berthelin, 2003).

El agotamiento del O₂ del suelo ejerce efecto sobre la composición y actividad de las comunidades microbianas (Noll *et al.*, 2005; Gelsomino *et al.*, 2006), sobre la tasa de descomposición de la materia orgánica (Gale y Gilmour, 1988; Updegraff *et al.*, 1995), sobre la disolución mineral (Chacón *et al.*, 2006a; b) y la disponibilidad de nutrientes (Silver *et al.*, 1999; Chacón *et al.*, 2006a; b; Gelsomino *et al.*, 2006). Tales cambios van a depender del tipo de suelo, naturaleza de la materia orgánica, tipo de aceptor de electrones presentes en el suelo y de las características de las comunidades microbianas (Tian *et al.*, 2017; Noll *et al.*, 2005; Baldwin y Mitchell, 2000).

El arroz (*Oryza sativa* L.) es uno de los principales cultivos que se siembran en los Llanos bajo condiciones de inundación, y al igual que todas las plantas requiere de una adecuada suplencia de elementos nutritivos en especial de nitrógeno, fósforo y potasio, entre otros, para su normal crecimiento y adecuada producción. Sin embargo, los suelos de los Llanos Occidentales son deficientes en fósforo, pero al ser inundados se incrementa su disponibilidad para ser aprovechado por la planta, lo que reduce la necesidad de aplicación de elevadas dosis de P en campos que han sido fertilizados anteriormente con este elemento (Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas, 2004).

La forma tradicional de determinar la disponibilidad de P en el suelo en todos los laboratorios a nivel nacional es a través del análisis de las muestras en estado seco, por lo que se plantea la interrogante de si realmente estos métodos se ajustan a las condiciones de inundación en que se encuentra el suelo cuando es sembrado con arroz, y si se están haciendo las extracciones correctas que nos permitan dar una recomendación más precisa en función a la cantidad de P que tiene el suelo y el que es necesario aplicarle, sobre todo cuando se trata de suelos que están bajo inundación, donde

los cambios biogeoquímicos que ocurren son totalmente diferentes a los ocurridos en estado seco.

Por otra parte, la cantidad de P en la solución de extracción depende del poder de extracción del método en uso (JanBen, 2004), por lo tanto, es necesario precisar un método apropiado para realizar los análisis de suelos a muestras en estado saturado.

En este sentido, el objetivo principal de este trabajo fue evaluar mediante las metodologías de Olsen y Bray 1 el efecto de diferentes períodos de inundación sobre la disponibilidad de P en suelos cultivados con arroz en Los Llanos Occidentales de Venezuela.

Materiales y métodos

Área de estudio

Con el fin de evaluar la dinámica del P disponible en suelos sometidos a diferentes períodos de inundación, se usaron muestras de suelo provenientes de una zona dedicada a la producción de arroz, la cual se encuentra ubicada en el sector Potrero de Armo con las siguientes coordenadas UTM: Este 487293 y Norte 1062018, del municipio Araure, Estado Portuguesa, correspondiente a los Llanos Occidentales de Venezuela.

Los Llanos Occidentales se caracterizan por presentar un clima seco, subhúmedo y magatémico, según la clasificación Thornthwaite (Bustillos y Martínez, 1974). Esta es una región de relieve bajo, cubierta por capas horizontales de sedimentos aluviales de la Formación Volcancito (Pinto, 1981; Carbón y Schubert, 1994).

El régimen hídrico se caracteriza por la presencia de un período seco que va desde diciembre hasta abril y un período lluvioso, desde mayo hasta noviembre, en el que ocurre el 85% de la precipitación anual. El promedio de precipitación anual está alrededor de 1400 mm de lluvia, los meses con los mayores registros son junio y julio, con unos 190 mm/mes. La evaporación promedio está alrededor de unos 2000 mm/año, siendo enero, febrero y marzo los meses con valores más altos, de 200 a 230 mm/mes (Paredes-Trejo *et al.*, 2018).

Los suelos del área de estudio se caracterizan por ser de texturas finas con altos contenidos de arcilla (FAL, FA, AL), porcentaje de materia orgánica medio, conductividad eléctrica baja, pH ligeramente alcalino y alto contenido de calcio (Tabla 1). Estos suelos son utilizados para la siembra del cultivo de arroz, tanto en el período seco como el lluvioso. Desde el punto de vista taxonómico este suelo es clasificado a nivel de orden como un Inceptisol (Carbón y Schubert, 1994).

Para corroborar las características de los suelos se realizó un análisis de rutina a las muestras de suelo seco, para conocer características químicas tales como el contenido de potasio (K), calcio (Ca), magnesio (Mg), materia orgánica (MO), conductibilidad eléctrica y pH, y características físicas tales como la textura (Tabla 1).

Tabla 1. Características físicas y químicas de los suelos estudiados

Características (0-20 cm)	Promedios
Textura	FAL-FA-AL
Arcilla (%)	44,22±6,76
pH (1:2)	7,23±0,23
Conductividad eléctrica (dS/m)	0,3±0,07
Materia Orgánica (%)	3,08±0,83
Fósforo (ppm) (Método Olsen)	20,7±1,82
Calcio (ppm)	5620±1344,94
Magnesio (ppm)	430±95,85
Potasio (ppm)	85±30,41

Valores promedios ± desviación estándar. Fuente: Autores.

Se seleccionó un área de 15 hectáreas separada en 5 lotes y se tomaron 5 muestras compuestas de 20 submuestras del horizonte A (0-20 cm), es decir, una muestra compuesta por lote. Las muestras de suelos se tomaron al inicio del período de lluvias, durante el proceso de inundación y preparación del terreno para la siguiente siembra.

Las muestras de suelo fueron transportadas inmediatamente al laboratorio de análisis y procesamiento de suelos “Gustavo Campero”, perteneciente a la Universidad Nacional Experimental de los Llanos Occidentales Ezequiel Zamora (UNELLEZ) donde procesadas para realizar los respectivos análisis.

