

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria
Ingeniería Agronómica



Proyecto Especial de Graduación
**Evaluación de la fijación de fósforo y potasio y su aplicación a distintas
dosis en suelos con diferentes niveles de fósforo**

Estudiante

Diego Escobar Roca

Asesores

Gloria Arévalo de Gauggel, Ph.D.

Carlos Gauggel, Ph.D.

Ricardo Peña, Ph.D.

Honduras, julio 2022

Autoridades

TANYA MÜLLER GARCÍA

Rectora

ANA M. MAIER ACOSTA

Vicepresidenta y Decana Académica

CELIA O. TREJO RAMOS

Directora Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria

HUGO ZAVALA MEMBREÑO

Secretario General

Contenido

Índice de Cuadros.....	5
Índice de Figuras	6
Índice de Anexos.....	7
Resumen	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Materiales y Métodos.....	14
Localización	14
Recolección de Muestras.....	16
Análisis de Laboratorio	16
Análisis de Fijación de Fósforo y Potasio	17
Fuentes Fertilizantes.....	18
Extracción de Fósforo y Potasio.....	18
Elaboración de las Curvas de Fijación de Fósforo y Potasio	19
Interpretación de Análisis de los Suelos	19
Resultados y Discusión.....	20
Características del Suelo	20
Fijación de Fósforo.....	20
Fijación de Fósforo Utilizando como Extractante la Solución Mehlich 3.....	20
Fijación de Fósforo Utilizando como Extractante Agua Destilada	27
Fijación de Potasio	29
Fijación de Potasio Utilizando como Extractante la Solución Mehlich 3	29
Fijación de Potasio Utilizando como Extractante Agua Destilada	31
Conclusiones	32

Recomendaciones..... 33

Referencias..... 34

Anexos..... 38

Índice de Cuadros

Cuadro 1 Resultados de los análisis de suelo realizados en noviembre de 2021, de diferentes localidades de la EAP Zamorano (tomados de la base de datos del Laboratorio de Suelos Zamorano)	14
Cuadro 2 Preparación de soluciones a partir de la solución de 2500 mg·kg ⁻¹ de P con base en el fertilizante ácido fosfórico (H ₃ PO ₄)	18
Cuadro 3 Condición química de los cinco suelos evaluados para determinar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación a distintas dosis, en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras	20
Cuadro 4 Porcentaje de fijación de P basado en la cantidad de P aplicado, con distintas fuentes de fertilizante, en los cinco suelos evaluados para determinar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras	25
Cuadro 5 Porcentaje de fijación de P basado en la fuente de fertilizante, en los cinco suelos evaluados para determinar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras	26
Cuadro 6 Porcentaje de fijación de K utilizando el fertilizante KCl y extractante Mehlich 3, en los cinco suelos evaluados para determinar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras	30

Índice de Figuras

Figura 1 Mapa de ubicación de la muestra de suelo, tomada de Zona 3, Lote 2 C, EAP Zamorano, Honduras.....	15
Figura 2 Mapa de ubicación de las muestras de suelo, tomadas de la finca Pivote, Lotes Portón y Laguna, EAP Zamorano, Honduras.....	15
Figura 3 Mapa de ubicación de las muestras de suelo, tomadas de la finca Colindres, Lotes 3 y 8, Colindres, EAP Zamorano, Honduras	16
Figura 4 Curvas de fijación de fósforo utilizando tres fuentes fertilizantes H_3PO_4 , DAP y MAP y extractante Mehlich 3, en los cinco suelos evaluados para determinar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras	23
Figura 5 Curvas de fijación de fósforo utilizando tres fuentes fertilizantes H_3PO_4 , DAP y MAP y extractante agua destilada, en los cinco suelos evaluados para determinar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.	28
Figura 6 Curva de fijación de potasio utilizando fertilizante KCl y extractante Mehlich 3, en los cinco suelos evaluados para determinar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras	29
Figura 7 Curva de fijación de potasio utilizando KCl y extractante agua destilada, en los cinco suelos muestreados en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.....	31

Índice de Anexos

Anexo A Pesaje de los suelos estudiados en muestras de cinco gramos	38
Anexo B Rotulado de los frascos plásticos en los que se colocaron las muestras de cinco gramos de suelo.....	39
Anexo C Soluciones madre de 2500 ppm de cada fuente fertilizante	40
Anexo D Agregado de la solución extractora Mehlich 3 en los frascos plásticos con suelo.....	41
Anexo E Proceso de agitación de los frascos durante cinco minutos.....	42
Anexo F Filtrado de las muestras de suelo con los extractantes Mehlich 3 y agua destilada	43
Anexo G Determinación del contenido de fósforo en las muestras mediante la técnica de colorimetría	44
Anexo H Determinación del contenido de potasio en las muestras mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica	45
Anexo I Informe de resultados del análisis de los suelos estudiados, realizados en el Laboratorio de Suelos de Zamorano (LSZ), EAP Zamorano, Honduras.....	46

Resumen

La fijación de fósforo y potasio en el suelo es un tema de gran relevancia dentro de la nutrición vegetal para la determinación de las dosis de fertilizante. Diversos estudios han sido dirigidos a la influencia de la mineralogía y el pH del suelo, sobre la fijación de estos elementos. El objetivo fue evaluar la fijación de fósforo y potasio a distintas dosis y fuentes de aplicación, en suelos con diferentes niveles de fósforo, con tres fuentes fertilizantes de fósforo y uno de potasio: ácido fosfórico (H_3PO_4), fosfato diamónico (DAP), fosfato monoamónico (MAP) y cloruro de potasio (KCl). Se aplicaron en dosis de 50, 100, 150, 200, 300 y 400 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en cinco suelos con altos niveles de potasio y niveles de fósforo variable: 9 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (bajo), 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (medio), 48 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (alto b), 67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (alto a) y 169 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (muy alto). Después de tres semanas de incubación, se extrajo el fósforo y potasio con el método Mehlich 3 y con agua destilada. Se consideró fijada la fracción de fósforo o potasio añadida y no extraída. Todos los suelos fijaron fósforo y potasio bajo las seis dosis. El suelo con muy alto fósforo, lo fijó en menor proporción. Las dosis más altas de fósforo y potasio mostraron un menor porcentaje de fijación en comparación con las dosis bajas de los fertilizantes aplicados. El método Mehlich 3 es más adecuado que el agua destilada para la extracción de fósforo y potasio.

Palabras clave: Curva de fijación, dosis, fertilizante, Mehlich 3, porcentaje de fijación.

Abstract

Phosphorus and potassium fixation in the soil is a subject of great relevance in plant nutrition for the determination of fertilizer rates. Several studies have been directed to the soil mineralogy and soil pH on the fixation of these elements. The objective was to evaluate phosphorus and potassium fixation at different rates and application sources, in soils with different phosphorus levels, with three phosphorus and one potassium fertilizer sources: phosphoric acid (H_3PO_4), diammonium phosphate (DAP), monoammonium phosphate (MAP) and potassium chloride (KCl). They were applied at doses of 50, 100, 150, 150, 200, 300 and 400 mg-kg⁻¹ in five soils with high potassium levels and varying phosphorus levels: 9 (low), 30 (medium), 48 (high b), 67 (high a) and 169 mg-kg⁻¹ (very high). After three weeks of incubation, phosphorus and potassium were extracted with the Mehlich 3 method and distilled water. The fraction of phosphorus or potassium added and not extracted was considered fixed. All soils fixed phosphorus and potassium under all six rates. The soil with very high phosphorus had a lower fixation of this element. The higher doses of phosphorus and potassium showed a lower percentage of fixation compared to the lower doses of the applied fertilizers. The Mehlich 3 method is more suitable than distilled water for phosphorus and potassium extraction.

Keywords: Dose, fertilizer, fixation curve, fixation percentage, Mehlich 3.

Introducción

La disponibilidad de todos los nutrientes que la planta necesita está directamente relacionada con un buen desarrollo de esta. La función que desempeña cada nutriente esencial no puede ser realizada por otro nutriente y existen ciertas plantas que requieren en mayor medida de ciertos nutrimentos, como el caso del fósforo, el nutriente que más limita el crecimiento de las plantas, después del nitrógeno (Hernández et al. 2007; Gebirim et al. 2010). El punto principal para considerar con el fósforo es su baja disponibilidad generalizada en la rizosfera, a pesar de ser uno de los macronutrientes esenciales principalmente requeridos por los organismos vivos. Alrededor de la raíz, se forma una zona de agotamiento libre de fosfato, debido a la lenta difusión y la rápida absorción del mismo en las plantas (Estrada-Ortiz et al. 2011).

En el caso de los fertilizantes como el súper fosfato triple, fosfato de amonio y fosfato de potasio, el fósforo normalmente se encuentra en forma de ácido fosfórico (H_3PO_4) y sus sales. Estos se oxidan y se disocian para formar el fosfato de hidrógeno (HPO_4^{-2}) y el fosfato de dihidrógeno (H_2PO_4^-), formas en las que se transporta a las células vegetales (Thao y Yamakawa 2009). El fósforo en el suelo puede formar fosfitos y fosfatos, estos últimos (H_2PO_4^- , HPO_4^{-2} , PO_4^{-3}) son la forma en que la planta los absorbe y los asimila. Igualmente, a través de sus enzimas, las plantas pueden desprender grupos de fosfatos de los compuestos orgánicos y absorberlos (Ticconi et al. 2001). Para formar fosfato, ocurren reacciones de transferencia de electrones, dando lugar a procesos de oxidación y reducción.

