

UNIVERSIDAD NACIONAL  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y MAR  
ESCUELA CIENCIAS AGRARIAS

**EVALUACIÓN DE LAS SOLUCIONES EXTRACTORAS KCI-OLSEN  
MODIFICADA Y MEHLICH 3 EN SUELOS CAFETALEROS DE  
COSTA RICA**

**Trabajo final de graduación bajo la modalidad de tesis de grado sometida a consideración del Tribunal  
Examinador de la Escuela de Ciencias Agrarias de la Universidad Nacional para optar al grado de Licenciatura  
en Ingeniería Agronómica**

Carlos Eduardo Delgado Chavarría

Heredia, Costa Rica

Diciembre, 2021

Trabajo final de graduación presentado como requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en  
Ingeniería Agronómica  
Tribunal Examinador

---

Lic. Ellen Sancho Barrantes  
Representante de la Decana de Facultad de Ciencias de la Tierra y el Mar

---

Dr. Rafael Evelio Granados Carvajal  
Director Escuela de Ciencias Agrarias

---

Dr. Roger Muñoz Hernández  
Tutor de Tesis

---

Lic. Víctor Chaves Arias  
Lector

---

Lic. Roberto González  
Lector

---

Carlos Eduardo Delgado Chavarría  
Postulante

## **DEDICATORIA**

A Dios, a la Virgen María por su increíble bondad y amor que me acompañan día a día y me ayuda a seguir adelante. A mi madre, que a través de mi vida realizó innumerables sacrificios por darme el estudio y tenerme aquí. A mi padre, aunque no se encuentre presente con nosotros, sé que él está orgulloso de todo lo que he logrado. A mi esposa, mi hermana y sobrina por ser mi motor de vida y su apoyo incondicional está siempre conmigo. Y a todas las personas que han llegado y se han ido de mi vida las cuales han tenido un propósito importante para mí, les agradezco y que Dios bendiga sus caminos.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al Ing. Agrónomo Víctor Chaves Arias, por su acompañamiento y apoyo en mi vida profesional, por todos los conocimientos dados, siempre le estaré agradecido. Al Lic. Roberto González y personal del laboratorio de suelos del Instituto del café de Costa Rica, los cuales me brindaron todas las herramientas para la elaboración de esta investigación y todo su apoyo, infinitas gracias para ellos.

Al Dr. Roger Muñoz Hernández, profesor tutor, quien siempre me brindó su apoyo y conocimiento para la realización de esta tesis: mi agradecimiento por siempre. Por último, un agradecimiento a todas las personas que han estado presentes en mi vida y me han brindado una voz de aliento para seguir adelante, a todos ellos: gracias.

## TABLA DE CONTENIDOS

INDICE DE TABLAS.....	Vii
INDICE DE FIGURAS .....	Viii.
RESUMEN .....	xi
1. Introducción.....	1
2. Objetivos.....	4
2.1 Objetivo General.....	4
2.2 Objetivos específicos .....	4
3. Marco conceptual .....	5
3.1 Historia del café .....	5
3.2 Importancia del sistema suelo-planta.....	6
3.3 Análisis de suelo.....	6
3.4 La interpretación de los resultados de los análisis de suelos .....	8
3.5 Soluciones extractoras .....	8
3.6 Nivel crítico de un elemento en el suelo .....	9
3.7 Correlación y calibración en análisis de suelos .....	9
3.8 Correlación.....	9
3.9 Calibración .....	10
3.10 Métodos de extracción para análisis de nutrimentos en el suelo .....	11
3.11 Descripción de las soluciones extractoras .....	13
3.11.1 KCl-Olsen Modificada.....	13
3.11.2 Mehlich 3.....	13
4. Materiales y métodos .....	14
4.1 Localización del experimento .....	14
4.2 Características generales de las regiones de estudio .....	14
4.3 Selección de los puntos de muestreo .....	16
4.4 Muestreo.....	16
4.5 Preparación de las muestras de suelo .....	17
4.6 Determinaciones físicas y químicas de las muestras de suelo.....	17
4.6.1 Análisis de laboratorio .....	17
4.7 Diseño experimental .....	18
4.8 Fase de invernadero (ensayo biológico) .....	18
4.9 Variables por evaluar .....	20

4.10	Rendimiento relativo de materia seca (RR) .....	20
4.11	Nivel critico .....	21
4.12	Análisis de la información .....	21
5.	Discusión de Resultados .....	22
5.1	Distribución porcentual de los contenidos de los nutrientes K, Ca, Mg y P, en suelos muestreados en diferentes regiones cafetaleras del país .....	22
5.2	Contenido de nutrientes en suelos de diferentes regiones cafetaleras extraído por las soluciones extractoras Olsen KCl y Mehlich 3.....	24
5.3	Correlación entre las soluciones extractoras Mehlich 3 y Olsen- KCl.....	25
5.4	Correlación entre las soluciones extractoras Mehlich 3, Olsen- KCl y la parte foliar....	46
6.	Determinación del nivel crítico entre las soluciones extractoras Mehlich 3 y Olsen modificada KCl.....	48
7.	Conclusiones.....	52
8.	Recomendaciones .....	54
9.	Referencias bibliográficas .....	55
10.	Anexos .....	58
	Metodologías de laboratorio utilizadas en los análisis de las muestras de suelo recibidas por el Instituto del Café de Costa Rica.....	58
	Análisis de la muestra .....	58
	Extracción de la muestra - pH .....	59
	Preparación de reactivos: .....	59
	Olsen modificada .....	59
	Instructivo para la determinación de Potasio en Suelos por el método de Olsen Modificada .....	59
	Extracción de la muestra.....	59
	Mehlich 3 .....	63

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1.</b> Ubicación de los sitios de muestreo y las regiones cafetaleras de Costa Rica seleccionadas en el trabajo de investigación.....	15,16
<b>Tabla 2.</b> Características físicas y químicas por determinar y metodologías a utilizar en el análisis de las muestras de suelo a evaluar.....	18
<b>Tabla 3.</b> Distribución porcentual de los contenidos de los nutrientes K, Ca, Mg y P en suelos muestreados en diferentes regiones cafetaleras del país.....	22
<b>Tabla 4.</b> Contenido de nutrientes en suelos de diferentes regiones cafetaleras extraído con las soluciones extractora Olsen KCl y Mehlich 3 .....	24
<b>Tabla 5.</b> Extracción de los nutrientes K, Ca, Mg y P con las soluciones Olsen modificada- KCl y Mehlich 3 versus la parte foliar.....	46
<b>Tabla 6.</b> Nivel crítico de K en el suelo con la solución Mehlich 3, de acuerdo con el modelo de regresión obtenido, utilizando como referencia el nivel crítico (NC) de $0.20 \text{ cmol (+)} 1^{-1}$ .....	48
<b>Tabla 7.</b> Nivel crítico de Ca en el suelo con la solución Mehlich 3, de acuerdo con el modelo de regresión obtenido, utilizando como referencia el nivel crítico (NC) de $3.00 \text{ cmol (+)} 1^{-1}$ .....	49
<b>Tabla 8.</b> Nivel crítico de Mg en el suelo con la solución Mehlich 3, de acuerdo con el modelo de regresión obtenido, utilizando como referencia el nivel crítico (NC) de $0.80 \text{ cmol (+)} 1^{-1}$ .....	50
<b>Tabla 9.</b> Nivel crítico de P en el suelo con la solución Mehlich 3, de acuerdo con el modelo de regresión obtenido, utilizando como referencia el nivel crítico (NC) de $10 \text{ mg (+)} 1^{-1}$ .....	51

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Instalaciones del invernadero del Instituto del Café de Costa Rica donde se llevó a cabo la investigación en macetas.....	14
<b>Figura 2.</b> Identificación de las muestras de suelo antes de ser llevadas a su respectivo análisis.....	17
<b>Figura 3.</b> A. Crecimiento de la semilla variedad obata a los dos meses de la siembra, B. Desarrollo y formación de las plantas, C. Corta de las plantas para su posterior análisis foliar .....	20
<b>Figura 4.</b> Diagrama de dispersión de K extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en los distintos suelos de Costa Rica.....	26
<b>Figura 5.</b> Diagrama de dispersión de K extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Andisoles de Costa Rica.....	27
<b>Figura 6.</b> Diagrama de dispersión de K extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Ultisoles de Costa Rica.....	28
<b>Figura 7.</b> Diagrama de dispersión de K extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Inceptisoles de Costa Rica.....	29
<b>Figura 8.</b> Diagrama de dispersión de K extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Alfisoles de Costa Rica.....	30
<b>Figura 9.</b> Diagrama de dispersión de Ca extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en los distintos suelos de Costa Rica.....	31
<b>Figura 10.</b> Diagrama de dispersión de Ca extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Andisoles de Costa Rica.....	32



<b>Figura 11.</b> Diagrama de dispersión de Ca extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Ultisoles de Costa Rica.....	33
<b>Figura 12.</b> Diagrama de dispersión de Ca extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Inceptisoles de Costa Rica.....	34
<b>Figura 13.</b> Diagrama de dispersión de Ca extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Alfisoles de Costa Rica.....	35
<b>Figura 14.</b> Diagrama de dispersión de Mg extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en distintos suelos de Costa Rica.....	36
<b>Figura 15.</b> Diagrama de dispersión de Mg extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Andisoles de Costa Rica.....	37
<b>Figura 16.</b> Diagrama de dispersión de Mg extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Ultisoles de Costa Rica.....	38
<b>Figura 17.</b> Diagrama de dispersión de Mg extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Inceptisoles de Costa Rica.....	39
<b>Figura 18.</b> Diagrama de dispersión de Mg extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Alfisoles de Costa Rica.....	40
<b>Figura 19.</b> Diagrama de dispersión de Fosforo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en distintos suelos de Costa Rica.....	41

<b>Figura 20.</b> Diagrama de dispersión de Fosforo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Andisoles de Costa Rica.....	42
<b>Figura 21.</b> Diagrama de dispersión de Fosforo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Ultisoles de Costa Rica.....	43
<b>Figura 22.</b> Diagrama de dispersión de Fosforo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Inceptisoles de Costa Rica.....	44
<b>Figura 23.</b> Diagrama de dispersión de Fosforo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Alfisoles de Costa Rica.....	45

## RESUMEN

El objetivo principal del presente estudio fue evaluar las soluciones extractoras KCl-Olsen modificada y Mehlich 3, mediante estudios de correlación y calibración para los nutrimentos P, K, Ca y Mg, en suelos cultivados con café.

Se seleccionaron suelos de importancia cafetalera en Costa Rica, distribuidos entre las 8 regiones cafetaleras del país, que incluyen: Valle Central, Valle Occidental, Orosi, Turrialba, Tres Ríos, Brunca, Tarrazú y Guanacaste. Se escogieron 64 sitios de muestreo, en cada sitio de muestreo se recolectaron 15 submuestras para formar una muestra compuesta; la profundidad de muestreo fue de 0 a 20 cm y se colectaron 45 kg de suelo por muestra compuesta. Los 64 suelos muestreados estaban conformados por 5 macetas y a cada suelo se le realizó una aplicación diferenciada con los elementos por evaluar (P, K, Ca y Mg), el experimento fue desarrollado en el Invernadero del Instituto del café de Costa Rica. En cada maceta se sembró una plántula de la variedad obata, la cual se obtuvo mediante un semillero realizado previamente, el crecimiento de las plantas en maceta fue de aproximadamente tres meses, luego se cortaron y se analizó el contenido de sus nutrimentos, además, se tomó una muestra de suelo por maceta (320 macetas) y se analizó el contenido de los nutrimentos con las soluciones extractoras por investigar, Olsen modificado- KCl y Mehlich 3.

En la distribución porcentual de los contenidos de los nutrimentos para K, Ca, Mg y P en suelos muestreados en diferentes regiones cafetaleras del país, para K, con ambas soluciones extractoras, se presentaron valores reportados altos,  $\geq 0,20 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ , que representan 1,25% para Olsen modificada y 3,43% para Mehlich 3, así como un gran porcentaje de valores bajos, un 98,75% para Olsen modificada y 96,56% para Mehlich 3. El Ca con la solución extractora KCl presentó un porcentaje bajo de valores altos,  $\geq 3 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ , un 10,93%, y con Mehlich 3 un 10%. Predominó el porcentaje de valores bajos  $\leq 3 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ , con valores de 89,06% para KCl, y 90% para Mehlich 3. Para el Mg con KCl se obtuvo un 11,25% de valores porcentuales altos,  $\geq 0,80 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ , y para Mehlich un 12,18%, mientras que los valores bajos representaron un 88,75% para KCl y 87,81% para Mehlich 3.

Con el P se presentaron valores contrarios a los obtenidos con K, Ca y Mg, ya que un 98,12% de las muestras presentó valores altos con la solución Olsen modificada,  $\geq 10 \text{ mg/l}^{-1}$ , y con Mehlich 3 un 86,25%, y el porcentaje de valores bajos fue de 1,87% para Olsen y 13,75% para Mehlich 3.

La correlación de las soluciones extractoras Olsen KCl y Mehlich 3 para K presentó valor de  $R^2$  de 0,608, con una significancia alta, con un  $r = 0,78$ . Los valores obtenidos con Mehlich 3 fueron mayores a los obtenidos con Olsen modificada, se obtuvo una regresión con pendiente  $y = 1,0787x$ .

Para el Ca extraído en las muestras totales con Mehlich 3 y KCl, se encontró un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,975 y un valor  $r = 0,99$ , este es altamente significativo.

La correlación entre los valores obtenidos de magnesio en los distintos suelos muestreados en esta investigación, con la solución extractora Mehlich 3 y la solución Olsen modificada, mostró un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,956 y un  $r = 0,98$ . Esta es altamente significativa y existe un alto grado de asociación entre las variables.

Para el fósforo, la correlación entre los valores obtenidos en los distintos suelos muestreados en esta investigación, con la solución extractora Mehlich 3 y la solución KCl, mostró un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,71 y un  $r = 0,84$ , esta es altamente significativa. Asimismo, se extrajo más con la solución Olsen modificada que con la solución Mehlich 3.

En la determinación de los niveles críticos para el K, al considerar el total de muestras (320), se observa una correlación lineal significativa ( $r=0,78^{**}$ ) entre la extracción de potasio con las soluciones Mehlich y Olsen modificada. El modelo lineal ( $y=1,0787 \text{ Olsen} + 0,0181$ ) presenta un alto coeficiente de determinación ( $R^2=0,60$ ), con una pendiente que no es cercana a 1, lo que indica que ambas soluciones extrajeron cantidades diferentes de potasio. La solución Mehlich 3 extrajo mayor cantidad que Olsen modificada.

De esta forma, el nivel crítico (NC) de  $0,20 \text{ cmol K (+) } 1^{-1}$  con el extractor Olsen modificada, utilizado actualmente, independientemente del orden de suelo, permanecería igual de utilizarse Mehlich. Si lo separamos por orden de suelos, el NC con Mehlich variaría a  $0,33 \text{ cmol K (+) } 1^{-1}$  para los Alfisoles y  $0,21 \text{ cmol K (+) } 1^{-1}$  para los Andisoles y Ultisoles Al separar los suelos por órdenes, se presentan correlaciones altamente significativas entre Mehlich 3 y Olsen modificada.

Con respecto al nivel crítico de calcio, se mantiene un nivel crítico de  $3 \text{ cmol (+) Ca l}^{-1}$  al utilizar la solución extractora KCl, indistintamente del orden de suelo. Con la solución extractora Mehlich 3, el nivel crítico variaría entre  $3.33 \text{ cmol Ca (+) l}^{-1}$  para los Andisoles y  $2.72 \text{ cmol Ca (+) l}^{-1}$  para los Inseptisoles.

En el total de las 320 muestras, para el magnesio se observó una correlación lineal altamente significativa ( $r= 0.98$ ) entre la extracción con la solución Mehlich 3 y KCl. El modelo lineal ( $y= 0,94x + 0,005$ ) presenta un alto coeficiente de determinación ( $R^2 = 0,95$ ) con una pendiente cercana a 1, lo que indica que ambas soluciones extrajeron cantidades muy similares del elemento magnesio.

Para el elemento P no se pudo establecer con claridad un nivel crítico, las soluciones extractoras no presentaron una buena correlación, esto dificultó la obtención de una buena correspondencia entre Olsen modificada y Mehlich 3.

## ABSTRACT

The main objective of the present study was to evaluate the extraction solutions modified KCl-Olsen and Mehlich 3, through correlation and calibration studies for the nutrients P, K, Ca and Mg, in soils cultivated with coffee.

The soils of coffee importance in Costa Rica, are distributed among the 8 coffee growing regions of the country, which include: Central Valley, Western Valley, Orosi, Turrialba, Tres Ríos, Brunca, Tarrazú and Guanacaste. For the study 64 sampling sites were chosen, in each sampling site 15 subsamples were collected to form a composite sample; The sampling depth was from 0 to 20 cm and 45 kg of soil were collected per composite sample. The 64 sampled soils were made up of five pots and a differentiated application was made to each soil with the elements to be evaluated (P, K, Ca and Mg), the experiment was developed in the greenhouse of the Costa Rican Coffee Institute. In each pot a seedling of the Obata variety was sown, which was obtained through a previously made seedbed, the growth of the potted plants was approximately three months, then they were cut and the content of their nutrients was analyzed, in addition, they were took a soil sample per pot (320 pots) and the nutrient content was analyzed with the extracting solutions to be investigated, modified Olsen- KCl and Mehlich 3.

In the percentage distribution of the nutrient contents for K, Ca, Mg and P in soils sampled in different coffee regions of the country, for K, with both extracting solutions, there were high reported values,  $\geq 0.20 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ , representing 1.25% for modified Olsen and 3.43% for Mehlich 3, and a large percentage of low values, 98.75% for modified Olsen and 96.56% for Mehlich 3. Ca, with the KCl extraction solution it presented a low percentage of high values,  $\geq 3 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ , 10.93%, and with Mehlich 3 10%. The percentage of low values  $\leq 3 \text{ cmol (+) l}^{-1}$  predominated, with values of 89.06% for KCl, and 90% for Mehlich 3. For Mg, with KCl 11.25% of high percentage values were obtained,  $\geq 0.80 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ , and for Mehlich 12.18%, while the low values represented 88.75% for KCl and 87.81% for Mehlich 3.

With P, were presented values contrary to those obtained with K, Ca and Mg, since 98.12% of the samples presented high values with the modified Olsen solution,  $\geq 10 \text{ mg / l}^{-1}$ , and with Mehlich 3 86, 25%, and the percentage of low values was 1.87% for Olsen and 13.75% for Mehlich 3.

The correlation of the extraction solutions Olsen KCl and Mehlich 3 for K presented a value of  $R^2$  of 0.608, with a high significance, with an  $r = 0.78$ , the values obtained with Mehlich 3 were higher than those obtained with modified Olsen, a regression was obtained with slope  $y = 1.0787x$ .

For the Ca extracted in the total samples with Mehlich 3 and KCl, a correlation coefficient  $R^2$  of 0.975 and an  $r$  value = 0.99 was found, being highly significant.

The correlation between the Magnesium values obtained in the different soils sampled in this investigation, with the Mehlich 3 extraction solution and the modified Olsen solution, showed a correlation coefficient  $R^2$  of 0.956 and an  $r = 0.98$ , being highly significant, existing a high degree of association between the variables.