Incubación de los suelos

Se pesaron 20 g de suelo y se colocaron en frascos plásticos de 100 mL que contenían 50 mL de agua desmineralizada (relación 1: 2,5), para crear la condición de total inundación. Las muestras se dejaron incubando por períodos de 2 horas, 2, 10, y 20 días. Cinco replicas por tratamiento por cada método fueron cosechadas destructivamente (condición inicial de suelo seco, 2, 10, y 20 días de incubación bajo condiciones inundación) para las determinaciones del contenido de P disponible por los métodos de Olsen y Bray 1.

Determinación del contenido de P disponible a través de la metodología de Olsen

La determinación del contenido de P disponible se realizó siguiendo el método de Olsen (Olsen *et al.*, 1945), a través de la extracción con bicarbonato de sodio (NaHCO₃) 0,5 M a pH 8,5. En suelos calcáreos que contiene fosfatos de calcio, este extractante disminuye la concentración de calcio en la solución debido a que causa una precipitación del calcio como carbonato de calcio (CaCO₃); y como resultado aumenta la concentración de P en la solución (Olsen *et al.*, 1945).

Se tomó 1 g de suelo seco (previamente molido y tamizado través de la malla N° 30, < 2 mm de diámetro) en la condición inicial (suelo seco) y 1,6 g de suelo saturado aproximadamente, el cual es equivalente a 1 g de suelo seco,

y se colocaron en tubos de centrifuga a los que se les adicionó 20 mL de bicarbonato de sodio (NaHCO₃) 0,5 M a pH 8,5. Los tubos con suelo más solución se agitaron por 30 minutos, se dejaron reposando y se pasaron a través de filtros Whatman N° 42. La determinación de P disponible se hizo por el método colorimétrico de Murphy y Riley (1962).

Determinación del contenido de p disponible a través de la metodología de Bray 1.

La determinación del contenido de P disponible se hizo siguiendo el método de Bray 1 (Bray y Kurtz, 1945), a través de la extracción con fluoruro de amonio (NH₄F) 1,0 N y ácido clorhídrico (HCl) 0,5N. La combinación de NH₄F y HCl ha sido diseñada para remover fácilmente formas de P solubles en ácido, en gran parte fosfatos de calcio, y una proporción de los fosfatos de Fe y Al (Bray y Kurtz, 1945).

Se tomaron 2 g de suelo seco (previamente molido y tamizado través de la malla N° 30, <2 mm de diámetro) en la condición inicial (suelo seco) y 3,2 g de suelo saturado aproximadamente, el cual es equivalente a 2 g de suelo seco, y se colocaron en tubos de centrifuga a los que se les adicionó 20 mL de solución extractora de fluoruro de amonio 1,0 N y ácido clorhídrico 0,5 N. Los tubos con suelo más solución se agitaron por 1 minuto, se dejaron reposando por 10 minutos y se filtraron a través de filtros Whatman N° 42. La determinación de P disponible se hizo por el método colorimétrico de Murphy y Riley (1962).

Determinación del pH del suelo

En cada uno de los tratamientos se determinó el pH del suelo en una relación 2:5, en los tratamientos de inundación se determinó inmediatamente al momento de las cosechas.

Determinación de la humedad del suelo

Se determinó el contenido de humedad del suelo mediante el método gravimétrico, expresado como el porcentaje de agua en peso en 100 g de suelo. Las muestras tomadas en campo fueron pesadas, secadas al horno por 48 horas a 105°C, pesadas nuevamente y la diferencia de peso húmedo y peso seco expresado en porcentaje nos permitió conocer el contenido de humedad del suelo. Este procedimiento fue de utilidad para determinar el peso que debían tener las muestras en condición de inundación para el análisis, ya que la metodología normal se hace en suelo seco. El porcentaje de humedad de las muestras de suelo totalmente saturadas correspondió en promedio a un 62%.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se hizo por separado para cada método. Se utilizó un análisis de la varianza (ANOVA) de una vía para evaluar las diferencias entre los tratamientos en el contenido de P disponible. Cuando el ANOVA fue significativo ($p < 0,05$) se aplicó una prueba de comparación de medias de rangos múltiples de Duncan. También se hizo un análisis de correlación de Pearson para las variables pH y contenido de P (ppm) disponible en el suelo. Para el análisis

estadístico de los datos recolectados se utilizó el paquete estadístico SAS versión 6,12 (1998).

Resultados

Concentración de P (ppm) disponible a través de la metodología de Olsen para los diferentes períodos de inundación

Según los resultados obtenidos en el análisis de la varianza, el modelo resultó no significativo ($p > 0,05$) cuando se usó la metodología de Olsen para la determinación del P disponible en el suelo saturado (Tabla 2).

Tabla 2. Análisis de la varianza para la variable P (ppm) disponible a diferentes períodos de inundación por el método Olsen.

Fuentes de variación	de	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Valor de F	Pr > F
Modelo		8	126,50	1,97	0,12
Período		4	49,90	1,55	0,32
Repetición		4	76,60	2,38	0,005
Error		16	128,50		
Total corregido		24	255,00		

$r^2 = 0,49$; CV = 12,54%; Media P: 22,6. Fuente: Autores.

Aunque el modelo no fue significativo, el comportamiento del contenido de P (ppm) disponible presentó una tendencia irregular durante los diferentes períodos de inundación. A las 2 horas de inundación (T2) el P disponible comenzó a aumentar ($24,8 \pm 2,93$), para luego disminuir durante el resto del ensayo (T3: $21,5 \pm 3,26$, T4: $23 \pm 3,26$, T5: $23 \pm 2,4$), sin llegar a alcanzar los valores obtenidos en la condición inicial de suelo seco (T1: $22,3 \pm 4,54$) (Tabla 3).