El fosfato participa en la formación de semillas y en los procesos de maduración y también en la fijación simbiótica del nitrógeno (Sánchez et al. 2009). De igual manera, los fosfatos juegan un papel importante en la bioenergética celular y en la regulación metabólica; siendo componente estructural del ADN y ARN, fosfolípidos y fosfoproteínas; almacenando y transfiriendo energía en forma de ATP y ADP; y siendo constituyente de las membranas citoplasmáticas, enzimas y proteínas (Ratjen y Gerendás 2009; Molina y Rodríguez 2013).

La retención de fósforo ocurre cuando los fosfatos solubles del fertilizante aplicado pasan a formas menos disponibles, debido a su reacción con partículas orgánicas e inorgánicas del suelo (Henríquez 2005). Existen dos tipos de mecanismos que causan la retención de los fosfatos: primero, su precipitación como fosfatos de baja solubilidad y otros fosfatos complejos cristalizados o sus formas amorfas, debido a la reacción de iones fosfato con cationes de la fase acuosa del suelo y segundo, la adsorción superficial de los iones fosfato sobre partículas coloidales, como la materia orgánica, arcillas e hidróxidos (Fassbender 1966). Por lo general, la disponibilidad del fósforo es baja en suelos derivados de cenizas volcánicas y el fósforo aplicado en forma de fertilizante es rápidamente retenido por el suelo (Fassbender 1969; Alvarado y Buol 1985).

El potasio es un nutriente esencial para las plantas, que lo necesitan en cantidades semejantes a las del Nitrógeno. Es un elemento de alta movilidad dentro de la planta, cumpliendo un rol fundamental en la activación de numerosas enzimas que participan en procesos como la fotosíntesis, síntesis de proteínas y carbohidratos (Mengel et al. 2001). Esto convierte al potasio en un actor principal para el crecimiento vegetativo, la fructificación, la maduración y la calidad de los frutos. El potasio puede encontrarse de tres formas en el suelo: en la fase soluble, intercambiable y fijado o como reserva en la estructura de los minerales. El primero, es el que la planta extrae de manera inmediata. El segundo, es la fuente que se encarga de reponer el potasio en la solución del suelo cuando este se agota. Y el último, también llamado potasio no intercambiable, es aquel que se encuentra fijado o combinado químicamente con los elementos en la estructura mineral del suelo (Conti et al. 1995).

La dinámica del potasio en el suelo es regulada por el tipo de arcillas (2:1), como las illitas y esmectitas. En las láminas de las illitas ocurre un reemplazo de Al^{+3} por Si^{+4} , dando lugar a un exceso de carga negativa que es mayormente neutralizada por iones K^{+} . De esta manera, el potasio queda fijado entre las láminas perdiendo su capacidad de intercambio. En el caso de las esmectitas, donde se encuentran las montmorillonitas, las láminas no quedan tan estrechamente unidas entre sí como

en las illitas. Esto hace que las moléculas de agua puedan penetrar entre las láminas facilitando el intercambio de los cationes que se encuentran allí ubicados (Munson 1985).

Para conocer la disponibilidad de nutrientes en el suelo, es necesario realizar análisis de laboratorio, que involucran métodos de extracción de estos elementos. Para esto, se han realizado investigaciones por más de un siglo, utilizando en primer lugar el agua como solvente de extracción. Sin embargo, el poder de extracción del agua era muy bajo y podría conducir a errores en las medidas. Más adelante, S. Olsen y L. Sommers introdujeron la solución de bicarbonato de sodio 0.5 M, para ser utilizada en suelos calcáreos, alcalinos y neutros (Olsen y Sommers 1982). Por su parte, A. Mehlich desarrolló su propia solución extractante denominada Mehlich 3, indicada para suelos ácidos y neutros (Mehlich 1984). Dicho esto, la selección de una u otra solución extractante dependerá en gran medida del pH del suelo. Utilizar una solución inadecuada puede conducir a sobreestimaciones y subestimaciones del elemento presente en el suelo.

Para la asignación del uso del suelo, se debe tener un conocimiento del mismo. A lo largo de los años, se han realizado estudios de los suelos de Zamorano. En el terreno conocido como Pivote, se observaron suelos compactados y con baja profundidad efectiva y niveles de pH de 4.6 a 5.5 (Alvarado Argueta y López Wundram 2015; Carvajal Diguay y Gómez Badillo 2016; Elvir Coello 2016; Cruz Calderón y Macal Alvarado 2018). Estos suelos son destinados a la siembra de cultivos como maíz, frijol y sorgo. Por su parte, los suelos del terreno de Colindres presentaron un pH más elevado que va desde 5.9 a 6.3 y una textura arcillosa a partir de los 30 cm de profundidad. Estos suelos fueron destinados a la producción de caña de azúcar (2006 a 2020), maíz y sorgo. En la Zona 3 de Zamorano, los suelos presentaron un pH en el rango de 6.16 a 7.36. Este terreno es destinado a la producción de hortalizas (Lovo Silva et al. 2013; Hernández Cornejo 2020).

Los estudios de suelos, realizados en los últimos años en sitios como las fincas del Pivote, Colindres y Zona 3 de Zamorano, evidencian niveles variables del contenido de nutrientes en el suelo. Si bien es cierto que los cultivos extraen estos elementos a lo largo de su ciclo productivo, no siempre

es necesario realizar grandes aplicaciones de fertilizantes químicos en el suelo; sino, propiciar las condiciones para que éste sea disponible, manteniendo niveles medios de materia orgánica y un pH ligeramente ácido (Quiñónez Vera 2019). Existen suelos que tienen reservas de nutrientes, capaces de cubrir la demanda de los cultivos durante su ciclo. Aunque es prudente restituir la extracción de nutrientes por parte de los cultivos, también se debe tomar en cuenta la dinámica de estos en el suelo (González y Pomares 2008).

Los suelos de Zamorano provienen de formaciones de rocas volcánicas, específicamente aquella conocida como Grupo Padre Miguel, que cubre gran parte de la zona Central, Sur y Suroccidental de Honduras (Donnelly et al. 1990). Estos suelos probablemente pertenecen al orden de los Andosoles, derivados de cenizas volcánicas y caracterizados por su abundancia en arcillas amorfas o alófanas, y se denominan así debido a que no poseen una estructura cristalina definida, sino que se encuentra desordenada. Entre las principales características asociadas a las alófanas se puede mencionar la adsorción aniónica y altos contenidos de aluminio intercambiable (Besoain 1985). Esto les permite fijar grandes cantidades de fósforo, causando una acumulación de este elemento en el suelo.

Estos puntos mencionados anteriormente son los que justifican la realización de este trabajo de investigación. Los objetivos del experimento fueron evaluar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación a distintas dosis en suelos con diferentes niveles de fósforo, determinar el efecto de la aplicación de diferentes fuentes y dosis de fósforo sobre su fijación en el suelo y comparar el nivel de fijación de fósforo y potasio utilizando agua destilada y Mehlich 3 como soluciones extractoras.

Materiales y Métodos

Localización

Para estudiar la fijación de fósforo (P) y potasio (K) en el suelo, se recolectaron muestras de cinco suelos distintos, dentro de la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Francisco Morazán, Honduras. Partiendo de la base de datos de los análisis de suelo del Laboratorio de Suelos de Zamorano (LSZ), se seleccionaron suelos con distintos niveles de P y texturas similares para poderlos comparar (Cuadro 1). Las muestras fueron tomadas de Zona 3, Lote 2 C (Figura 1); de la finca denominada Pivote, lotes Portón y Laguna respectivamente (Figura 2); y de la finca llamada Colindres, Lotes 3 y 8 (Figura 3).

Cuadro 1

Resultados de los análisis de suelo realizados en noviembre de 2021, de diferentes localidades de la EAP Zamorano (tomados de la base de datos del Laboratorio de Suelos Zamorano)

Localidad	$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	Clasificación P	Textura	Ubicación	
	P			Latitud	Longitud
Zona 3, Lote 2 C	169	Muy alto	Franco	14°00'38.28" N	86°59'31.12" O
Pivote, Lote Portón	67	Alto (a)	Franco	13°59'48.35" N	87°00'02.59" O
Pivote, Lote Laguna	48	Alto (b)	Franco	13°59'52.14" N	87°00'16.40" O
Colindres, Lote 3	30	Medio	F Ar A	14°00'17.84" N	86°59'20.44" O
Colindres, Lote 8	9	Bajo	Franco Arenoso	14°00'28.63" N	86°58'59.19" O

Nota. F Ar A = Franco Arcillo Arenoso

Figura 1

Mapa de ubicación de la muestra de suelo, tomada de Zona 3, Lote 2 C, EAP Zamorano, Honduras

