

**UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE AGRONOMIA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS**

**EVALUACIÓN DEL FÓSFORO EXTRAÍDO CON DOS SOLUCIONES
EXTRACTORAS EN 19 SUELOS DEL ALTIPLANO OCCIDENTAL DE GUATEMALA.**

TESIS

**PRESENTADA A LA HONORABLE JUNTA DIRECTIVA DE LA FACULTAD DE
AGRONOMIA DE LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA**

POR

NORVIN ARIEL RAMOS SANTOS

EN EL ACTO DE INVESTIDURA COMO

INGENIERO AGRÓNOMO

EN

**SISTEMAS DE PRODUCCIÓN AGRÍCOLA
EN EL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIADO**

GUATEMALA, NOVIEMBRE DEL 2,003.

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

RECTOR

Dr. M.V. LUIS ALFONSO LEAL MONTERROSO

JUNTA DIRECTRIVA DE LA FACULTAD DE AGRONOMIA

DECANO:	Dr.	ARIEL ABDERRAMAN ORTIZ LÓPEZ
VOCAL PRIMERO:	Ing. Agr.	ALFREDO ITZEP MANUEL
VOCAL SEGUNDO:	Ing. Agr.	MANUEL DE JESÚS MARTINEZ OVALLE
VOCAL TERCERO:	Ing. Agr.	ERBERTO RAÚL ALFARO ORTIZ
VOCAL CUARTO:	Br.	LUIS ANTONIO RAGUAY PIRIQUE
VOCAL QUINTO:	Br.	JUAN MANUEL COREA OCHOA
SECRETARIO:	Ing. Agr.	PEDRO PELÁEZ REYES

Guatemala, Noviembre 2003

Señores:

Honorable Junta Directiva
Honorable Tribunal Examinador
Facultad de Agronomía
Universidad de San Carlos de Guatemala

Señores Miembros:

De acuerdo con las normas establecidas por la Ley Orgánica de la Universidad de San Carlos de Guatemala, tengo el honor de someter a consideración de ustedes el trabajo de tesis titulado:

**EVALUACIÓN DEL FÓSFORO EXTRAÍDO CON DOS SOLUCIONES
EXTRACTORAS EN 19 SUELOS DEL ALTIPLANO OCCIDENTAL DE GUATEMALA.**

Presentado como requisito previo a obtener el título de Ingeniero Agrónomo en Sistemas de Producción Agrícola, en el grado académico de Licenciado.

Respetuosamente:

Norvin Ariel Ramos Santos

ACTO DE DEDICO

A:

DIOS: Por estar en todos los momentos de mi vida y permitirme llegar a cumplir una más de mis metas.

MIS PADRES: Julio Ramos y Marta Santos de Ramos, por el apoyo incondicional que me brindaron, que este triunfo sea recompensa a sus innumerables esfuerzos y sacrificios.

MIS HERMANAS: Aminda Ramos, Patricia Ramos (QEPD), por el cariño y apoyo que siempre me han brindado.

MIS SOBRINOS: Fabiola, Antonio, Josue, Lourdes. Con cariño.

MIS CUÑADOS: Antonio Guzman, Juan Pardo, con aprecio.

MIS COMPAÑEROS Y AMIGOS: Por los momentos compartidos.

TESIS QUE DEDICO

A:

GUATEMALA.

SANTA MARIA IXHUATAN, SANTA ROSA.

LA FACULTAD DE AGRONOMIA.

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA.

TODOS LOS AGRICULTORES DE GUATEMALA.

AGRADECIMIENTOS

A:

MIS ASESORES:

Ing. Agr. José Chonay Pantzay
Inga. Agra. Ana Celena Carías
Por su colaboración incondicional en la realización del presente trabajo.

A el Ing. Agr. Anibal Sacbaja, por su amistad y su valiosa colaboración y el apoyo para la realización del presente trabajo de investigación.

Mis compañeros y amigos del laboratorio de Análisis de suelo, agua y planta "Ing. Salvador Castillo Orellana" FAUSAC.

Todas aquellas personas, que de una u otra forma, colaboraron en la realización de las diferentes fases de este trabajo de tesis.

INDICEGENERAL

	Página
INDICE DE CUADROS	III
INDICE DE FIGURAS	III
RESUMEN	IV
1 Introducción.....	1
2 Definición del problema.....	2
3 Marco teórico.....	3
3.1 Marco Conceptual.....	3
3.1.1 Análisis de suelos.....	3
3.1.2 Selección de la solución extractora.....	3
3.1.3 Descripción de los métodos de extracción de los elementos en el suelo.....	4
3.1.4 Fósforo.....	5
3.1.5 Fijación de fósforo.....	6
3.1.6 Dinamica del fósforo en el suelo.....	7
3.1.7 Factores que afectan la dinámica y disponibilidad del fósforo en el suelo.....	7
3.1.8 Nivel critico.....	8
3.1.9 Método de Correlación.....	9
3.1.10 Método Grafico de Cate y Nelson.....	10
3.1.11 Planta indicadora.....	11
3.2 Marco Referencial.....	12
3.2.1 Niveles y rangos críticos para el P encontrados en algunas series de suelos de Guatemala.....	12
3.2.2 Antecedentes de investigaciones internacionales.....	13
3.2.3 Descripción del Área Experimental.....	14
3.2.3.1 Localización.....	14
3.2.3.2 Características generales del área de estudio.....	14
3.2.3.3 Condiciones climáticas.....	15
3.2.3.4 Geología.....	15
3.2.3.5 Fisiografía.....	15
3.2.4 Descripción y ubicación de los suelos según clasificación Taxonomica.....	16
4 Objetivos.....	20
5 Hipótesis.....	20
6 Metodología.....	21
6.1 Selección de los puntos de muestreo.....	21
6.2 Muestreo.....	21
6.2.1 Preparación de las muestras de suelo.....	21

6.3	Determinaciones físicas y químicas de las muestras de suelo.....	21
6.3.1	Análisis realizados en el laboratorio.....	21
6.3.2	Descripción de las soluciones extractoras evaluadas.....	22
6.4	Determinación de las cantidades de elementos utilizados en la definición del tratamiento de referencia.....	23
6.4.1	Estudio de sorción.....	23
6.5	Fase de invernadero.....	23
6.5.1	Metodología experimental.....	23
6.5.2	Unidad experimental.....	24
6.5.3	Variabes evaluadas.....	24
6.6	Manejo agronómico del experimento.....	24
6.7	Análisis de la información.....	25
6.7.1	Nivel crítico.....	25
7	Resultados y discusión.....	26
7.1	Características físicas y químicas de los suelos.....	26
7.2	Determinación de niveles críticos para fósforo.....	29
8	Conclusiones.....	33
9	Recomendaciones.....	34
10	Bibliografía.....	35
11	Anexo.....	38

INDICE DE CUADROS

	Página
1 Diferentes soluciones extractoras utilizadas en el análisis de suelo.....	4
2 Localización y ubicación de los puntos de muestreo.....	14
3 Posición fisiográfica, material madre y características de los perfiles de los suelos muestreados.....	18
4 Características importantes que influyen el uso del suelo.....	19
5 Características físicas y químicas determinadas y metodologías utilizadas en el análisis de las muestras de suelos evaluados.....	22
6 Soluciones extractoras evaluadas, reactivos y procedimiento utilizado.....	22
7 Concentración de fósforo en las soluciones de los tratamientos de sorción.....	23
8 Tratamientos evaluados.....	24
9 Características químicas de los 19 suelos estudiados.....	26
10 Características físicas de los suelos estudiados.....	26
11 Fósforo extraído con la solución extractora Mehlich I, Mehlich III y el porcentaje de rendimiento relativo de sorgo, en suelos del altiplano occidental de Guatemala.....	29
12 Porcentaje de fijación promedio de fósforo en las 19 muestras de suelo.....	39

INDICE DE FIGURAS

	Página
1 Determinación del nivel crítico del suelo según Cate y Nelson.....	11
2 Nivel crítico de fósforo con la solución extractora Mehlich I.....	30
3 Coeficiente de correlación de fósforo entre el rendimiento relativo y la extracción de Mehlich I.....	31
4 Nivel crítico de fósforo con la solución extractora Mehlich III.....	31
5 Coeficiente de correlación de fósforo entre el rendimiento relativo y la extracción de Mehlich III.....	32
6 Curva de retención de fósforo.....	39
7 Mapa de ubicación de los puntos de muestreo de los suelos del Altiplano Occidental de Guatemala	40

EVALUATION OF THE PHOSPHORUS EXTRACTED WITH TWO EXTRACTING SOLUTIONS IN 19 SOILS OF THE WESTERN ALTIPLANO OF GUATEMALA

EVALUACIÓN DEL FÓSFORO EXTRAÍDO CON DOS SOLUCIONES EXTRACTORAS EN 19 SUELOS DEL ALTIPLANO OCCIDENTAL DE GUATEMALA

RESUMEN

Cuando el análisis químico de suelos está orientado hacia el diagnóstico de la fertilidad sirve de guía para las recomendaciones de fertilizantes y enmiendas de los cultivos. Existen metodologías específicas de extracción para cada nutriente las cuales varían dependiendo de las propiedades químicas de los mismos (pH, mineral arcilloso dominante, contenidos de materia orgánica); razón por la cual es necesario realizar evaluaciones de metodologías de extracción de elementos en diferentes suelos con características similares y correlacionar los valores obtenidos con parámetros de crecimiento de las plantas para obtener rangos críticos confiables. El objetivo del presente estudio fue determinar el grado de asociación entre el fósforo extraído con dos soluciones extractoras (Mehlich I y Mehlich III) y el rendimiento relativo de biomasa aérea de (*Sorghum bicolor* L.) como también determinar el nivel crítico de fósforo para las dos soluciones extractoras usando el método gráfico de Cate y Nelson en 19 suelos del Altiplano Occidental de Guatemala a nivel de invernadero.

Para la presente investigación se seleccionaron 19 sitios de muestreo distribuidos en los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán y Sololá, tomando en cuenta el uso del suelo, clima, altura, geología, topografía. Por cada punto de muestreo se tomó una muestra compuesta de 50 kg a una profundidad de 0 a 30 cm las cuales se utilizaron en los análisis físico químico y estudio de invernadero.

A nivel de laboratorio se determinó el fósforo con dos soluciones extractoras (Mehlich I y Mehlich III) en los 19 suelos, y a nivel de invernadero se realizó una prueba biológica utilizando *Sorghum bicolor* L. como planta indicadora. Se utilizó el diseño experimental de Bolques Completamente al Azar, con dos tratamientos (1. referencia 2. sin P) y tres repeticiones, la unidad experimental consistió en una maceta de plástico con capacidad de 500mL de suelo. Las variables evaluadas fueron, en el suelo, índices de fósforo expresados en mg kg^{-1} y en el sorgo, materia seca aérea y rendimiento relativo. Los índices de fósforo que se obtuvieron con cada solución extractora se correlacionaron con los rendimientos relativos de materia seca de sorgo para obtener los coeficientes de correlación y a través del Método Gráfico de CATE y NELSON se determinaron los niveles críticos de P para cada solución extractora.

Los resultados indican que los coeficientes de correlación entre el fósforo extraído y el rendimiento relativo fueron para la solución Mehlich I $r = 0.9274$ y la solución Mehlich III $r = 0.9627$ y nivel crítico para fósforo es de 15 mg kg^{-1} para la solución Mehlich I y 19 mg kg^{-1} para la solución extractora Mehlich III. con lo cual se concluye que las dos metodologías utilizadas en la extracción de fósforo para los suelos del altiplano Occidental que abarcan los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango Totonicapán y Sololá son confiables y que se pueden ser utilizadas en el análisis químico de fósforo para la recomendación de programas de fertilización fosfatadas.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la agricultura moderna se basa principalmente en el uso de una agricultura intensiva y no extensiva. Para poder desarrollar este tipo de agricultura es necesario optimizar ciertos factores que inciden directamente en la productividad de los cultivos. En una agricultura intensiva los nutrientes presentes en el suelo se agotan rápidamente debido a su constante extracción por los cultivos, repercutiendo directamente sobre la fertilidad, lo que implica la reposición de los nutrientes a través de fertilizantes químicos y orgánicos.

La cantidad de nutrientes adicionados debe ser optimizada para que el productor obtenga los mayores beneficios económicos, debido a que una cantidad excesiva de fertilizantes puede ocasionar la pérdida total del cultivo mientras que una cantidad insuficiente origina que se incurra en gastos sin obtener beneficios que los compensen.