Tabla 3. Valores promedios de P disponible (ppm) obtenidos por el método Olsen durante los diferentes tiempos de inundación

Método Olsen		
Tratamientos	Descripción	P (ppm)
T1	Condición inicial	$20,7 \pm 1,82^a$
T2	2 horas de inundación	$24,8 \pm 2,93^a$
T3	2 días de inundación	$21,5 \pm 3,26^a$
T4	10 días de inundación	$23 \pm 3,26^a$
T5	20 días de inundación	$23 \pm 2,4^a$

Valores promedios \pm desviación estándar seguidos por letras distintas indican diferencias entre los tratamientos. Fuente: Autores.

Concentración de P (ppm) disponible a través de la metodología de Bray 1 para los diferentes tiempos de inundación.

De acuerdo con el análisis de la varianza se encontró un efecto altamente significativo ($p < 0,01$) del modelo utilizado (Tabla 4).

Tabla 4. Análisis de la varianza para la variable P (ppm) disponible a diferentes tiempos de inundación por el método Bray 1.

Fuentes de variación	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Valor de F	Pr > F
Modelo	8	131,08	6,03	0,0012**
Período	4	128,54	11,83	0,0001
Repetición	4	2,54	0,23	0,9153
Error	16	43,46		
Total corregido	24	174,54		

**Altamente significativo ($p < 0,01$). $r^2 = 0,75$. CV = 17,88 Media P (ppm) 9,22. Fuente: Autores.

Al realizar la prueba de Duncan para comparación de medias, se encontraron diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,01$) en la concentración de P (ppm) disponible entre los tratamientos 1 ($5,3 \pm 1,82$), 2 ($8,9 \pm 1,52$) y 3 ($12 \pm 1,41$), mientras que los tratamientos 4 ($10,8 \pm 1,2$) y 5 ($9,1 \pm 1,56$) solamente presentaron diferencias con el tratamiento 1. El contenido de P (ppm) determinado por Bray 1 fue aumentando con el período de inundación, y resultó ser significativamente ($P < 0,01$) más alto ($12 \pm 1,41$ ppm) para el tratamiento 3 con respecto al resto de los tratamientos. Al inicio del período de inundación el contenido de P (ppm) disponible comenzó a aumentar hasta llegar a un máximo en el tratamiento 3, y posteriormente fue disminuyendo al final del ensayo (Tabla 5).

Tabla 5. Valores promedios de P disponible (ppm) obtenidos por el método Bray 1 durante los diferentes períodos de inundación.

Método Bray 1		
Tratamientos	Descripción	P (ppm)
T1	Condición inicial	$5,3 \pm 1,82^c$
T2	2 horas de inundación	$8,9 \pm 1,52^b$
T3	2 días de inundación	$12 \pm 1,41^a$
T4	10 días de inundación	$10,8 \pm 1,2^{ab}$
T5	20 días de inundación	$9,1 \pm 1,56^b$

Valores promedios \pm desviación estándar seguidos por letras distintas indican diferencias entre los tratamientos. Fuente: Autores.

Variación del pH del suelo con relación al tiempo de inundación

En términos generales se puede apreciar que el pH en los primeros días de inundación subió, pero nuevamente volvió a bajar al final del ensayo (Tabla 6).

Tabla 6. Variación del pH del suelo en cada uno de los tratamientos.

Tratamientos	Descripción	pH
T1	Condición inicial suelo seco	7,23±0,23 ^a
T2	2 horas de inundación	7,54±0,50 ^a
T3	2 días de inundación	7,10±0,21 ^a
T4	10 días de inundación	7,36±0,33 ^a
T5	20 días de inundación	7,16±0,17 ^a

Valores promedios ± desviación estándar seguidos por letras distintas indican diferencias entre los tratamientos. Fuente: Autores.

Correlación entre el pH del suelo y la disponibilidad de P

Los valores de pH influyen sobre el equilibrio de los hidróxidos, carbonatos, sulfatos, silicatos y los fosfatos en suelos inundados. Este equilibrio regula la precipitación y disolución de sólidos, la adsorción y desorción de iones. En suelos alcalinos el incremento en la solubilidad del P es una consecuencia de la disminución del pH de estos por efecto de la inundación, debido a un aumento en la solubilidad de la hidroxiapatita cuando el pH disminuye (Tian *et al.*, 2017, Shenker *et al.*, 2005). A este respecto, en este estudio se hizo un análisis de correlación de Pearson entre el comportamiento del P y el pH en los diferentes tratamientos, para ambos métodos, Olsen y Bray 1, el cual indicó que no existe correlación ($P>0,05$) (Tabla 7).

Tabla 7. Análisis de correlación entre el pH del suelo y el contenido de P (ppm) disponible

	Olsen	Bray 1
Coefficiente de correlación de Pearson	-0,28277	0,02130
Nivel de significancia	0,1708	0,9195

Fuente: Autores

Discusión

Concentración de P (ppm) disponible a través de la metodología de Olsen

Es importante recordar que estos suelos son sembrados con arroz dos veces al año, y que además son fertilizados con nitrógeno, fósforo y potasio durante cada ciclo del cultivo. Por lo tanto, es posible encontrar algún fósforo residual de la siembra anterior que haya quedado fijado en los coloides del suelo, como las arcillas y la materia orgánica.

El aumento en la concentración de P extraído por el método Olsen está en concordancia con lo reportado por la literatura (Dobermann y Fairshurts, 2000; Ferrando *et al.*, 2002; Slaton *et al.*, 2002; Shenker *et al.*, 2005; Chacón *et al.*, 2006a; Christophoridis y Fytianos, 2006). Ese aumento de P probablemente está asociado con la solubilización de fosfatos de calcio debido al alto contenido de ese elemento encontrado

en las muestras de suelo analizadas y a la disolución reductiva de óxidos de hierro (Shenker *et al.*, 2005).