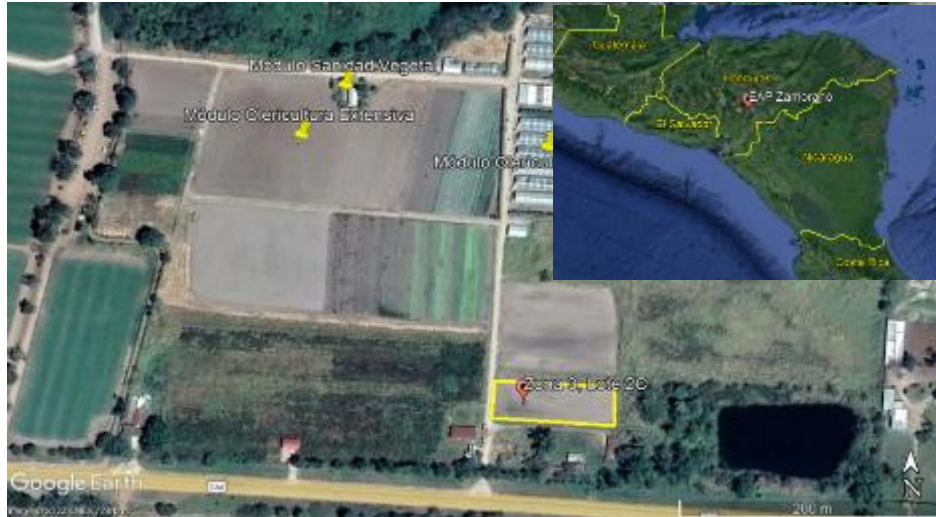


Figura 2

Mapa de ubicación de las muestras de suelo, tomadas de la finca Pivote, Lotes Portón y Laguna, EAP Zamorano, Honduras



Figura 3

Mapa de ubicación de las muestras de suelo, tomadas de la finca Colindres, Lotes 3 y 8, Colindres, EAP Zamorano, Honduras



Recolección de Muestras

Se tomó una muestra de aproximadamente 5 kg del horizonte superficial a una profundidad de 20 cm, en un solo punto de cada suelo en estudio. El muestreo se hizo en el mismo punto donde se había realizado para el análisis de suelo original. No se hizo muestra compuesta para asegurar mantener el nivel de P definido.

Análisis de Laboratorio

Los análisis de laboratorio se llevaron a cabo en el Laboratorio de Suelos de Zamorano (LSZ). Cada una de las muestras fue sometida a un proceso de homogenización, secado al aire en un cuarto con ventilación y finalmente tamizado (tamiz #10 en el que solo deja pasar partículas menores a dos mm). Luego se tomaron 2 kg de suelo procesado de cada muestra para realizar el análisis químico. La materia orgánica fue determinada mediante el método Walkley y Black (1934). Para determinar la textura de cada suelo, se utilizó el método Bouyoucos (1962) y el pH fue determinado mediante el

método AOAC 994.16 (AOAC International 1997), haciendo uso del potenciómetro con electrodo de vidrio en relación 1:1 (suelo:agua).

Análisis de Fijación de Fósforo y Potasio

Se pesaron 5 g de suelo en una balanza digital marca OHAUS Adventurer-Pro y se colocaron en frascos de plástico. Fueron cinco suelos muestreados, seis concentraciones de P y K respectivamente (50, 100, 150, 200, 300 y 400 mg·kg⁻¹), además de la que se encuentra presente en el suelo, cuatro fuentes fertilizantes (H₃PO₄, DAP, MAP y KCl) y dos soluciones extractantes (Mehlich 3 y agua destilada), dando un total de 240 frascos. No se hicieron repeticiones de cada muestra, concentración y fuente. Para determinar el nivel de fijación de P y K en cada suelo, se les añadió cada elemento en solución a diferentes concentraciones: 50, 100, 150, 200, 300 y 400 mg·kg⁻¹. Luego se dejaron las muestras en incubación durante 21 días, para finalmente realizar la extracción utilizando agua destilada y solución Mehlich 3 respectivamente. Se considera fijada la fracción añadida y no extraída (Reiche González 2011).

Para determinar la capacidad de fijación de P (CFP) y K (CFK), se usó las ecuaciones 1, 2, 3 y 4 donde, se resta el nutriente añadido y la diferencia entre lo extraído y la cantidad que se encuentra presente en el suelo [1] y [3]. Para calcular el porcentaje de fijación de P y K, se multiplica la capacidad de fijación del elemento (CFP y CFK respectivamente) por cien y se divide entre la cantidad del elemento añadido [2] y [4].

$$CFP (mg \cdot kg^{-1}) = P \text{ añadido} - (P \text{ extraído} - P \text{ del suelo}) \quad [1]$$

$$Fijación \text{ de } P (\%) = CFP \times 100 / P \text{ añadido} \quad [2]$$

$$CFK (mg \cdot kg^{-1}) = K \text{ añadido} - (K \text{ extraído} - K \text{ del suelo}) \quad [3]$$

$$Fijación \text{ de } K (\%) = CFK \times 100 / K \text{ añadido} \quad [4]$$

Donde:

CFP = capacidad de fijación de fósforo.

CFK = capacidad de fijación de potasio.

Fuentes Fertilizantes

Las fuentes de fertilizantes utilizados para P fueron: ácido fosfórico (H_3PO_4), fosfato diamónico (DAP) y fosfato monoamónico (MAP). El fertilizante utilizado para agregar K fue únicamente el cloruro de potasio (KCl). Para cada fertilizante, se preparó una solución madre de $2500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de P y K respectivamente y a partir de ella se obtuvieron otras seis soluciones a diferentes concentraciones: 50, 100, 150, 200, 300 y $400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Cuadro 2). Las soluciones de cada concentración se colocaron en matraces de 500 mL, se llevaron al volumen final añadiendo agua destilada, se sellaron y agitaron. Luego se aplicaron 5 mL de cada solución a los frascos de plástico que contenían 5 g de suelo, cada uno debidamente identificado según la procedencia, fertilizante, concentración y solución extractante.

Cuadro 2

Preparación de soluciones a partir de la solución de $2500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de P con base en el fertilizante ácido fosfórico (H_3PO_4)

Concentración del elemento ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	mL de solución madre/L de dilución
50	20
100	40
150	60
200	80
300	120
400	160

Nota. Se usaron las mismas concentraciones y diluciones para todos los fertilizantes.

Extracción de Fósforo y Potasio

Los frascos con suelo y fertilizante fueron tapados con papel aluminio y rotulados para indicar qué fertilizante se les agregó. A los 21 días de incubación a temperatura ambiente, a la mitad de los frascos se les añadió 50 mL de la solución Mehlich 3 y a los restantes se les agregó 50 mL de agua destilada, ambos como extractantes de P y K. Luego los frascos fueron agitados por cinco minutos y la

suspensión se filtró en embudos con papel filtro Whatman #1. Una vez terminado el proceso de filtrado, se procedió a la determinación de P por colorimetría y de K por espectrofotometría de absorción atómica (Beaty y Kerber 1993).

Elaboración de las Curvas de Fijación de Fósforo y Potasio

Las curvas de fijación de P y K representan la variación de la cantidad fijada del elemento en el suelo, en función de la dosis aplicada con cada una de las fuentes fertilizantes. En el eje de las abscisas (X) se colocó la cantidad ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) del elemento agregado al suelo y en el de las ordenadas (Y) la cantidad ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) fijada del elemento en el suelo. Se utilizó el programa Excel de Microsoft Office 2022 (versión 16.61). El objetivo de realizar estas curvas fue determinar el comportamiento tanto de incremento, decremento, máximos, mínimos y puntos de inflexión generados por diferencia en la fijación del elemento en el suelo y la concentración adicionada del mismo para cada fuente fertilizante y tipo de suelo (Clapham 2004).

Interpretación de Análisis de los Suelos

Para la interpretación de los análisis de suelo se utilizaron los valores determinados para ello. El pH se clasificó en extremadamente ácido (<4.5), fuertemente ácido (4.5-5.5), moderadamente ácido (5.6-6), ligeramente ácido (6.1-6.5) y neutro (6.51-7.3) (USDA 1998). El LSZ entrega los resultados del contenido de bases (K, Ca, Mg y Na) expresados en $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, para su interpretación se convierten a $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$, dividiendo la concentración ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) entre el peso equivalente de cada elemento y referido a un kg de suelo. Después se calcula la concentración de cada base en relación con las demás y con la acidez intercambiable, lo que indica la proporción de cada uno respecto a la CIC expresado como saturación de bases y saturación de cada elemento. El contenido de potasio normal para su interpretación está entre 3 a 5%, contenido de materia orgánica normal (2-4%). Los niveles de fósforo extraídos con Mehlich 3, se consideran normales en un rango entre 13 a 30 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Arévalo y Gauggel 2020).

Resultados y Discusión

Características del Suelo

Los análisis de laboratorio indicaron que los suelos estudiados en general, tienen un alto contenido de potasio de más de 5%, calculado por saturación de bases, contenido de materia orgánica normal (2-4%) excepto el suelo de Colindres, Lote 8, con mayor cantidad de arena (Franco Arenoso) y el más bajo nivel de fósforo ($9 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y de materia orgánica (1.38%). Los niveles mayores de fósforo en cantidad media, alta y muy alta se encuentran en los suelos con texturas francas (Zona 3, Lote 2C; Pivote, Lotes Portón y Laguna) y franco arcillo arenosa (Colindres, Lote 3). El pH de los suelos estudiados es variable y no muestra una relación directa con respecto al contenido de fósforo y varía desde extremadamente ácido (menor de 4.5) a ligeramente ácido (6.1-6.5) (Cuadro 3).