For Phosphorus, the correlation between the values obtained in the different soils sampled in this investigation, with the Mehlich 3 extraction solution and the KCl solution, showed a correlation coefficient  $R^2$  of 0.71 and an  $r = 0.84$  being highly significant. More was extracted with the modified Olsen solution than the Mehlich 3 solution.

In determining the critical levels for K, when considering the total number of samples (320), a significant linear correlation ( $r = 0.78^{**}$ ) is observed between the extraction of potassium with the Mehlich and modified Olsen solutions. The linear model ( $y = 1.0787 \text{ Olsen} + 0.0181$ ), presents a high coefficient of determination ( $R^2 = 0.60$ ), with a slope that is not close to 1, which indicates that both solutions extracted different amounts of potassium, extracting greater quantity the Mehlich 3 solution than Olsen Modified.

In this way, the critical level (NC) of  $0.20 \text{ cmol K (+) l}^{-1}$  with the modified Olsen extractor, currently used, regardless of the soil order, would remain the same, if Mehlich was used; and separate it in order of soils, the NC with Mehlich would vary to  $0.33 \text{ cmol K (+) l}^{-1}$  for Alfisols and  $0.21 \text{ cmol K (+) l}^{-1}$  for Andisols and Ultisols. When separating the soils by order, highly significant correlations are presented between Mehlich 3 and modified Olsen.

Regarding the critical level of Calcium, a critical level of 3 cmol (+) Ca l<sup>-1</sup> is maintained, using the KCl extraction solution, regardless of the soil order, with the Mehlich 3 extraction solution, the critical level would vary between 3.33 cmol Ca (+) l<sup>-1</sup> for Andisols, and 2.72 cmol Ca (+) l<sup>-1</sup> for Inseptisols.

In the total of 320 samples, for Magnesium a highly significant linear correlation ( $r = 0.98$ ) was observed between the extraction with the Mehlich 3 solution and KCl. The linear model ( $y = 0.94x + 0.005$ ) presents a high coefficient of determination ( $R^2 = 0.95$ ) and with a slope close to 1, which indicates that both solutions extracted very similar amounts of the element Magnesium.

For P, a critical level could not be clearly established, the extracting solutions did not show a good correlation, making it difficult to obtain a good correspondence between modified Olsen and Mehlich 3.



## 1. Introducción

El suelo es un sistema heterogéneo trifásico, conformado por un componente sólido (elementos orgánicos e inorgánicos), un componente líquido y un componente gaseoso, es un ente dinámico y complejo en el que suceden numerosos procesos físicos, químicos y biológicos.

Las condiciones químicas determinan la fertilidad del suelo, la cual tiene como objetivo maximizar la eficacia del uso agronómico de los nutrientes y mejorar la productividad de los cultivos. La evaluación de la fertilidad de los suelos es considerada uno de los aspectos más importantes en un sistema de producción agrícola. Para lograr un uso eficiente y racional de los fertilizantes, se requiere conocer las concentraciones de los nutrientes en el suelo, la extracción que realiza el cultivo, así como las propiedades físicas y químicas del suelo. Muchos de los nutrientes que las plantas requieren para su desarrollo se encuentran en el suelo en cantidades variables y, a veces, insuficientes para su adecuada nutrición.

El análisis químico se utiliza como herramienta para diagnosticar la fertilidad del suelo (Camacho-Tamayo *et al.*, 2010), esta evaluación permite conocer la capacidad que posee el suelo para aportar los nutrientes que las plantas necesitan para su normal crecimiento, desarrollo y producción (Sadeghian, 2011), además, a través de su interpretación, se realizan las recomendaciones de fertilización para suplir las necesidades de nutrientes de los cultivos. La interpretación del análisis de suelo permite identificar los nutrientes limitantes del crecimiento y la producción, también, mediante el conocimiento de los requerimientos de los cultivos, se elaboran estrategias de fertilización equilibradas para el uso racional de los fertilizantes.

El análisis químico de laboratorio permite determinar la disponibilidad de nutrientes en el suelo. Para cuantificar esta disponibilidad, se utilizan soluciones extractoras; por lo tanto, la función de la solución extractora es extraer la fracción disponible de los nutrientes en el suelo, tal como lo realizan las plantas. En las metodologías de análisis de suelos en laboratorio, una muestra de suelo es agitada con la solución extractora, posteriormente, se filtra la solución y se determina la cantidad del nutriente que permanece en solución (Jones 1990). Para seleccionar un método de análisis con

una solución extractora específica, se requieren estudios de correlación y calibración (Danhke y Olson, 1990).

En los estudios de correlación, para evaluar el grado de disponibilidad de un nutriente para las plantas, se correlaciona el rendimiento relativo del cultivo con la concentración del elemento en el suelo (Cabalceta, 1993). Estos estudios de correlación se realizan tanto en invernadero como en campo y permiten determinar el grado de deficiencia o suficiencia de un elemento en el suelo (Cabalceta y Molina, 2006). Esta información es necesaria y de suma importancia para la interpretación y recomendación de fertilización en cultivos agrícolas.

Los estudios de calibración en campo permiten establecer los niveles críticos definitivos para una metodología particular de extracción utilizada en el análisis de suelo (Molina y Bornemisza, 2006). El nivel crítico se define como la concentración de un elemento en el suelo, por debajo de la cual la probabilidad de respuesta a su aplicación es alta, mientras que, por encima de esta, la probabilidad de respuesta es baja.

En el cultivo del café, el productor obtiene altas cosechas cuando se maneja un adecuado plan de fertilización, en donde aporten los requerimientos nutricionales exigidos por el cultivo, para mantener o incrementar su producción (Valencia, Carrillo, Pachon y Hoyos, 1989). Por esta razón, las metodologías de análisis de suelos deben estar correlacionadas y calibradas adecuadamente, porque son fundamentales para la interpretación y para el cálculo de las dosis de fertilizantes por aplicar.

En nuestro país, en los análisis de suelos se han utilizado las soluciones extractoras Olsen modificada para analizar la disponibilidad de P, K, Fe, Cu, Zn, y Mn y KCl para determinar la acidez extraíble o intercambiable, y para la disponibilidad de Ca y Mg (Díaz-Romeu y Hunter, 1978, citados por Molina, 2007). También, se ha propuesto el uso de la solución Mehlich 3 para el análisis simultáneo de todos los nutrientes (Cabalceta y Molina, 2006, citados por Molina.).

Con la información del censo cafetalero nacional realizado en el año 2011, se han estimado noventa mil hectáreas sembradas de café, en las cuales se considera una producción de aproximadamente veinticinco a treinta fanegas por hectárea. Esta área cafetalera registrada

comprende una gran diversidad de ordenes de suelos, entre los cuales se encuentran los andisoles, inceptisoles, alfisoles y ultisoles (Instituto del Café de Costa Rica, 2013).

Debido a la variabilidad de las propiedades físicas y químicas de los suelos de un sitio a otro, incluyendo variaciones por clima, variedad y manejo que influyen en el rendimiento y la calidad del café, se ha propuesto la presente investigación, con la finalidad de realizar estudios de correlación y calibración con las soluciones extractoras KCl-Olsen modificado y Mehlich 3 para el análisis de P, K, Ca y Mg en los diferentes órdenes taxonómicos de suelos del país utilizados en la producción de café. El objetivo del estudio es definir niveles críticos de dichos nutrimentos en cada uno de estos grupos de suelos, para optimizar un uso más eficiente de los nutrimentos aplicados en los programas de fertilización.

## **2. Objetivos**

### **2.1 Objetivo General**

Evaluar las soluciones extractoras Olsen-KCl modificada y Mehlich 3 en invernadero, en muestras de suelo colectadas en las principales regiones cafetaleras de Costa Rica

### **2.2 Objetivos específicos**

Evaluar la eficiencia de las soluciones extractoras KCl-Olsen modificada y Mehlich 3 por medio del análisis químico de laboratorio en la determinación del contenido de P, K, Ca y Mg disponibles en suelos cafetaleros.

Determinar la correlación entre el contenido de los nutrimentos P, K, Ca y Mg en el suelo y el contenido extraído por la parte aérea foliar de las plantas de café en invernadero

Determinar los niveles críticos de P, K, Ca y Mg para las soluciones extractoras Olsen modificada-KCl y Mehlich 3 en los suelos evaluados a nivel de invernadero, utilizando el modelo de regresión y el nivel crítico actual reportado para la disolución KCl-Olsen Modificada, para establecer si estos niveles son adecuados para su utilización en la interpretación de los análisis de las muestras de suelo.

### **3. Marco conceptual**

#### **3.1 Historia del café**

La fecha en que probablemente se introdujo el café a América es 1720, cuando las primeras semillas de la especie *Coffea Arábica*, variedad *Typica*, llegaron a la isla Martinica, Antillas. Luego, estas fueron sembradas en la provincia de Costa Rica a finales del siglo XVIII (ICAFE, 2017).

En esa época, nuestro país tenía una agricultura de subsistencia. La historia costarricense cambió desde 1808, bajo el amparo del gobernador Tomás de Acosta, debido a que empezó a arraigarse en nuestro suelo el cultivo del café, el cual ha influenciado el ser y quehacer costarricense.

Costa Rica fue el primer país centroamericano que estableció esta floreciente industria. Destacadas personalidades contribuyeron con el desarrollo del cultivo y se asignó al Padre Félix Velarde como el primer sembrador, quien en 1816 menciona que posee un solar con plantas de café. El primer cafetal estuvo cien metros al norte de la Catedral Metropolitana, en el cruce de la Avenida Central y calle Cero.

Varios factores favorecieron el establecimiento del “Grano de Oro”. Los lugares alrededor de los cuales se hicieron las primeras plantaciones, se caracterizaban por suelos de origen volcánico, sumamente fértiles; una temporada lluviosa y otra seca, temperaturas relativamente uniformes y favorables a lo largo de todo el año para el desarrollo de la planta (ICAFE, 2017).

Luego de la Independencia, en 1821, los gobiernos municipales fueron los primeros en incentivar este cultivo con políticas de entrega de plantas y concesión de tierras a quienes se interesarán en esta empresa. La municipalidad josefina, pionera en ese esfuerzo, fue pronto emulada por los cuerpos administrativos de otros asentamientos: Cartago y Tres Ríos.

Los jefes de Estado don Juan Mora Fernández y don Braulio Carrillo apoyaron la actividad cafetalera y vieron en el café el producto que generaría un movimiento económico para beneficiar a las personas y que permitir el desarrollo económico y social de Costa Rica. Asimismo, Don Mariano Montealegre se conoce como el principal impulsador del cultivo entre 1830-1840 (ICAFE, 2013).

### **3.2 Importancia del sistema suelo-planta**

La planta está anclada a un medio de desarrollo en el cual suceden numerosos procesos tanto físicos como químicos, este medio es lo que se conoce como suelo, el cual le suministra los nutrientes a la planta para poder realizar todos los procesos fisiológicos necesarios para su subsistencia.

Es sabido que las plantas requieren para todos sus procesos fisiológicos diferentes cantidades de nutrientes, incluyendo macro y micro nutrientes. Muchas veces el suelo no tiene la capacidad para aportar todos estos nutrientes, una de las razones es la extracción que realiza el cultivo de grandes cantidades de nutrientes a través de la formación de frutos o cosecha. Esta situación se presenta con el cultivo del café, en donde la planta, a través de las etapas fenológicas de la formación de fruto, exige altos contenidos de nutrientes: en primer lugar, el nitrógeno, luego el potasio, continuando con los otros nutrientes. Mientras más fruto o cosecha produzca una planta de café, mayor va a ser su exigencia para llenar esas necesidades, por lo tanto, se recurre a la aplicación de fertilizantes para poder cubrir esos requerimientos.

La continua fertilización de los cafetales con productos químicos, con un alto costo y un efecto residual acidificante en su mayoría, ha traído como consecuencia una disminución del pH, aumento en las concentraciones de aluminio, hierro y manganeso, así como disminución del potasio, calcio y magnesio intercambiables, con la consecuente pérdida de efectividad de los fertilizantes aplicados.

### **3.3 Análisis de suelo**

Para evaluar la fertilidad de un suelo mediante la técnica del análisis químico se requiere una secuencia de etapas que se mencionan a continuación:

- Muestreo de suelos
- Preparación de la muestra para su análisis
- Análisis químico de la muestra de suelo
- Interpretación de los resultados
- Elaboración con bases científicas, de recomendaciones de fertilizantes y enmiendas

En el análisis de suelo, hay un factor que es prioritario e indispensable: la obtención de la muestra. Esta debe ser representativa de varias hectáreas de café, la forma de muestreo adecuada debe ser sistemática al azar, colectándose varias submuestras, al final, se toma una muestra compuesta de aproximadamente 0.5 kg (Molina, 2007).

Uno de los principales objetivos de un análisis de suelo es diagnosticar los problemas de fertilidad o las deficiencias de nutrimentos que se van a encontrar en el suelo y, a través de este diagnóstico, se puede crear un plan de corrección de estas deficiencias, por medio de un plan de fertilización que se ajuste a las necesidades. Este análisis es un método de bajo costo, en muchos casos sin ningún costo, porque lo brindan las empresas formuladoras de fertilizantes o laboratorios químicos de instituciones gubernamentales, las cuales están al servicio del agricultor. La interpretación de los análisis de los resultados obtenidos a partir de las muestras de suelos enviadas a los laboratorios se basa en estudios de correlación y calibración, con la respuesta de las plantas a la aplicación de una cantidad dada del nutrimento.

El análisis de suelo indica si uno o unos de los elementos son deficientes o están en el nivel adecuado, además, muestra los niveles de acidez, pH y aluminio en el suelo, estos indicadores están relacionados con posibles problemas de toxicidad para la planta, si sus niveles son muy altos.

La fertilidad es vital para que un suelo sea productivo, aunque un suelo fértil no necesariamente es productivo, debido a que existen otros factores de tipo físico, como el mal drenaje, escasa profundidad, piedra superficial, déficit de humedad, etc., que pueden limitar la producción, aun cuando la fertilidad del suelo es adecuada. El grado de potencial productivo de un suelo está determinado por sus características químicas y físicas.

El análisis de suelos cumple con dos funciones básicas (INPOFOS, 1997): muestra el contenido nutricional de los elementos (macro y micro nutrimentos) en el suelo a través del tiempo en que se desarrolla el cultivo y, conforme se vayan realizando continuamente los análisis de suelos, se registran los diferentes cambios que se obtienen a través de un plan de fertilización, el cual tiene como objetivo llenar los requerimientos nutricionales básicos del cultivo, para una buena producción.

Numerosos procesos se han desarrollado a través de los años para el análisis de suelos, los cuales varían según ciertas características, como lo son el pH, la mineralogía de las arcillas o su capacidad de intercambio catiónico (Molina, 2007). Para cada región que se quiere estudiar, se deben realizar los estudios de calibración y correlación de análisis de suelos, ya que esto permitirá escoger el método más apropiado para las condiciones predominantes en el suelo.

### **3.4 La interpretación de los resultados de los análisis de suelos**

Cuando se realiza la interpretación de un análisis de suelo, se utilizan tablas de fertilidad elaboradas con los análisis de los laboratorios químicos a través de numerosas investigaciones en invernadero y en campo, donde se hacen análisis de calibración y correlación de los suelos. Estas tablas van a clasificar cada nutrimento en cuatro categorías: bajo o deficiente, medio o suficiente, óptimo o adecuado y alto o excesivo. Con estas categorías, se puede observar el contenido real de cada elemento en el suelo y su posible respuesta a la aplicación del elemento deficiente (Molina, 2007).

### **3.5 Soluciones extractoras**

Una solución extractora es aquella que simula en el laboratorio la forma en que la planta extrae del suelo los nutrimentos disponibles, de una manera rápida y sencilla, dependiendo del método de extracción que se utilice (Cabalceta y Molina, 2006). Es importante que el valor extraído en el análisis correlacione bien con la cantidad absorbida por las plantas, y no necesariamente que el método de análisis extraiga exactamente la misma cantidad del nutrimento que extrae la planta (Lindsay y Cox, 1985, citados por Cabalceta y Molina, 2006).

Muchos de los laboratorios químicos en nuestro país a través de los años han utilizado el método de extracción de Olsen modificada para los siguientes elementos: P, K, Fe, Cu, Zn y Mn disponibles; así como el KCl para el Ca, Mg y la acidez intercambiable (Díaz-Romeu y Hunter, 1978). La utilización de una solución extractora diferente para el análisis de los nutrimentos, como lo es Mehlich 3, ha mostrado en ensayos de invernadero y laboratorio que puede ser más práctica y eficiente, esto hace que el resultado de los niveles críticos sea muy satisfactorio para la mayoría de los nutrimentos (Cabalceta y Molina, 2006).



### **3.6 Nivel crítico de un elemento en el suelo**

Para determinar si un nutrimento se encuentra disponible para las plantas, lo conveniente es utilizar el nivel crítico de este y complementarlo con el estudio que se debe realizar en el invernadero, de correlacionar el rendimiento relativo del cultivo y la concentración de los nutrimentos en el suelo (Cabalceta, 1993).

Este nivel crítico mencionado es la concentración de un elemento en el suelo por debajo de la cual se va a observar una respuesta del cultivo a la aplicación. Dicha respuesta va a ser alta si los niveles de este elemento son bajos y si los niveles de concentración del elemento en el suelo son altos, su respuesta a la aplicación va a ser baja (Cabalceta, 1995).

### **3.7 Correlación y calibración en análisis de suelos**

Cuando se hacen estudios de correlación y calibración en análisis de suelos, se deben de realizar 3 procedimientos:

- 1) En el laboratorio se escoge la solución extractante por utilizar, por ejemplo, Olsen modificada-KCl o Mehlich 3, para extraer las formas disponibles de los nutrimentos en el suelo.
- 2) Etapa de invernadero, donde se analiza si hay una relación directa entre la solución extractora escogida con lo que absorbe la planta y su rendimiento.
- 3) Calibración en el campo, donde se comprueba el método de análisis, por medio de un cultivo específico en condiciones de campo (Molina y Bornemisza, 2001).

### **3.8 Correlación**

Es el método utilizado para analizar la posible relación entre un nutrimento del suelo extraído mediante una solución extractora y la respuesta que pueda tener el cultivo a la aplicación del

nutrimento. La correlación determina el grado de asociación entre dos variables, de modo que una influya sobre la otra (Danhnke y Olson, 1990; Molina y Bornemisza, 2006).

La importancia de los estudios de correlación en el análisis de suelo se basa en la posibilidad de realizar diferentes comparaciones entre métodos de extracción; es decir, permite comparar el comportamiento de una solución extractora con respecto a otra, de esta manera, facilita la interpretación de los resultados (Alvarado, Iturriaga, Smyth, Portuguez y Ureña, 2009).

Una solución extractora presenta una buena correlación con el rendimiento y se considera apropiada para análisis cuando bajas concentraciones, extraídas con la solución, coinciden con bajos rendimientos y altas concentraciones coinciden con altos rendimientos (Bertsch, Bejarano y Corrales, 2005).

### **3.9 Calibración**

La calibración se utiliza para ver la respuesta de la planta en crecimiento a través de la aplicación de un nutrimento, se utiliza como referencia el valor obtenido por un procedimiento seleccionado de análisis (Molina & Bornemisza, 2006).