Durante el tiempo que duró el experimento el P logró alcanzar un máximo a las dos horas de inundación (24,8±2,93 ppm) que luego disminuyó hasta un valor relativamente estable a los 20 días de inundación. En este sentido, el P liberado pudo precipitar nuevamente como la forma mineral antes señalada o quizás fue readsorbido por las superficies de las arcillas, en especial en estos suelos cuyo contenido de arcilla es bastante alto (44,22%).

Concentración de P (ppm) disponible a través de la metodología de Bray 1

Al igual que lo observado con la metodología de Olsen, los resultados de este ensayo concuerdan con los reportados por diferentes autores (Tian *et al.*, 2017; Dobermann y Fairshurts, 2000; Ferrando *et al.*, 2002; Slaton *et al.*, 2002, Shenker *et al.*, 2005, Chacón *et al.*, 2006a; Christophoridis y Fytianos, 2006) quienes han encontrado que la inundación puede causar un aumento en el contenido de P en el suelo, fenómeno que lo atribuyen a procesos tales como la solubilización de fosfatos de calcio, disolución de la apatita, causada por una presión más alta de CO₂ en la solución del suelo, mineralización de P orgánico, liberación del P desde las arcillas y precipitación del calcio (Ca) como CaCO₃.

Shenker *et al.* (2005) también sugiere que el casi persistente equilibrio de los minerales de Ca-P en suelos con altos contenidos de calcita está relacionado principalmente a la precipitación del P liberado a partir de la disolución reductiva de hidróxidos férricos presentes en el suelo, más que a la disolución de los minerales de Ca-P. Esos autores además señalan que en un sistema controlado por calcita y minerales de Ca-P, se debe suponer que las concentraciones de Ca y P aumentan y disminuyen simultáneamente con relación al cambio del pH. Asimismo, demostraron que la liberación de P es usualmente independiente de la disolución de Ca, pero que una combinación de procesos no puede ser la regla. Por su parte, Velázquez *et al.* (2004) también encontraron en suelos calcáreos que la inundación causó la disolución reductiva de compuestos de Fe, y que posterior a la oxidación estos compuestos pueden nuevamente precipitar a formas de Fe pobremente cristalinas.

Chacón (1995) reportó un aumento significativo del fosfato nativo con la inundación en suelos con pH por encima de 6, aumentando rápidamente desde un valor inicial de 0,05 ppm hasta un valor de 0,35 ppm a los 9 días de inundación, el cual se mantiene durante el resto del período de inundación, atribuyendo este comportamiento entre otras cosas al pH de 6,5 y a su alto contenido de materia orgánica (4,5%). De Datta (1986) señala que el aumento en la concentración del P después de la inundación es más alta en suelos calcáreos arenosos escasos en hierro, moderados en suelos ácidos arenosos bajos en hierro, pequeños en las arcillas casi neutras y mínimos en las arcillas ferrolíticas.

En este ensayo, se observó que con ambos métodos de extracción (Olsen y Bray 1) el P disponible aumentó con el período de inundación del suelo hasta llegar a un nivel máximo, y posteriormente comenzó a bajar.

La disminución de la disponibilidad de fosfatos puede deberse también a la formación de complejos insolubles de P órgano-minerales (Patrick y Mahapatra, 1968), y a una coprecipitación del P con el CaCO_3 (Olila y Reddy, 1997). Dobermann y Fairhurst (2000) mencionan que dos a cuatro semanas después de la inundación, el flujo inicial de P disponible sigue un período donde se reduce la disponibilidad debido a la adsorción de P en las partículas de arcilla, o destrucción de la materia orgánica que se había intercambiado con los iones fosfato.

La disminución en la disponibilidad de fósforo también ha sido atribuida a reacciones de adsorción, precipitación y sustituciones isomórficas. Así, los iones fosfatos liberados por reacciones de solubilización de la hidroxiapatita y por la descomposición de la materia orgánica pueden ser readsorbidos por las arcillas y por los oxihidroxidos de aluminio en la zona aeróbica, o pueden difundirse a zonas oxidadas y ser nuevamente precipitados (Tian *et al.*, 2017).

La cantidad de carbonato reactivo es considerado un factor clave en la precipitación de fosfatos de calcio, debido a que éstos que son menos solubles han sido formados en suelos más ricos en carbonato reactivo que en suelos con poco carbonato reactivo (Castro y Torrent, 1998). Darke y Walbridge (2000) también sugieren que la disminución drástica del P bajo condiciones de anaerobiosis puede estar asociada a un proceso de inmovilización microbiano. En este sentido, la química del P en estos suelos pudiera estar más relacionada con la formación de complejos con los carbonatos de calcio, especialmente porque se trata de suelos con pH alto, con un alto contenido de Ca (Tabla 1), ya que, en suelos ácidos, el P forma compuestos complejos con el hierro y el aluminio (Adams, 1995). Por otro lado, se ha encontrado una baja estimación de P disponible en estos suelos calcáreos a través del método Bray 1, que ha sido atribuida a la rápida neutralización del ácido por CaCO_3 (Blanchar y Caldwell, 1964; Randall y Grava, 1971). Otros resultados, indican que un mecanismo adicional está relacionado con la formación de CaF_2 y su reacción con la calcita para inmovilizar P (Syers *et al.*, 1972; Smillie y Syers 1972). Cuando estos mecanismos operan es común encontrar problemas en la discusión de la dinámica del P en el suelo.