Cuadro 3

Condición química de los cinco suelos evaluados para determinar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación a distintas dosis, en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras

Ubicación	Textura	% de Arcilla	pH (H ₂ O)	%	P en el suelo	mg·kg ⁻¹	
				M.O.		P	K
Zona 3, Lote 2 C	Franco	20	6.51 ^δ	2.43 N	Muy alto	169	398 A
Pivote, Lote Portón	Franco	24	4.32 ^α	2.04 N	Alto (a)	67	392 A
Pivote, Lote Laguna	Franco	22	4.47 ^α	2.37 N	Alto (b)	48	412 A
Colindres, Lote 3	F Ar A	24	5.16 ^β	2.70 N	Medio	30	410 A
Colindres, Lote 8	Franco Arenoso	10	5.85 ^γ	1.38 B	Bajo	9	479 A

Nota. F Ar A: Franco Arcillo Arenoso. Rango medio: Materia orgánica (M.O.): 2-4 %, Fósforo (P): 13-30 mg·kg⁻¹, Potasio (K): 150-280 mg·kg⁻¹

¹; Nivel: A: alto, N: normal, B: bajo; pH: α: extremadamente ácido (<4.5), β: fuertemente ácido (4.5 a 5.5), γ: moderadamente ácido (5.51 a 6.0), δ: neutro (6.51 a 7.3).

Fijación de Fósforo

Fijación de Fósforo Utilizando como Extractante la Solución Mehlich 3

Para las tres fuentes de fertilizante de P (H₃PO₄, DAP y MAP), el suelo con P medio (Colindres, Lote 3) presentó la mayor fijación ($206 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) y el de menor fijación ($107 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) fue el de P muy alto (Zona 3, Lote 2 C) (Figura 4). En el caso del suelo con nivel medio de P, este resultado podría,

probablemente, ser explicado por el mayor porcentaje de arcilla (24%) y materia orgánica (2.7%) presente, en comparación con el suelo de P bajo (Colindres, Lote 8). Los otros suelos, P alto (b) y (a) (Pivote, Lote Laguna y Portón) y P muy alto (Zona 3, Lote 2 C), tienen cantidades similares de arcilla (20-24%) y materia orgánica (2-2.4%); sin embargo, se encuentran más saturados en P y por lo tanto su capacidad de seguir fijándolo es menor. También es posible que este suelo tenga una mayor proporción de arcillas alófanas que el resto. Según Osorio (2014), el ion fosfato sufre fenómenos de adsorción y acomplejamiento sobre la superficie de los minerales de arcilla, óxidos e hidróxidos de hierro y aluminio. El P orgánico presente en la materia orgánica puede representar el 50% del P total insoluble en el suelo (Gyaneshwar et al. 2002). La materia orgánica, al estar cargada negativamente, no es capaz de retener P por sí sola. No obstante, cuando se asocia con cationes como el hierro (Fe^{3+}), aluminio (Al^{3+}) y calcio (Ca^{2+}) puede retenerlo en cantidades significativas. Appelt et al. (1975) prepararon un complejo de hidroxilo-Al-ácido húmico, el cual adsorbía P mediante el intercambio entre los grupos hidroxilo y los fosfatos. La baja fijación de P, observada en el suelo con nivel muy alto de P, está influenciada principalmente por la elevada cantidad de este elemento que existía previo a la adición de las dosis de fertilizante.

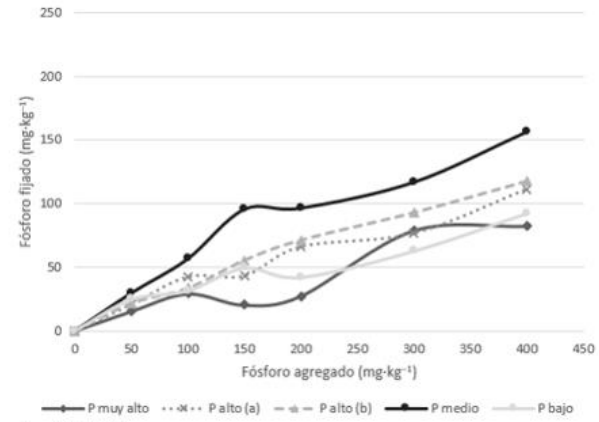
La curva de fijación de P, donde se utilizó el fertilizante DAP (Figura 4 b), tuvo un comportamiento más lineal que aquellas en las que se aplicó H_3PO_4 y MAP, mostrando una tendencia de aumento en la fijación de P con el incremento de la dosis aplicada. El punto de la curva en el que se observó mejor esta tendencia fue con la dosis de $200 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ en el suelo de P medio (Colindres, Lote 3), donde la cantidad de fijada de P fue de $115 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. Estos valores son contrastantemente mayores que en las curvas de fijación correspondientes a la aplicación de ácido fosfórico (Figura 4 a), donde se fijaron $97 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de P y MAP (Figura 4 c), donde la cantidad de P fijado llegó apenas a los $34 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ bajo la misma dosis y en el mismo suelo.

En general, en las curvas de fijación se observa que la cantidad de P fijado aumenta a medida que el P agregado también lo hace, excepto en aquella en la que se utiliza MAP como fertilizante

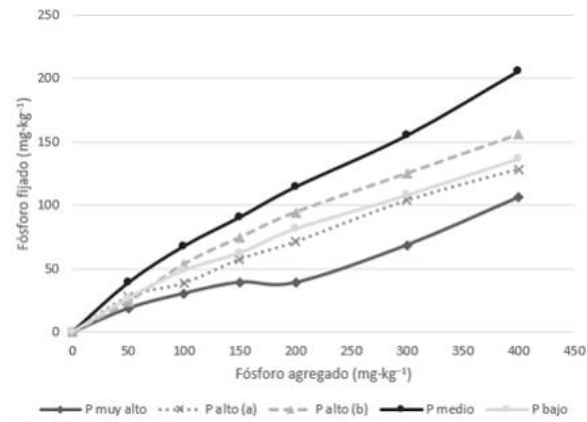
(Figura 4 c). En esta última curva, la cantidad de P fijado disminuyó para las dosis de 200 y 400 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$; sin embargo, con la dosis de 300 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ la fijación de P subió notablemente. No se hallaron factores que expliquen este comportamiento del P en la dosis de 300 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, pero podría deberse al pH de la solución a esa concentración. Lindsay et al. (1962) encontraron que el fertilizante MAP tiene una reacción ácida, reduciendo el pH hasta 3.5; y que el DAP tiene una reacción básica, elevando el pH hasta 8.0. Zanini et al. (2007) añadieron ácido fosfórico como fertilizante al suelo y observaron una disminución del pH hasta 4.1.

Figura 4

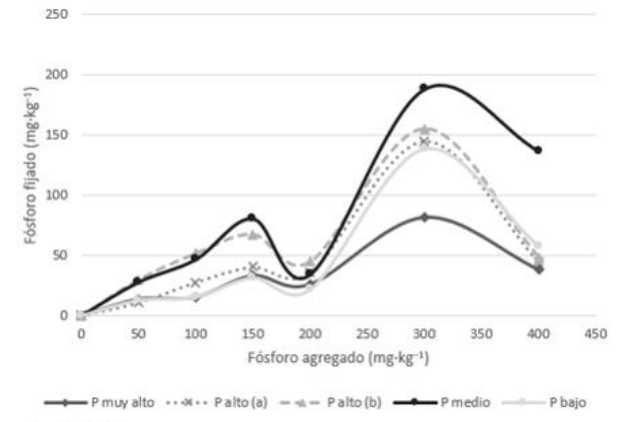
Curvas de fijación de fósforo utilizando tres fuentes fertilizantes H₃PO₄, DAP y MAP y extractante Mehlich 3, en los cinco suelos evaluados para determinar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras



a) H₃PO₄



b) DAP



c) MAP

Si bien las curvas muestran un aumento del P fijado al incrementar la dosis aplicada, el porcentaje de P fijado demuestra lo contrario (Cuadros 4 y 5). En el cálculo del porcentaje de fijación que tuvo el P aplicado, se determinó que este disminuye al elevar la dosis. Torres y García (2013) consideran que los iones fosfato tienen una alta reactividad química y que pasan a formar parte de diferentes fracciones en el suelo: a) asimilados por la biota y constituyendo el P orgánico, b) adsorbidos en la superficie de partículas órgano-minerales, o c) precipitados en minerales secundarios, con aluminio, hierro y calcio. Esto explica por qué el P fijado disminuye a dosis mayores agregadas al suelo, ya que, al quedar llenas todas estas fracciones del suelo en las que el P puede ser desviado, el resto del P aplicado formará parte de la solución del suelo y estará finalmente disponible para las plantas.