Para diagnosticar la fertilidad química de un suelo se pueden utilizar diferentes métodos como el análisis químico del suelo, análisis de tejido vegetal, métodos microbiológicos y métodos biológicos o la combinación de estos. El análisis químico de suelos utiliza soluciones extractoras que simulan la absorción de nutrimentos por la planta. Los valores de las fracciones de los nutrientes obtenidas deben ser correlacionadas con parámetros de crecimiento de los cultivos para que tengan significado, esto se logra a través de pruebas biológicas a nivel de invernadero o en el campo. De ahí la importancia de realizar este tipo de investigaciones en los suelos de las diferentes regiones fisiográficas del país para determinar la mejor solución extractora de fósforo y su nivel crítico para realizar interpretaciones y recomendaciones correctas de fertilizantes.

El objetivo principal del presente trabajo fue determinar el grado de asociación entre el fósforo extraído con cada una de las soluciones extractoras evaluadas (Mehlich I y Mehlich III) y el rendimiento relativo de biomasa aérea a nivel de invernadero, y la determinación del nivel crítico de fósforo utilizando sorgo *Sorghum bicolor L.* como planta indicadora en 19 suelos procedentes del Altiplano Occidental de Guatemala, distribuidas en los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán y Sololá.

2. DEFINICION DEL PROBLEMA

Guatemala se caracteriza por poseer diversidad fisiográfica, climática y geológica que al interactuar a través del tiempo da lugar a la formación de suelos con diferentes características químicas, físicas y biológicas y por ende los nutrientes se encuentran en diferentes formas químicas como es el caso del fósforo que puede encontrarse reaccionando con el Fe, Mn, Al, Ca Mg, lo que da lugar a que el diagnóstico de la fertilidad de los suelos a través del análisis químico se vuelva complejo, por no existir una solución extractora que sea funcional para el fósforo en las diferentes características químicas.

Como prueba de ello los laboratorios de análisis de suelo existentes en el país: Instituto de Ciencia y Tecnología (ICTA), Asociación Nacional del Café (ANACAFE), Laboratorio de Suelo y Planta Salvador Castillo de la Universidad de San Carlos de Guatemala y el laboratorio de Soluciones Analíticas, no utilizan la misma solución extractora; tres utilizan la solución extractora Mehlich I y uno la solución Mehlich III, las cuales son generalizadas para todos los suelos del país sin tomar en cuenta la diversidad climática, geológica y fisiográfica y sin haber realizado estudios de correlación y calibración de las soluciones extractoras, en consecuencia la concentración de la fracción de los elementos puede no ser la disponible para los cultivos, dando lugar a una errónea interpretación y como consecuencia una recomendación inapropiada, repercutiendo en los rendimientos de los cultivos y en los costos.

Con base en lo expuesto con anterioridad es necesario realizar investigaciones más específicas que permitan seleccionar la metodología de extracción de la fracción disponible de fósforo que se adapte a los suelos enmarcados dentro de una región edafoclimática específica, como son los suelos del altiplano occidental de Guatemala donde se realizó la presente investigación.

3. MARCO TEORICO

3.1 MARCO CONCEPTUAL

3.1.1 ANALISIS DE SUELO

Específicamente, los análisis químicos de suelos consisten en la extracción de los nutrimentos del suelo mediante soluciones químicas. Obviamente, existen muchas diferentes soluciones extractoras que extraerán diferentes cantidades de los nutrimentos en los diferentes tipos de suelos. Por sí solo un análisis de suelo no tiene valor, es una cifra empírica que puede reflejar o no la disponibilidad de un nutrimento para las plantas. Estas extracciones tendrán un sentido agronómico sí guardan alguna relación con la acción que hacen las raíces de las plantas en el suelo. Si no se ha comprobado de antemano que cuando la solución extractora extrae poco de un nutrimento las plantas crecen poco, y que cuando extraen mucho se obtienen buenos rendimientos, el valor de un análisis de suelo carece de significado. Además es muy importante establecer el punto o nivel de elemento extraído con esa solución extractora a partir del cual los rendimientos que se obtienen del cultivo son casi iguales. De ahí que el diagnóstico químico de la fertilidad del suelo, para ser adecuado y confiable deba apoyarse en dos aspectos esenciales:

- a) En el uso de soluciones extractoras de la fracción disponible adecuadas para los diferentes grupos de suelos, y
- b) En la utilización de niveles críticos (altos, medios y bajos) confiables, calibrados para la solución extractora más adecuada según los grupos de suelos, y según los cultivos (3).

3.1.2 SELECCIÓN DE LA SOLUCION EXTRACTORA

La escogencia de una u otra solución extractora para un elemento dado se basa en la mayor o menor asociación entre la cantidad del elemento extraído por la solución y lo que realmente extrae la planta. En términos prácticos, una solución extractora será eficiente o adecuada cuanto a valores altos de extracción correspondan también valores altos de absorción del elemento y cuando los valores bajos de extracción coincidan con baja absorción del elemento por la planta. El caso contrario supondrá una eficiencia baja o nula (3).

CUADRO 1. Diferentes soluciones extractoras utilizadas en el análisis de suelo.

SOLUCION EXTRACTORA	COMPOSICION QUIMICA	RELACION
Bray I	NH ₄ F 0.03N + HCl 0.025N	1:7
Bray II	NH ₄ F 0.03N + HCl 0.1N	1:7
Olsen	NaHCO ₃ 0.5M a pH 8.5	1:20
Olsen modificado	NaHCO ₃ 0.5N + EDTA 0.01M	1:10
Ácido Doble Diluido	H ₂ SO ₄ 0.025N + HCl 0.05N	1:5
NO ₃ H	NO ₃ H 1N	1:10
Mehlich II	HOAc 0.2N+NH ₄ F 0.15N+NH ₄ Cl 0.2N +HCl 0.12N	1:10
Acetato de amonio	NH ₄ C ₂ H ₃ O ₂ 1N pH 7	1:5
Mehlich III	CH ₃ COOH 0.2N +H ₄ NO ₃ 0.25N+NH ₄ F 0.015N+HNO ₃ 0.013+EDTA 0.001M	1:10
AB – DTPA	NH ₄ HCO ₃ 1M + DTPA 0.005M pH	
Truog	H ₂ SO ₄ 0.002N amortiguada a pH 3 con (NH ₄) ₂ SO ₄	1:100
Ácido Cítrico	Ácido Cítrico 1%	1:10
Egner et al.	Lactato de Ca 0.02N + HCl 0.02N	1:20
Morgan	HOAc 0.54 + NaOAc 0.7N a pH 4.8	1:10

FUENTE: Cajuste, L. J. (6), Días, R; Nutre, A. (11), Salinas, J; Sánchez, P. (28)

3.1.3 DESCRIPCIÓN DE LOS METODOS DE EXTRACCION DE LOS ELEMENTOS EN EL SUELO

A. SOLUCION EXTRACTORA MEHLICH I

Este método sirve básicamente para determinar el fósforo en los suelos arenosos que tienen una capacidad de intercambio menor a 10 meq/100gr. De pH ácido de 6.5 con un contenido relativamente bajo de materia orgánica menor de 5%, este método nos es recomendable para suelos alcalinos. Extrae cantidades de fósforo no disponible en suelos con pH mayores de 6.0 (6).

B. SOLUCION EXTRACTORA MEHLICH III

Esta solución extractora esta compuesta por de ácido acético 0.2 N, nitrato de amonio 0.25 N, fluoruro de amonio 0.015N, ácido nítrico 0.013 N y EDTA 0.001 M. regulada a pH 2.5; ésta solución puede ser utilizada para la extracción de macro y micronutrientes, siendo una ventaja sobre las demás soluciones extractoras (6).

C. SOLUCION EXTRACTORA OLSEN

La solución extractora esta formada por NaHCO₃ 0.5M de pH 8.5. Bajo estas condiciones, la solubilidad del fosfato de calcio existente en los suelos calcáreos, alcalinos o neutros aumenta debido a la precipitación de Ca²⁺ como CaCO₃. En suelos ácidos que contengan fosfatos ligados al Al y Fe, la concentración de fósforo en la solución incrementa conforme sube el pH. Reacciones de precipitación secundaria se reducen al mínimo debido a que la concentración de Al, Ca y Fe, se mantienen a un bajo nivel en esta solución extractora(6).

D. SOLUCION EXTRACTORA OLSEN MODIFICADO

Esta solución esta compuesta por los siguientes compuestos: 0.5 N de NaHCO_3 , 0.01M EDTA con 0.5 gr de superfloc 127 para preparar 10 litros de solución.

El fósforo extraído con NaHCO_3 generalmente es menor que el extraído con Mehlich I y Bray I. Se ha reportado que la solución extractora de Olsen Modificado tiene una buena correlación con la extracción de fósforo con Resina intercambiable. Este ultimo método es apropiado para suelos de origen volcánico; además, representa un método para extracción de macronutrientes y micronutrientes(6).

E. SOLUCION EXTRACTORA BRAY I

Esta solución esta formada por fluoruro de amonio 1M y ácido clorhídrico 0.5M. Para suelos ácidos, el fluoruro incrementa la liberación del fósforo y decrece la liberación del aluminio por la formación del complejo de aluminio y fluoruro. Es una solución extractora no recomendable para suelos calcáreos debido a la neutralización de los carbonatos de calcio lo cual disuelve el complejo de fósforo calcio. Una desventaja de esta solución es la interferencia del fluor en la formación del color, para evitar esta interferencia se adiciona bisulfito de sodio(6).

3.1.4 FOSFORO

El fósforo del suelo proviene mayormente de la meteorización de la apatita, un mineral que contiene fósforo (P) y calcio (Ca), así como otros elementos como flúor y cloro. El fósforo elemental es químicamente muy reactivo y por esta razón no está presente en un estado puro en la naturaleza. Se encuentran solamente en combinaciones químicas con otros elementos. A medida que las apatitas se descomponen y libera fósforo, se forman varios compuestos de este elemento en el suelo y se liberan los dos iones ortofosfato que son absorbidos por las plantas (5).

El fósforo total en la capa arable disminuye conforme aumenta la intensidad de la meteorización. Los suelos jóvenes derivados de ceniza volcánica presentan un mayor contenido de fósforo total que los desarrollados de sedimentos meteorizados y depositado en áreas bajas tropicales. Así, en Oxisoles, Ultisoles y Alfisoles es común que los valores de fósforo total sean inferiores a 200 ppm. Mientras que en Andisoles, oscilan entre 1000 y 3000 ppm (3).

Los contenidos de fósforo en suelos de áreas tropicales son muy variables. Entre las condiciones edafológicas y ecológicas del suelo, las que principalmente determinan esta variable son el tipo de roca parietal presente, el grado de desarrollo de los suelos y el contenido de materia orgánica en forma localizada, suelos ricos en fósforo total resultan de materiales parentales ricos en fósforo. Por otra parte, al aumentar el contenido de materia orgánica de los suelos, aumenta el contenido de fosfato orgánico y por lo tanto los contenidos totales llegan a ser mayores. Factores estabilizadores de materia orgánica como órgano minerales y alófana es muy posible que conduzcan a elevar los niveles de fósforo total de

los suelos. El contenido total también depende de la textura del suelo y tanto en áreas de clima templado como tropicales, entre más fina sea la textura, mayor es el contenido de fósforo total. El fósforo en el suelo lo podemos encontrar en forma de fósforo orgánico y fósforo inorgánico, dentro del fósforo inorgánico se diferencian tres fracciones (17).

Fósforo Nativo o Precipitado: Esta forma sólida de fósforo inorgánico por lo general esta dividida en tres fracciones activas y dos relativamente inactivas. Las activas son los fosfatos enlazados a Calcio, Aluminio y al Hierro y se presentan como película o están absorbidos en la superficie de arcillas o limos. Las formas inactivas son las formas oclusivas y aquellas que se disuelven con la reducción química del suelo. Fósforo oclusivo consiste de compuestos de P-Al y P-Fe rodeado de un revestimiento inerte que evita la reacción de estos fosfatos con la solución del suelo (3).

Fósforo Absorbido al Complejo Coloidal: Como anión que es, el fosfato esta sujeto a fenómenos de adsorción e intercambio aniónico en la superficie coloidal cargadas positivamente. Dentro de los aniones presentes en el suelo, los fosfatos son los que presentan mayor fuerza de retención y hasta son capaces de desplazar al resto. Las cargas positivas del complejo coloidal se producen en todos aquellos puntos en donde hay OH terminales (bordes rotos, alófana, materia orgánica, sesquióxidos) cuando las condiciones son lo suficientemente ácidas que permitan la protonación de esos OH (3).