En general el método Bray 1 ha sido más exitoso en suelos ácidos. Smith *et al.* (1957) encontraron que la adición de NH_4F 0,03 N y HCl 0,025 N disminuyó el P extractable del medio de 306 a 37 ppm en 12 suelos calcáreos, pero la adición de NH_4F 0,03 N con HCl 0,025 N aumentó tres a cuatro veces el P extractable desde los fosfatos de Fe y Al. Dobermann y Fairhurst (2000) señalan que la extracción de P con el método de Olsen en muestras de suelo seco es más versátil para los suelos cultivados con arroz en zonas bajas porque puede usarse en un amplio intervalo de pH, y porque

mide también el P que se hace disponible a través de la solubilización inducida por las condiciones anaeróbicas de la rizósfera. Estos mismos autores señalan que las extracciones ácidas (Bray 1, Bray 2, Mehlich 1) son más adecuadas para medir la cantidad de P disponible en suelos ácidos de zonas bajas y zonas altas cultivadas con arroz. Por su parte, González (2000) obtuvo un comportamiento similar, utilizando el método de Olsen reportó una media de 28,5 ppm de fósforo, mientras que por Bray 1 obtuvo un valor de 7,3 ppm, independientemente de la condición de humedad del suelo.

De acuerdo con los resultados obtenidos en esta investigación, indistintamente de estar saturados los suelos al momento de realizarse las extracciones de P, el método de Olsen tuvo más poder de extracción lo cual es explicado por el hecho de que es un extractante que ha sido desarrollado para el análisis de P en suelos calcáreos (Olsen *et al.*, 1954). Además, se ha encontrado que los reactivos ácidos son más apropiados para suelos ácidos, mientras que los bicarbonatos a pH 8,5 se usan en suelos alcalinos y calcáreos (SCCS 2000).

Analizando los resultados encontrados en las metodologías de Olsen y Bray 1, el valor promedio de P (ppm) disponible obtenido por el método de Bray 1 ($9,22 \pm 2,54$ ppm de P) se considera como un nivel bajo en el suelo, mientras que, por el método de Olsen, el nivel de P disponible es considerado como medio ($22,92 \pm 1,22$ ppm de P), ambos para suelos de textura media (franco arcillo arenoso) (Palmaven, 1992).

Debido a que ambos métodos dan resultados diferentes, se hace casi imposible lograr una buena correlación entre ellos, debido a que ambos métodos usan reactivos químicos diferentes. Es importante destacar que el pH de los suelos estaba por encima de 7, lo que quiere decir que el reactivo utilizado por el método Bray 1 no tiene la capacidad de extraer la mayor cantidad de P disponible, comparado a la capacidad de extracción de P que tienen los reactivos empleados por el método Olsen.

Variación del pH del suelo con relación al tiempo de inundación

Generalmente en suelos calcáreos los valores de pH están relacionados con la interacción $\text{CaCO}_3\text{-H}_2\text{O-CO}_2$. La disminución en el pH después de la inundación probablemente se deba a la acumulación de CO_2 producida por la respiración de bacterias aeróbicas. Casi siempre se ha encontrado que los valores de pH en suelos calcáreos inundados son más bajos que en los suelos bajo condiciones aeróbicas debido a la acumulación de CO_2 , ya que el pH en suelos calcáreos es muy sensible a la presión parcial de CO_2 (Ding *et al.*, 2019).

De Datta (1986) menciona que pocas semanas después de la inundación, el pH de suelos alcalinos y calcáreos disminuye, cambio que es atribuido a factores como: acumulación de amonio, cambio de bióxido de carbono a metano en condiciones de reducción. Wild (1992) también señala que la

inundación determina, durante el primer o segundo día, una disminución del pH del terreno, seguido por un aumento, hasta alcanzar un valor estable de 6,5 a 7,5.

El descenso del pH en suelos inundados calcáreos es regulado básicamente por el sistema $\text{CaCO}_3\text{-CO}_2\text{-H}_2\text{O}$. La proporción y grado de los cambios del pH depende de las propiedades del suelo y de la temperatura. Así mismo, en suelos alcalinos y calcáreos, la materia orgánica aumenta la disminución en el pH. Los terrenos de pH alcalino, y de forma similar aquellos ácidos, pasan a un pH neutro pocos días después de la inundación (De Datta 1986).

Correlación entre el pH del suelo y la disponibilidad de P

En este estudio el pH no influyó sobre la disponibilidad de fósforo en el suelo. A este respecto, Shenker *et al.* (2005) también encontraron poca variación en el pH poco durante la inundación del suelo y la dinámica del P se debió más bien a la disolución de P a partir de minerales Ca-P y a la disolución reductiva de hidróxidos férricos.

En función a lo antes expuesto, la química del P en los suelos alcalinos o calcáreos es muy compleja debido a que el P puede estar presente como compuestos orgánicos e inorgánicos solubles en la solución del suelo, fosfatos de calcio escasamente solubles, formas orgánicas insolubles como la biomasa del suelo, residuos de plantas y animales, parte de la materia orgánica del suelo (humus), y fosfatos fijados en minerales silicatados (Tian *et al.*, 2017; Stevenson y Cole, 1999).

Numerosos estudios han demostrado que la mayoría del fósforo aplicado al suelo en formas solubles en agua como los fosfatos monocálcicos no permanece de la misma manera, sino que puede ser convertido a formas insolubles o formas complejas, además de ser objeto de transformaciones de adsorción y precipitación. En este sentido, el pH es importante debido a que gobierna las reacciones de fijación, y así la disponibilidad de P para las plantas. Para la mayoría de los suelos, una máxima disponibilidad puede esperarse en suelos con un intervalo de pH desde ligeramente ácido a neutro (Fassbender y Bornemisza 1987; Brady y Weil, 1999).

Otro de los mecanismos que ha sido desarrollado para explicar la fijación de P en los suelos es la adsorción de P sobre los minerales arcillosos, mediante reacciones como el acoplamiento del calcio sobre el complejo de intercambio para formar el enlace arcilla-Ca- PO_4 . Este fenómeno es mucho mayor en minerales arcillosos del tipo 1:1 que para los 2:1, y puede ser explicado por el alto contenido de grupos Al-OH expuestos (Stevenson y Cole, 1999).