La calibración se relaciona con la correlación e interpretación de un análisis, debe ser evaluada en gran cantidad de suelos, puede realizarse en invernadero o campo. Las evaluaciones en invernadero son las más utilizadas, principalmente por la facilidad de controlar fuentes de variación, como el clima, el efecto del subsuelo, las plagas, entre otras; asimismo, porque los ensayos en invernadero resultan más rápidos y económicos.

La importancia que recae sobre los estudios de correlación y calibración en laboratorio son fundamentales, ya que por medio de ellos es que se puede realizar la interpretación de los análisis de suelo. Para esta interpretación, se utilizan las tablas de niveles críticos, las cuales van a indicar, cuando se hace una interpretación del análisis de contenido de nutrimentos, si se encuentra en una categoría baja, media o alta (Henríquez, Bertsch y Salas, 1995). La correlación y calibración en invernadero permiten comparar diferentes métodos de extracción, además, facilita determinar los niveles críticos tentativos. Los niveles críticos definitivos, para un método de extracción

previamente seleccionado, se establecen con la calibración en campo y constituyen la fase más importante en los estudios de calibración (Sánchez, 1981).

### **3.10 Métodos de extracción para análisis de nutrimentos en el suelo**

Una solución extractora es aquella que cumple la función de las plantas al extraer los nutrimentos disponibles que se encuentran en el suelo (Cabalceta y Molina, 2006). Para poder ser adoptadas como metodologías adecuadas, simulando lo que extraen del suelo las raíces de las plantas, las soluciones extractoras deben presentar, ante todo, una buena correlación con el rendimiento de las plantas, de modo que concentraciones bajas extraídas con la solución deben coincidir con rendimientos bajos y concentraciones altas con rendimientos altos (Cabalceta & Molina, 2006). Es muy importante tener en cuenta que cuando se selecciona el método de análisis por utilizar, este debe correlacionar bien con la cantidad absorbida por las plantas (Lindsay & Cox, 1985).

La escogencia de una solución extractora para determinado elemento se basa en la asociación entre la cantidad extraída del elemento por la solución, con los valores de absorción del mismo elemento.

Los distintos métodos de análisis para las muestras de suelos indican, en su mayoría, que una muestra se debe agitar con la solución extractora por una cierta cantidad de tiempo, después esta solución debe ser filtrada para determinar la cantidad del nutrimento que se encuentra presente en la solución (Jones, 1990).

Los extractantes más utilizados en análisis de suelos han sido ácidos y bases diluidos, que disuelven las formas más disponibles de los nutrimentos. Los ácidos diluidos se utilizan en suelos ácidos, mientras que las bases, como carbonatos y bicarbonatos, son empleadas preferentemente en suelos alcalinos (Cox y Kamprath, 1972; Lindsay y Cox, 1985; Cabalceta y Molina, 2006). Algunos ejemplos de soluciones extractoras comprenden Bray, Carolina del Norte y Troug (Jones, 1990); Morgan modificada (Jones y Wolf, 1984); Olsen modificada (Díaz-Romeu y Hunter, 1978); y bicarbonato de amonio (Soltampour 1991).

En la extracción de elementos menores se han utilizado los agentes quelatantes y a complejantes como el EDTA (ácido etilendiaminotetraacético) y DTPA (ácido dietilentriaminotetracético), por lo que se han incluido en extractantes ácidos, como es el caso del EDTA incluido en la solución Mehlich 3 (Mehlich 1984), y extractantes básicos como Olsen modificada (Díaz-Romeu & Hunter, 1978).

Para la extracción de nutrimentos catiónicos de las fracciones intercambiable y en la solución del suelo, se utilizan soluciones de sales como el  $\text{NH}_4\text{OAc}$  (Lanyon y Heald, 1982) y  $\text{KCl}$  (Kamprath, 1970). Asimismo, en los análisis químicos de suelos, se utilizan una gran variedad de soluciones extractoras (Molina y Bornemisza, 2006), las cuales permiten extraer diferentes formas de nutrimentos disponibles para las plantas (Cabalceta & Molina, 2006).

Según sea la solución empleada como agente de extracción, se puede obtener el resultado de la mayoría o de todos los elementos extraídos con un solo proceso, un ejemplo es la solución extractante de Mehlich 1 ( $\text{HCl}$  0,05 N,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,025 N), conocida como doble ácido o Carolina del Norte, que no mostró efectividad en suelos alcalinos; por lo que se modificó para formar la solución Mehlich 2, combinando ácido acético, cloruro de amonio, fluoruro de amonio y ácido clorhídrico (Mehlich, 1978; Jones, 1990). Otros extractantes universales son las soluciones de EDTA y acetato de amonio ( $\text{NH}_4\text{OAc-EDTA}$ ) y Olsen modificada ( $\text{NaHCO}_3$  0,5 M, EDTA 0,01 M, superfloc 127 0,01%, pH 8,5), esta última muy utilizada en los trópicos, incluyendo Costa Rica, y con pocos estudios de correlación como extractante, especialmente de elementos menores (Lindsay y Cox, 1985; Rohman y Cox, 1988).

Una solución que ha generado gran interés entre los investigadores que trabajan en el desarrollo de métodos y soluciones extractoras a nivel mundial es el extractante Mehlich 3 ( $\text{HOAc}$  0,2 M,  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  0,25 M,  $\text{NH}_4\text{F}$  0,015 M,  $\text{HNO}_3$  0,013 M, EDTA 0,001 M, pH 2,5), propuesta por Mehlich (1984), ya que se adapta muy bien a suelos ácidos de los trópicos; además, se han encontrado correlaciones óptimas con otros extractantes de uso actual (Cabalceta y Cordero, 1994a; Cabalceta y Cordero, 1994b; Cabalceta, 1995; Cabalceta y Bornemisza, 1995; Gadea, 1993; Molina, 1993; Molina y Bornemisza, 2001).

### **3.11 Descripción de las soluciones extractoras**

#### **3.11.1 KCl-Olsen Modificada**

En nuestro país, el binomio de soluciones extractoras que se utilizan en el análisis de muestras de suelo es la combinación Olsen modificada-KCl. Por una parte, Olsen modificada permite determinar los siguientes elementos: P, K, Fe, Cu, Zn y Mn; por otra parte, la solución KCl permite determinar acidez intercambiable y Ca y Mg (Bertsch et al., 2005; Molina, 2007).

La solución Olsen modificada es una solución básica, y está compuesta por 0,5 N de NaHCO<sub>3</sub>, 0,01M EDTA con 0,15 gr de superfloc 127 0,01%, tiene un pH de 8,5 (Cabalceta y Molina, 2006, Ramos, 2003).

#### **3.11.2 Mehlich 3**

Esta solución está considerada como una solución universal, con una sola extracción se trata de determinar todos los elementos (P, Ca, K, Mg, Na, Cu, Zn y Mn) extraídos con la combinación Olsen modificada-KCl, excepto la acidez intercambiable (Bertsch, Bejarano y Corrales, 2005; Cabalceta & Molina, 2006,).

Es una solución Amoniacal que presenta en su composición 0,2 N de Ácido Acético (CH<sub>3</sub>COOH), 0,25 N de Nitrato de Amonio (NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>), adicionando 0,015 N de Fluoruro de Amonio (NH<sub>4</sub>F), 0,013 N de Ácido Nítrico (HNO<sub>3</sub>) y 0,001 M de Agente quelante EDTA, tiene un pH de 2,5 (Frank, Beegle y Denning,2011; Wolf y Beegle, 2011).

## 4. Materiales y métodos

### 4.1 Localización del experimento

El trabajo de investigación se realizó en el invernadero (Figura 2) y en el laboratorio químico de suelos del Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE), ubicado en San Pedro de Barba de Heredia. Sus coordenadas son 10°03'09" latitud norte y 84° 13' 67" longitud oeste, localizado a una altitud de 1189 msnm, con una precipitación media anual de 360.12mm La temperatura media es de 21 °C y la humedad relativa de 83 % (ICAFFE,2017).



**Figura 1.**

*Instalaciones del invernadero del Instituto del Café de Costa Rica donde se llevó la investigación en macetas*

Fuente: (Delgado, 2021)

### 4.2 Características generales de las regiones de estudio

Se seleccionaron suelos de importancia cafetalera en Costa Rica, distribuidos entre las ocho regiones cafetaleras del país, que incluyen: Valle Central, Valle Occidental, Orosi, Turrialba, Tres Ríos, Brunca, Tarrazú y Guanacaste. Las regiones estudiadas se desglosan en la Tabla 1.

**Tabla 1.**

*Ubicación de los sitios de muestreo y las regiones cafetaleras de Costa Rica seleccionadas en el trabajo de investigación.*

<b>Numero de muestra</b>	<b>Lugar de muestreo</b>	<b>Región Cafetalera</b>	<b>Orden de suelo</b>
1	Grecia	Valle occidental	Andisol
2	Berlín (San Ramón)	Valle occidental	Inceptisol
3	San Lorenzo	Tarrazú	Ultisol
4	La Lucha	Brunca	Andisol
5	San francisco, Sabalito	Brunca	Andisol
6	El Roble	Brunca	Andisol
7	La Unión	Brunca	Andisol
8	Coto Brus 1	Brunca	Andisol
9	Poás, Alajuela	Valle Central	Andisol
10	Coopronaranjo	Valle Occidental	Andisol
11	Poás 2, Alajuela	Valle Central	Andisol
12	Santa Anita, Alajuela	Valle Occidental	Andisol
13	Coopevictoria	Valle Occidental	Andisol
14	Grecia 2	Valle Occidental	Andisol
15	Santo Domingo, Heredia	Valle Central	Andisol
16	El Carmen, Tres Ríos	Valle Central	Andisol
17	Tres ríos 4	Valle Central	Andisol
18	San Rafael, Heredia	Valle Central	Andisol
19	Tres Ríos 2	Valle Central	Andisol
20	Concepción, Heredia	Valle Central	Andisol
21	Tres Ríos 3	Valle Central	Andisol
22	Tres Ríos 1	Valle Central	Andisol
23	Goñi, Dota	Tarrazú	Ultisol
24	Santa María, Dota	Tarrazú	Ultisol
25	San Pablo, León Cortez	Tarrazú	Ultisol
26	Santa Elena, Frailes	Tarrazú	Ultisol
27	Javillos, Pavones	Coto Brus	Inceptisol
28	CATIE, Turrialba	Turrialba	Inceptisol
29	Azul, Turrialba	Turrialba	Inceptisol
30	San Ramón, San Isidro	Valle Occidental	Inceptisol
31	Berlín, San Ramón	Valle Occidental	Inceptisol
32	Rincón de Zaragoza	Valle Occidental	Ultisol
33	Huacas	Valle Occidental	Alfisol
34	Las Cruces, San Pablo	Valle Central	Andisol
35	Monte Romo	Guanacaste	Alfisol
36	Santa Elena 2	Tarrazú	Andisol
37	San Lorenzo, Heredia	Valle Central	Ultisol
38	San Antonio, Escazú	Valle Central	Ultisol
39	Frailes	Tarrazú	Ultisol

40	Cabecera	Guanacaste	Andisol
41	Sabanilla Centro, Alajuela	Valle Central	Andisol
42	San Isidro, Sabanilla	Valle Central	Andisol
43	San José de la Montaña	Valle Central	Andisol
44	Santa Lucía, Barba	Valle Central	Andisol
45	Birrí, Heredia	Valle Central	Andisol
46	Getsemaní, Heredia	Valle Central	Andisol
47	Tres X, Turrialba	Turrialba	Ultisol
48	San Isidro, Heredia	Valle Central	Andisol
49	La Zaca, Heredia	Valle Central	Andisol
50	San Gabriel Aserrí	Valle Central	Ultisol
51	La Ceiba alta, Acosta	Valle Central	Ultisol
52	San Marcos de Tarrazú	Tarrazú	Ultisol
53	Corralillos de Cartago	Tarrazú	Ultisol
54	San Cristóbal Sur	Tarrazú	Ultisol
55	Río Nuevo, Pérez Zeledón	Brunca	Ultisol
56	Pueblo Nuevo, Pérez Zeledón	Brunca	Inceptisol
57	San Isidro, Pérez Zeledón	Brunca	Ultisol
58	Pejibaye, Pérez Zeledón	Brunca	Ultisol
59	Páramo, Pérez Zeledón	Brunca	Inceptisol
60	Los Ángeles, Pérez Zeledón	Brunca	Ultisol
61	Palmares, Pérez Zeledón	Brunca	Ultisol
62	Platanares, Pérez Zeledón	Brunca	Ultisol
63	Cajón, Pérez Zeledón	Brunca	Ultisol
64	General Viejo	Pérez Zeledón	Ultisol

**Fuente:** (Instituto del Café de Costa Rica, 2017)

### 4.3 Selección de los puntos de muestreo

Los puntos de muestreo se seleccionaron al azar, en fincas que fueran representativas de todas las regiones cafetaleras de nuestro país. Para la elección de los puntos de muestreo se consideraron los sitios y las regiones indicadas en la Tabla 1.

### 4.4 Muestreo

Se seleccionaron 64 sitios de muestreo, en cada sitio de muestreo se recolectaron 15 submuestras para formar una muestra compuesta; la profundidad de muestreo fue de 0 a 20 cm y se colectaron 45 kg de suelo por muestra compuesta. Las muestras fueron transportadas al Instituto del Café de Costa Rica (ICAFFE) para su secado, tamizado y homogenizado previo al análisis de laboratorio.



## 4.5 Preparación de las muestras de suelo

El secado de los suelos se realizó al aire y a la sombra en el Invernadero del Centro de Investigación del Café de Costa Rica (CICAFE), hasta lograr un secado homogéneo. Una vez secos los suelos, se procedió a su tamizado, utilizando un tamiz No. 10, con una abertura de diámetro de 2 mm, pasando todo el suelo, hasta obtener aproximadamente 25 Kg de suelo tamizado.

La muestra ya tamizada se homogenizó. Luego, se procedió a etiquetarla, empacarla y guardarla en un lugar seco (Figura 2), para su posterior análisis de laboratorio.



**Figura 2.**

*Identificación de las muestras de suelo antes de ser llevadas a sus respectivos análisis*

Fuente: (Delgado,2021).

## 4.6 Determinaciones físicas y químicas de las muestras de suelo

### 4.6.1 Análisis de laboratorio

Para la determinación de las características físicas y químicas de las muestras de suelo se utilizó una fracción de la muestra compuesta de los suelos previamente homogeneizados, de acuerdo con las metodologías que se presentan en la Tabla 2.

**Tabla 2.**

*Características físicas y químicas por determinar y metodologías a utilizar en el análisis de las muestras de suelos a evaluar*

<b>Características físicas y químicas</b>	<b>Metodología que utilizar</b>
Materia Orgánica	Combustión Húmeda de Walkley y Black
pH	Potenciómetro
Acidez extraíble, determinación de la textura	Extracción (KCl 1M) y titulación (NaOH) Hidrómetro de Bouyoucos
Densidad aparente	Cilindro de volumen conocido
Determinación de Ca y Mg	Mehlich 3 y KCl 1M
Determinación de K	Mehlich 3 y Olsen modificado
Determinación de fósforo disponible	Mehlich 3 y Olsen modificado

Fuente: Instituto del Café de Costa Rica (2012).

Las metodologías utilizadas están descritas en el Manual de laboratorio para la determinación de los análisis físicos y químicos en las muestras de suelo en café del Instituto del Café de Costa Rica (2012).

En los Anexos se presentan las Metodologías de laboratorio utilizadas en los análisis de las muestras de suelo para su caracterización física y química.

#### **4.7 Diseño experimental**

El diseño experimental utilizado en esta investigación fue completamente al azar, se realizó un análisis de correlación y obtención de coeficientes para el análisis de los datos. Además, se realizaron ecuaciones de regresión lineal para obtener la equivalencia entre soluciones extractoras para los nutrientes analizados.

#### **4.8 Fase de invernadero (ensayo biológico)**

Para correlacionar los contenidos de nutrientes obtenidos con las soluciones extractoras utilizadas en el laboratorio se realizó un ensayo biológico en invernadero, en donde se realizaron las siguientes labores:

- 1) Se recolectó 80 kg de suelo de cada uno de los 64 sitios de muestreo descritos en la Tabla 1.
- 2) Se procedió a realizar el semillero de café en una caja plástica, con las dimensiones de 70,5 cm de largo x 40 cm de ancho, con el sustrato conocido como turba (Peat Moss), medio para el desarrollo y crecimiento de la semilla. La variedad utilizada fue obata, en donde se colocaron 500 gr de semilla al azar en la caja plástica para su desarrollo, a este medio de cultivo se le añadió riego manual una vez a la semana para mantener la humedad necesaria para la germinación de la semilla, que ocurrió en enero y febrero, para luego ser trasplantada.
- 3) Los suelos de los diferentes sitios de muestreo colectados y caracterizados física y químicamente se colocaron en macetas plásticas de 40 cm de ancho por 16 cm de altura, con una capacidad para contener 3 L de suelo; se sembró en cada maceta una planta, y se mantuvo la humedad aprovechable del suelo aproximadamente a 80% durante el ensayo, realizando riegos manuales 2 veces a la semana para evitar el marchitamiento de las plantas.
- 4) Los 64 suelos analizados y provenientes de los diferentes sitios de muestreo estaban conformados por 5 repeticiones, constituidas macetas de 3 L, cada maceta representaba una unidad experimental, para un total de 320 unidades experimentales.
- 5) A cada maceta, se le realizó una aplicación diferenciada con los diferentes elementos por evaluar (P, K, Ca y Mg), esta se efectuó de la siguiente manera: a la primera maceta, denominada completa, se le aplicó los cuatro nutrimentos P, K, Ca y Mg; a la segunda se le omitió el P, a la tercera se le omitió el K, a la cuarta se le omitió el Ca y, por último, a la quinta se le omitió el Mg. Se realizó este procedimiento, para correlacionar directamente la falta de un nutriente en el suelo, con el desarrollo foliar de la planta.
- 6) Tres meses después de la siembra se procedió a realizar la corta de las plantas, colocándolas en bolsas de papel para su secado, pesado y molienda para, posteriormente, ser analizadas en el laboratorio químico.
- 7) Después del periodo de cosecha de las plantas de café, se retiró de cada maceta una muestra de suelo de x kg, la cual se secó al aire, se pasó por un tamiz de 2 mm y se analizó el contenido de

fósforo, potasio, calcio y magnesio, con las soluciones extractoras KCl-Olsen modificada y Mehlich 3.



**Figura 3.**

*A. crecimiento de la semilla variedad obata a dos meses de su siembra, B. desarrollo y formación de las plantas, C. corta de las plantas para su posterior análisis foliar*

Fuente: (Delgado, 2021)

#### **4.9 Variables por evaluar**

##### **4.10 Rendimiento relativo de materia seca (RR)**

La producción de materia seca se obtuvo 90 días después de la siembra del café, cortando las plantas a 5 cm de la superficie del suelo de cada maceta o unidad experimental. La biomasa se secó en un horno a 65°C durante 72 horas hasta alcanzar peso constante y su masa seca se expresó en g/planta, posteriormente, se determinó el rendimiento relativo.