Fósforo Soluble en la Solución del Suelo: Las cantidades en esta fracción son bajas, del orden de menos de 0.2 ppm. Se presentan en las dos formas aniónicas mas soluble (H_2PO_4^- y HPO_4^{2-}) variando su predominancia según el pH. Entre el pH 2 y 7 predomina la forma H_2PO_4^- y entre pH 7 y 12, la forma HPO_4^{2-} por lo que la forma mas común en los suelos tropicales es la H_2PO_4^- (8).

3.1.5 FIJACION DE FOSFORO

La fijación del fósforo se refiere a cualquier procedimiento o mecanismo por medio del cual las formas solubles y disolubles son convertidas a formas insolubles y no disponibles a la planta. El origen del suelo afecta la fijación del fósforo (25).

Sánchez (29), considera la fijación como el proceso que altera la disponibilidad de los compuestos fosfatados conforme lo indica el crecimiento de la planta. El proceso consiste en la transformación de fosfatos monocalcicos solubles en fosfatos menos solubles de calcio, aluminio y hierro.

Fassbender (13), indica que el tipo de arcilla es otro factor que influye en el fenómeno de fijación de fósforo por el coloide inorgánico; el ion fosfato reemplaza al radical OH, o es absorbido por la micela de arcilla mediante un puente de calcio.

Tisdale y Nelson (33), señalan que los suelos con alto contenido de arcilla y arcillas de baja relación $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, tienen mayor poder de fijación.

3.1.6 DINAMICA DEL FOSFORO EN EL SUELO

La planta absorbe en grandes cantidades, nitrógeno, fósforo y potasio. Aunque el fósforo generalmente se incluye dentro de este grupo de elementos mayores porque se aplica en grandes cantidades, no es en realidad consumido por la planta en gran magnitud, sino que su uso en el suelo resulta muy ineficiente (3).

El fósforo se mueve muy poco en la mayoría de los suelos. Generalmente se mantiene en el lugar que ha sido colocado por la meteorización de los minerales o por la fertilización; Muy poco se pierde por lixiviación, aunque cuando se mueve mas libremente en suelos arenosos que en arcillosos. La erosión y la remoción por el cultivo son las dos únicas formas significativas de perdida de fósforo del suelo.

Casi todo el fósforo se mueve en el suelo por difusión, un proceso lento de poco alcance que depende de la humedad del suelo. Las condiciones secas reducen notablemente la difusión (17). Este proceso es el movimiento que ocurre a través de la solución del suelo en respuesta a un gradiente de concentración del nutrimento, ó sea, que las partículas se mueven de zonas de mayor concentración a zonas de menor concentración.

La difusión depende de factores como el coeficiente químico de difusión de cada elemento, la magnitud de las gradientes, la textura, la cantidad de agua creciente en el suelo, la superficie de raíz disponible a la absorción la tortuosidad y la viscosidad del medio (3).

3.1.7 FACTORES QUE AFECTAN LA DINAMICA Y DISPONIBILIDAD DEL FOSFORO EN EL SUELO

La mayoría de los cultivos recupera solamente del 10 al 30% del fósforo aplicado el primer año después de la aplicación. El porcentaje de recuperación varia ampliamente. Dependiendo principalmente de factores como las fuentes de fósforo, tipos de suelo, cultivo, método de aplicación y clima. Sin embargo, una apreciable cantidad de fósforo residual pasara a ser disponible para los cultivos subsiguientes. La disponibilidad y dinámica del fósforo varia de acuerdo a los siguientes factores:

Cantidad de arcilla: A mayor cantidad de arcilla, habrá una mayor fijación de fósforo.

Tipo de arcilla: Suelos con contenido alto de arcilla como caolinita, óxidos, hidróxidos de Fe y Al que son comunes en regiones con altas temperaturas y precipitaciones, y arcillas amorfas como alófana, imogolita y humus-Al que son comunes en suelos de origen de ceniza volcánica, retiene o fijan mas fósforo que otros suelos.

Época de aplicación: Cuanto mayor sea el tiempo que el suelo se encuentre en contacto con fósforo añadido, mayor es la posibilidad de fijación.

Aireación: El oxígeno es necesario para el crecimiento de las plantas y la absorción de nutrientes, es esencial para la descomposición de la materia orgánica del suelo, una fuente importante de fósforo.

Humedad: El incrementar la humedad del suelo a niveles óptimos hace que el fósforo sea más disponible para la planta. Sin embargo el exceso de humedad reduce el oxígeno lo que limita el crecimiento de la raíz y hace lenta la absorción de fósforo (17).

Contenido de fósforo en el suelo: Los suelos que han recibido varios años más fósforo que la cantidad removida en los cultivos presentarán un incremento en los niveles de disponibilidad de fósforo.

Temperatura: Las temperaturas ideales para un buen crecimiento de la planta afectan muy poco la disponibilidad del fósforo. Sin embargo las temperaturas muy altas o bajas pueden restringir la absorción.

Otros Nutrientes: La aplicación de otros nutrientes puede estimular la absorción de fósforo.

El pH: En los suelos dominados por arcillas del tipo 2:1 la solubilidad de varios compuestos de fósforo está determinada principalmente por el pH del suelo.

Las formas más solubles o disponibles de fósforo existen en el rango de pH de 5.5 a 7.0 los compuestos insolubles de fósforo como el Ca y Mg como cal y magnesio existen sobre el valor de pH 7.0 (17).

3.1.8 NIVEL CRÍTICO

Salinas y Sánchez citados por Herrarte (15), definen el nivel crítico como la concentración de nutrientes que puede ser extraída del suelo y afecta positivamente el rendimiento máximo estable, a un nivel menor, la producción y cantidad del cultivo declinan significativamente.

Hunter citado por Recinos (25), indica que el uso del análisis del suelo como un medio para determinar el estado de fertilidad y disponibilidad de nutrientes para las plantas, está basado en la determinación de los niveles críticos en relación con la solución de extracción utilizada cuando la concentración de un elemento medido en el suelo está por debajo de ese nivel, el crecimiento de la planta estará restringido por el grado en que el elemento se encuentre por debajo del mismo.

Guerrero (14), define que la determinación de los niveles críticos se realiza para la metodología de extracción que haya dado los mejores resultados, es decir, que muestre una correlación entre la absorción de nutrientes por la planta o con los rendimientos relativos.

El procedimiento para obtener los niveles críticos consiste en: muestreo de suelo, análisis químico con las soluciones extractoras, ensayo de invernadero, correlación entre la absorción de nutrientes por la planta o con rendimientos relativos, selección y ubicación del nivel crítico. Además, nos permite agrupar los suelos en categorías de acuerdo a su fertilidad.

En la determinación de los niveles críticos se utiliza la información concerniente a la correlación entre los valores del elemento disponible en el suelo y los valores correspondientes al rendimiento relativo obtenido con la aplicación del elemento o los elementos de estudio. La alta correlación positiva obtenida previamente entre estas dos variables garantizara que el grupo de suelos que muestran bajos niveles disponibles de nutrimento corresponda con bajos rendimientos relativos, estos suelos van a presentar altas probabilidades de respuesta a la aplicación de nutrientes. Por el contrario, el grupo de suelo que tenga altos niveles disponibles del nutrimento corresponderá a altos rendimientos relativos, estos suelos van a presentar bajas probabilidades de respuesta (14).

3.1.9 METODO DE CORRELACION

Para que un análisis de suelo tenga significado para cualquier nutriente, este deberá ser asociado con la disponibilidad de dicho nutriente para la planta (19). Se han ensayado diversas técnicas para relacionar los análisis de suelo con el crecimiento de las plantas, fluctuando desde intentos directos para extraer químicamente del suelo la misma cantidad que las raíces extraen biológicamente, hasta correlaciones indirectas o empíricas entre los nutrimentos extraídos y el crecimiento vegetal. Los métodos indirectos de correlación han resultado ser los medios mas prácticos para una evaluación, a pesar de la dificultad de controlar los factores de rendimiento. Muchos científicos prefieren iniciar los trabajos de correlación con estudios de invernadero donde el rendimiento puede ser controlado dentro de los límites razonables a través de un mejor control de todos los factores del crecimiento. Aun así, el rendimiento es afectado por tantos factores que los estudios de correlación entre los análisis de los suelos y el rendimiento absoluto en materia seca (o una medida relacionada, tal como asimilación de nutrientes), han tenido mas éxito que los estudios que involucran el rendimiento relativo. A pesar de ser cierto que la simulación de nutrientes, o la cantidad de nutriente en un tejido vegetal, frecuentemente correlaciona bien con el análisis de suelo, no existe una manera conveniente para distinguir entre el requerimiento de la planta y el consumo de lujo. Entonces, la escala que resulta para la interpretación de los análisis de suelos será arbitraria sin un punto de inflexión bien definido que indique cuando la fertilidad de los suelos esta por debajo o sobre el rango de la respuesta del rendimiento.

Los diagramas de dispersión para la correlación del rendimiento relativo vrs el análisis de suelo son difíciles de manejar como funciones continuas debido a que la relación no es lineal. En la mayoría de los casos, la función no tiene ni siquiera una forma polinomial de alto grado.

Desde el punto de vista práctico, es muy útil dividir los suelos en categorías de fertilidad de acuerdo a la probabilidad de que exista una respuesta beneficiosa en el rendimiento. El Comité Nacional de Investigación de Análisis de Suelo de los Estados Unidos tomó algunos pasos en esta dirección e hizo divisiones de clases arbitrarias basadas en el grado de la respuesta del rendimiento. Sin embargo,

mayormente, no se han propuesto otras bases cuantificables para separar categorías desde el trabajo realizado por Cate y Nelson (19).

3.1.10 METODO GRAFICO DE CATE Y NELSON

Cate y Nelson, en 1965 desarrollaron un método gráfico sencillo para determinar con muy buena aproximación, un primer nivel crítico. En vez de intentar adecuar una función matemática continua a través de los puntos diseminados, se coloca una hoja transparente dividida en cuadrantes por líneas horizontales y verticales.

El método de Cate y Nelson consiste en plotear los valores de los rendimientos relativos en función del análisis de suelo, básicamente la concentración de la fracción disponible. Es conveniente utilizar un plástico transparente de sobrepuesto dividido por cuadrantes que son líneas horizontales y verticales (7). Al realizar un diagrama de dispersión en un sistema de coordenadas rectangulares de puntos obtenidos entre el rendimiento relativo en el eje "Y" (ordenadas), en función del contenido del nutriente en el eje "X" (abscisa). Sobre este diagrama se coloca una hoja transparente dividida en cuadrantes por líneas horizontales y verticales de tal manera que el máximo número de puntos se ubique en los dos cuadrantes positivos, tal como se observa en la figura 1.

El punto en que la línea horizontal corta al eje "Y" separa a los suelos de respuesta alta, de los de respuesta baja. El punto en que la línea vertical corta el eje "X", se considera el nivel crítico para el método de análisis (19).

VENTAJAS: El método Cate y Nelson tiene algunas ventajas fundamentales y prácticas. Al separar los puntos de los datos en dos poblaciones, sigue la ley de Liebig, por cuanto el nivel crítico es el punto más allá del cual el nutrimento de que se trata deja de ser un factor limitante. En contraposición, los modelos de regresión continuos no presentan puntos de inflexión y obligan a que los agrupamientos sean arbitrarios. Otra ventaja es que el método identifica los suelos que la solución extractora no trabaja bien (los puntos que quedan en los cuadrantes negativos) (3).