El alto contenido de calcio encontrado en los suelos analizados en este estudio puede estar influyendo negativamente en la disponibilidad de fósforo, debido a la formación de compuestos de fosfatos de calcio más complejos e insolubles como la apatita. La apatita es un compuesto complejo insoluble de fosfato tricálcico cuya fórmula empírica es $3[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]\cdot\text{CaX}_2$. Donde X puede ser

Cl^- , F^- , OH^- , o CO_3^{2-} . Los minerales más comunes son cloro, flúor, y carbonatoapatitas. Estos minerales son altamente insolubles en agua y, por lo tanto, el P no está disponible inmediatamente para las plantas (Fassbender y Bornemisza, 1987; Stevenson y Cole, 1999).

En suelos calcáreos, los fosfatos dicálcicos y tricálcicos [$\text{Ca}_2(\text{HPO}_4)_2$ y $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$] menos solubles son formados y convertidos gradualmente a carbonatos de hidroxiapatita $3[\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2]\cdot\text{CaCO}_3$. Este compuesto es altamente insoluble y no es buena fuente de P para las plantas, pero su disponibilidad puede aumentar en presencia de plantas en activo crecimiento a través de la acción de los ácidos orgánicos secretados por las raíces de estas, o sintetizados por los microorganismos en la rizósfera (Stevenson y Cole, 1999).

Adicionalmente, la potencial presencia de óxidos de hierro, evidenciada por los moteados rojos observados en campo puede estar jugando un papel fundamental en la dinámica del P en estos suelos. A este respecto, Luo *et al.* (2009) señalaron que la presencia de óxidos de hierro amorfos y poco cristalinos en ambientes calcáreos inundados afectaron la adsorción y liberación de P debido a la alta energía de adsorción que presentan estos compuestos en sus superficies.

En este sentido, la mayoría del P aplicado al suelo como fertilizantes, con frecuencia 90% o más, no es tomado por los cultivos, sino que es retenido como formas insolubles o fijado. Mientras una parte del P residual puede ser usado por la cosecha siguiente, futuras aplicaciones de fertilizante son a menudo requeridas para mantener un alto rendimiento de los cultivos. Repetidas aplicaciones de P en cantidades que exceden a las aprovechadas por el cultivo pueden resultar inevitablemente en una acumulación de P en el suelo (Stevenson y Cole, 1999; Takahashi, 2007). Al aumentar la capacidad de fijación de P, la respuesta a los fertilizantes disminuye, debido a que la fijación está directamente ligada a la retención superficial del P en los suelos (Fassbender, 1987).

En forma general se ha encontrado que los suelos en los Llanos Occidentales son deficientes en P, pero al ser inundados incrementa su disponibilidad para ser aprovechado por la planta, lo cual reduce la necesidad de aplicación de elevadas dosis de fertilizantes, especialmente en campos que han sido fertilizados anteriormente (Álvarez, 1997). Según los resultados obtenidos en este ensayo, hay que ser muy cuidadoso al momento de aplicar fertilizantes fosforados en estos suelos, debido a las características físicas y químicas que presentan, y que hacen pensar que allí estén ocurriendo procesos de fijación y de transformación del P a formas insolubles como el fosfato tricálcico, además de formar complejos con los minerales arcillosos.

Bajo estas circunstancias normalmente se recomiendan aplicar altas dosis de fertilizantes, en esta zona de los Llanos se recomienda aplicar aproximadamente 46 Kg de P_2O_5 /ha al momento de la siembra, incorporados al suelo (Álvarez,

1997). En función a los resultados obtenidos, es necesario aplicar fertilizantes fosforados al cultivo de arroz, debido a que las plantas pueden llegar a sufrir deficiencias de este. Aunque el problema del P en la agricultura no es la compensación de este extraído por las plantas, sino el uso de estrategias de manejo de los fertilizantes para lograr una utilización adecuada de las cantidades aplicadas (Zhang et al., 2006).

Conclusiones

La metodología de Olsen resultó ser más eficiente en la extracción del P disponible en suelos calcáreos bajo condiciones de inundación.

El tiempo de inundación del suelo afectó la dinámica del P.

El P del suelo posiblemente se esté liberando a partir de la solubilización de los fosfatos de calcio, del intercambio aniónico sobre las arcillas y la reducción de Fe(III) a Fe(II), que aunque no fueron determinados se presume que pudieran estar presente en estos suelos.

El P liberado sufrió reacciones secundarias debido a la ligera precipitación y/o readsorción del P por los minerales arcillosos del suelo, por los oxihidróxidos ferrosos poco cristalinos y compuestos de Fe(II)-Fe(III) recién precipitados y la formación de fosfatos de calcio insolubles.

La poca e inconsistente variación del pH del suelo no explica la dinámica del P con ambos métodos de extracción.

Recomendaciones

Evaluar otro tipo de métodos de extracción de P en suelos inundados, y comparar con Olsen y Bray 1, con el fin de hacer mejores estimaciones del contenido de P disponible.

Determinar en el laboratorio la presencia de carbonatos de calcio y óxidos de Fe pobremente cristalinos y amorfos y correlacionarlos con el comportamiento del P a lo largo del período de inundación, para poder determinar con mayor exactitud cuales son los mecanismos que intervienen en la dinámica del P bajo esas condiciones de suelos calcáreos.

Aumentar el tiempo de inundación del suelo en condiciones de laboratorio con el fin de simular las condiciones de campo y evaluar el comportamiento del P a en períodos de tiempo más prolongados.

Extrapolar los resultados obtenidos en el laboratorio a ensayos en campo, para hacer recomendaciones de dosis de fertilizantes fosforados más adecuadas y correlacionarlas con los rendimientos del cultivo.

Hacer los análisis de suelos cultivados con arroz usando muestras con al menos 2 horas en condiciones reducidas debido a la mayor disponibilidad de P obtenida en ese tiempo con el fin de disminuir la cantidad de P a aplicar al cultivo.