Para correlacionar el P, K, Ca y Mg extraídos de cada una de las muestras de suelo y el rendimiento relativo (% Y) de las plantas, se utilizará la fórmula propuesta por Diaz-Romeu y Hunter (1978), en donde:

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

Por medio del estudio y selección de datos de rendimiento relativo (% RR) obtenidos con los diferentes tratamientos, se pueden separar los suelos con una respuesta positiva a la aplicación del fertilizante de aquellos en los cuales no hubo una respuesta al fertilizante.

#### **4.11 Nivel crítico**

El nivel crítico en el suelo es la cantidad del elemento bajo en donde no se ven reflejados los máximos rendimientos, esto referido a una limitante agronómica. La determinación de los niveles críticos para los nutrimentos analizados en cada solución extractora se establecerá por medio del modelo de regresión y el nivel crítico actual reportado para la solución Olsen Modificada. En la cual, se despeja la formula del coeficiente de correlación y de esta forma obtener el valor del nivel crítico para cada elemento en estudio.

#### **4.12 Análisis de la información**

Para definir los niveles críticos de P, K, Ca y Mg para cada solución extractora, se utilizó el modelo de regresión y el nivel crítico actual reportado para la disolución Olsen Modificada.

## 5. Discusión de Resultados

### 5.1 Distribución porcentual de los contenidos de los nutrimentos K, Ca, Mg y P, en suelos muestreados en diferentes regiones cafetaleras del país

En la Tabla 3 se presenta la distribución en porcentaje de las concentraciones de los nutrimentos en las categorías alta y baja de los suelos muestreados en las diferentes regiones cafetaleras.

**Tabla 3.**

*Distribución porcentual de los contenidos de los nutrimentos K, Ca, Mg y P en suelos muestreados en diferentes regiones cafetaleras del país.*

Niveles reportados (óptimo, bajo)	Solución extractora	Total, de la muestra (320)	Porcentaje (%)
(Alto $\geq 0,6$ cmol (+) $l^{-1}$ ), Medio (0,2 a 0,6 cmol (+) $l^{-1}$ )	Valores reportados por Méndez y Bertsch (2012)		
Alto $\geq 0,20$ cmol (+) $l^{-1}$	K Olsen modificada	<b>4</b>	<b>1,25</b>
Bajo $\leq 0,20$ cmol (+) $l^{-1}$	K Olsen modificada	<b>316</b>	<b>98,75</b>
Alto $\geq 0,20$ cmol (+) $l^{-1}$	K Mehlich 3	<b>11</b>	<b>3,43</b>
Bajo $\leq 0,20$ cmol (+) $l^{-1}$	K Mehlich 3	<b>309</b>	<b>96,56</b>
(Alto $\geq 20$ cmol (+) $l^{-1}$ ) (Medio (4 a 20 cmol (+) $l^{-1}$ ))	Valores reportados por Méndez y Bertsch (2012)		
Alto $\geq 3$ cmol (+) $l^{-1}$	Ca KCl	<b>35</b>	<b>10,93</b>
Bajo $\leq 3$ cmol (+) $l^{-1}$	Ca KCl	<b>285</b>	<b>89,06</b>
Alto $\geq 3$ cmol (+) $l^{-1}$	Ca Mehlich 3	<b>32</b>	<b>10</b>
Bajo $\leq 3$ cmol (+) $l^{-1}$	Ca Mehlich 3	<b>288</b>	<b>90</b>
(Alto $\geq 5$ cmol (+) $l^{-1}$ ) (Medio 1 a 5 cmol (+) $l^{-1}$ )	Valores reportados por Méndez y Bertsch (2012)		
Alto $\geq 0,80$ cmol (+) $l^{-1}$	Mg KCl	<b>36</b>	<b>11,25</b>
Bajo $\leq 0,80$ cmol (+) $l^{-1}$	Mg KCl	<b>284</b>	<b>88,75</b>
Alto $\geq 0,80$ cmol (+) $l^{-1}$	Mg Mehlich 3	<b>39</b>	<b>12,18</b>
Bajo $\leq 0,80$ cmol (+) $l^{-1}$	Mg Mehlich 3	<b>281</b>	<b>87,81</b>
Alto $\geq 10$ mg $l^{-1}$	P Olsen modificada	<b>314</b>	<b>98,12</b>
Bajo $\leq 10$ mg $l^{-1}$	P Olsen modificada	<b>6</b>	<b>1,87</b>
Alto $\geq 10$ mg $l^{-1}$	P Mehlich 3	<b>276</b>	<b>86,25</b>
Bajo $\leq 10$ mg $l^{-1}$	P Mehlich 3	<b>44</b>	<b>13,75</b>

**Fuente:** Elaboración propia

Para el K al utilizar la solución extractora Olsen, del total de muestras analizadas (320), 4 muestras (1,25%) presentan valores reportados como altos, con un contenido mayor de  $0,20 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ , (Alto  $\geq 0,20 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ ), mientras que 316 muestras, que representan un 98,75 %, muestran valores considerados bajos (Bajo  $\leq 0,20 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ ). El K, extraído con la solución extractora Mehlich 3, presenta un comportamiento similar al de la solución Olsen modificada, ya que únicamente 11 muestras (3,43%) presentan valores altos (Alto  $\geq 0,20 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ ) y 309 muestras (96,56%), valores bajos (Bajo  $\leq 0,20 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ ).

Con el Calcio, para la solución extractora KCl, un 10,93 % de las muestras presentó valores altos (Alto  $\geq 3 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ ) y un 89,06 % de las muestras (285), contenidos reportados bajos (Bajo  $\leq 3 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ ). Con la solución extractora Mehlich 3 se tuvo un comportamiento muy similar: 32 muestras del total, un 10%, mostraron concentraciones altas (Alto  $\geq 3 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ ); 288 muestras, que representan un 90%, valores bajos (Bajo  $\leq 3 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ ).

Para el Mg, con la solución extractora KCl, de las 320 muestras totales analizadas, 36 muestras (11,25%) presentaron valores altos (Alto  $\geq 0,80 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ ), y 284 muestras (88,75%) mostraron valores bajos (Bajo  $\leq 0,80 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ ). Con Mehlich 3, los valores fueron muy similares a los obtenidos con la solución KCl, 39 muestras (12,18%) con valores altos (Alto  $\geq 0,80 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ ), y 281 muestras (87,81%) presentaron valores bajos (Bajo  $\leq 0,80 \text{ cmol (+) l}^{-1}$ ).

Con el P, se obtuvo un comportamiento diferente a lo observado en los valores de K, Ca y Mg con ambas soluciones extractoras, con Olsen modificada se tuvieron valores altos (Alto  $\geq 10 \text{ mg l}^{-1}$ ) en 314 muestras (98,12%), y valores bajos (Bajo  $\leq 10 \text{ mg l}^{-1}$ ) solo en 6 de las muestras (1,87%). En Mehlich 3, 276 muestras (86,25%) mostraron valores altos (Alto  $\geq 10 \text{ mg l}^{-1}$ ) y 44 muestras (13,75%), valores bajos (Bajo  $\leq 10 \text{ mg l}^{-1}$ ).

## 5.2 Contenido de nutrimentos en suelos de diferentes regiones cafetaleras extraído por las soluciones extractoras Olsen KCl y Mehlich 3.

En la Tabla 4 se muestran los ámbitos y el promedio de las concentraciones de los nutrimentos K, Ca, Mg y P, extraídos con las soluciones extractoras Olsen modificada-KCl y Mehlich 3.

**Tabla 4.**

*Contenido de nutrimentos en suelos de diferentes regiones cafetaleras extraído con las soluciones extractora Olsen KCl y Mehlich 3.*

<b>Elemento</b>	<b>Solución extractora</b>	<b>Ámbito cmol (+)1<sup>-1</sup></b>	<b>Promedio cmol (+)1<sup>-1</sup>Mg 1<sup>-1</sup></b>	<b>Referencia</b>
P	Olsen modificada	<b>7,39- 172</b>	<b>58,21</b>	Estudio actual
P	Mehlich 3	<b>2,11- 223,42</b>	<b>35,31</b>	Estudio actual
K	Olsen modificada	<b>0,01- 0,90</b>	<b>0,08</b>	Estudio actual
K	Olsen modificada	<b>0,01- 0,60</b>	<b>0,27</b>	Molina y Cabalceta (1990)
K	Mehlich 3	<b>0,02- 1,39</b>	<b>0,11</b>	Estudio actual
K	Mehlich 3	<b>0,03- 0,66</b>	<b>0,15</b>	Molina y Cabalceta (1990)
Ca	KCl	<b>0,04- 14,02</b>	<b>1,32</b>	Estudio actual
Ca	KCl	<b>0,71- 7,25</b>	<b>2,68</b>	Molina y Cabalceta (1990)
Ca	Mehlich 3	<b>0,16- 14,66</b>	<b>1,32</b>	Estudio actual
Ca	Mehlich 3	<b>0,61- 6,21</b>	<b>2,63</b>	Molina y Cabalceta (1990)
Mg	KCl	<b>0,03- 3,71</b>	<b>0,40</b>	Estudio actual
Mg	KCl	<b>0,05- 3,08</b>	<b>0,95</b>	Molina y Cabalceta (1990)
Mg	Mehlich 3	<b>0,05- 3,59</b>	<b>0,43</b>	Estudio actual
Mg	Mehlich 3	<b>0,06- 2,04</b>	<b>1,21</b>	Molina y Cabalceta (1990)

**Fuente:** Elaboración propia

Se observa menor extracción promedio de P con la solución Mehlich 3, en comparación con la solución extractora Olsen modificada, estos resultados coinciden con lo reportado por Bertsch (1986), asimismo, Cabalceta y Cordero (1994a) mencionan que en suelos Ultisoles, Andisoles y Inceptisoles, la solución Olsen modificada extrae mayores contenidos de P que la solución extractora Mehlich 3.

Los rangos de extracción y el valor promedio para K son diferentes con ambas soluciones extractoras. La solución Mehlich 3 presenta mayor extracción que la solución Olsen modificada.



Los rangos de extracción obtenidos con ambas soluciones extractoras son mayores a los mencionados por Molina y Cabalceta (1990).

Bertsch et al. (2005), mencionan que, sin importar el tipo de suelo, hay mayor extracción de K con la solución Mehlich 3 que con la solución Olsen modificada.

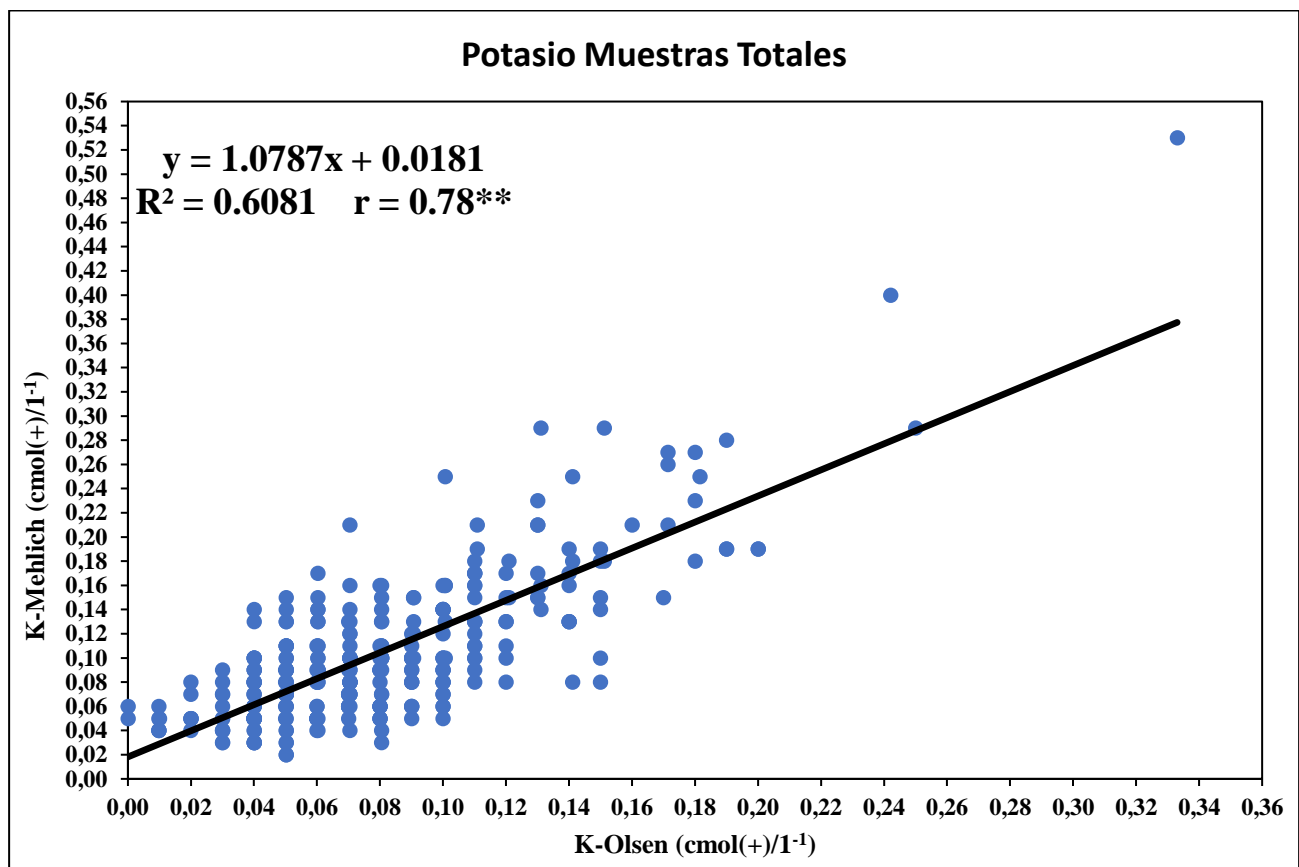
Se observa que los rangos de extracción y el valor promedio para Ca son similares con las soluciones extractoras Olsen modificada y Mehlich 3. La extracción promedio de Ca ( $1,23 \text{ cmol (+)} 1^{-1}$ ) para ambas soluciones extractoras es menor a las reportada por Molina y Cabalceta (1990).

El contenido de Mg evaluado para las diferentes muestras analizadas presenta rangos de extracción y valores promedio similares con las soluciones KCl y Mehlich 3. Los valores promedio encontrados,  $0,40 \text{ cmol (+)} 1^{-1}$  y  $0,43 \text{ cmol (+)} 1^{-1}$ , respectivamente para KCl y Mehlich 3, son menores a los mencionados por Molina y Cabalceta (1990).

### **5.3 Correlación entre las soluciones extractoras Mehlich 3 y Olsen- KCl**

En la Figura 4 se muestra el gráfico de correlación entre los valores obtenidos de potasio en los diferentes sitios de muestreo, utilizando la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada; la ecuación de regresión lineal y el coeficiente de correlación con su debida significancia (\*\* altamente significativo).

Las cantidades de K extraído por Mehlich 3 fueron superiores a las extraídas por Olsen modificada, con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,608, y un nivel de significancia alto, con un  $r = 0,78$ , la ecuación de regresión es  $y = 1,0787x + 0,0181$ . Molina y Cabalceta (1990) obtuvieron una regresión con pendiente inferior a la obtenida en esta investigación ( $y = 0,756x$ ). Asimismo, Molina y Cabalceta (1990), en comparación con la presente investigación, encontraron una ecuación de regresión con pendiente inferior ( $y=0,756x$ ) y Bertsch et al (2005) obtuvieron una pendiente superior ( $y = 1,52x$ ).

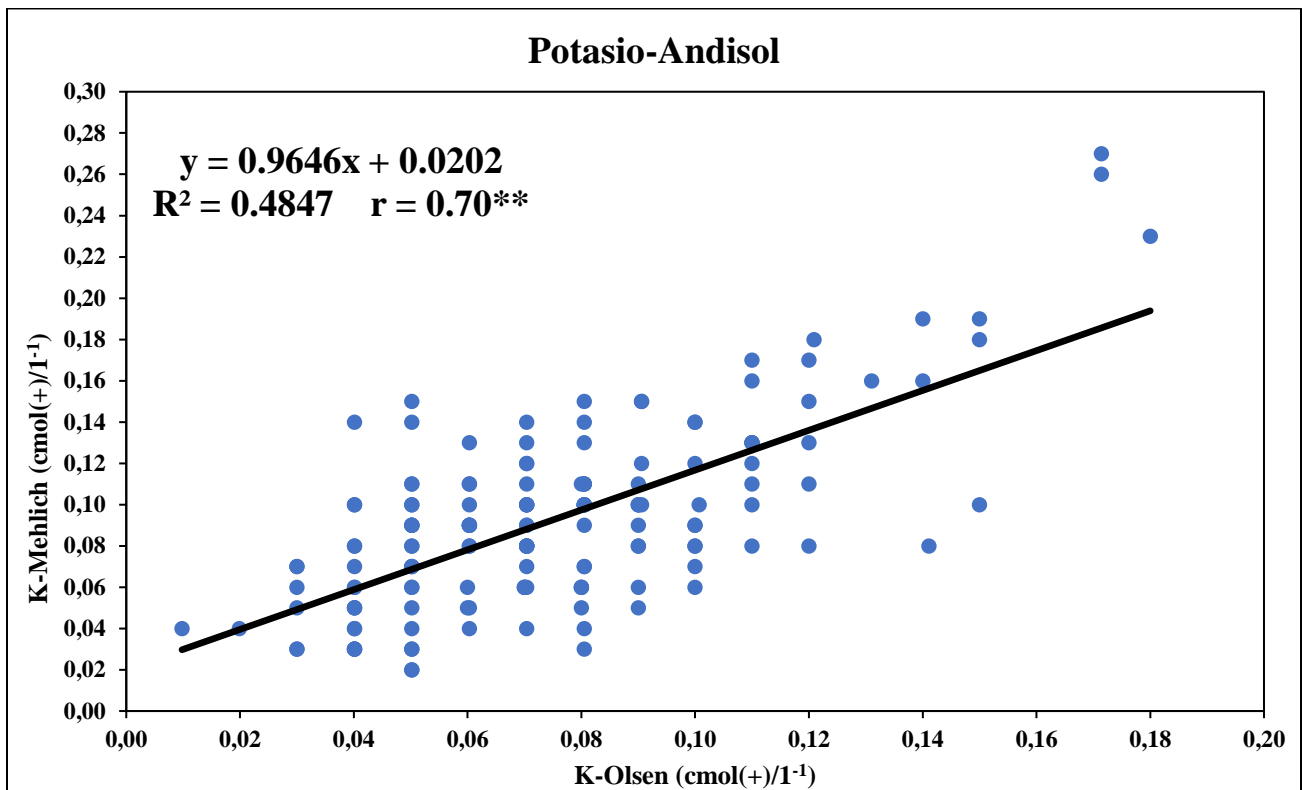


**Figura 4.**

*Diagrama de dispersión de K extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en los distintos suelos de Costa Rica.*

El coeficiente de correlación entre las cantidades extraídas de K por Mehlich 3 y Olsen modificada en suelos andisoles, como se observa en la Figura 5, tiene un valor  $R^2$  de 0,484 y un  $r = 0,70$ , el cual es altamente significativo.