Cuadro 4

Porcentaje de fijación de P basado en la cantidad de P aplicado, con distintas fuentes de fertilizante, en los cinco suelos evaluados para determinar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras

P en el suelo	Fertilizante	Dosis de P aplicado (mg·kg ⁻¹)						% P fijado Promedio
		50	100	150	200	300	400	
Fijación de P (%)								
Muy alto	H ₃ PO ₄	31	29	14	14	26	21	23
	DAP	28	31	26	20	23	27	28
	MAP	28	16	22	13	27	10	19
	AVG	32	25	21	16	25	19	23
Alto (a)	H ₃ PO ₄	42	43	29	33	26	28	34
	DAP	56	39	38	36	35	32	39
	MAP	22	28	27	18	48	11	26
	AVG	40	37	31	29	36	24	33
Alto (b)	H ₃ PO ₄	44	34	37	36	31	29	35
	DAP	48	54	50	47	42	39	47
	MAP	60	52	45	22	52	12	41
	AVG	51	47	44	35	42	27	41
Medio	H ₃ PO ₄	60	57	64	48	39	39	51
	DAP	78	68	60	57	52	52	61
	MAP	56	47	54	17	63	34	45
	AVG	65	57	59	41	51	42	53
Bajo	H ₃ PO ₄	50	32	33	21	21	23	30
	DAP	54	49	42	41	36	34	43
	MAP	26	16	21	11	46	14	22
	AVG	43	32	32	24	34	24	32

Un punto sobresaliente del porcentaje de P fijado (Cuadro 4) es el que fija el suelo con nivel de P bajo, el cual no obedece la tendencia (menor porcentaje de fijación a mayor nivel en el suelo) que siguen los demás suelos. Esto puede deberse a su textura franco arenosa, teniendo hasta un 14% menos de arcilla que el resto. Todos los suelos analizados poseen una cantidad similar de arcilla (20-24%); en contraste, el suelo de P bajo tiene apenas un 10% de arcilla. Boschetti et al. (1998) señalaron a las arcillas como el factor principal de variación en la capacidad de adsorción de los suelos. De igual manera, el pH de 5.85 (moderadamente ácido) del suelo con P bajo (Lote 8 de Colindres), al igual que el pH de 6.51 (neutro) del suelo con P muy alto (Lote 2 C de Zona 3), difieren en el estado de acidez de los suelos restantes con P alto (Lotes Portón y Laguna del Pivote) y pH menor a 4.5

(extremadamente ácido) y P medio (Lote 3 de Colindres) con pH de 5.16 (fuertemente ácido). Gómez y Narvez (1999) realizaron un estudio en un suelo con pH de 4.30, donde observaron precipitación del P aplicado, en fosfatos de aluminio. Sanguino (1961) mencionó que al aumentar la acidez del suelo se incrementa la actividad del hierro y aluminio. En suelos alcalinos hay una mayor abundancia de calcio. Los iones fosfato en suelos con ácidos con pH menor a 5.5 y básicos con pH mayor a 7 forman compuestos complejos insolubles de hierro, aluminio y calcio. Por lo tanto, se determinó que el bajo porcentaje de arcilla y un pH más cercano a ligeramente ácido, fueron los que disminuyeron el porcentaje de fijación en el suelo con nivel de P bajo.

Cuadro 5

Porcentaje de fijación de P basado en la fuente de fertilizante, en los cinco suelos evaluados para determinar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras

Fertilizante	P en el suelo	Dosis de P aplicado ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)						% P fijado Promedio
		50	100	150	200	300	400	
		Fijación de P (%)						
H_3PO_4	Muy alto	31	29	14	14	26	21	22
	Alto (a)	42	43	29	33	26	28	34
	Alto (b)	44	34	37	36	31	29	35
	Medio	60	57	64	48	39	39	51
	Bajo	50	32	33	21	21	23	30
	AVG	51	44	42	34	29	30	38
DAP	Muy alto	38	31	26	20	23	27	28
	Alto (a)	56	39	38	36	35	32	39
	Alto (b)	48	54	50	47	42	39	47
	Medio	78	68	60	57	52	52	61
	Bajo	54	49	42	41	36	34	43
	AVG	63	52	47	45	41	39	48
MAP	Muy alto	28	16	22	13	27	10	19
	Alto (a)	22	28	27	18	48	11	26
	Alto (b)	60	52	45	22	52	12	41
	Medio	56	47	54	17	63	34	45
	Bajo	26	16	21	11	46	14	22
	AVG	35	30	34	15	52	20	31

El cuadro anterior (Cuadro 5) muestra que el fertilizante DAP tuvo, en promedio, el mayor porcentaje de fijación (48%). Esto indica que el DAP fue el menos eficiente de los tres fertilizantes, ya

que mostró los valores más altos de fijación de P. Fuentes (1994) indicó que el P puede ser asimilado bajo las formas de fosfato monovalente (H_2PO_4^-) y bivalente (HPO_4^{2-}). La solubilidad de estos dos iones depende fundamentalmente del pH, siendo el fosfato monovalente más soluble a un pH bajo. El fosfato bivalente se comporta de manera opuesta, volviéndose más soluble a pH alcalino. Lindsay et al. (1962) encontraron que los fertilizantes MAP y DAP modifican temporalmente el pH cuando se encuentran en solución, a valores de 3.5 y 8.0 respectivamente.

Dicho esto, es posible que hubiera una mayor abundancia de fosfato monovalente en el suelo. Entonces al aplicar DAP, el pH de la solución subió, reduciendo la solubilidad del ion de P. Esto explicaría el mayor nivel de fijación observado con la aplicación de DAP, en comparación con las otras fuentes fertilizantes.

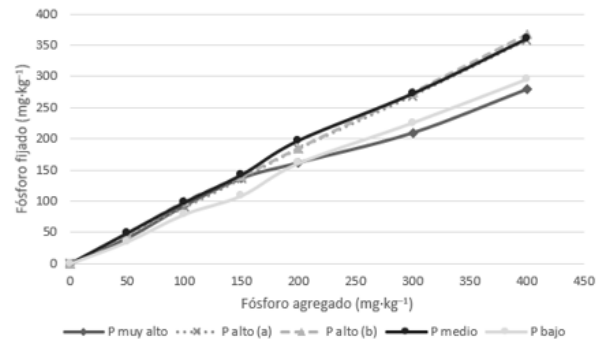
Fijación de Fósforo Utilizando como Extractante Agua Destilada

El comportamiento de la curva de fijación para cada uno de los suelos fue similar hasta la dosis de $150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, manteniéndose alrededor de los $135 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de P fijado (Figura 5). Carrero et al. (2015) indicaron que el poder de extracción del agua destilada es muy bajo y puede conducir a errores en las medidas. Los niveles de fijación de P observados fueron bastante elevados, llegando casi hasta los $400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de P fijado. La única variante en la curva de fijación de la Figura 5 fue el uso del agua destilada como extractante, en lugar de la solución Mehlich 3. Esto indica que podría haber una sobreestimación en la cantidad de P fijado, debida al extractante utilizado.

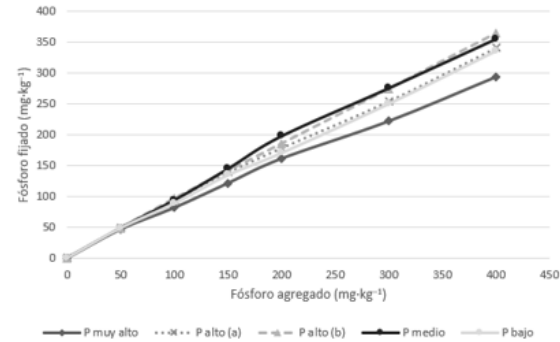
Aun así, se observó nuevamente que el suelo que fijó la menor cantidad de P en comparación con los demás fue el que contenía un nivel de P muy alto. Esto reafirma la idea de que los suelos con niveles más altos de P lo fijan en menor cantidad.

Figura 5

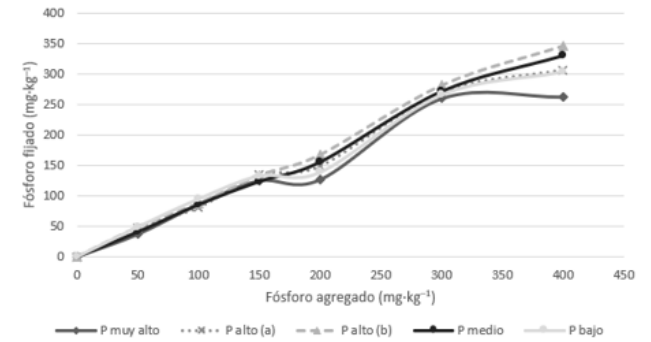
Curvas de fijación de fósforo utilizando tres fuentes fertilizantes H_3PO_4 , DAP y MAP y extractante agua destilada, en los cinco suelos evaluados para determinar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras.



a) H_3PO_4



b) DAP



c) MAP

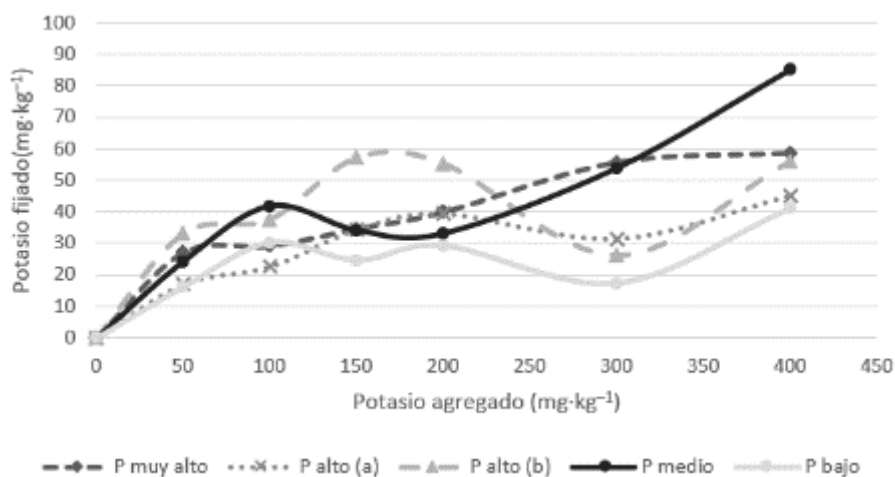
Fijación de Potasio

Fijación de Potasio Utilizando como Extractante la Solución Mehlich 3

En los análisis de potasio, nuevamente se observó que el suelo con P medio (Colindres, Lote 3) fue el que alcanzó el valor máximo de fijación, llegando casi a los $90 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ con la dosis de $400 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ de KCl. El suelo que presentó la menor fijación de K fue el de P bajo (Colindres, Lote 8), permaneciendo por debajo de los $41 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (Figura 6). Sin embargo, al ser todos los suelos estudiados altos en potasio, no es posible compararlos de acuerdo con el nivel presente en el suelo, como se hizo anteriormente con el fósforo.