Referencias

- Adams, M. (1995). *Fundamentos de química de suelos*. Universidad Central de Venezuela. Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico. Caracas. 373 pp.
- Instituto Nacional de Investigaciones Agrícola (INIA) (2004). *El Cultivo del arroz en Venezuela*. Serie Manuales de Cultivo INIA N° 1. Primera edición. Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas. Maracay, Venezuela. ISBN: 978-980-318-256-4.
- Baldwin, D. S. y Mitchell, A. M. (2000). *The effects of drying and re-flooding on the sediment and soil nutrient dynamics of lowland river-floodplain systems. A synthesis. Regulated Rivers: Research & Management*, 16: 457-467.
- Blanchar, R. W. y Caldwell, C. (1964). *Phosphorus uptake by plants and readily extractable phosphorus in soils*. *Agronomy Journal*, 56: 218-221.
- Bray, R. H., y Kurtz, L. T. (1945). *Determination of total, organic, and available forms of phosphorus in soils*. *Soil Science*, 59: 39-45.
- Brady, N. C. y Weil, R. R. (1999). *The nature and properties of soils*. Twelfth edition. Prentice Hall. 881 pp.
- Bustillos, A. y Martínez, E. (1974). *Estudio del nivel freático en el sistema de riego Río Boconó*. División de Edafología. Ministerio de Obras Públicas. Dirección General de Recursos Hidráulicos. Guanare. 95 pp.
- Castro, B. y Torrent, J. (1998). *Phosphate sorption by calcareous Vertisols and Inceptisols as evaluated from extended P-sorption curves*. *European Journal of Soil Science*, 49: 661-667.
- Carbón, J. y Schubert, C. (1994). *Late cenozoic history of the eastern llanos of Venezuela: geomorphology and stratigraphy of the mesa formation*. *Quaternary International*, 21: 91-100.
- Chacón, L. A. (1995). *Efecto de la inundación sobre la dinámica del fósforo nativo y adicionado como rocas fosfóricas naturales y parcialmente aciduladas en cuatro suelos venezolanos*. Comisión de estudios de postgrado. Postgrado en la Ciencia del Suelo. U.C.V. Facultad de Agronomía, Maracay.
- Chacón, N., Flores, S. y González, A. (2006a). *Implications of iron solubilization on soil phosphorus release in seasonally flooded forests of the lower Orinoco River, Venezuela*. *Soil Biology & Biochemistry*, 38: 1494-1499.
- Chacón, N., Silver, W., Dubinsky, A. y Cusack, D. (2006b). *Iron reduction and soil phosphorus solubilization in humid tropical forest soils: the roles of labile carbon pools and an electron shuttle compound*. *Biogeochemistry*, 78: 67-84.

- Christophoridis, C. y Fytianos, C. (2006). *Conditions affecting the release of phosphorus from surface Lake sediments*. Journal Environment Quality, 35: 1181-1192.
- Darke A. K. y Walbridge M. R. (2000). *Al and Fe biogeochemistry in a floodplain forest: implications for P retention*. Biogeochemistry, 51: 1-32.
- De Datta, S. (1986). *Producción de arroz. Fundamentos y prácticas*. Editorial Limusa. Primera edición. México. 690 pp.
- Dobermann, A., Fairhurst T. (2000). *Manejo del fósforo en arroz*. Informaciones Agronómicas. 46: 1-2.
- Fassbender, H. W. y Bornemisza, E. (1987). *Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina*. Instituto interamericano de cooperación para la agricultura. San José de Costa Rica. 420 pp.
- Ferrando, M., Mercado, G. y Hernández, J. (2002). *Dinámica del hierro y disponibilidad de fósforo durante períodos cortos de anaerobiosis en los suelos*. Agrociencia, VI: 1-9.
- Gale, P. M. y Gilmour, J. T. (1988). *Net mineralization of carbon and nitrogen under aerobic and anaerobic conditions*. Soil Science Society American Journal, 53: 883-890.
- Gelsomino, A., Badalucco, L., Ambrosoli, R., Crecchio, C., Puglisi, E. y Meli, S. M. (2006). *Changes in chemical and biological soil properties as induced by antropogenic disturbance: A case study of fan agricultural soil under recurrent flooding by wastewaters*. Soil Biology & Biochemistry, 38(8): 2069-2080.
- González, G. (2000). *Evaluación de los métodos Olsen y Bray para determinar fósforo en suelos arroceros bajo condiciones aeróbicas y anaeróbicas. Subproyecto: Aplicación de conocimientos*. Universidad Ezequiel Zamora. Guanare 28 p.
- Islam, A. (1970). *Transformation of inorganic phosphorus in flooded soils under rice cropping*. Plant and Soil, 33: 533-544.
- JanBen, E. (2004). *Extraction of soluble phosphorus in soil, sludge, biowaste and treated biowaste*. Horizontal, 25: 1-18.
- Luo, Z-X., Zhu B., Tang J-L., Wang, T. (2009). *Phosphorus retention capacity of agricultural headwater ditch sediments under alkaline condition in purple soils area, China*. Ecological Engineering 3 5: 57-64.
- Mehlich, A. (1953). *Determination of P, Ca, Mg, K, Na and NH₄⁺*. North Carolina Soil Test Division (Mimeo 1953).
- Murphy J y Riley J. P. (1962). *A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters*. Anal. Chim. Acta 27: 31-36.
- Noll, M., Matthies, D., Frenzel, P., Derakshani, M. y Liesack, W. (2005). *Succession of bacterial community structure and diversity in a paddy soil oxygen gradient*. Environmental Microbiology. 7(3): 382-395.
- Olila, O. G. y Reddy, K. R. (1997). *Influence of redox potential on phosphate-uptake by sediments in two subtropical eutrophic lakes*. Hydrobiologia. 345: 45-57.
- Olsen, S. R., Cole, C. V., Watanable, F. S. y Dean, L. A. (1954). *Estimation of available phosphorus in soils by extraction with sodium bicarbonate*. U. S. Dep. of Agric. Circ. 939.
- Palmaven. (1992). *Análisis de suelo y su interpretación. Serie técnica*. Segunda Edición. Caracas. 12 pp.
- Paredes-Trejo, F., Barbosa-Alves, H., Moreno-Pizani, M. y Farias-Ramirez, A. (2018). *Influencia de las sequías sobre el régimen hídrico de los ríos en Venezuela*. Capítulo 9. En: D. Rodríguez-Olarte (ed.), Ríos en Riesgo de Venezuela. Volumen II, 2018. Colección Recursos Hidrobiológicos de Venezuela. ISBN Obra completa: 978-980-12-9274-6
- Patrick, W. H. y Mahapatra I. C. (1968). *Transformation and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils*. Adv. Agrn. 20: 323-359.
- Pinto, M. R. (1981). *Estudios agrológicos y descripción de series de suelos de los Llanos Occidentales de Venezuela*. Informe técnico del Vice-rectorado de Producción Agrícola N° 1. Universidad Ezequiel Zamora. Guanare 297 pp.
- Randall, G. W. y Grava, J. (1971). *Effect of soil: Bray N° 1 ratios on the amount of phosphorus extracted from calcareous Minnesota soils*. Soil Sci. Soc. Am. Proc. 35: 112-114.
- SCCS. (2000). *Fundamentos para la interpretación de análisis de suelos, plantas y aguas para riego*. Tercera Edición. Colombia 305 pp.
- Shenker, M., Seitelbach, S., Brand, S., Haim, A. y Litaor, M. I. (2005). *Redox reactions and phosphorus release in re-flooded soils of an altered wetland*. European Journal of Soil Science. 56: 515-525.
- Shoja, H., Rahimi, G., Fallah, M., y Ebrahimi, E. (2017). *Investigation of phosphorus fractions and isotherm equation on the lake sediments in Ekbatan Dam (Iran)*. Environ Earth Sci 76, 235 <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6548-2>
- Sahrawat. K. L. (2012). *Soil fertility in flooded and non-flooded irrigated rice systems.*, Archives of Agronomy and Soil Science, 58(4): 423-436. DOI: 10.1080/03650340.2010.522993
- Silver, W., Lugo, A. E. y Keller, M. (1999). *Soil oxygen availability and biogeochemistry along and topographic*