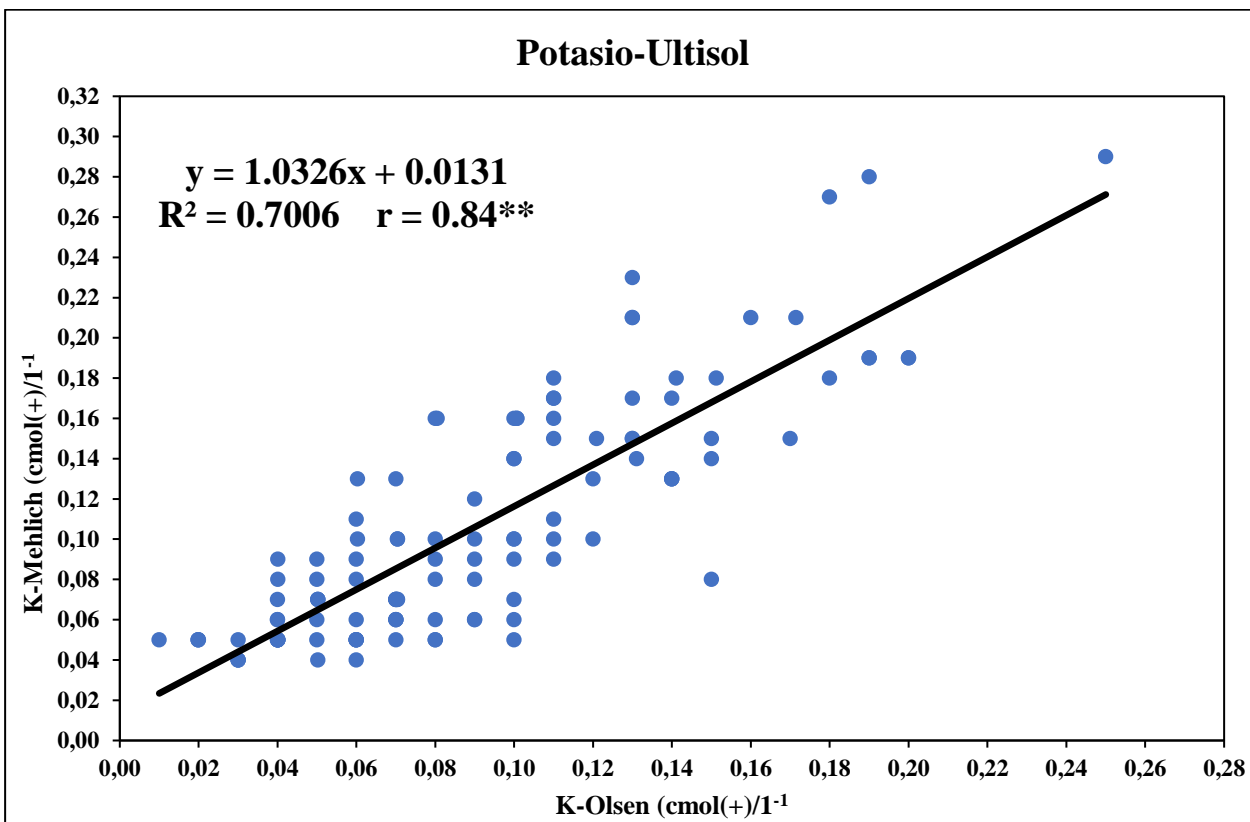
Los valores de extracción de K por parte de la solución extractora Mehlich 3 fueron mayores a los extraídos por la solución Olsen modificada ( $y = 0.964 x + 0.020$ ), aunque gráficamente pareciera existir cierto nivel de asociación, estadísticamente esas semejanzas no son importantes.



**Figura 5.**

*Diagrama de dispersión de K extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Andisoles de Costa Rica.*

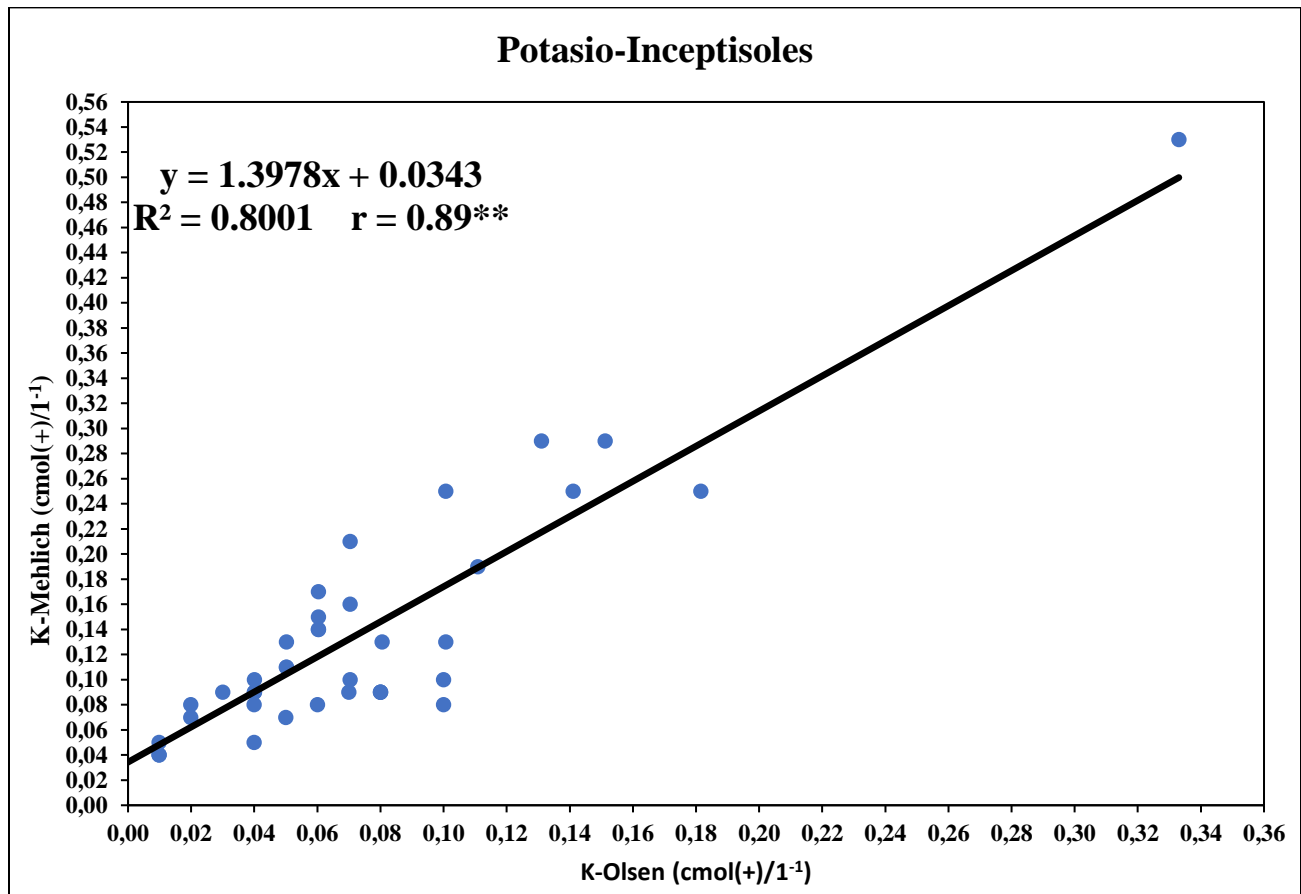
Las cantidades extraídas de Potasio con la solución Olsen modificada con respecto a la extracción con Mehlich 3 en suelos ultisoles (Figura 6) presentan un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,701 y un  $r = 0,84$ , el cual tiene una alta significancia. Se observa, por medio de la pendiente de la ecuación de regresión, que los valores de extracción de K por parte de la solución Mehlich 3 son superiores a los extraídos por la solución Olsen modificada ( $y = 1.032x + 0.013$ ).



**Figura 6.**

*Diagrama de dispersión de K extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Ultisoles de Costa Rica.*

Las cantidades de Potasio extraído por las soluciones Olsen modificada y Mehlich 3 para los suelos Inceptisoles (Figura 7), presentan una correlación  $R^2$  de 0,80 y un  $r = 0.89$  altamente significativo. La solución Mehlich 3 extrajo mayor cantidad de Potasio que la solución Olsen modificada ( $y = 1.397x + 0.034$ ).



**Figura 7.**

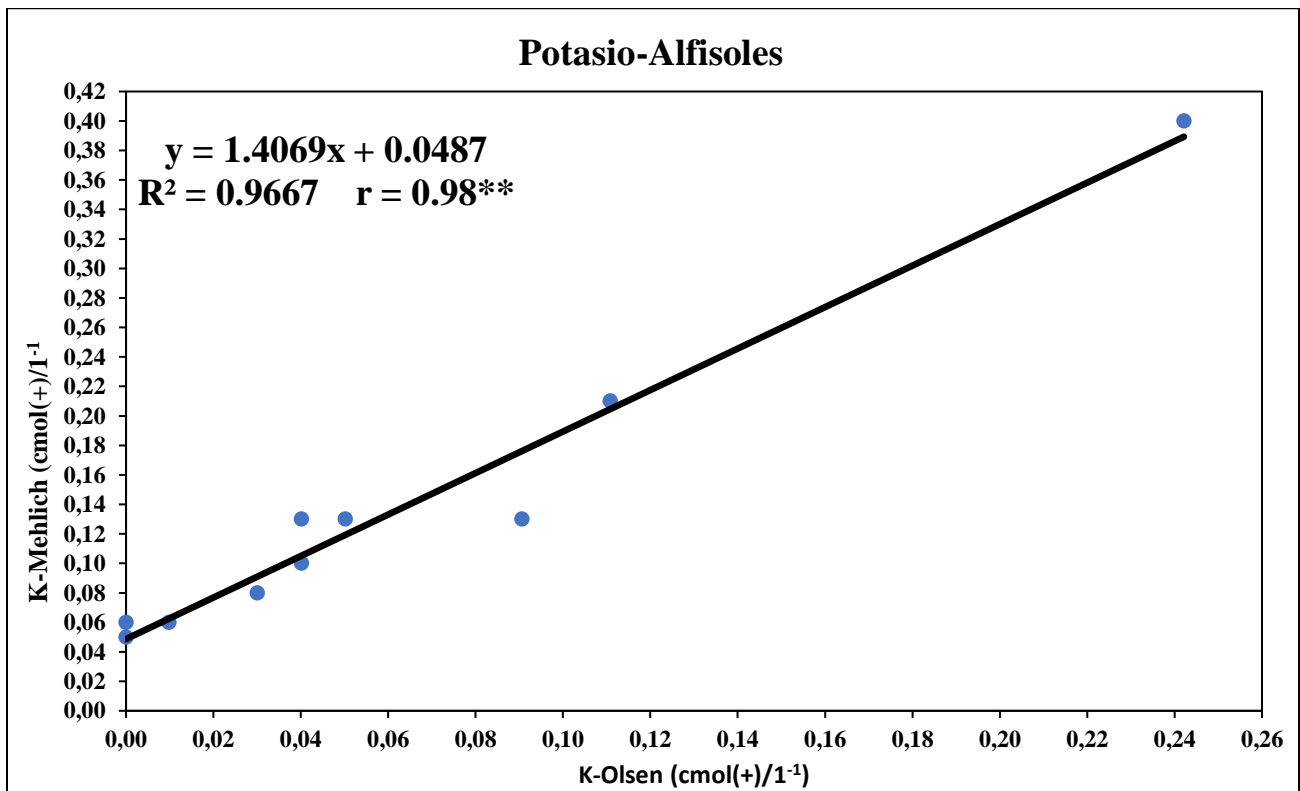
*Diagrama de dispersión de K extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Inceptisoles de Costa Rica.*

En la Figura 8 se observa, gráficamente, la correlación entre los valores obtenidos de potasio en suelos alfisoles con la solución extractora Mehlich 3 y la solución Olsen modificada, con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,966. En el análisis de varianza se encontró que la correlación entre ambas soluciones es altamente significativa, con un  $r = 0,98$ . Se presenta un alto grado de asociación entre variables, al incrementarse la cantidad de potasio extraído con Mehlich 3 aumenta la cantidad de potasio extraído con Olsen modificada.

Bertsch et al (2005), Gadea (1993) y Salazar (2015) reportaron valores de correlación  $R^2$  de 0,96, 0,98 y 0,99, respectivamente, similares al encontrado en esta investigación. Se observan

mayores valores de extracción de potasio por parte de la solución Mehlich 3, con respecto a los extraídos por la solución Olsen modificada ( $y = 1.406x + 0.048$ ).

Bertsch et al (2005) reportaron mayor cantidad de K extraído con Mehlich 3 que con Olsen modificada, independientemente del tipo de suelo. Salazar (2015), encontró mayores valores de K extraídos por Mehlich 3 en comparación con los obtenidos con Olsen modificada. Sin embargo, Molina y Cabalceta (1990) encontraron mayor extracción de K con la solución Olsen modificada que con Mehlich 3.

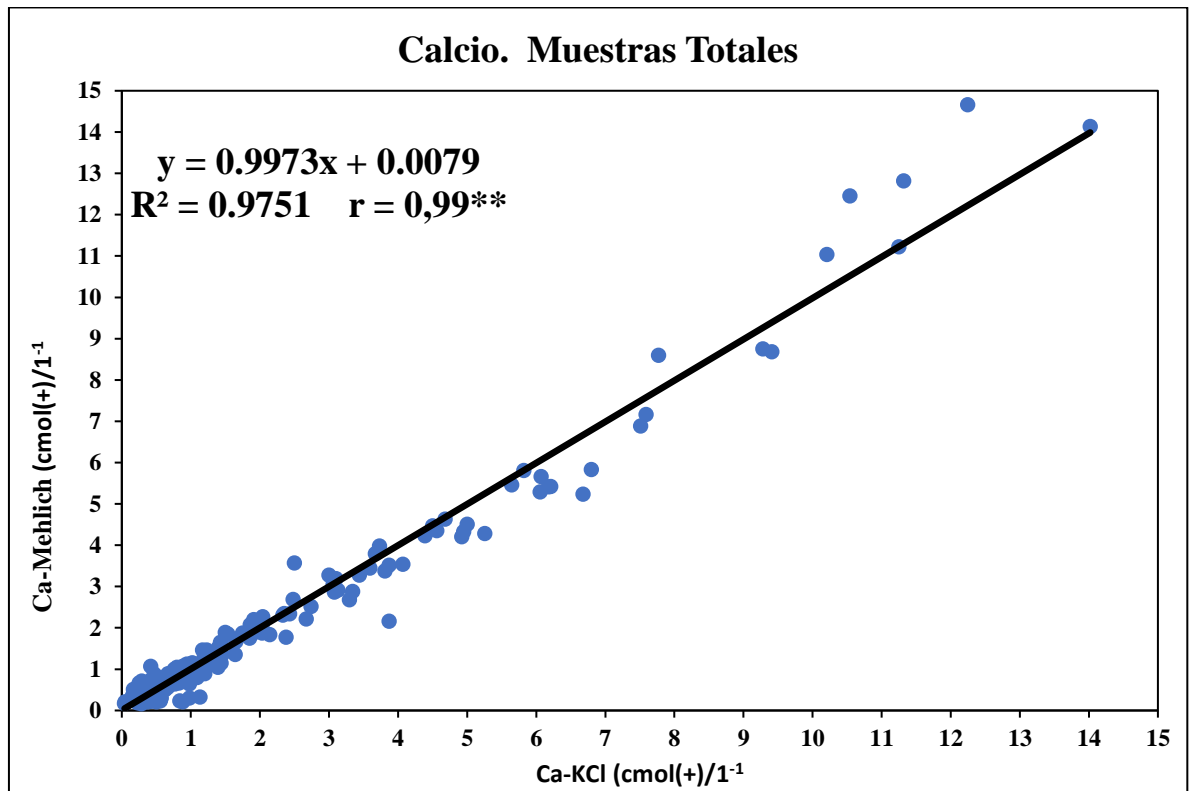


**Figura 8.**

*Diagrama de dispersión de K extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Alfisoles de Costa Rica*

En la Figura 9 se observa, gráficamente, la correlación entre los valores obtenidos de Calcio en los distintos suelos muestreados en esta investigación, con las soluciones extractoras Mehlich 3 y KCl, con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,975 y un  $r = 0.99$ , esta es altamente significativa.

Bertsch et al. (2005) encontraron un comportamiento similar de estas soluciones en la extracción de calcio ( $R^2 = 0,93$ ), con una pendiente de la recta  $y = 1,07x$ , en este estudio se obtuvo una pendiente  $y = 0,997x$



**Figura 9.**

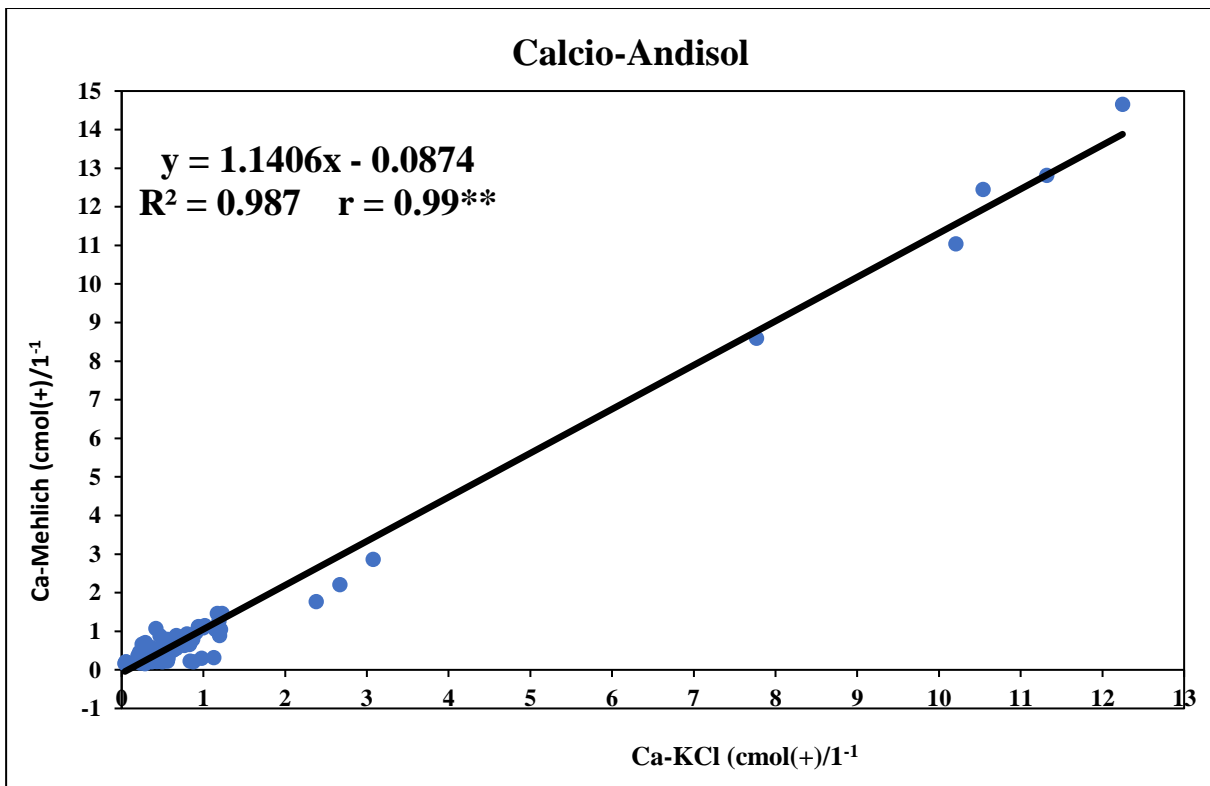
*Diagrama de dispersión de Ca extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en los distintos suelos de Costa Rica.*

Las cantidades de Calcio extraído en suelos Andisoles (Figura 10) con las soluciones Mehlich 3 y KCl presentan un coeficiente de correlación altamente significativa, con un  $R^2$  de 0,98 y un  $r = 0,99$ . Los valores de Ca extraídos con las soluciones Mehlich 3 fueron mayores que los extraídos con la solución KCl.