Figura 6

Curva de fijación de potasio utilizando fertilizante KCl y extractante Mehlich 3, en los cinco suelos evaluados para determinar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras



En cuanto al porcentaje de K fijado, a medida que se incrementó la dosis aplicada, la proporción que fue retenida en el suelo disminuyó. Esta tendencia fue aún más marcada que en las aplicaciones de P. Con la dosis de $300 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, aplicada en el suelo de P bajo, solo se fijó el 6 %, siendo el valor más bajo de todos (Cuadro 6).

La fijación de K se encuentra fuertemente relacionada a la presencia de arcillas en el suelo. Según Fuentes (1994), una parte del K añadido al suelo con fertilizantes químicos sintéticos es absorbida por las plantas, otra parte mayor es adsorbida por los coloides y el resto es retenido entre las capas de las arcillas. Conti et al. (1995) indicaron que las arcillas 2:1 son fijadoras de K en el suelo, principalmente las illitas y las montmorillonitas. Las primeras son las arcillas con mayor contenido de K, el cual se encuentra en su superficie, en sus bordes y entre las capas de los cristales. Por su parte, las montmorillonitas son arcillas expansibles que, en condiciones de alta humedad, atrapan K entre sus capas interlaminares. Al secarse, estas capas se cierran, fijando el K que difícilmente es liberado nuevamente a la solución del suelo.

Los altos valores de fijación de K a dosis bajas de fertilizante pueden ser explicados por la distribución de los iones de K^+ en las posiciones interlaminares de las arcillas. Esto ocurre debido a un exceso de cargas negativas alrededor de las arcillas, que son neutralizadas por las cargas positivas de los iones de K^+ (Munson 1985). A medida que estos espacios y la superficie externa de las arcillas son ocupadas gradualmente por iones de K^+ , el resto del K aplicado forma parte de la solución del suelo (INPOFOS 1997). Esta sería la razón por la cual las dosis altas de fertilizante tienen un menor porcentaje de fijación.

Cuadro 6

Porcentaje de fijación de K utilizando el fertilizante KCl y extractante Mehlich 3, en los cinco suelos evaluados para determinar la fijación de fósforo y potasio y su aplicación en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras

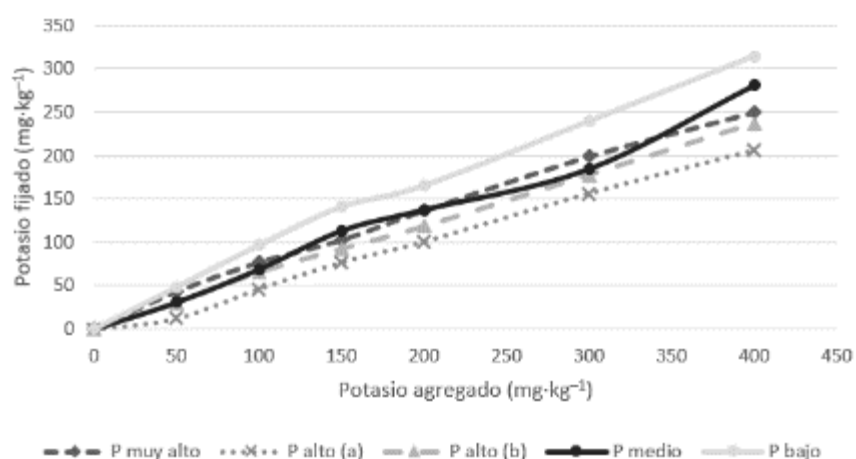
Suelo	Dosis ($mg \cdot kg^{-1}$)					
	50	100	150	200	300	400
Fijación de K (%)						
P muy alto	54	29	23	20	19	15
P alto (a)	34	23	23	20	10	11
P alto (b)	66	38	38	28	9	14
P medio	49	42	23	17	18	21
P bajo	32	30	16	15	6	10

Fijación de Potasio Utilizando como Extractante Agua Destilada

En la curva de fijación de K utilizando el fertilizante KCl y agua destilada como extractante, la fijación fue muy alta, llegando a los 315 mg·kg⁻¹ con la dosis más alta (Figura 7). Estos valores son muy elevados comparados con los del extractante Mehlich 3. Nuevamente, se comprobó que el agua destilada tiene un débil poder de extracción, por lo tanto, condujo a sobreestimaciones en la cantidad de K fijado en el suelo.

Figura 7

Curva de fijación de potasio utilizando KCl y extractante agua destilada, en los cinco suelos muestreados en la Escuela Agrícola Panamericana Zamorano, Honduras



Conclusiones

Al aplicar dosis variables de fósforo y potasio en suelos de origen volcánico, hubo fijación de estos elementos en proporciones variables, independiente del contenido inicial de fósforo y potasio.

El agua destilada tiene un bajo poder de extracción de P y K en los suelos estudiados, en comparación con la solución Mehlich 3 y refleja una mayor fijación de estos elementos en el suelo.

La fijación de fósforo ocurrió independiente de la fuente fertilizante utilizada.

Recomendaciones

Tomar en cuenta que los suelos en la EAP Zamorano fijan fósforo independiente del pH y las dosis y fuentes aplicadas, para la formulación de fertilizantes, por lo tanto se debe propiciar actividades que mejoren la condición física, química y biológica del suelo a fin de generar un ambiente adecuado para el crecimiento de las raíces, como estructuras granulares estables, materia orgánica adecuada, horizontes profundos y friables, ajuste del pH a ligeramente ácido (6.1-6.5) y activación de organismos, que incrementen la capacidad de absorción de nutrientes de la planta, en especial de fósforo.

Realizar aplicaciones localizadas de fertilizante para aumentar el contacto con las raíces y en el momento que la planta lo requiera.

Conocer el porcentaje y tipo de arcillas presentes en el suelo para inferir si estas pueden ser fijadoras de P y K.

Realizar análisis de suelo para determinar el P disponible y complementarlo con análisis foliar para conocer su aprovechamiento por las plantas.

Validar los resultados del experimento con pruebas de campo para comparar la capacidad de extracción que tienen los cultivos en contraste con las soluciones extractantes utilizadas en laboratorio.

En pruebas de fijación de fósforo en el suelo, medir el pH en las soluciones de suelo y fertilizante, para determinar si la fuente y la dosis generan variación, influyendo en la fijación.

Referencias

- Alvarado A, Buol SW. 1985. Field estimation of phosphate retention by anepts. *Soil Science Society of America Journal*. 49(4):911–914. doi:10.2136/sssaj1985.03615995004900040024x.
- Alvarado Argueta CJ, López Wundram ME. 2015. Evaluación del subsoleo y aplicación de cal en el cultivo de maíz en Zamorano, Honduras [Tesis]. Valle del Yeguaré, San Antonio de Oriente: Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 28 p; [consultado el 15 de jun. de 2022]. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/1ab8f15a-05d8-420f-87fb-2e708fbd41f2/content>.
- AOAC International. 1997. Books in brief. *Journal of AOAC INTERNATIONAL*. 80(6):127A-128A. doi:10.1093/jaoac/80.6.127A.
- Appelt H, Coleman NT, Pratt PF. 1975. Interactions between organic compounds, minerals, and ions in volcanic-ash-derived soils: II. Effects of organic compounds on the adsorption of phosphate. *Soil Science Society of America Journal*. 39(4):628–630. en. doi:10.2136/sssaj1975.03615995003900040018x.
- Arévalo G, Gauggel C. 2020. Manual de laboratorio manejo de suelos y aguas. 5ª ed. Tegucigalpa: Litocom. ISBN: 978-99926-95-95-1.
- Beatty RD, Kerber JD. 1993. Concepts, instrumentation and techniques in atomic absorption spectrophotometry. 2ª ed. [sin lugar]: [sin editorial] ; [consultado el 5 de jun. de 2022]. <https://iitk.ac.in/che/pdf/resources/aas-gta-reading-material.pdf>.
- Besoain E. 1985. Mineralogía de arcillas de suelos. San José (Costa Rica): Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura. 1216 p. (Serie de libros y materiales educativos (IICA); vol. 60). ISBN: 92-9039-067-0.
- Boschetti NG, Quintero CE, Benavidez RA. 1998. Caracterização do fator capacidade de fósforo em solos de Entre Ríos, Argentina. *Rev. Bras. Ciênc. Solo*. 22(1):95–99. doi:10.1590/S0100-06831998000100013.
- Bouyoucos GJ. 1962. Hydrometer method improved for making particle size analyses of soils 1. *Agronomy Journal*. 54(5):464–465. en. doi:10.2134/agronj1962.00021962005400050028x.
- Carrero A, Zambrano A, Hernández E, Contreras F, Machado D, Bianchi G, Varela R. 2015. Comparación de dos métodos de extracción de fósforo disponible en un suelo ácido. *Avances en Química*; [consultado el 5 de jun. de 2022]. 10:29–33. <https://www.redalyc.org/pdf/933/93343104006.pdf>.
- Carvajal Diguay KG, Gómez Badillo CA. 2016. Efecto de la aplicación de cal dolomita sobre el pH del suelo y rendimiento de sorgo sureño en suelos de uso agrícola, Zamorano, Honduras [Tesis]. Valle del Yeguaré, San Antonio de Oriente: Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 29 p; [consultado el 29 de jun. de 2022]. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/2d912d12-8bf2-4b3c-a858-d2ae507da608/content>.
- Clapham C. 2004. *Diccionario de Matemáticas*. 2a. reimpr. Madrid: Editorial Complutense. 392 p. (Diccionarios oxford-complutense). ISBN: 9788489784567. es.
- Conti ME, De La Horra AM, Gonzalez MG. 1995. Velocidad de liberación de potasio en Argiudoles pampeanos (Argentina). *Ciencia del suelo*. 13(2):76–79. spa. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4387709>.