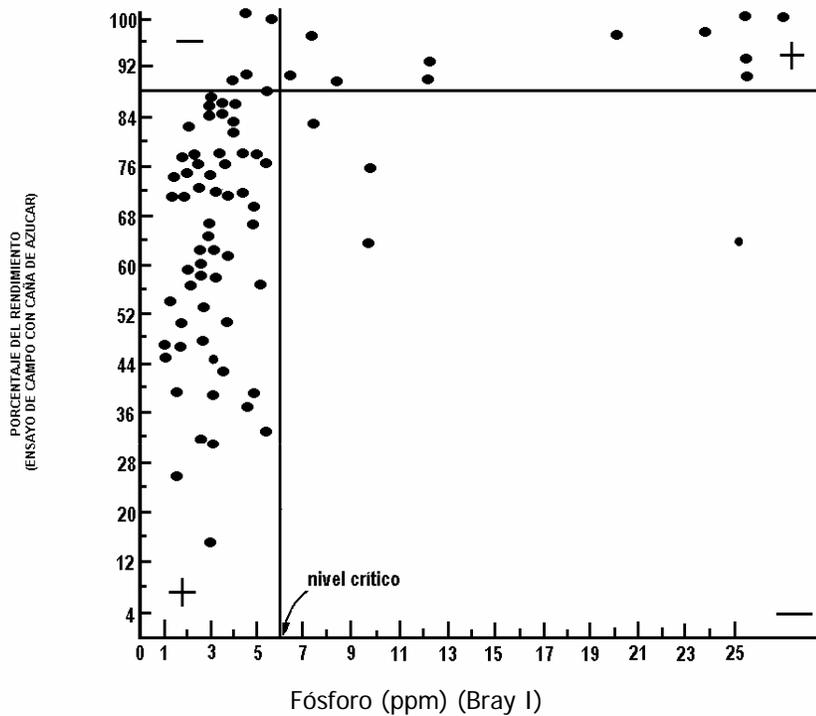


Figura 1. Determinación del nivel crítico del suelo, según Cate y Nelson

Fuente: Bertsch Hernández, Floria. 1998. La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la ciencia del suelo. p 113.

3.1.11 PLANTA INDICADORA

Para determinar los niveles críticos de fósforo de los suelos en estudio, es necesario el uso de una planta indicadora que sea sensible a la aplicación de nutrientes.

Díaz Romeu-Hunter (11), recomiendan a nivel de invernadero, el uso del sorgo *Sorghum bicolor L.* por las ventajas que esta planta presenta: entre las cuales se tienen, es sensible a la mayoría de deficiencias, crece rápido, tienen semilla pequeña y crece bien en un amplio rango de condiciones climáticas y edáficas, además de tener una germinación rápida.

El sorgo puede sembrarse directamente en macetas, alcanzando su máximo crecimiento de 4 a 5 semanas. Sus características son: posee tallos erectos, macizos de 0.6 a 2.5 metros de altura, en cada yema lateral se encuentra un nudo, hojas solitarias en los nudos, alternas, los nudos llevan

acanaladuras de un lado al otro, junto con las yemas laterales y las hojas son de limbo sin vellosidades y de superficie ceria. El sistema radicular es muy ramificado y sin pivotante.

3.2 MARCO REFERENCIAL

3.2.1 NIVELES Y RANGOS CRITICOS PARA FOSFORO ENCONTRADOS EN ALGUNAS SERIES DE SUELOS DE GUATEMALA

Hurtarte (16), determinó el nivel crítico de fósforo en la serie de suelos Chicaj, La Fragua, Zacapa, con las soluciones extractora Mehlich I y Olsen Modificado y concluyó que el nivel crítico de P para Mehlich I fue de 13.5 ppm y para Olsen Modificado de 2.5 ppm.

Barillas (1), determinó el rango y nivel crítico de fósforo y potasio con las soluciones extractoras: Mehlich I y Bray I, en las series de suelos Guatemala y Patzité. Para la serie Guatemala determinó coeficientes de correlación de 0.05 y 0.04 respectivamente para fósforo y -0.04 y -0.05 para potasio y para los suelos de la serie Patzité se determinaron los valores de coeficiente de correlación 0.07 y 0.09 para fósforo y de 0.125 y 0.118 para K.

Palencia, et.al. (24), en el Programa de Producción de Cultivos del Instituto de Ciencia y Tecnología (ICTA), y el Programa Internacional de Evaluación y Mejoramiento de la Fertilidad de los Suelos (ISFEI) evaluaron la fertilidad de los suelos en las principales regiones agrícolas del país; evaluaron dos soluciones extractoras en granos básicos: maíz, arroz, frijol, trigo, sorgo y hortalizas y concluyeron que el nivel críticos para fósforo extraído con Mehlich I era de 7.3, y para Olsen Modificado de 6.2ppm.

Meneses (22), Al evaluar tres soluciones extractoras en suelos de la serie Alotenango concluyó que los niveles críticos para fósforo y K eran: Para fósforo, con Carolina del Norte de 12.4 ppm, Con Olsen Modificado 15.4 ppm, y Morgan Modificado por Wolf de 5.2 ppm.

Espinoza (12), concluye que en la serie de suelo Tempisque, el rango y nivel crítico de fósforo es el siguiente: con la solución extractora MehlichI, el rango de concentración crítico es de 10 ppm a 16 ppm y el nivel crítico de 13 ppm. Con la solución extractora de Olsen modificado, el rango de concentración crítica es de 2.8 ppm a 4 ppm y el nivel crítico de fósforo es de 3.4 ppm. También indica que en la serie Sinaneque, el rango y nivel crítico de fósforo son: para la solución extractora Mehlich I el rango crítico va de 23 ppm a 28 ppm y el nivel crítico de 25 ppm. Para la solución extractora Olsen Modificado el rango crítico va de 3 ppm a 3.5 ppm y el nivel crítico de 3.45 ppm.

Márquez (21), al evaluar dos soluciones extractoras en dos series de suelo concluyó lo siguiente: Para la serie Cauque, el rango y nivel crítico de fósforo extraído con Mehlich I fue de 6.63 ppm a 8.14 ppm y el nivel crítico de 7.4 ppm, para la metodología de Olsen Modificado, el rango de concentración crítica fue de 3 ppm a 3.4 ppm y el nivel crítico de 3.2 ppm. Para la serie de suelos Tecpán, el rango y nivel crítico con la metodología Mehlich I fue de 8.14 ppm a 9.66 ppm y 8,9 ppm respectivamente, para la metodología de Olsen modificado el rango crítico fue de 4.7 ppm a 6 ppm y nivel crítico es de 5.35 ppm

Yoc (35), señala que para la serie de suelo Suchitepéquez, el nivel crítico de fósforo para la solución extractora Mehlich I fue de 7 ppm. y para la solución Bray II el nivel crítico fue de 15 ppm.

3.2.2 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIONES INTERNACIONALES

Rone, J.; et al. (26) Al correlacionar cuatro soluciones extractoras, Bray 1, Olsen Original (NaHCO_3 0.5M a pH 8.5), Mehlich I y Bray II para fósforo aprovechable en suelos de los campos cañeros del Ingenio "Los Mochis" de Sinaloa, encontraron que el método que presenta un coeficiente de correlación más alto entre el fósforo extraído del suelo y el fósforo absorbido por la planta es el Bray I con un coeficiente de correlación $r = 0.77$, por lo que recomendaron adoptar el método Bray I como prueba química de rutina de análisis de fósforo aprovechable del suelo en la región del estudio.

Cruz, J.; et al. (9) Estudiaron los suelos de la región de Teziutlán, Puebla, México y determinaron que el fósforo extraído con la solución extractora de Bray I presentó el coeficiente de correlación mas alto (0.55) con relación a la materia seca, seguido por el método Bray II, Wolf y Mehlich I. Y para el parámetro concentración de fósforo el método Bray II obtuvo una correlación de (0.64) y para Mehlich I (0.63).

Romero, G.; et al. (27) En un estudio de correlación de métodos de análisis de fósforo en suelos de la región de Teziutlan, Puebla, México. Encontraron que los coeficientes de correlación r para rendimiento de materia seca (gr/macetas) con cuatro métodos de análisis, fueron los siguientes, el coeficiente de correlación $r = 0.53$ para el método de Bray I, para Bray II $r = 0.477$, para Mehlich I $r = 0.373$ y Wolf con un $r = 0.402$. La concentración de fósforo (%) tuvo un $r = 0.63$ significativo para Bray II y un $r = 0.62$ para Mehlich I de la absorción de fósforo (mg/macetas) en la planta indicadora de sorgo se obtuvo un $r = 0.65$ para Bray II y un $r = 0.60$ para Mehlich I.

Bautista, G.; et al. (2) Correlacionaron 4 métodos de extracción de fósforo (Olsen, Bray II, Soltanpour y Mehlich III); con la producción de materia seca (gr/ maceta) y concentración de fósforo en la materia seca en suelos de Tehuantepec, Oaxaca, México. Determinaron para los métodos Osen Y Soltanpour los coeficientes mas altos (0.57) con respecto a la producción de materia seca. Para la concentración

de fósforo en la materia seca los coeficientes mas altos correspondieron a la soluciones Mehlich III con (0.51).

3.2.3 DESCRIPCION DEL AREA EXPERIMENTAL

3.2.3.1 LOCALIZACION

La investigación se realizo en el invernadero de la Facultad de Agronomía, que se encuentra ubicado en la ciudad universitaria zona 12, ciudad capital, Guatemala. Sus coordenadas son 14°35' 11" latitud norte y 90° 31' 58". latitud oeste a una altura de 1,502.32 msnm, con una precipitación anual de 1,246 mm. distribuidos en 110 días del año. Con temperatura media de 17.2°C. con una humedad relativa de 79% (25).

3.2.3.2 CARACTERISTICAS GENERALES DEL AREA DE ESTUDIO

El área de estudio se ubica en el Altiplano Occidental del país, teniendo su localización desde 1,600 msnm a 2,896 msnm. Los departamentos estudiados fueron (San Marcos, Totonicapán, Quetzaltenango y Sololá).

CUADRO 2. LOCALIZACIÓN Y UBICACIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

Suelo	LOCALIZACIÓN			UBICACIÓN		
	Aldea	Municipio	Departamento	Altitud	Latitud	Longitud
1	Chana	Tajumulco	San Marcos	2050	1666000	615000
2	Las Barrancas	Sibinal	San Marcos	2410	1674000	602000
3	Independencia	Tejutla	San Marcos	2520	1672000	628000
4	El Paraíso	Esquipulas palo Gordo	San Marcos	2490	1652000	626000
5	La Cienega	Cabricán	Quetzaltenango	2896	1667000	645000
6	Los Angeles	Sibilia	Quetzaltenango	2800	1658000	648000
7	Sta. Ma. De Jesús	Zunil	Quetzaltenango	1603	1628000	658000
8	Almolonga	Quetzaltenango	Quetzaltenango	2251	1638000	662000
9	Chipoc	Concepción Chiquirichapa	Quetzaltenango	2502	1642000	648000
10	San Ramón	Sn. Cristobal Toto.	Totonicapán	2380	1643000	668000
11	Paxboch	Sn. Bartolo	Totonicapán	2234	1671000	665000
12		Sta.Ma. Chiquimula	Totonicapán	2857	1662000	678000
13	Tierra Colorada	Momostenango	Totonicapán	2380	1661000	671000
14	Pachoc	Totonicapán	Totonicapán	2730	1652000	684000
15	Palanquix	Nahualá	Sololá	2467	1641000	682000
16	Argueta	Sololá	Sololá	2113	1639000	691000
17		Sn. L Tolimam	Sololá	1600	1617000	700000
18	Arenales	Sn. J. Chacaya	Sololá	2150	1633000	692000
19	Los Encuentros	Sololá	Sololá	2587	1642000	699000

3.2.3.3 CONDICIONES CLIMATICAS

El altiplano comprende la mayor parte de los departamentos de Huehuetenango, Quiché, San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, Chimaltenango, Guatemala y sectores de las Verapáces y Jalapa. Las montañas definen mucha variabilidad (las altitudes oscilan entre 2,500 y 3,500 msnm) generando diversidad de microclimas son regiones densamente pobladas, por lo que, la acción humana se convierte en factor de variación apreciable.

Las lluvias no son intensas. Los registros más altos se obtienen de mayo a octubre. En los meses restantes se pueden dar registros deficitarios. En cuanto a la temperatura, en diversos puntos de esta región se registran los niveles más bajos del país. Existen climas que varían de templados y semifríos con invierno benigno a semicálidos con invierno benigno de carácter húmedo y semisecos con invierno seco.

En esta región hay una franja desde la frontera de México, a la altura del límite entre Huehuetenango y San Marcos, que se extiende hasta el extremo noroccidental de Jalapa, allí se encuentran las menores altitudes (dentro del Altiplano) y define un eje de simetría entre los climas de la región norte y sur del país se registran las temperaturas más altas del altiplano y las precipitaciones son deficitarias en alguna época del año (34).

3.2.3.4 GEOLOGIA

Son las rocas ígneas que forman la mayor parte del Cinturón Volcánico, estando comprendidas las lavas basálticas andesíticas, riolitas, dacitas, tobas (ignimbritas) y lahres . Estas rocas se extienden de occidente a oriente, encontrándose en los departamentos de San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán, Sololá, Quiché, Chimaltenango, Sacatepéquez, Guatemala, Santa Rosa, Jalapa, Jutiapa y Chiquimula (34).