Molina y Cabalceta (1990) indican que los valores de extracción de Ca con las soluciones Mehlich 3 y KCl son similares, debido a que Mehlich extrae el nutrimento por la acción del

$\text{NH}_4\text{NO}_3$  y  $\text{HNO}_3$ , que actúan de forma muy similar al  $\text{KCl}$ , por lo que presentan semejanzas en los valores de Calcio con ambas soluciones.

Los datos obtenidos en un estudio realizado por Briceño (1970), indican que para el elemento  $\text{Ca}$  en suelos Andisoles, ambas soluciones extractoras extrajeron del suelo cantidades similares de este elemento, con una pendiente de la recta  $y = 1,20x$ , mientras que, en la presente investigación, la pendiente de la recta fue  $y = 1,141x$ .

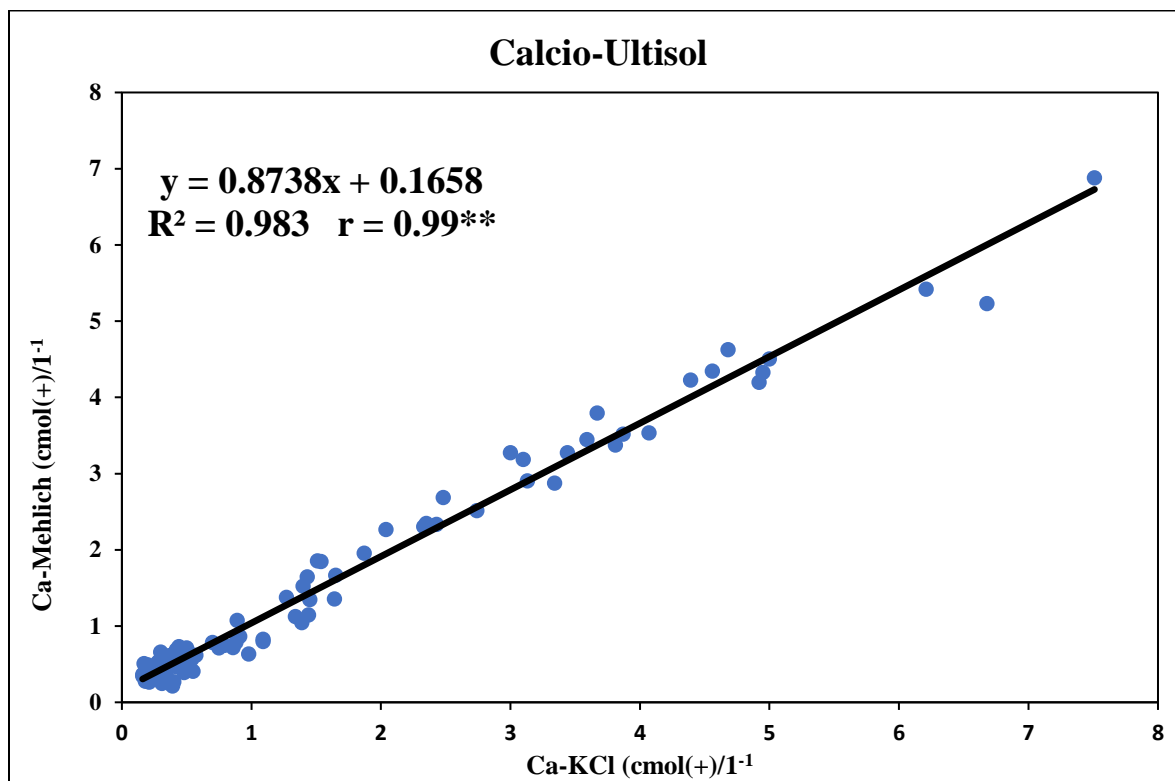


**Figura 10.**

*Diagrama de dispersión de Ca extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Andisoles de Costa Rica.*

En la Figura 11 se observan las cantidades de calcio extraído por las soluciones  $\text{KCl}$  y Mehlich 3 en suelos ultisoles, se presenta un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,983, altamente significativo, con un  $r = 0,99$ . Hubo mayor extracción de  $\text{Ca}$  con la solución extractora Mehlich 3, comparada con  $\text{KCl}$  ( $y = 0.8738x + 0.1658$ )

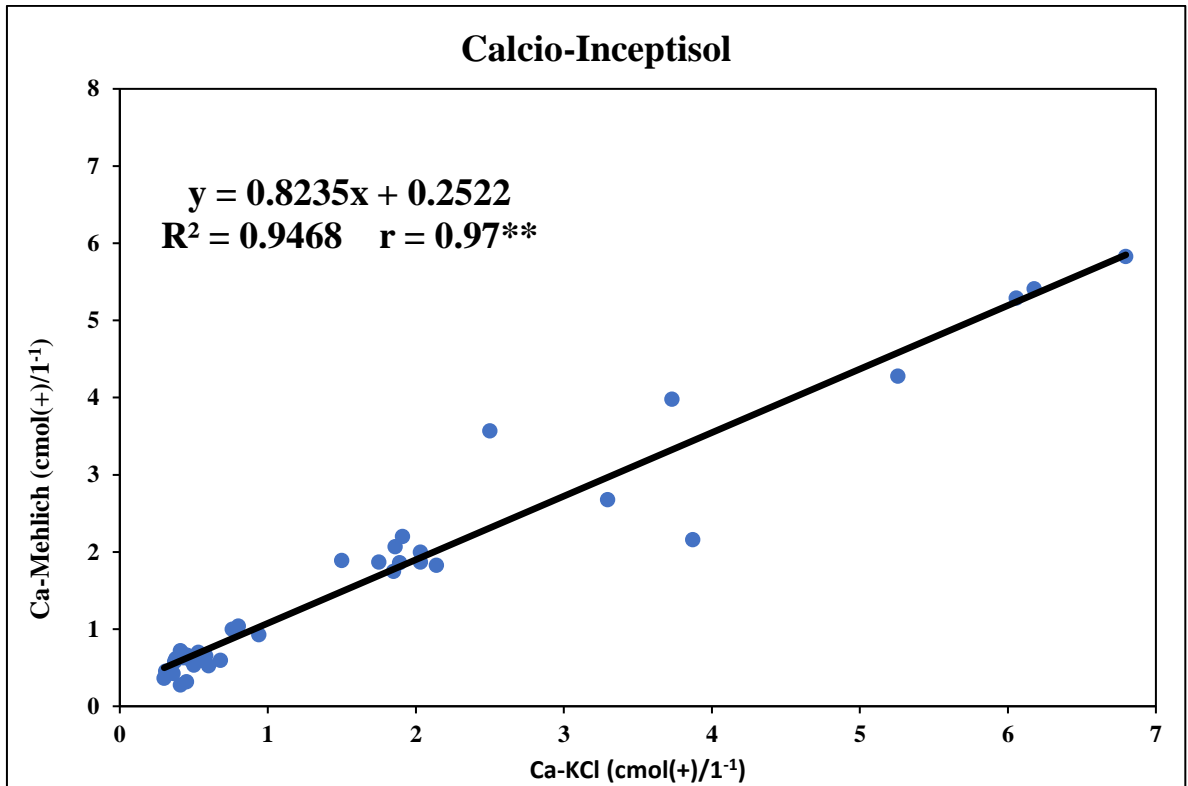




**Figura 11.**

*Diagrama de dispersión de Ca extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Ultisoles de Costa Rica.*

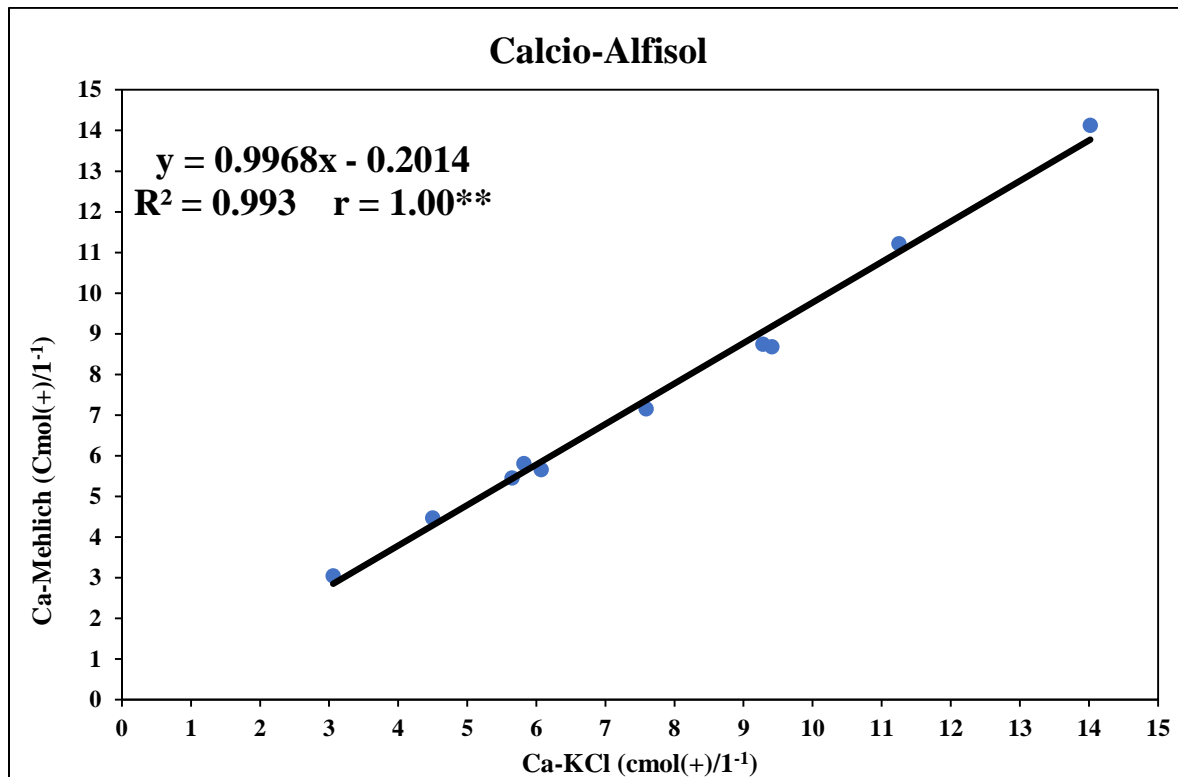
Los valores de calcio extraídos en suelos Inceptisoles con las soluciones KCl y Mehlich 3 presentan un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,946 y un  $r = 0,97$  el cual es altamente significativo (Figura 12). La cantidad de Calcio extraída fue mayor con Mehlich que con KCl ( $y = 0.8235x + 0.2522$ )



**Figura 12.**

*Diagrama de dispersión de Ca extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Inceptisoles de Costa Rica.*

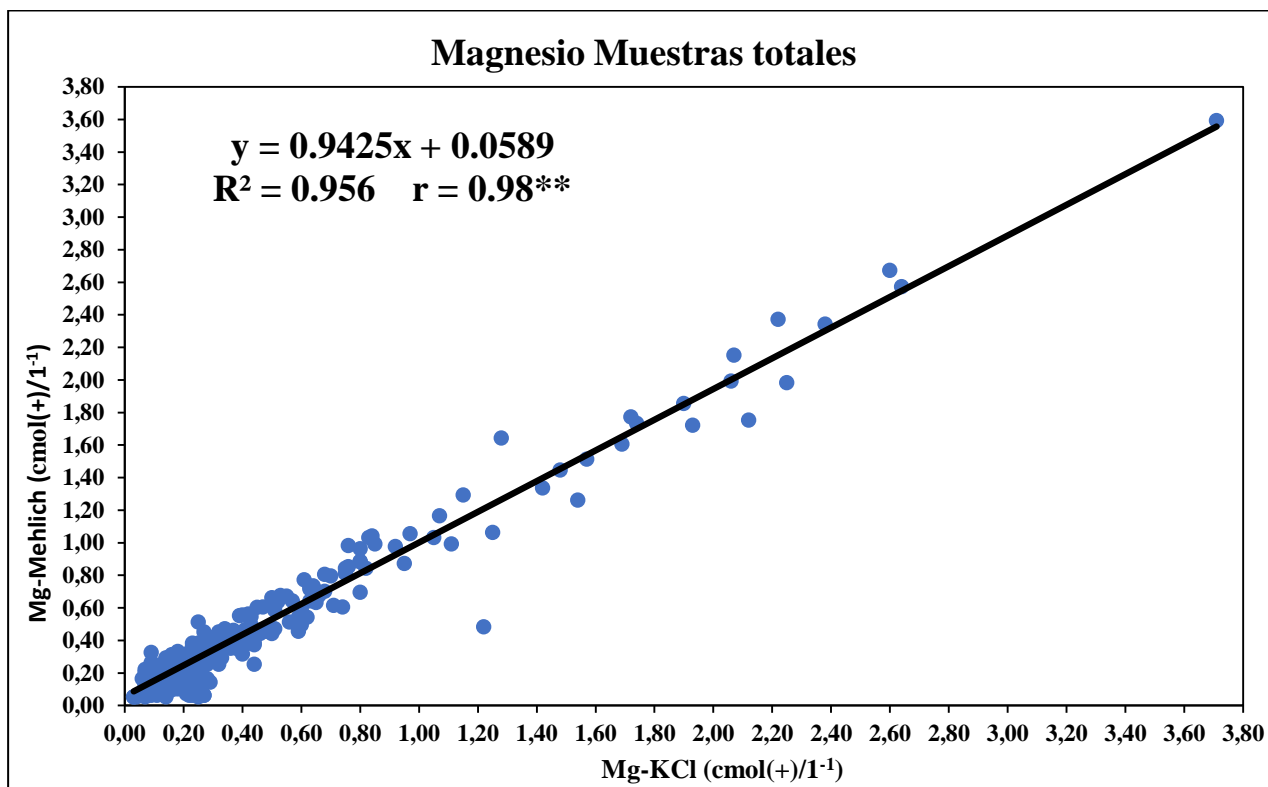
En la Figura 13 se observa que las cantidades de calcio extraído en suelos alfisoles con las soluciones KCl y Mehlich 3 muestran una correlación altamente significativa, con un valor de  $R^2$  de 0,993 y un  $r = 1,00$ . La ecuación de la recta presenta una pendiente cercana a uno. Resultados similares encontraron Bertsch et al. (2005) en la extracción de Ca con estas soluciones extractoras, con un valor  $R^2$  de 0,93 y una pendiente de la recta  $y = 1,07x$ , mientras que Gadea (1993) y Salazar (2015), para las mismas soluciones extractoras, reportaron un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,99, altamente significativo.



**Figura 13.**

*Diagrama de dispersión de Ca extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Alfisoles de Costa Rica.*

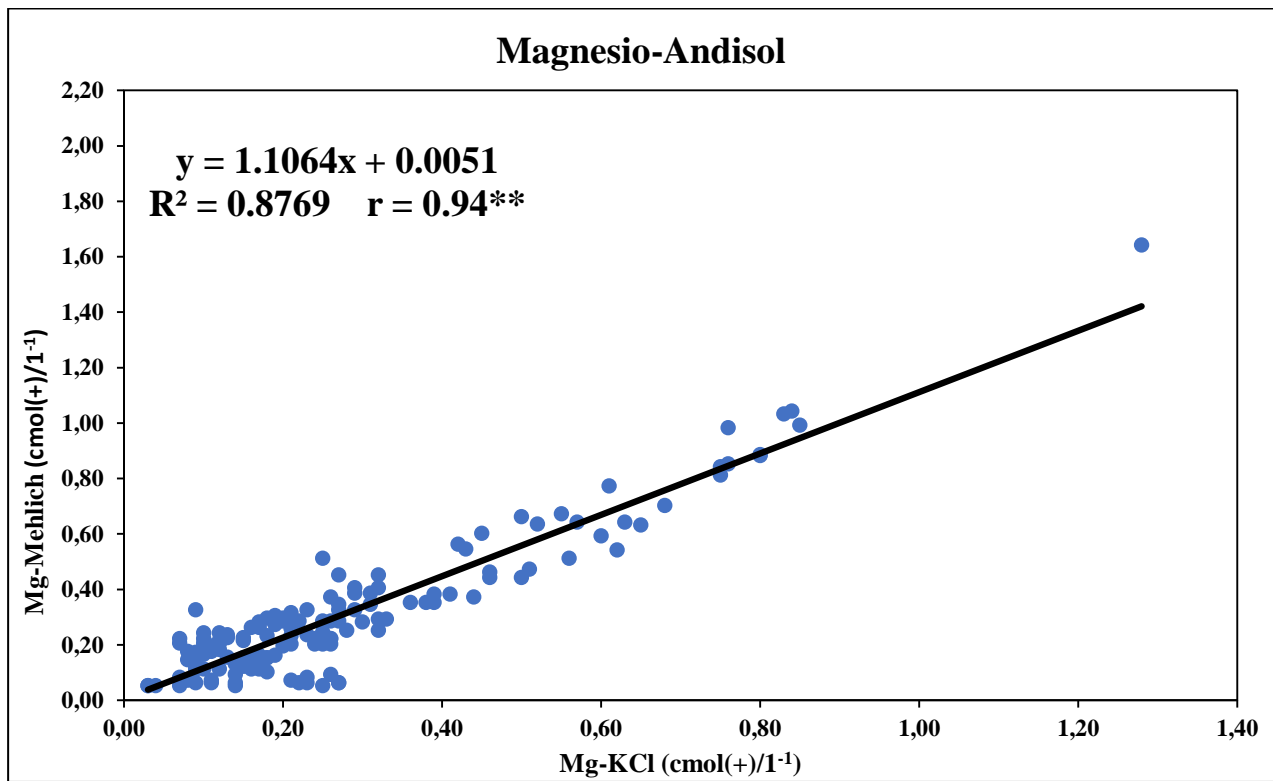
En la figura 14 se puede observar en el gráfico, la correlación entre los valores obtenidos de Magnesio en los distintos suelos muestreados en esta investigación, con la solución extractora Mehlich 3 y la solución Olsen modificada, con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,956 y un  $r = 0,98$ , esta es altamente significativa y existe un alto grado de asociación entre las variables. Gadea (1993) reporta altos valores de correlación, con  $R^2 = 0,97$ , similar al obtenido en la presente investigación.