- Cruz Calderón RA, Macal Alvarado JA. 2018. Efecto de dos tipos de cal en el pH del suelo y en la producción de sorgo sureño, Zamorano, Honduras. [Tesis]. Valle del Yeguaré, San Antonio de Oriente: Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 24 p; [consultado el 17 de jun. de 2022]. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/ca77404d-7f49-4826-9839-18a874b1b584/content>.
- Donnelly T, Horne G, Finch R, López E. 1990. Northern Central America; the Maya and Chortis Blocks. New York: The Geology of North America ; [consultado el 19 de jun. de 2022]. <http://kevin.quinillo.com/wp-content/uploads/2018/09/northern-central-america-the-maya-and-chortis-blocks.pdf>.
- Elvir Coello JA. 2016. Diagnóstico de la compactación de los suelos para determinar subsuelo y registro de su adecuación en lotes agropecuarios, Zamorano, Honduras [Tesis]. Valle del Yeguaré, San Antonio de Oriente: Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 50 p; [consultado el 29 de jun. de 2022]. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/a1ff70c4-8a79-4336-89b3-65c508dab0e5/content>.
- Estrada-Ortiz E, Trejo-Téllez LI, Gómez-Merino FC, Núñez-Escobar R, Sandoval-Villa M. 2011. Respuestas bioquímicas en fresa al suministro de fósforo en forma de fosfito. Chapingo; [consultado el 2 de jun. de 2022]. 17(3):129–138. http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1027-152X2011000300005.
- Fassbender H. 1966. La adsorción de fosfatos en suelos fuertemente ácidos y su evaluación usando la isoterma de Langmuir. *Fitotecnia Latinoamericana*. 3(1-2):203–216.
- Fassbender H. 1969. Estudio del fósforo en suelos de América Central: capacidad de fijación de fósforo y su relación con características edáficas. *Turrialba*. 19(4):497–505.
- Fuentes JL. 1994. El suelo y los fertilizantes. 4a. ed. revisada y ampliada. Madrid: Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación; Mundi-Prensa. 327 p. ISBN: 84-7114-492-1.
- Gebrim FdO, Ferreira Novais R, Ribeiro da Silva I, Schulthais F, Vergütz L, Costa Procópio L, Fonseca Moreira F, Luiz de Jesus G. 2010. Mobility of inorganic and organic phosphorus forms under different levels of phosphate and poultry litter fertilization in soils. *Brasileira de Ciência do Solo*. 34(4):1195–1205. doi:10.1590/S0100-06832010000400019.
- Gómez CR, Narvez CE. 1999. Efecto de tres enmiendas orgánicas de la cal sobre la disponibilidad y la adsorción de fósforo en un suelo ácido. *Rev. colomb. quim.* 28(2):59–67. es. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rcolquim/article/view/17936>. doi:10.15446/rev.colomb.quim.
- González V, Pomares F. 2008. La fertilización y el balance de nutrientes en sistemas agroecológicos. Valencia: Sociedad Española de Agricultura Ecológica ; [consultado el 5 de jun. de 2022]. <https://www.agroecologia.net/recursos/documentos/manuales/manual-fertilizacion-fpomares.pdf>.
- Gyaneshwar P, Naresh Kumar G, Parekh LJ, Poole PS. 2002. Role of soil microorganisms in improving P nutrition of plants. *Plant and Soil*. 245(1):83–93. <https://link.springer.com/article/10.1023/A:1020663916259>. doi:10.1023/A:1020663916259.
- Henríquez C. 2005. Sorción y desorción de fósforo en un Andisol de Costa Rica dedicado al cultivo del café, caña de azúcar y bosque. 1; [consultado el 2 de jun. de 2022]. es. <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/agrocost/article/view/6784>.

- Hernández G, Ramírez M, Valdés-López O, Tesfaye M, Graham MA, Czechowski T, Schlereth A, Wandrey M, Erban A, Cheung F, et al. 2007. Phosphorus stress in common bean: root transcript and metabolic responses. *Plant Physiol.* 144(2):752–767. eng. doi:10.1104/pp.107.096958.
- Hernández Cornejo E. 2020. Actualización de la evaluación de la aptitud de los suelos de uso agrícola de Zamorano y su mapeo con sistemas de información geográfica. [Tesis]. Valle del Yeguaré, San Antonio de Oriente: Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 99 p; [consultado el 17 de jun. de 2022]. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/6abfd448-90f5-4b15-9a3e-2d74b74c0a34/content>.
- INPOFOS. 1997. Manual internacional de fertilidad de suelos. Canada: Potash and Phosphate Institute of Canada.
- Lindsay WL, Frazier AW, Stephenson HF. 1962. Identification of reaction products from phosphate fertilizers in soils1. *Soil Science Society of America Journal.* 26(5):446. en. doi:10.2136/sssaj1962.03615995002600050013x.
- Lovo Silva JJ, Saavedra Alvarado JE, Saravia Chávez R. 2013. Calidad de los suelos y plan de adecuación para los terrenos de uso agrícola y pecuario de Zamorano, Honduras [Tesis]. Valle del Yeguaré, San Antonio de Oriente: Escuela Agrícola Panamericana Zamorano; [consultado el 5 de jun. de 2022]. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/0cb18c0a-65f3-4f67-ae6a-ce4e10e9c1e9/content>.
- Mehlich A. 1984. Mehlich 3 soil test extractant: A modification of Mehlich 2 extractant. *Communications in Soil Science and Plant Analysis.* 15(12):1409–1416. en. doi:10.1080/00103628409367568.
- Mengel K, Kirkby EA, Kosegrten H, Appel T. 2001. Principles of plant nutrition. 5ª ed. Dordrecht, Boston: Kluwer Academic Publishers. 849 p. ISBN: 9789401010092. en.
- Molina E, Rodríguez JH. 2013. Fertilización con N, P, K y S, y curvas de absorción de nutrientes en arroz var. CFX 18 en Guanacaste. 1. doi:10.15517/rac.v36i1.9963.
- Munson RD. 1985. Potassium in agriculture. Madison: Soil Science Society of America. 1223 p. ISBN: 9780891180869.
- Olsen S, Sommers L. 1982. Phosphorus. Methods of soil analyses, part 2. Madison, Wisconsin: American Society of Agronomy.
- Osorio NW. 2014. Manejo de nutrientes en suelos del trópico. Colombia: L. Vieco S.A.S. ISBN: 978-958-44-9746-8.
- Quiñónez Vera LR. 2019. Dinámica de fósforo bajo diferentes sistemas de manejo de suelo [Tesis]. Asunción: Universidad Nacional de Asunción. 78 p; [consultado el 17 de jun. de 2022]. <https://www.conacyt.gov.py/sites/default/files/Tesis%20-Laura%20Qui%C3%B1onez.pdf>.
- Ratjen AM, Gerendás J. 2009. A critical assessment of the suitability of phosphite as a source of phosphorus. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.* 172(6):821–828. en. doi:10.1002/jpln.200800287.
- Reiche González AC. 2011. Determinación de la fijación de fósforo y potasio en un suelo joven y un suelo evolucionado del Valle de Cantarranas, Francisco Morazán, Honduras. [Tesis]. Valle del Yeguaré, San Antonio de Oriente: Escuela Agrícola Panamericana Zamorano. 29 p; [consultado el 17 de jun. de 2022]. <https://bdigital.zamorano.edu/server/api/core/bitstreams/c6ba5b54-3168-4f4a-a912-57b3694a6327/content>.