- gradients in upland wet tropical forest soils. Biogeochemistry*, 44: 301-328.
- Slaton, N. A., Wilson, Jr. C. E., Norman, R. J., Ntamatungiro, S. y Frizzel, D. L. (2002). *Rice response to phosphorus fertilizer application rate and timing on alkaline soils in Arkansas*. *Agronomy Journal*. 94: 1393-1399.
- Smillie, G. W. y Syers, J. K. (1972). *Calcium fluoride formation during extraction of calcareous soils with fluoride: II. Implications to the Bray P-1 test*. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36:25-30.
- Smith, F. W., Ellis, B. G. y Grava, J. (1957). *Use of acid-fluoride solutions for the extraction of available phosphorus in calcareous soils and in soils to which rock phosphate has been added*. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 21: 400-404.
- Stemmler, S. H. y Berthelin, J. (2003). *Microbial activity as a major factor in the mobilization of iron in the humid tropics*. *European Journal of Soil Science* 54: 725-733.
- Stevenson, F. J. y Cole, M. A. (1999). *Cycles of soil. Carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients*. Second edition. 427 pp.
- Sun, L., Chen, S., Chao, L. y Sun, T. (2007). *Effects of Flooding on Changes in Eh, pH and Speciation of Cadmium and Lead in Contaminated Soil*. *Bull Environ Contam Toxicol* 79, 514–518.
- Syers, K., Smillie, G. W. y Williams, D. H. (1972). *Calcium fluoride formation during extraction of calcareous soils with fluoride: I. Implications to inorganic P fractionation schemes*. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 36: 20-25.
- Takahashi, S. (2007). *Residual effect of phosphorus fertilizer in a low-humic Andosol with low extractable phosphorus*. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 38: 1479-1485.
- Tian, J., Dong, G., Karthikeyan, R., Li, L., Harmel, R.D. (2017). *Phosphorus Dynamics in Long-Term Flooded, Drained, and Reflooded Soils*. *Water*, 9: 531. <https://doi.org/10.3390/w9070531>
- Ding, C.F., Du, S.Y., Ma, Y.B., Li, X.G., Zhang, T.L., Wang, X.J. (2019). *Changes in the pH of paddy soils after flooding and drainage: modeling and validation*. *Geoderma* 337: 511-513. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.012>
- Updegraff, K., Pastor, J., Bridgham, S. D. y Johnston, C. A. (1995). *Environmental and substrate control over carbon and nitrogen mineralization in northern wetlands*. *Ecological Applications* 5: 151-163.
- Velázquez, M., del Campillo, M.C. y Torrent, J. (2004). *Temporary flooding increases iron phytoavailability in calcareous Vertisols and Inceptisols*. *Plant and Soil*. 266: 195-203.
- Wild, A. (1992). *Condiciones del suelo y desarrollo de las plantas según Rusell*. Ediciones Mundi Prensa. Madrid España. 1025 pp.
- Xiao, Y., Tang, J. L., Wang, M. K., Zhai L-B. (2017). *Impacts of soil properties on phosphorus adsorption and fractions in purple soils*. *Journal of Mountain Science* 14(12). <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4545-2>
- Zhang, Q., Wang, G. H., Feng, Y. K., Sun, Q. Z., Witt, C. y Dobermann, A. (2006). *Changes in soil phosphorus fractions in a calcareous paddy soil under intensive rice cropping*. *Plant and Soil* 288(1-2): 141-154.

Ciencia y Tecnología Agropecuaria es una revista publicada por la Universidad de Pamplona bajo la licencia: [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/) (CC BY-NC-SA 4.0)