3.2.3.5 FISIOGRAFIA

En esta región, las erupciones de tipo de grieta lanzaron cantidades de material principalmente basalto y riolitas, que cubrieron las formaciones de roca pre-existentes desarrolladas sobre el basamento cristalino y sedimentario que se encuentra hacia el norte.

Esta cadena volcánica del pacífico (o del cuaternario) es parte de una zona de historia tectónica joven, que presenta peculiaridades, tanto del relieve como de la constitución geológica que la caracterizan. Su topografía se distingue porque consiste en formas poco erosionadas, en las que prevalecen las superficies originadas por diferentes fenómenos volcánicos. Consecuentemente, han resultado varios

tipos de relieve, desde conos con pendientes fuertes a montes bajos con pendientes leves hasta zonas planas de relleno de valles.

Como parte de esta zona se incluyen algunas pequeñas serranías de materiales volcánicos del terciario, que forman el zócalo sobre el cual se asientan los volcanes cuaternarios, al igual que varios valles anchos que han sido rellenados por materiales volcánicos. En algunos de estos valles se asientan varias de las poblaciones más importantes como, San Marcos, Quetzaltenango y Guatemala; presentando un grueso relleno de tobas pumíticas que han sido erosionadas localmente, formándose cañones angostos y profundos, generalmente denominados barrancos (34).

3.2.4 DESCRIPCIÓN DE LOS SUELOS SEGÚN LA CLASIFICACIÓN TAXONÓMICA

De acuerdo con el mapa de clasificación taxonomía a nivel de reconocimiento escala 1:250,000 editado por el Ministerio de Agricultura Ganadería y Alimentación (20), dentro del área de estudio se encuentran tres órdenes de suelos cuyas características generales son:

ANDISOLES: Orden que se caracteriza por presentar propiedades andicas, suelos debilmente intemperizados con abundante vidrio volcánico, este se define como vidrio translucido ópticamente isotrópico o como pomez.(32)

Dentro de las características principales de los Andisoles están:

- Valores bajos de densidad aparente
- Retención de fósforo de más del 85%
- Alta retención de humedad
- % de carbono orgánico alto esto se debe a que los andisoles forman compuestos muy estables con la materia orgánica
- Colores oscuros
- Se encuentran localizados en áreas que tienen influencia volcánica.

INCEPTISOLES: Son suelos minerales poco desarrollados generalmente con un % saturación de bases menor de 50% (Por NH_4AC). Están compuestos por una fracción de arcilla con más de 35% de Montmorillonita, cuando el material original es carbonato de calcio.

Los Inceptisoles se excluyen del orden de los aridisoles ya que la precipitación es mayor y de los vertisoles por el tipo de arcilla predominante. Generalmente presentan un epipedón ocrico, y por lo común un endopedón cambico.(32)

MOLLISOLES: Suelo mineral oscuro con abundante carbono orgánico (mayor 15%), saturación de bases mayor de 50% o más (por NH_4AC) en todos los horizontes.

Dentro del orden de los Mollisoles se da el proceso de Melanización que no es más que el proceso de oscurecimiento de los suelos por la adición de Materia Orgánica. El epipedon característico de los Mollisoles es el molico.

Por lo general se puede decir que son suelos muy fértiles y se encuentran distribuidos ampliamente en el territorio Guatemalteco.(32)

Cuadro 3: Posición fisiográfica, material parental y características de los perfiles de los suelos muestreados

SERIE	SIM.	MAT. MADRE		RELIEVE	DRENAJE INTERNO	SUELO SUPERFICIAL			SUBSUELO	
						COLOR	TEX. CONS.	Y ESP. APROX.	COLOR	C.
TOTONICAPÁN	Tp	Ceniza a roca vol.	Color claro	Sumamente ondulado a escarpado	Bueno	Café muy oscuro a negro	Fco. Turbosa, friable	30-70 cm.	Café oscuro a café muy oscuro	F
QUETZALTENANGO	Qe	Ceniza vol.	Color claro	Casi Plano	Bueno	Café oscuro	Fco. Arenosa, firme y fina	50-75 cm.	Café amarillento	F
ALOTENANGO	Al	Ceniza col. Mafica	Color oscuro	Inclinado a muy inclinado	Excesivo	Café oscuro a café muy oscuro	Franca, suelta	25-40 cm.	Café grizáceo oscuro	S
ATITLAN	At	Lodo máfico (lahar)		Muy escarpado	Moderado	Café oscuro	Fco arenosa, suelta.	40 cm.	Café amarillento	F
CAMANCHA	Cm	Ceniza vol.	Color claro	Fuertemente ondulado escarpado	Bueno	Café muy oscuro	Franca, friable	50 cm.	Café amarillento	F
OSTUNCALCO	Os	Cenizavol.	Color claro	Fuertemente ondulado escarpado	Muy rápido	Gris oscuro	Arena franca, suelta	10 cm.		Ceniz
PALIN	Pl	Toba volcánica		Muy escarpado	Bueno	Café oscuro a café muy oscuro	Fco. Arenosa pedregosa, friable	20-30 cm.	Café a café amarillento	F
QUICHE	Qi	Ceniza Cementada claro	vol. color	Fuertemente ondulado	Bueno	Café oscuro	Fco arcillo arenosa, friable	15-30 cm.	Café rojizo oscuro	F
SINACHÉ	Si	Ceniza vol.	Color	Fuertemente	Bueno	Café a	Franco	30 cm.	Café rojizo	F

claro

ondulado

café
oscuroarcillosa
friable

FUENTE: Simmons et al(30)

Cuadro 4: Características importantes que influyen el uso del suelo

SERIE	SIMBOLO	DECLIVE DOMINANTE (%)	DRENAJE A TRAVÉS DEL SUELO	CAPACIDAD DE ABASTECIMIENTO DE HUMEDAD	CAPA QUE LIMITA LA PENETRACION DE RAICES	PELIGRO DE EROSIÓN	FERTILIDAD NATURAL
TOTONICAPAN	Tp	5-25	Regular	Muy alta	Ninguna	Alta	Regular
QUETZALTENANGO	Qe	0-3	Moderado	Regular	Ninguna	Ligera	Alta
ALOTENANGO	Al	12-30	Muy rápido	Muy baja	Ninguna	Alta	Regular
ATITLAN	At	30-40	Rápido	Regular	Lahar cementada a 75 cm.	Muy alta	Alta
CAMANCHA	Cm	10	Moderado	Alta	Ninguna	Regular	Alta
OSTUNCALCO	Os	10-20	Muy rápido	Muy baja	Ninguna	Muy alta	Muy baja
PALIN	Pl	40-60	Rápido	Baja	Ninguna	Muy alta	Regular
QUICHE	Qi	10-20	Lento	Regular	Capa dura a 70-100 cm.	Alta	Regular
SINACHE	Sí	3-12	Rápido	Alta	Ninguna	Alta	Moderada

FUENTE: Simmons (30)

4. OBJETIVOS

- 1- Determinar el grado de asociación entre el fósforo extraído con las soluciones extractoras MEHLICH I y MEHLICH III y el rendimiento relativo de biomasa aérea de sorgo (*Sorghum bicolor L.*) en 19 suelos del Altiplano Occidental de Guatemala a nivel de invernadero.

- 2- Determinar el nivel crítico de fósforo para las soluciones extractoras MEHLICH I y MEHLICH III en los suelos evaluados a nivel de invernadero, utilizando el Método Gráfico de CATE y NELSON.

5. HIPOTESIS

1. El grado de asociación entre la solución Extractora MEHLICH III y la biomasa aérea del sorgo *Sorghum bicolor L.* será mas alto que el reportado por la solución MEHLICH I en los suelos evaluados.

6. METODOLOGIA

6.1 SELECCIÓN DE LOS PUNTOS DE MUESTREO

Para la selección de los puntos se tomó de base los mapas cartográficos de regiones fisiográficas, geológico, zonas de vida y cubierta vegetal. Se tomaron 5 puntos por cada departamento siendo éstos, San Marcos, Quetzaltenango, Totonicapán y Sololá.

6.2 MUESTREO

Se seleccionaron 19 puntos de muestreo, en cada punto de muestreo se recolectaron 15 submuestras para formar una muestra compuesta; la profundidad de muestreo fue de 0 a 30 cm y se colectaron 45 kg de suelo por muestra compuesta. Las muestras fueron transportadas al invernadero de la Facultad de Agronomía para ser secadas, tamizadas y homogenizadas previo al análisis de laboratorio.

6.2.1 PREPARACION DE LAS MUESTRAS DE SUELO

SECADO: El suelo fue secado al aire a la sombra, se esparció la muestra de suelo en una capa delgada sobre plástico, la cual fue removida periódicamente de 3 a 4 veces por día hasta lograr un secado homogéneo.

TAMIZADO: Luego de que la muestra estuvo completamente seca se procedió a tamizarla en un tamiz No. 10 con un diámetro de 2 mm hasta pasar todo el suelo, obteniéndose aproximadamente 25 Kg de suelo tamizado.

HOMOGENEIZADO: La muestra ya tamizada se homogeneizo pasando la muestra compuesta de suelo 20 veces por un homogenizador de doble flujo a manera de que la muestra quedara bien homogeneizada. Luego se procedió a etiquetarla, empacarla y guardarla en un lugar seco.

6.3 DETERMINACIONES FISICAS Y QUIMICAS DE LAS MUESTRAS DE SUELO

6.3.1 ANALISIS REALIZADOS EN EL LABORATORIO

Se utilizo una fracción de la muestra compuesta de los suelos previamente homogeneizados para la determinación de sus características físicas y químicas de acuerdo a las metodologías que se presentan en el cuadro 5.

CUADRO 5. Características físicas y químicas determinadas y metodologías utilizadas en el análisis de las muestras de suelos evaluados.

CARACTERISTICAS DETERMINADAS	METODOLOGÍA
Materia Orgánica **	Combustión Húmeda de Walkley y Black
pH *	Potenciómetro
Determinación de partículas primarias **	Hidrómetro de Bouyoucos
Color *	Tabla de colores Munssell
Densidad aparente *	Cilindro de volumen conocido
Determinación de fósforo disponible *	Mehlich I y Mehlich III

Fuente: * Schweizer, L; Coward, H; Vasquez, A. (31). ** Briceño J. A.; Pacheco R. (4)

6.3.2 DESCRIPCION DE LAS SOLUCIONES EXTRACTORAS EVALUADAS

En el cuadro 6 se presentan las dos soluciones extractoras evaluadas, los reactivos de preparación de cada una y el procedimiento realizado para la cuantificación del fósforo.

Cuadro 6. Soluciones extractoras evaluadas, reactivos y procedimiento utilizado.

SOLUCION EXTRACTORA	REACTIVOS	PROCEDIMIENTO
MEHLICH I	H ₂ SO ₄ 0.025N + HCL 0.05N	<ul style="list-style-type: none"> - pesar 5 gr de suelo, tamizado a 2 mm, - colocarlo en un beaker de 50 ml - adicionar 25 ml de la solución extractora. - agitar durante 8 minutos a 400 r.p.m. - filtrar la suspensión en un papel filtro wnatman No. 1 -Cuantificar el fósforo por el método colorimétrico.
MEHLICH III	NH ₄ (NO ₃) 0.25N + HOAc 0.2N + NH ₄ F 0.015N + HNO ₃ 0.013N y EDTA 0.001M	<ul style="list-style-type: none"> - pesar 5 gr de suelo, tamizado a 2 mm, - colocarlo en un beakers de 50 ml - agregar 25 ml de solución extractora. - agitar durante 5 minutos a 400 r.p.m. -filtrar la suspensión en un papel filtro Whatman No. 1 -cuantificar el fósforo por el método calorimétrico.

FUENTE: Cajuste, Llenom: (6)

6.4 DETERMINACION DE LAS CANTIDADES DE ELEMENTOS UTILIZADOS EN LA DEFINICIÓN DEL TRATAMIENTO DE REFERENCIA

6.4.1 ESTUDIO DE SORCIÓN

Estos estudios se llevan a cabo añadiendo al suelo una solución con distintas concentraciones de elementos. La cantidad de solución agregada es suficiente para saturar completamente la muestra de suelo. El recipiente que contiene la muestra se deja destapado hasta que se seque; En el cuadro (7) se observan los valores de las concentraciones de fósforo que se aplicaran a cada suelo.

Con los valores aplicados y extraídos se elaboraron las curvas llamadas de sorción. El tratamiento de referencia se basó en los datos obtenidos de las curvas de fijación de fósforo, potasio, cobre, zinc y manganeso, Para definir la aplicación de los elementos se tomo el criterio de usar 3 veces en nivel crítico de los mismos (11).