- Sánchez E, Muñoz E, Anchondo Á, Ruiz JM, Romero L. 2009. Nitrogen impact on nutritional status of phosphorus and its main bioindicator: response in the roots and leaves of green bean plants. *rchsh*. XV(2):177–182. doi:10.5154/r.rchsh.2009.15.024.
- Sanguino E. 1961. Influencia del pH sobre la fijación de fósforo y su relación con la respuesta del maíz a la fertilización fosfatada. *Acta Agronómica*; [consultado el 6 de jul. de 2022]. 11(3):187–209. https://revistas.unal.edu.co/index.php/acta_agronomica/article/view/48957/50039.
- Thao HTB, Yamakawa T. 2009. Phosphite (phosphorous acid): Fungicide, fertilizer or bio-stimulator? *Soil Science and Plant Nutrition*. 55(2):228–234. en. doi:10.1111/j.1747-0765.2009.00365.x.
- Ticconi CA, Delatorre CA, Abel S. 2001. Attenuation of phosphate starvation responses by phosphite in arabidopsis. *Plant Physiol*. 127(3):963–972. doi:10.1104/pp.010396.
- Torres Y, García F. 2013. La disponibilidad del fósforo es producto de la actividad bacteriana en el suelo en ecosistemas oligotróficos: una revisión crítica. *Terra Latinoam*; [consultado el 5 de jun. de 2022]. 31(3). http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=s0187-57792013000400231.
- [USDA] United States Department of Agriculture. 1998. Soil quality indicators: pH. Washington: USDA Natural Resources Conservation Service; [consultado el 28 de jun. de 2022]. 2 p. https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_052208.pdf.
- Walkley A, Black IA. 1934. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter, and a proposed modification of the chromic acid titration method. *Soil Science*; [consultado el 5 de jun. de 2022]. 37(1):29–38. https://journals.lww.com/soilsci/Fulltext/1934/01000/AN_EXAMINATION_OF_THE_DEGTJAREFF_METHOD_FOR.3.aspx.
- Zanini JR, Barreto AKG, Foratto LC, Natale W. 2007. Distribuição de fósforo no bulbo molhado, aplicado via fertirrigação por gotejamento com ácido fosfórico. *Eng. Agríc*. 27(1):180–193. doi:10.1590/S0100-69162007000100012.

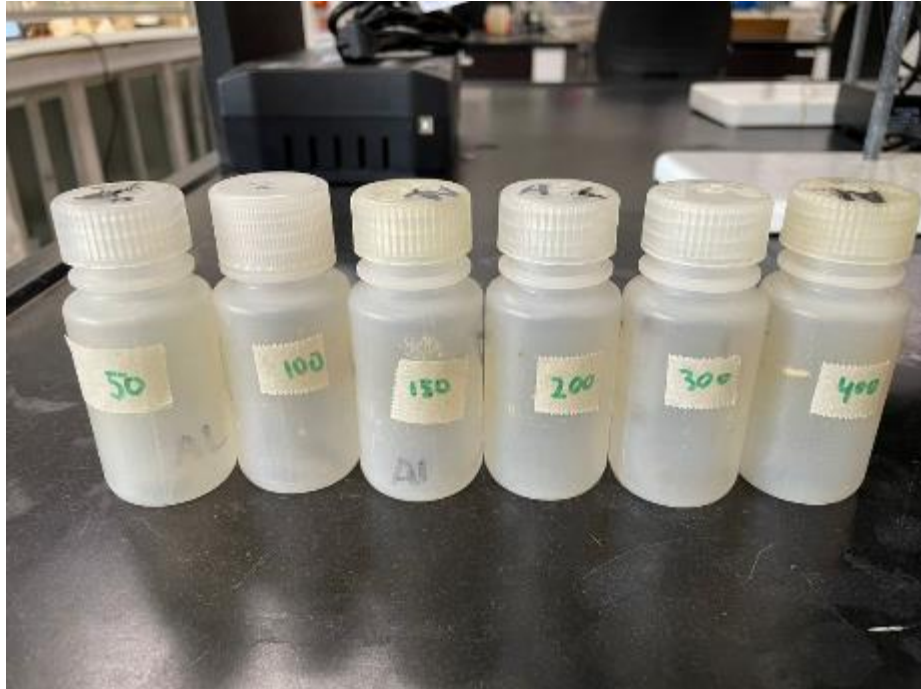
Anexos**Anexo A**

Pesaje de los suelos estudiados en muestras de cinco gramos



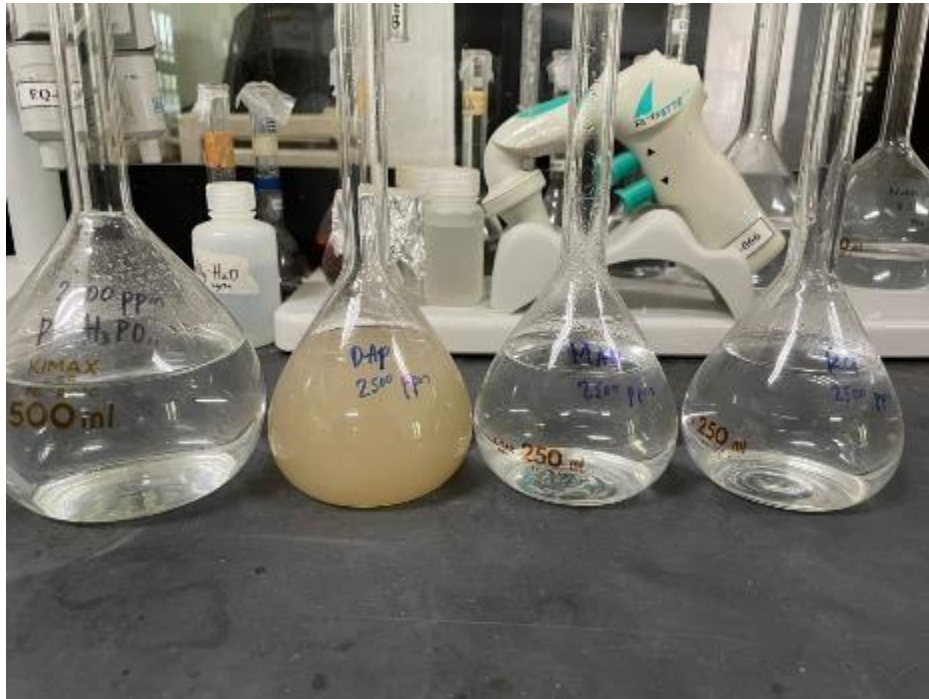
Anexo B

Rotulado de los frascos plásticos en los que se colocaron las muestras de cinco gramos de suelo



Anexo C

Soluciones madre de 2500 ppm de cada fuente fertilizante



Anexo D

Agregado de la solución extractora Mehlich 3 en los frascos plásticos con suelo



Anexo E

Proceso de agitación de los frascos durante cinco minutos



Anexo F

Filtrado de las muestras de suelo con los extractantes Mehlich 3 y agua destilada



Anexo G

Determinación del contenido de fósforo en las muestras mediante la técnica de colorimetría



Anexo H

Determinación del contenido de potasio en las muestras mediante la técnica de espectrofotometría de absorción atómica



Anexo I

Informe de resultados del análisis de los suelos estudiados, realizados en el Laboratorio de Suelos de Zamorano (LSZ), EAP Zamorano, Honduras

LABORATORIO DE SUELOS ZAMORANO		LSZ F10708-1								
INFORME DE RESULTADOS DE ANÁLISIS DE SUELOS		Versión	V02							
Sistema de Gestión de Calidad ISO 17025										
Solicitante	Fecha Ingreso Muestra	Fecha Envío Informe	Procedencia de la muestra							
Tesis Diego Escobar	2022-02-08	2022-03-14	Varios							
Dirección del cliente	Nº Lote de Análisis	Cultivo	Informe N°							
EAP, Zamorano	2022-03	---	2022-025.b							
Este informe sustituye cualquier versión anterior										
Código	Muestra	pH ⁺ (H ₂ O)	g/100g		mg/kg (extractable)					
Interno Lab.			C.O.	M.O.	N _{total}	P	K	Ca	Mg	Na
22-S-0831	Zona 3, Lote 2 C	6.51	1.41	2.43	0.12	169	398	2853	176	138
22-S-0841	Pivote, Lote Laguna	4.47	1.37	2.37	0.12	56	412	1124	136	19
22-S-0842	Pivote, Lote Portón	4.32	1.19	2.04	0.10	67	392	701	74	9
22-S-0844	Colindres, Lote 3	5.16	1.57	2.70	0.14	30	410	2220	228	58
22-S-0385	Colindres, Lote 8	5.85	0.80	1.38	0.07	9	479	2041	332	4
Rango Medio			2.00	0.20	13	Por: Saturación de bases				
			4.00	0.50	30					
Métodos: K, Ca, Mg, Na: Solución extractora Mehlich 3, determinados por espectrofotometría de absorción atómica. P: Solución extractora Mehlich 3, determinado por colorimetría. % Carbono Orgánico: Método de Walkley & Black para suelos minerales no salinos. % N total: 5% de M.O. pH: 1:1 en agua: ADAC 934.16 rango de 4,00-10,00.										

Alto
Normal
Bajo

*Valores de pH en negrita y cursiva se encuentran dentro del Ensayo Acreditado: Ver alcance N° ENS-004 en

oha.hondurascalidad.org



El laboratorio no se hace responsable por el estado de la muestra al ingresar a nuestras instalaciones. Los resultados se relacionan solo con las muestras recibidas. El laboratorio se exonera de responsabilidad por reproducción parcial o total del informe, a su uso que pueda causar. El lote de análisis revierte la fecha de ejecución de análisis.

Responsable del análisis: *F. Aguilar*
Ing. Gerente Operativo Técnico

Verificado: *A. Cortés*
Dra. Gerente de Calidad
Directora Unidad de Suelos



E-mail: laboratoriosuelos@zamorano.edu.hn, ggauget@zamorano.edu.hn, Tel: (504) 2287-2000 ext. 2316 Fax: (504) 2287-6242 Cel: 9969-6846
Laboratorio de Suelos, Departamento de Ciencia y Producción Agropecuaria Apartado Postal # 93 Tegucigalpa-Honduras. Km 30 Carret. Danlí