**Figura 14.**

*Diagrama de dispersión de Mg extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en los distintos suelos de Costa Rica.*

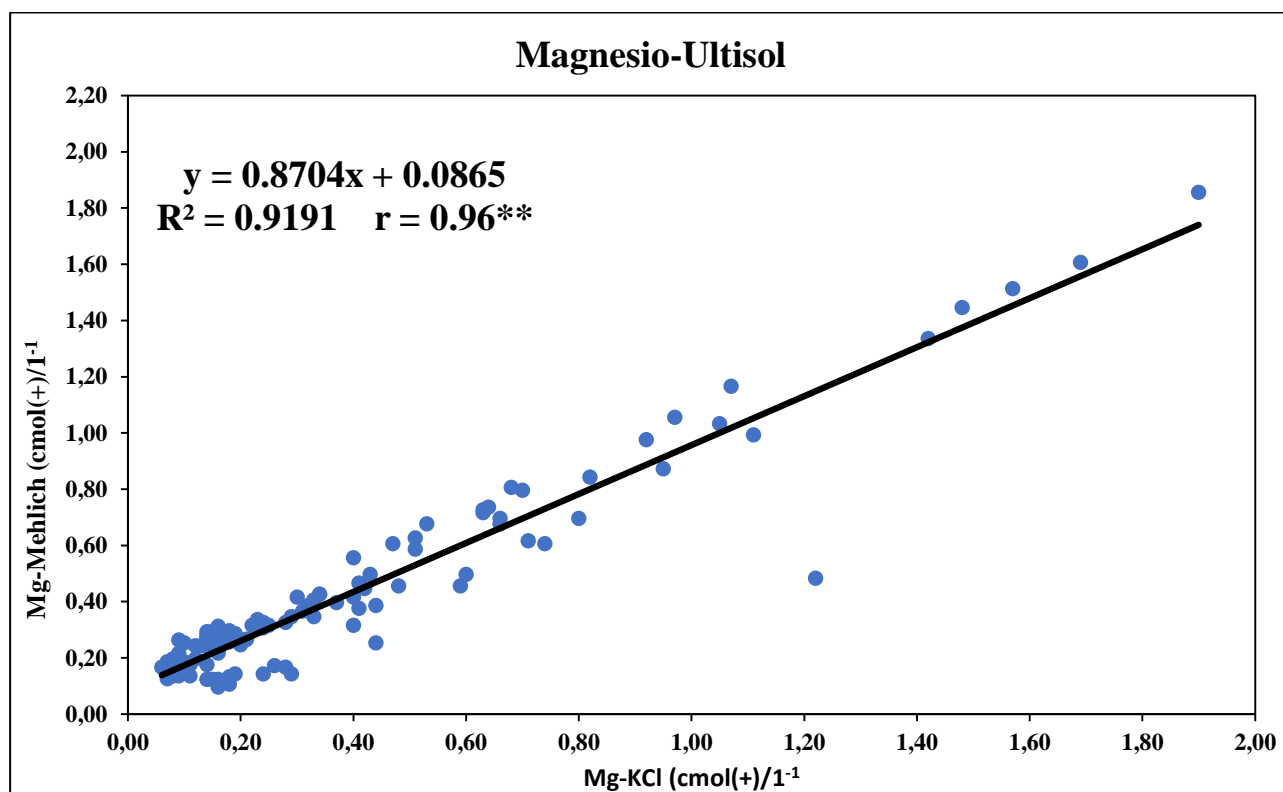
La Figura 15 muestra las cantidades extraídas de magnesio en Andisoles con la solución KCl con respecto a la extracción con Mehlich 3, presentando un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,876 y un  $r = 0,94$ , el cual es altamente significativo. Se observa, por medio de la ecuación de regresión, que los valores de extracción de Mg por parte de la solución Mehlich 3 son superiores a los extraídos por la solución KCl ( $y = 1.1064x + 0.0051$ ).



**Figura 15.**

*Diagrama de dispersión de Mg extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Andisoles de Costa Rica.*

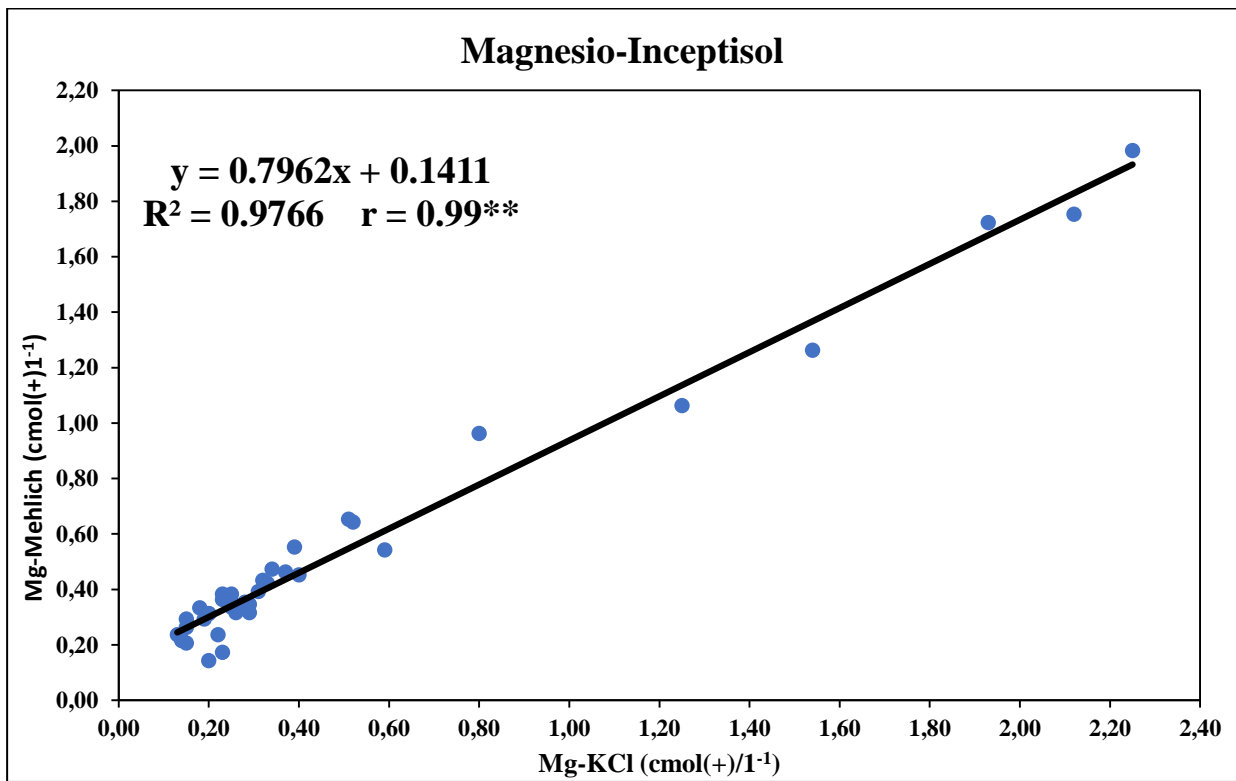
Las cantidades de magnesio extraído por las soluciones KCl y Mehlich 3 para los suelos ultisoles (Figura 16) presentan una correlación  $R^2$  de 0,919 y un  $r = 0,96$ , altamente significativa. Los valores de Mg extraídos por Mehlich 3 son menores a los obtenidos con KCl ( $y = 8704x + 0.0865$ ). Molina y Cabalceta (1990) mencionan un coeficiente de correlación de  $R^2$  de 0,94, al relacionar los valores extraídos con Mehlich 3 y KCl en suelos Ultisoles. Asimismo, Gadea (1993), para las mismas soluciones extractoras y suelos del orden ultisol, reporta una correlación de 0,98.



**Figura 16.**

*Diagrama de dispersión de Mg extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Ultisoles de Costa Rica.*

La correlación entre los valores obtenidos de magnesio con la solución extractora Mehlich 3 y la solución KCl en suelos Inceptisoles se observa, gráficamente en la Figura 17, con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,976 y un  $r = 0,99$ , este es altamente significativo. Las cantidades extraídas de Mg con la solución Mehlich 3 son menores con respecto a la extracción con KCl.



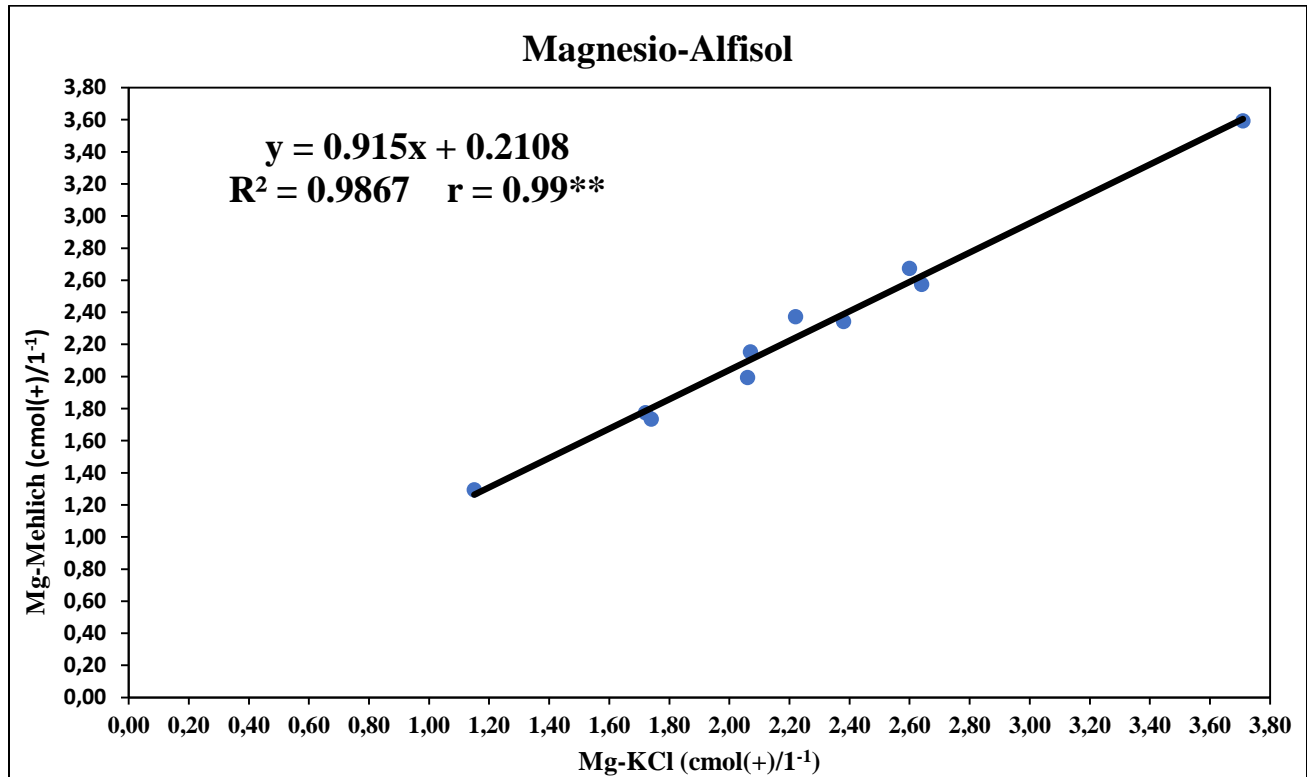
**Figura 17.**

*Diagrama de dispersión de Mg extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Inceptisoles de Costa Rica.*

En la Figura 18 se observan las cantidades de magnesio extraído en suelos alfisoles con las soluciones Mehlich 3 y KCl, presentan una correlación altamente significativa, con un valor de  $R^2$  0,986 y un  $r = 0,99$ . Los valores de extracción de Mg por parte de la solución Mehlich 3 son mayores a los extraídos por la solución Olsen KCl.

Resultados similares han sido reportados por Molina y Cabalceta (1990) en estudios con suelos ultisoles, al asociar el Mg extraído con las soluciones Mehlich 3 y KCl se encontró un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,944. Asimismo, Gadea (1993), para las mismas soluciones y suelos del orden ultisol, reporta una correlación de 0,98. Bertsch et al. (2005) mencionan que existe una correlación  $R = 0,99$  entre ambas soluciones, mientras que Salazar (2015), encontró un coeficiente de correlación de 0,98 en los valores de Mg extraídos con las soluciones KCl y Mehlich 3.

Esta semejanza entre las cantidades de Mg extraído por las soluciones KCl y Mehlich 3 está relacionada con la capacidad de los iones  $K^+$  de la solución extractora de KCl, y los iones  $NH_4^+$  del  $NH_4NO_3$  de la solución Mehlich 3, de sustituir al magnesio (Vargas et al., 1992).



**Figura 18.**

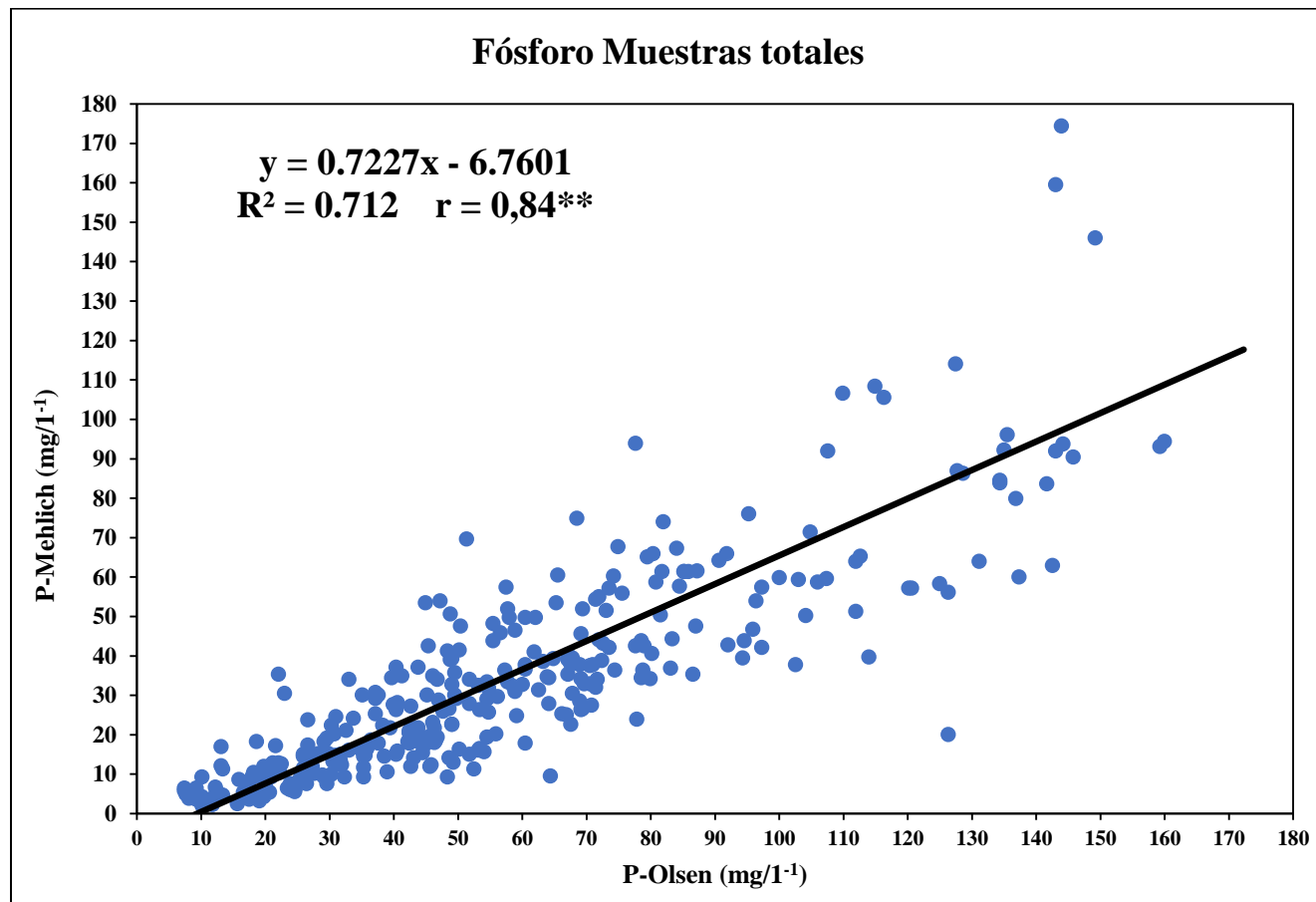
*Diagrama de dispersión de Mg extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Alfisoles de Costa Rica.*

En la Figura 19 se puede observar gráficamente la correlación entre los valores obtenidos de fósforo en los distintos suelos muestreados en esta investigación, con la solución extractora Mehlich 3 y la solución KCl, con un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,71 y un  $r = 0,84$ , esta es altamente significativa. Las cantidades de P extraído por la solución Mehlich fueron menores que las extraídas por Olsen modificada ( $y = 0,7227x - 6,7601$ ).

Cabalceta (1995), correlacionando el contenido de P en 100 suelos de Costa Rica, encontró que KCl y Mehlich 3 extrajeron cantidades de P muy similares, las cantidades extraídas presentaron una



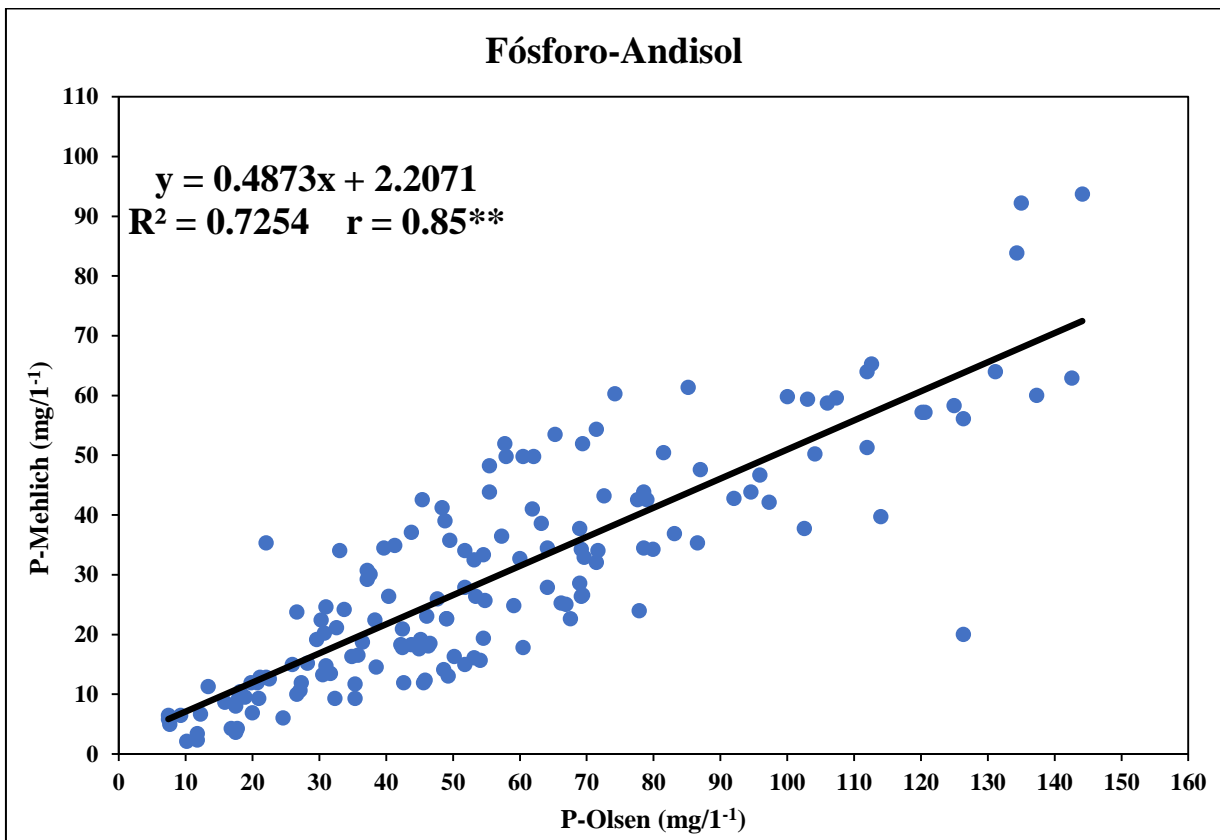
correlación  $R^2$  de 0,82, altamente significativa, la pendiente de la ecuación de regresión fue  $y = 0,64x$ . Mientras tanto, Chonay (2002) obtuvo una correlación  $R^2$  de 0,88 para estas dos soluciones extractoras.