Cuadro 7. Concentración de fósforo en las soluciones de los tratamiento de sorción diluidas a 100 mL

Tratamiento de la solución	mL de sol. diluidos en 100 ml	Fósforo mg/mL.
1	5	35
2	10	70
3	20	140
4	40	280
5	80	560

Fuente: Díaz Romeu y Hunter (11).

6.5 FASE DE INVERNADERO (ENSAYO BIOLÓGICO)

6.5.1 METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Para correlacionar los índices de fósforo obtenidos con las soluciones extractoras en el laboratorio, se realizó un ensayo biológico con los tratamientos seleccionados, los cuales se sometieron a evaluación mediante un experimento completamente al azar con 2 tratamientos y 3 repeticiones. Un tratamiento con aplicación de fósforo y otro sin fósforo para cada uno de los 19 suelos. Se utilizó sorgo forrajero *sorghum bicolor* L. como planta indicadora. El diseño experimental de bloques completamente al azar se uso únicamente para obtener la media aritmética del rendimiento relativo de la biomasa.

6.5.2 UNIDAD EXPERIMENTAL

La unidad experimental consistió en una maceta de plástico con capacidad de 500 cc. de suelo, haciendo un total de 114 unidades experimentales.

Cuadro 8. Tratamientos evaluados

Tratamiento	Descripción del tratamiento
1	Referencia: N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe, Mn, Mo, B.
2	N, K, Ca, Mg, S, Cu, Zn, Fe, Mn, Mo, B.

6.5.3 VARIABLES EVALUADAS

a. RENDIMIENTO RELATIVO DE MATERIA SECA (RR)

La materia seca se obtuvo a los 30 días de haber sembrado el sorgo, se cortaron las plantas a 0.05 m de altura de la superficie de cada unidad experimental. La biomasa se secó en un horno de convección forzada a 65 °C durante 48 horas hasta que se alcanzó peso constante, los pesos se realizaron en una balanza analítica y se expresaron en gr/planta, seguidamente se determinó el rendimiento relativo a través de la siguiente fórmula.

$$\% \text{ RR} = \frac{\text{MATERIA SECA (gr) sin elemento}}{\text{MATERIA SECA (gr) completo}} \times 100$$

Entre mas cercano a 100 sea el % de RR, menor será la respuesta de la aplicación del elemento. Por lo tanto se deben separar los valores de rendimiento que indiquen que hubo respuesta positiva de aquellos con respuesta negativa (11).

6.6 MANEJO AGRONOMICO DEL EXPERIMENTO

A SIEMBRA

El sorgo *Sorghum bicolor* L. se sembró distribuyendo 10 semillas en la superficie del suelo de cada una de las unidades experimentales y con un varilla se enterraron a 0.05m de profundidad.

B RIEGO

Antes de la siembra el suelo fue saturado completamente con agua destilada, a cada unidad experimental se le abrieron agujeros en su base y se les colocó un recipiente plástico, con el objetivo de aplicar el agua para el riego y que se humedeciera el suelo por capilaridad evitando de esta manera la formación de costras en la superficie. El riego se realizó cada dos días y se aplicó 90 mL de agua destilada por unidad experimental.

C RALEO

Después de cinco días de germinada la semilla, se seleccionaron cinco plantas de cada maceta, siendo estas las mas vigorosas y homogeneas en cuanto su desarrollo.

D FERTILIZACIÓN NITROGENADA

Se aplicó 100 kg N ha⁻¹ en forma de NH₄(NO₃). Se realizaron dos aplicaciones, en la primera se aplicó el 50% de lo programado y se efectuó a los 8 días después de que las semillas germinaron, la segunda aplicación se realizó a los 15 días después de la primera.

F COSECHA

A los 30 días se cortaron las plantas a 0.05m de la superficie del suelo, las que se pesaron por tratamiento y repeticiones; se colocaron en bolsas de papel previamente identificadas, y luego se determino el peso seco para la obtención del rendimiento relativo.

6.7 ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN

Para definir los niveles críticos de fósforo para cada solución extractora, se efectuó a través del método gráfico de Cate y Nelson.

6.7.1 NIVEL CRITICO

La determinación de los niveles críticos para fósforo en cada solución extractora se determinaron por medio de la gráfica de Cate y Nelson, colocando en el eje de la Y el rendimiento relativo y en el eje de las X la concentración del elemento (fósforo) expresado en partes por millón (ppm).

El procedimiento consistió en marcar con puntos en un sistema de coordenadas los valores de rendimiento relativo (% con respecto al máximo) en el eje Y, en función de los valores de análisis de suelo en el eje X. Para esto se uso una hoja transparente dividida en cuadrantes por líneas horizontales y verticales. Esta hoja se sobrepone sobre los datos de manera tal que el mayor número de puntos se ubiquen en los cuadrantes inferior izquierdo y superior derecho (positivos), y el número menor de puntos queden en los cuadrantes superior izquierdo e inferior derecho (negativos). En la posición anterior descrita, la línea horizontal coincidirá con un valor de rendimiento relativo (eje Y) bajo el cual la respuestas serán altas o medias. El punto en que la línea vertical corta el eje de la abscisas, se considera que es el nivel crítico de concentración de nutrimento en el suelo (3).

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la determinación del nivel crítico de fósforo de los suelos del altiplano occidental de Guatemala con las soluciones extractoras Mehlich I y Mehlich III a nivel de invernadero, se realizó el análisis físico-químico de las muestras de suelo, obteniéndose los siguientes resultados.

7.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS

En el Cuadro 9. se presentan los resultados de las características químicas de los 19 suelos evaluados, realizados en el Laboratorio de Suelos Salvador Castillo de la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala.

Cuadro 9. Características químicas de los 19 suelos estudiados

Suelo	pH	mg kg ⁻¹		Meq/100 gr		mg kg ⁻¹				cmol(+) kg ⁻¹		%
		P	K	Ca	Mg	Cu	Zn	Fe	Mn	CIC	S.B.	
1	6.4	3.64	510	4.99	0.67	0.65	1.75	20.2	9.3	15.71	40.74	1.78
2	5.5	3.43	58	1.25	0.31	0.1	1.25	5.75	10.0	46.67	4.18	6.25
3	5.7	3.65	155	3.74	0.67	0.15	1.95	3.25	19.0	53.81	12.14	7.06
4	5.9	26.50	290	8.11	1.23	0.85	2.3	18.5	23.9	21.90	43.17	3.06
5	6.8	11.00	585	10.29	1.79	2.3	9.4	9.25	39.35	28.57	43.88	1.78
6	6.1	9.00	455	8.11	0.92	0.55	2.35	13.8	25.35	29.52	31.86	2.39
7	6.0	4.00	200	8.11	1.75	0.4	2.55	7.4	17.75	39.05	28.39	4.17
8	5.9	50.0	140	24.64	3.29	0.55	47.6	33.0	54.2	37.62	62.48	7.06
9	6.2	51.11	510	6.86	1.13	2.1	6.4	27.6	18.65	16.19	45.07	2.56
10	6.1	29.58	143	5.30	1.18	2.65	1.75	32.4	8.75	12.38	48.67	0.74
11	5.8	7.20	345	6.24	2.11	2.9	4.35	26.55	28.1	30.48	30.77	2.99
12	6.2	0.71	365	5.93	2.01	2.45	1.8	52.3	36.1	26.19	37.55	1.11
13	6.7	0.78	557	6.55	1.34	1.3	1.45	8.5	29.65	30.48	32.83	1.98
14	6.1	1.78	358	10.60	2.57	0.15	3.05	10.2	71.15	69.52	30.47	12.77
15	6.3	4.21	125	6.86	1.59	1.55	1.7	17.7	28.0	49.05	22.33	2.05
16	6.2	14.54	335	5.93	1.03	0.7	2	21.7	15.2	13.33	42.30	1.81
17	6.2	4.85	490	9.04	1.18	1.6	2.6	14.45	12.8	23.81	35.01	3.23
18	6.2	2.42	520	9.36	1.59	0.95	2.5	3.8	6.9	37.62	30.00	2.22
19	6.1	1.14	203	11.54	0.82	0.05	4.85	5.3	14.2	53.33	25.91	6.05

Fuente: Laboratorio de Suelo y Planta Ing. Salvador Castillo. FAUSAC.

En el cuadro anterior se observa que los valores de fósforo extraídos con la solución Mehlich I, varían de 0.50 a 165.20 mg kg⁻¹. El 75% de las muestras presentaron valores menores de 12 mg kg⁻¹ considerados como bajos o deficientes de acuerdo con el nivel crítico establecido a nivel general de los suelos de Guatemala según el laboratorio de suelos Salvador Castillo de la Facultad de Agronomía (FAUSAC). Este comportamiento se puede deber en gran medida al material de origen de los suelos, siendo éste cenizas volcánicas en su mayoría como lo indica el mapa de génesis y clasificación de suelos, lo que le infiere características específicas a los suelos entre las que se pueden mencionar la alta capacidad de retener fósforo por la presencia de arcillas amorfas lo cual se demuestra en el estudio de fijación del P donde todas las muestras presentan un promedio mayor de 90% de fijación ver figura (6), cuadro (11). El 25% restante se consideran como adecuados y altos y puede ser debido al resultado del manejo al que están sometidos los suelos (cultivo de hortalizas).

En cuanto a los índices de Potasio, el 89.5 % de las muestras de suelo presentaron valores altos y el 10.5% valores bajos, lo cual está relacionado con el material de origen. El rango de valores encontrados fue de 58 mg kg⁻¹ a 585 mg kg⁻¹.

Para Ca, el 21% de las muestras presentan valores altos, el 68.59% presenta rangos adecuados, mientras que el 10.5 % de las muestras presentan valores bajos. Los rangos encontrados fueron 1.25 cmol(+) kg⁻¹ a 24.64 cmol(+) kg⁻¹.

Para el Magnesio se determinó que el 26% de las muestra manifestaron encontrarse deficientes, el 63% presentan niveles adecuados, y solo un 5.26 % presento valores altos. Los rangos reportados oscilaron entre 0.31 cmol(+) kg⁻¹ a 3.29 cmol(+) kg⁻¹.

Los valores de pH de variaron de 5.5 a 6.8 clasificados como suelos ácidos a ligeramente ácidos. Los valores de materia orgánica varían de 0.74% a 12.78% que corresponde a niveles bajos y altos.

La capacidad de intercambio catiónico de los suelos varió de 12.38 a 69.52 meq/100gr, lo que indica un alto potencial de fertilidad debido a que el 70 % de las muestras de suelo presentaron valores altos de capacidad de intercambio cationico, (mayor del 25 cml(+))kg⁻¹.

En cuanto a las características física de los suelos Ver cuadro 10. El 79% de los suelos presentó clases texturales francas y franco-arenosas.

Cuadro 10. Características físicas de los suelos en estudio

Suelo	%			CLASE TEXTURAL	g/cc D.A.
	Arcilla	Limo	Arena		
1	10.62	36.90	52.47	Franco	1.081
2	11.08	34.52	54.40	Franco arenoso	0.976
3	7.63	36.12	56.25	Franco arenoso	0.741
4	11.22	19.14	69.64	Franco arenoso	1.081
5	43.46	21.85	34.68	Arcilloso	1.111
6	13.41	25.94	60.64	Franco arenoso	1.053
7	16.00	33.24	50.75	Franco	0.952
8	5.15	22.06	72.79	Franco arenoso	1.000
9	9.08	13.21	77.71	Franco arenoso	1.250
10	13.15	17.64	69.20	Franco arenoso	1.176
11	42.82	17.72	39.45	Arcilloso	1.081
12	28.31	26.63	45.05	Fco Arc arenoso	1.053
13	22.31	20.60	57.09	Fco Arc arenoso	1.000
14	9.91	28.21	61.87	Franco arenoso	0.678
15	19.86	24.49	55.65	Franco arenoso	1.111
16	5.56	20.09	74.34	Arena franca	1.212
17	5.64	17.93	76.41	Arena franca	1.176
18	12.31	25.05	62.63	Franco arenoso	1.000
19	8.08	27.46	64.45	Franco arenoso	0.909

Fuente: Laboratorio de Suelo y Planta Ing. Salvador Castillo. FAUSAC.

7.2 DETERMINACION DE NIVELES CRITICOS PARA FOSFORO

En el Cuadro 11. se presentan las concentraciones de fósforo extraído por cada solución extractora y el porcentaje de rendimiento relativo.

Cuadro 11. Fósforo extraído con la solución extractora Mehlich I, Mehlich III y el porcentaje de rendimiento relativo de sorgo, en los suelos del altiplano Occidental de Guatemala.

IDENTIFICACIÓN PROCEDENCIA	MEHLICH I P mg kg ⁻¹	MEHLICH III P mg kg ⁻¹	Rendimiento Relativo (%)
1 Chana	3.64	2.68	21.77
2 Las Barrancas	3.43	1.85	22.63
3 La Independencia	3.65	1.65	24.99
4 El Paraiso	26.50	12.70	69.94
5 La Cienega	11.0	3.85	44.64
6 Los Angeles	9.0	3.98	28.14
7 Sta. Ma. De Jesús	4.0	1.85	16.81
8 Almolonga	50.0	72.09	101.06
9 Chipoc	51.11	48.55	102.48
10 San Ramon	29.58	37.63	100.00
11 Paxboch	7.20	5.01	49.74
12 Sta. María Chiquimula	0.71	1.79	22.64
13 Tierra Colorada	0.78	1.44	15.26
14 Pachoc	1.78	2.61	33.52
15 Palanquix	4.21	4.12	47.56
16 Argueta	14.54	18.61	59.22
17 Sn. Lucas Toliman	4.85	4.39	24.08
18 Arenales	2.42	3.91	33.55
19 Los Encuentros	1.14	2.68	24.91

Fuente: Laboratorio de Suelo y Planta Ing. Salvador Castillo. FAUSAC.

Los valores del cuadro anterior muestran que el rango extraído de fósforo con Mehlich I fue de 0.71mg kg⁻¹ a 51.11 mg kg⁻¹ y con Mehlich III de 1.44 mg kg⁻¹ a 72.09 mg kg⁻¹ en ambas metodologías los valores de fósforo mayores corresponden a los valores mayores de rendimiento relativo de sorgo.

En las figura 2. se presenta el nivel crítico de fósforo extraído con la metodología de Mehlich I siendo éste de 15 mg kg^{-1} , lo que indica que los índices de fósforo debajo de este tienen alta probabilidad de respuesta a la aplicación de fósforo.

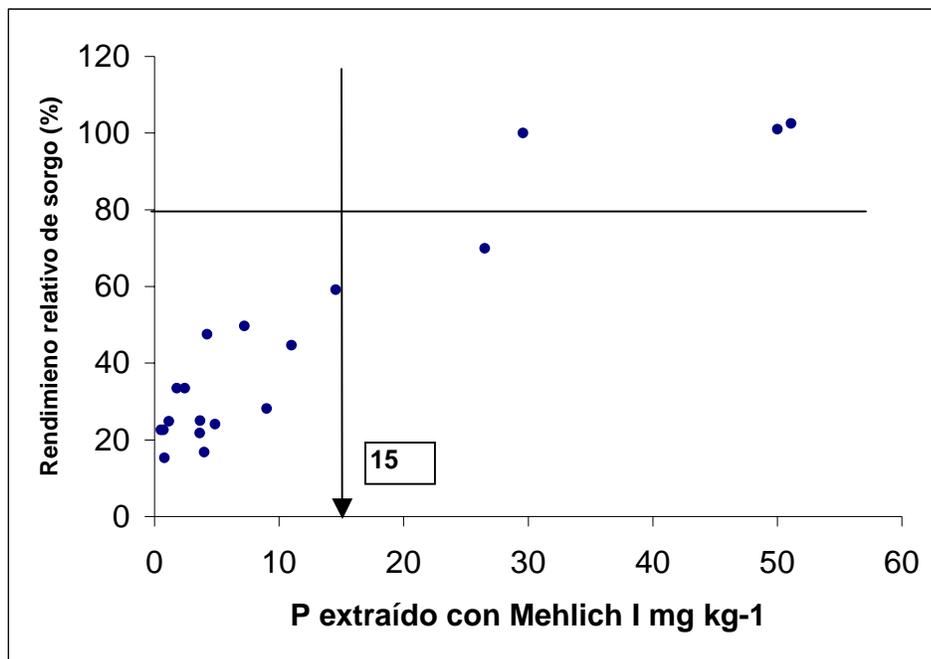


Figura 2 Nivel crítico de fósforo con la solución extractora Mehlich I

Resultados similares fueron reportados por Morales (23), en suelos del pie de monte neovolcanico de Guatemala para la solución Mehlich I siendo éste de 17.81 mg kg^{-1} . Estos resultados se pueden deber a que los suelos de las diferentes regiones son muy similares en cuanto a su formación. Yool (36), en suelos de la zona cañera del sur de Guatemala ubicados en la región fisiografica planicie costera del pacifico reportó 9 mg kg^{-1} de fósforo como nivel crítico con la solución Mehlich I. Este valor difiere de los anteriores y la explicación se puede deber a la formación de los mismos y al manejo que estos han sufrido. Chonay et, al.(10) reportaron 12 mg kg^{-1} como el nivel critico de fósforo para Mehlich I en 60 suelos provenientes de las regiones fisiográficas Llanura costera del pacifico y pendiente volcánica reciente de Guatemala.

En la figura 3. se muestra el coeficiente de correlación lineal (r) entre el fósforo extraído con la solución Mehlich I y el rendimiento relativo del sorgo siendo de 0.9274. Guerrero (14), menciona que el coeficiente de correlación (r) sera mas eficiente y confiable cuanto más cercano este su valor (positivo) a la unidad.

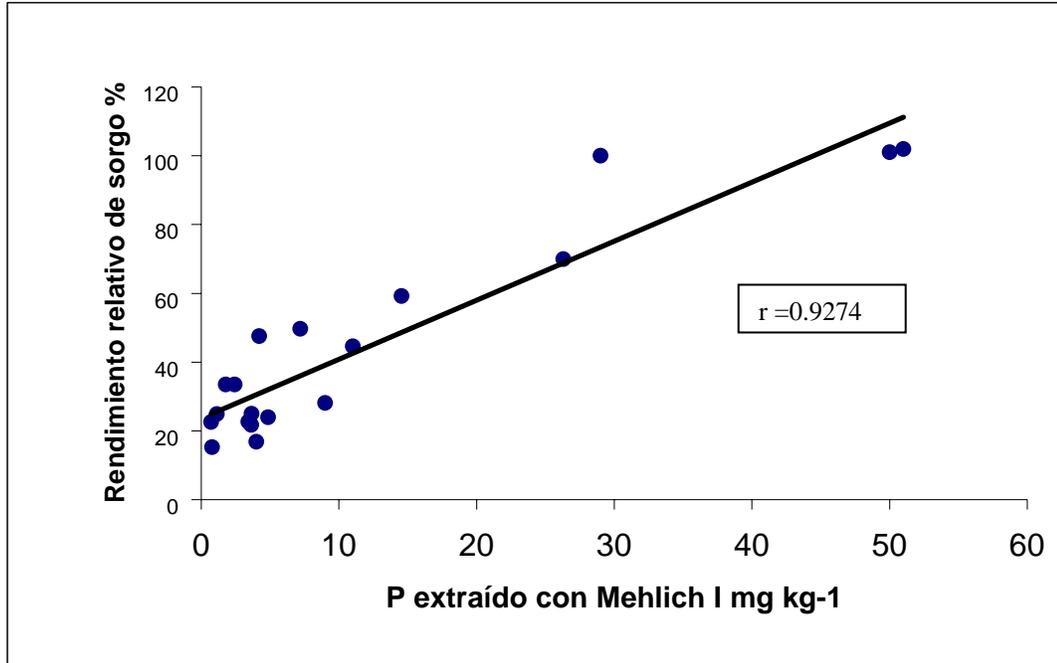


Figura 3 Coeficiente de correlación de fósforo entre el rendimiento relativo y la extracción de Mehlich I.

En la figura 4. se presenta el nivel crítico de fósforo extraído con la metodología de Mehlich III, siendo el nivel crítico de 19 mg kg⁻¹, lo que indica que los suelos con índices de fosforo abajo de éste, tienen alta probabilidad de respuesta a la aplicación de fósforo por parte de los cultivos.

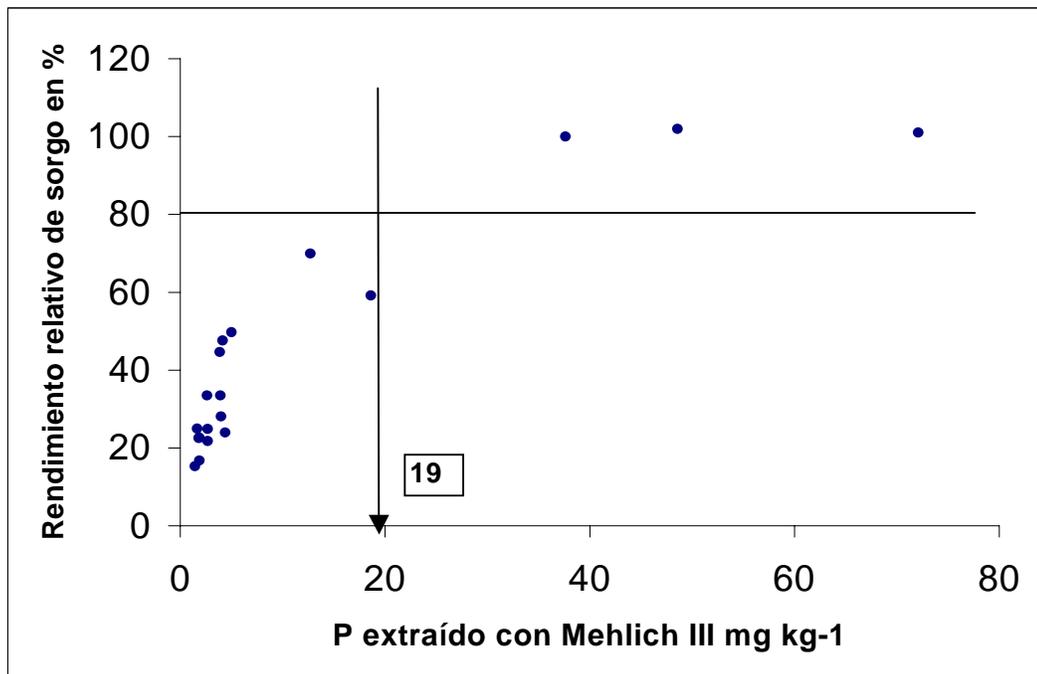


Figura 4 Nivel crítico de fósforo con la solución extractora Mehlich III

Morales G. (23) evaluó fósforo con la solución extractora Mehlich III en 25 suelos del pie de monte neovolcanico de Guatemala reportó 15 mg kg^{-1} . Estos niveles difieren al reportado por Yool R. (36) de 4 mg kg^{-1} en suelos de la zona cañera del sur de Guatemala. La diferencia marcada entre los niveles criticos de los suelos de las diferentes regiones fisiograficas se debe a la formación de los mismos y en especial a la dominancia de minerales arcillosos en cada una de ellas. En la zona del altiplano occidental y pie de monte neovolcánica existe dominancia de minerales arcillosos amorfos los cuales son muy reactivos con el fosforo, haciendolo poco disponible para los cultivos, situación que va disminuyendo a medida que se van alejando los suelos de esas regiones hacia la planicie costera, donde la dominancia de minerales arcillosos amorfos es menor. Chonay et, al. evaluando 60 suelos de la Llanura costera del pacifico y pendiente volcánica reportó 10 mg kg^{-1} de fósforo como nivel critico para solución extractora Mehlich III.

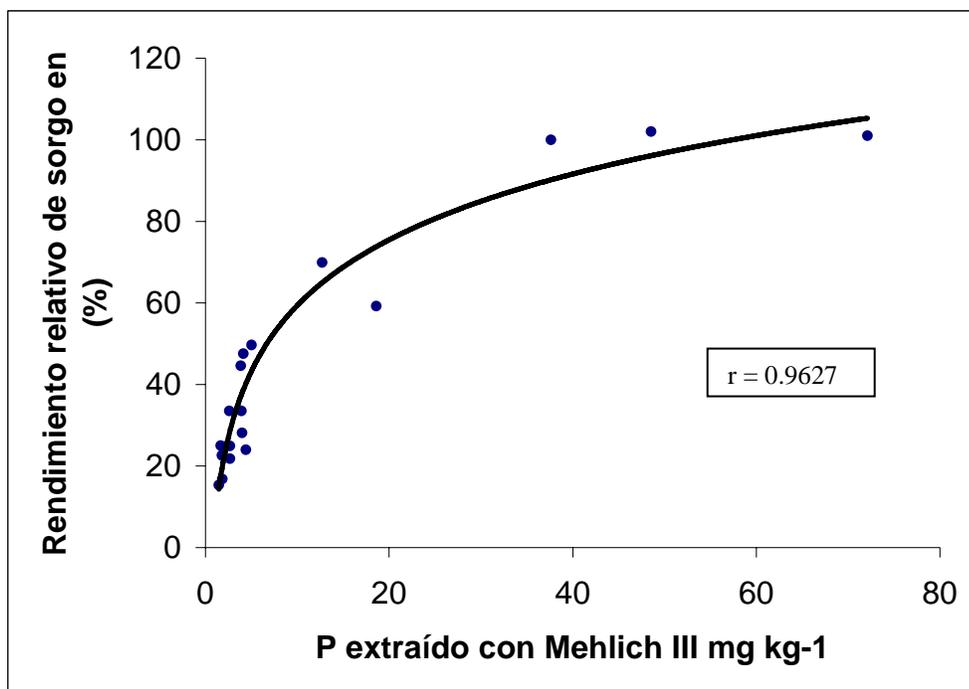


Figura 5 Coeficiente de correlación de fósforo entre el rendimiento relativo y la extracción de Mehlich III.

En la figura 5. se muestra el coeficiente de correlación lineal entre el fósforo extraído y el rendimiento relativo. Siendo éste de 0.9627 mayor que el coeficiente de correlación (r) obtenido con la solución Mehlich I. Por lo que se concluye que ambas soluciones extractoras pueden utilizarse para el analisis de fósforo en los suelos del Altiplano Occidental de Guatemala, tomando en cuenta que el nivel crítico obtenido con la solución extractora Mehlich I es de 15 mg kg^{-1} y la solución Mehlich III es de 19 mg kg^{-1} .

8.CONCLUSIONES

- 8.1 Los coeficientes de correlación entre el fósforo extraído y el rendimiento relativo son: para la solución Mehlich I $r = 0.9274$ y la solución Mehlich III $r = 0.9627$, por lo que se acepta la hipótesis planteada.
- 8.2 Para los suelos del Altiplano Occidental de Guatemala, el Nivel Crítico de fósforo es de 15 mg kg^{-1} para la solución extractora Mehlich I y 19 mg kg^{-1} para la solución extractora Mehlich III.

9. RECOMENDACIONES

- 9.1 De acuerdo a los resultados, el grado de asociación obtenido para las dos soluciones extractoras Mehlich I y Mehlich III es alto ($r = 0.9274$ y $r = 0.9627$) respectivamente por lo que se pueden utilizar las dos soluciones en la extracción de fósforo en los suelos evaluados.
- 9.2 Realizar la calibración de los resultados obtenidos a nivel de campo, utilizando diferentes cultivos en los suelos del Altiplano Occidental de Guatemala.

10. BIBLIOGRAFIA

1. Barillas, J. 1987. Determinación del rango y nivel de concentración crítica de fósforo y potasio con dos metodologías de extracción, en las series de suelos Guatemala y Patzite. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. p.46
2. Bautista, G **et al.** 1998. La investigación edafológica en México 1997-1998. En : Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo (25., 1997, Acapulco, Guerrero, México). Memorias. México, CECSA. 12 p.
3. Bertsch, F. 1998. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, CR, Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. 157 p.
4. Briceño JA.; Pacheco, R. 1984. Métodos analíticos para el estudio de suelo y planta. San José, CR, Universidad de Costa Rica. 152p.
5. Bornemisza, E. 1960. La solución extractora y la humedad en relación el potasio intercambiable; experiencia en suelos aluviales de Costa Rica. Turrialba 10 (1): 35-38.
6. Cajuste, LL. 1986 El fósforo aprovechable en los suelos. Chapingo, México, Colegio de Postgraduados de Chapingo, Centro de Edafología.20 p.(Serie Cuadernos de Edafología 6.)
7. Cate, RB.; Nelson, LA. 1965. Modelos discontinuos para una rápida correlación, interpretación y utilización de los datos de análisis de los suelos y las respuestas a los fertilizantes. Trad. Isabel de Mendoza. Carolina del Norte, Universidad Estatal. p.106. (Boletín Técnico, no. 7)
8. Cook, MG.; Hutchenson JR. 1960. Soil potassium reactions as relates to clay mineralogy of selected Kentucky soil. Sc Soc. Amer. Proc. 24(4): 252-256.
9. Cruz, J. **et al.** 1992 La investigación edafológica en México 1991-1992. En : Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo(25., 1991, Acapulco, Guerrero, México). Memoria. México, CECSA. 12 p.
10. Chonay, PJJ **et al.** 2000. Evaluación de soluciones extractoras en la fertilidad de los suelos para las regiones fisiográficas ; llanura costera del pacifico y pendiente volcánica reciente de Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Instituto de investigaciones Agronómicas. Sub área de manejo de suelo y agua. 140 p.
11. Díaz RR.; Hunter, A. 1978 Metodología de muestreo de suelos, análisis de suelo y tejido vegetal e investigación en invernadero. Turrialba, CR, CATIE. p. 44-68.
12. Espinoza Navarro, RE. 1986. Determinación del nivel crítico de fósforo con dos metodologías de extracción, en la serie de suelos Tempisque. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de agronomía. p. 37.
13. Fassbender, HW. 1980. Química de suelos, con énfasis en suelos de América Latina. San José, CR, IICA. p. 37.
14. Guerrero, R. 1979. El diagnostico de la fertilidad de los suelos. Bogotá, CO, Universidad Nacional, Facultad de Agronomía. p. 156-170.

15. Herrarte Orantes, JM. 1987. Correlación de tres soluciones extractoras de fósforo y determinación del nivel crítico, bajo condiciones de invernadero. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Centro Universitario de Occidente. p.31
16. Hurtarte, M. 1984. Determinación del nivel crítico de fósforo en serie de suelos Chica, la Fragua, Zacapa. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad del Valle de Guatemala. Facultad de Ciencias y Humanidades, Departamento ciencias agrícolas. 42 p.
17. Instituto de la Potasa y el Fósforo, MX. 1996. Manual internacional de fertilidad de suelos. Queretaro, México. 85 p.
18. IGN (Instituto Geográfico Nacional,GT). 1962. Atlas geográfico nacional. Guatemala.
19. International soil fertility evaluation and improvement program. 1967. Annual reports. North Carolina, US, North Carolina State University. 86 p.
20. MAGA (Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, GT) .2000. Mapa de taxonomía de suelos. Guatemala. Esc. 1:250,000.
21. Marquez HJ. 1987. Determinación de rangos y niveles críticos de fósforo con tres metodologías de extracción, en la serie de suelos Cauque y Tecpán. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. p. 46
22. Meneses, A. 1986. Determinación del nivel crítico de fósforo y potasio con tres soluciones extractoras en la serie de suelos Alotenango. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. p. 46
23. Morales García, S. 2001. Determinación de niveles críticos para fósforo y potasio con cuatro soluciones extractoras a nivel de invernadero en suelos del pie de monte neo volcánico de Guatemala. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 41 p.
24. Palencia, M. 1974. Correlación para análisis de fósforo y potasio; Informe anual 1973. Guatemala, Instituto de Ciencia y Tecnología Agrícola, Programa de Nutrición Animal. P. 5-14
25. Recinos Aguirre, MA. 1991. Determinación del nivel y rango crítico para fósforo y potasio con diferentes soluciones extractoras en la serie de suelos Culma. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de agronomía. p. 54
26. Rone, J. **et al.** 1992. Correlación de cuatro métodos de análisis químico de fósforo aprovechable, con suelos de los campos cañeros del ingenio "LOS MOCHIS" de Sinaloa. En Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. (25, 1991, Acapulco, Guerrero, México.). Memorias. México, CECSA. p. 72.
27. Romero, G. **et al.** 1992. Correlación de métodos de análisis de fósforo en suelos de la región de Teziutlan Puebla. En Congreso Nacional de la Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. (25, 1991, Acapulco, Guerrero, México.). Memorias. México CECSA. p. 74.
28. Salinas, J.; Sánchez, P. 1972. Relación suelos planta que afecta los rendimientos entre especies y variedades para tolerar baja disponibilidad de fósforo en el suelo. Ciencia y Cultura no. 28:156-168.
29. Sánchez, PA. 1981. Suelos del trópico, características y manejo. Trad. Edilberto Camacho. San José, CR, IICA. 660 p.

30. Simmons, CH.; Tarano, JM.; Pinto, JH. 1959. Clasificación de reconocimiento de los suelos de la República de Guatemala. Trad. Pedro Tirado Sulsona. Guatemala, Ed. José de Pineda Ibarra. 1000 p.
31. Schweizer, L.; Coward, H.; Vasquez, A. 1980. Metodología para análisis de suelos, plantas y aguas. San José, CR, IICA. s.p. (Boletín Técnico no. 68.
32. Soil Survey Staff, US. 1995. Claves para la taxonomía de Suelos, versión 1994. Tad. Carlos A. Ortiz Solorio; Ma. Del Carmen Guriérrez Castoreña; Jorge Luis García Rodríguez. Chapingo, México, Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo. 306 p.(Publicación Especial 3).
33. Tisdale, SL.; Nelson, WL.. 1982. Fertilidad de los suelos. Trad.Jorge Balasch. México, UTEHA. p. 760.
34. Tobías, VH. 1997. Génesis de los suelos de Guatemala. En: Curso Nacional de Post-Grado (1., 1997, Guatemala). Memorias: criterios para recomendar el manejo de la fertilidad del suelo. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala. p. 45-86.
35. Yoc Sánchez, AL. 1989. Determinación del rango y nivel critico de fósforo con dos soluciones extractoras y potasio con tres metodologías de extracción en la serie de suelos Suchitepéquez. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de agronomía. 51 p.
36. Yool Rosales, ER. 2001. Determinación de niveles críticos para fósforo y potasio, con cuatro soluciones extractoras, a nivel de invernadero, en suelos de la zona cañera del sur de Guatemala. Tesis Ing. Agr. Guatemala, Universidad de San Carlos de Guatemala, Facultad de Agronomía. 55 p.

11. ANEXO

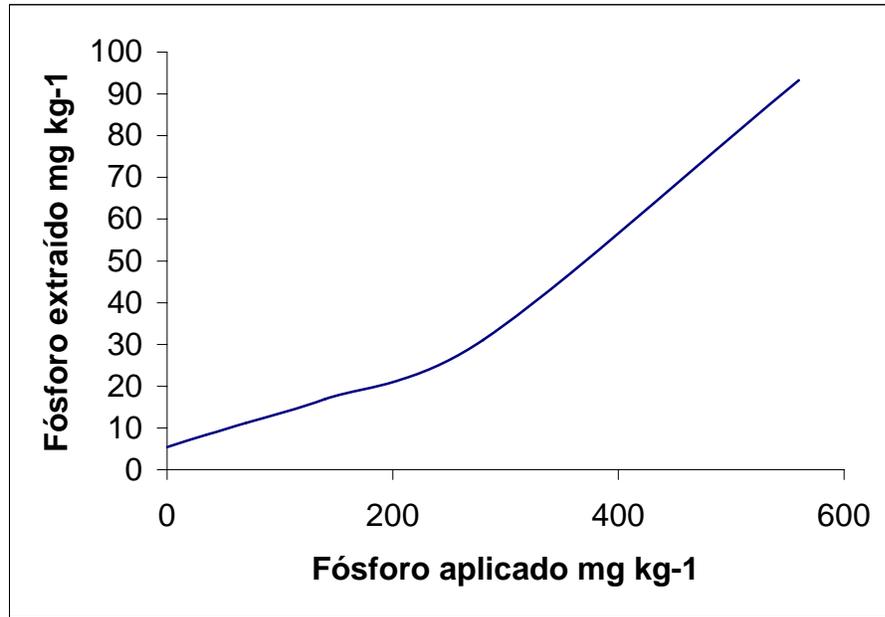


Figura 6 Curva de retención de fósforo

CUADRO 12 Porcentaje de fijación promedio de fósforo de las 19 muestras de suelo.

No. Suelo	% PROMEDIO DE FIJACIÓN
1	93.46
2	97.16
3	96.34
4	81.17
5	91.86
6	93.45
7	95.73
8	87.53
9	76.65
10	82.56
11	91.79
12	88.07
13	90.94
14	94.70
15	90.97
16	78.17
17	93.00
18	93.60
19	98.22

Fuente: Laboratorio de Suelo y Planta Ing. Salvador Castillo. FAUSAC.