**Figura 19.**

*Diagrama de dispersión de Fosforo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada en los diferentes sitios de muestreo, en los distintos suelos de Costa Rica.*

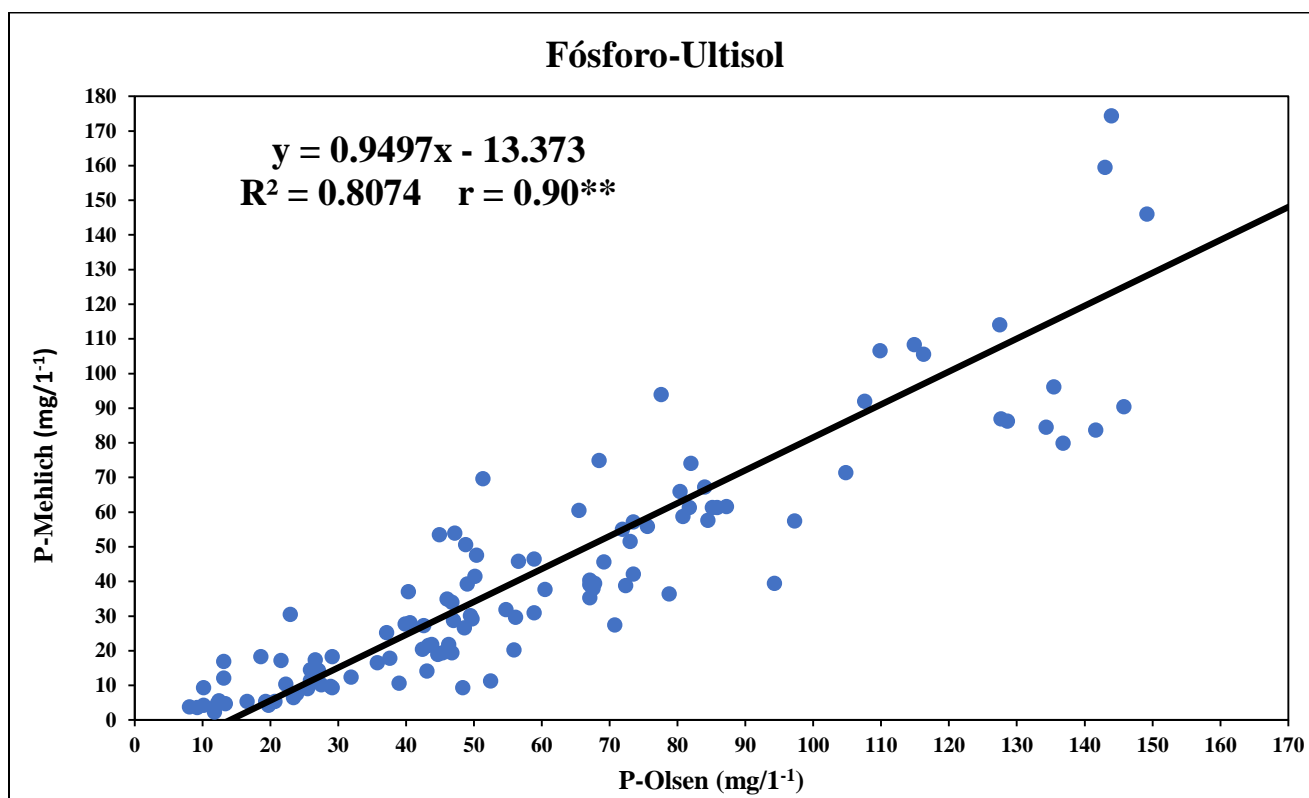
En la Figura 20 se observan las cantidades de fósforo extraído por las soluciones Olsen modificada y Mehlich 3 en suelos Andisoles, se presenta una correlación altamente significativa, con un valor  $R^2$  de 0,725 y un  $r = 0,85$ . La solución Mehlich 3 extrae menor cantidad de fósforo que la solución Olsen modificada ( $y = 0.487x + 2.207$ ).



**Figura 20.**

*Diagrama de dispersión de fósforo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Andisoles de Costa Rica*

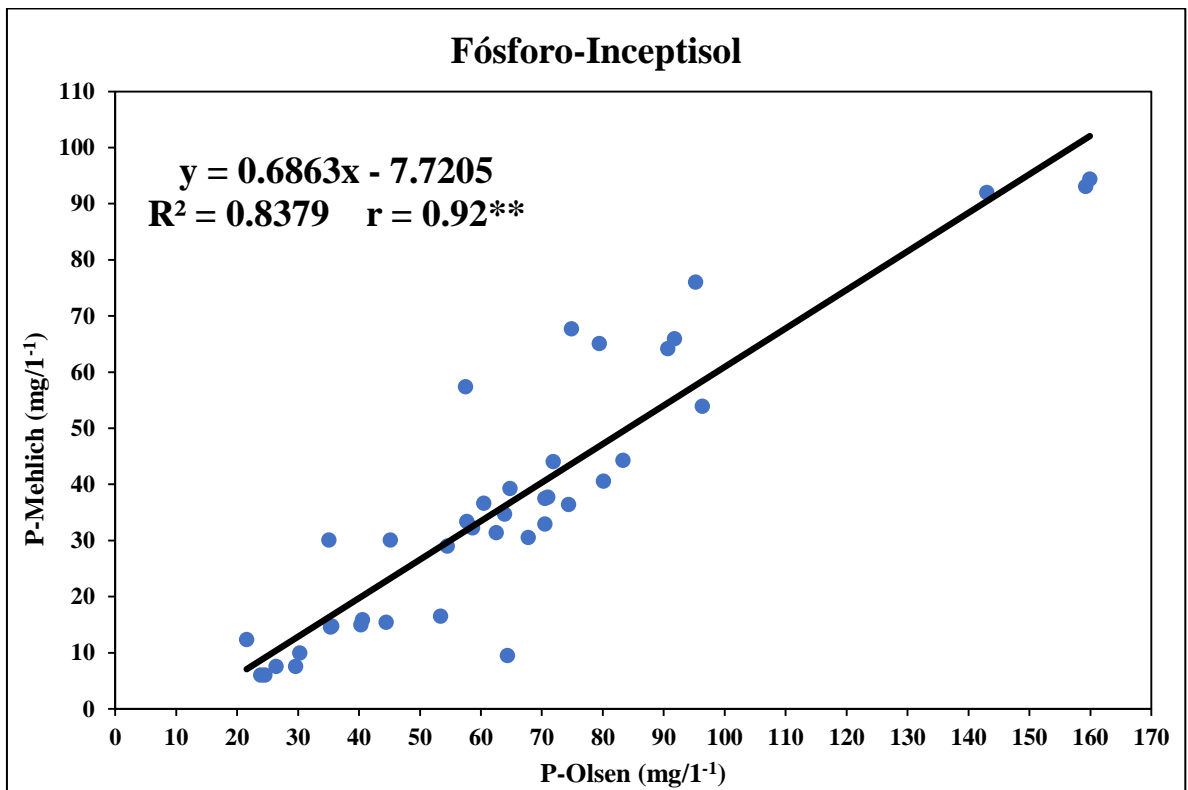
Los valores de fósforo extraídos en suelos ultisoles con las soluciones Olsen modificada y Mehlich 3 presentan un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,807 y un  $r = 0,90$ , el cual es altamente significativo (ver Figura 21). Se observan menores valores de extracción de fósforo por parte de la solución Mehlich 3 que los extraídos por la solución Olsen modificada ( $y = 0.949x - 13.373$ ).



**Figura 21.**

*Diagrama de dispersión de fósforo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Ultisoles de Costa Rica.*

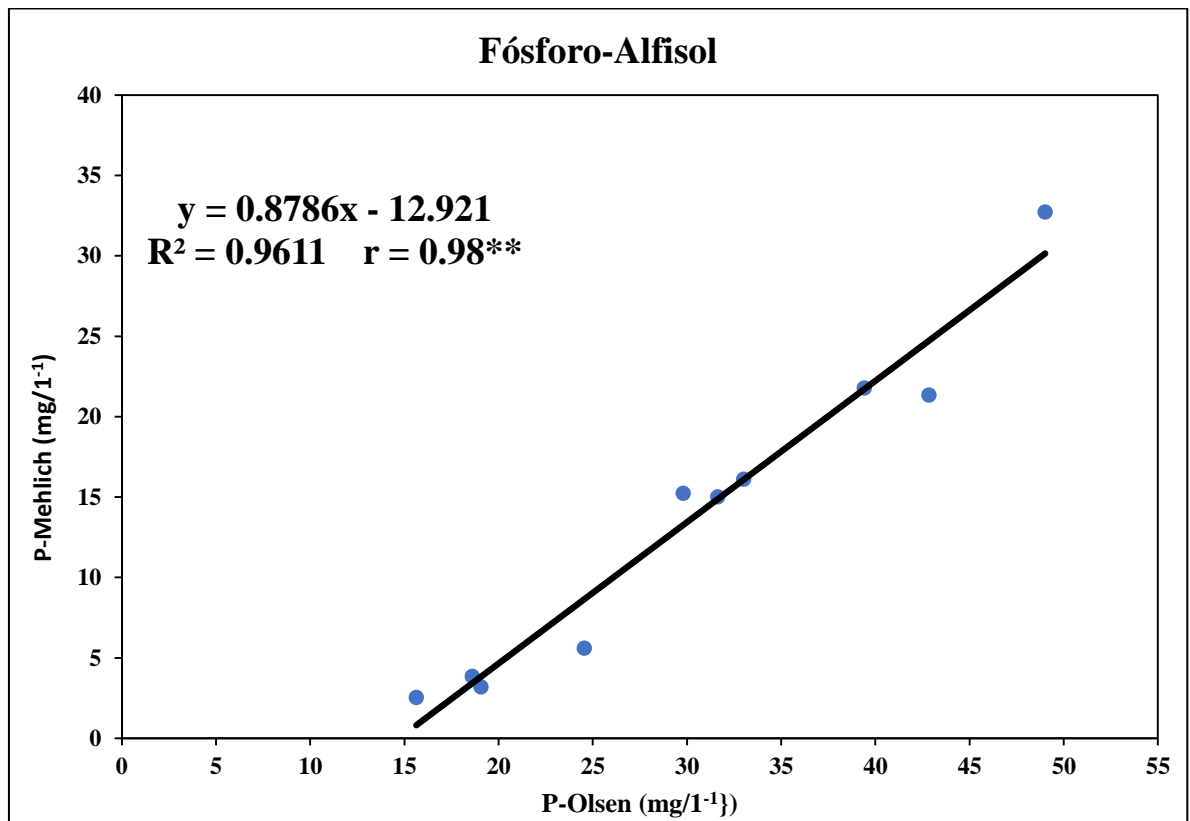
En la Figura 22 se observa que las cantidades de fósforo extraído en suelos Inceptisoles con las soluciones Olsen modificada y Mehlich 3 muestran una correlación altamente significativa, con un  $R^2$  de 0,837 y un  $r = 0,92$ . La solución Mehlich 3 extrae menor cantidad de fósforo que la solución Olsen modificada ( $y = 0.6863x - 7.7205$ ).



**Figura 22.**

*Diagrama de dispersión de fósforo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Inceptisoles de Costa Rica.*

La Figura 23 muestra las cantidades extraídas de fósforo en alfisoles con la solución Olsen modificada con respecto a la extracción con Mehlich 3, presenta un coeficiente de correlación  $R^2$  de 0,961 y un  $r = 0,98$ , el cual es altamente significativo. Los valores de P extraídos con la solución Mehlich 3 fueron menores que los extraídos con la solución Olsen modificada ( $y = 0.879x - 12.921$ ).



**Figura 23.**

*Diagrama de dispersión de fósforo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, en suelos Alfisoles de Costa Rica.*

Bertsch et al (2005) no pudieron establecer una correlación significativa o una tendencia definida, en estudios de correlación de P con las soluciones extractoras Mehlich 3 y Olsen modificada, mencionan que la correlación no es clara, lo que puede estar relacionado con la extracción de cantidades de P mucho más altas, iguales o mucho más bajas con Mehlich 3, que las que extrae Olsen modificada.

Salazar (2015) encontró que el coeficiente de correlación entre las cantidades extraídas de P por Olsen modificada y Mehlich 3 fue de 0,430, este no es significativo. Cabalceta (1995), al correlacionar el contenido de P en 100 suelos del país, encontró cantidades de extracción de fósforo similares entre Olsen modificada y Mehlich 3, con una correlación  $R^2$  de 0,828.

#### 5.4 Correlación entre las soluciones extractoras Mehlich 3, Olsen- KCl y la parte foliar.

En la Tabla 5 se muestran las concentraciones de los nutrimentos K, Ca, Mg y P, extraídos con las soluciones extractoras Olsen modificada-KCl y Mehlich 3 versus la parte foliar.

**Tabla 5.**

*Extracción de los nutrimentos K, Ca, Mg y P, con las soluciones Olsen modificada-KCl y Mehlich 3 versus la parte foliar.*

Elemento	Solución extractora	Suelo vrs Parte foliar
K	Olsen modificado	0,43
	Mehlich 3	0,54
Ca	KCl	0,58
	Mehlich 3	0,55
Mg	KCl	0,61
	Mehlich 3	0,62
P	Olsen modificado	0,32
	Mehlich 3	0,44

Fuente: Elaboración propia

Los cuatro elementos investigados K, Ca, Mg y P presentaron una alta significancia. Para K, Mehlich 3 extrajo a nivel foliar mayor contenido de nutrimentos (0,54) que Olsen modificado (0,43). Para el Ca ambas soluciones extractoras obtuvieron un valor similar de extracción KCl (0,58) y Mehlich 3 (0,55) El Mg con la solución extractora Mehlich 3 obtuvo un mayor valor de extracción (0,62) en comparación con KCl.

Con el P, en extracción foliar, Mehlich 3 fue superior en comparación con Olsen modificado (0,44) vrs (0,32). Con el K, el coeficiente de correlación obtenido con ambas soluciones OM y Mehlich 3 del total de las muestras en los distintos suelos dio como resultado un  $r = 0,78^{**}$ , el cual se considera altamente significativo e indica que Mehlich 3 tiende a extraer mayor cantidad del elemento que Olsen Modificado y, en la parte foliar, se cumple esta misma relación.

El coeficiente de correlación para ambos elementos en el suelo de Ca y Mg con el total de las muestras es muy similar:  $r = 0,98^{**}$  y  $r = 0,99^{**}$ , esto hace que la relación en la absorción por la parte foliar sea semejante.

Con el P, el coeficiente de correlación con las soluciones extractoras OM y Mehlich 3 en los distintos suelos del país se obtuvo un  $r = 0,84^{**}$ , el cual fue altamente significativo encontrando una buena correlación entre ambas soluciones, en la parte foliar se presenta que Mehlich 3 extrae mayor cantidad del elemento contrario a lo obtenido en el suelo donde Olsen Modificado extrae mayor cantidad de P.

## 6. Determinación del nivel crítico entre las soluciones extractoras Mehlich 3 y Olsen modificada KCl.

En la tabla 6 se observan los modelos de regresión utilizados para definir el nivel crítico de K para las soluciones extractoras en los diferentes órdenes de suelos

**Tabla 6.**

*Nivel crítico de K en el suelo con la solución Mehlich 3, de acuerdo con el modelo de regresión obtenido, utilizando como referencia el nivel crítico (NC) de 0.20 cmol (+) l<sup>-1</sup>*

Muestras	N	Modelo de Regresión	Nivel Crítico (NC)		Variación OM/Mehlich
			Olsen	Mehlich	
Total	320	1.0787Olsen + 0.0181	0.20	0.23	15%
Andisoles	155	0.9646Olsen + 0.0202	0.20	0.21	5%
Alfisoles	40	1.4069Olsen + 0.0487	0.20	0.33	65%
Inseptisoles	10	1.3978Olsen + 0.0343	0.20	0.31	55%
Ultisoles	115	1.0326Olsen + 0.0131	0.20	0.21	5%

Fuente: Elaboración propia

Al utilizar la solución extractora Olsen modificada, el nivel crítico de K se mantiene en 0.20 cmol K (+) l<sup>-1</sup>, actualmente utilizado, independientemente del orden de suelo, con la solución extractora Mehlich 3; el nivel crítico variaría entre 0.33 cmol K (+) l<sup>-1</sup> para los Alfisoles, y 0.21 cmol K (+) l<sup>-1</sup> para los Andisoles y Ultisoles, como se observa en la Tabla 6.



Los modelos de regresión utilizados para definir el nivel crítico de Ca para la solución extractora Mehlich 3 en los diferentes órdenes de suelos, se presentan en la Tabla 7

**Tabla 7.**

*Nivel crítico de Ca en el suelo con la solución Mehlich 3, de acuerdo con el modelo de regresión obtenido, utilizando como referencia el nivel crítico (NC) de 3.00 cmol (+) l<sup>-1</sup>*

Muestras	n	Modelo de Regresión	Nivel Crítico (NC)		Variación KCl/Mehlich
			KCl	Mehlich	
Total	320	0.9973 KCl + 0.0079	3.00	3.00	0%
Andisoles	155	1.1406 KCl + 0.0874	3.00	3.33	11%
Alfisolos	40	0.9968 KCl + 0.2014	3.00	2.79	7%
Inseptisoles	10	0.8235 KCl + 0.2522	3.00	2.72	9%
Ultisoles	115	0.8738 KCl + 0.1658	3.00	2.79	7%

Fuente: Elaboración propia

Con respecto al nivel crítico de calcio, se mantiene un nivel crítico de 3 cmol (+) Ca l<sup>-1</sup>, utilizando la solución extractora KCl, indistintamente del orden de suelo, con la solución extractora Mehlich 3, el nivel crítico variaría entre 3.33 cmol Ca (+) l<sup>-1</sup> para los Andisoles, y 2.72 cmol Ca (+) l<sup>-1</sup> para los Inseptisoles, como puede observarse en Tabla 6.

Las diferencias del NC entre KCl y Mehlich, en el orden de suelo, pueden considerarse agronómicamente de poca magnitud, ya que se encuentran dentro del rango normal de variación, desde el punto de vista de extracción en el laboratorio, que se ha estimado entre 10 a 15% (Corrales et al., 2006), por lo que parecería razonable mantener el NC de 3.00 cmol (+) l<sup>-1</sup> para calcio en ambas soluciones, independientemente del orden de suelo. Estos resultados coinciden con los encontrados por otros autores (Gadea y Briceño, 1994; Bertsch et al, 2005) y refuerzan el criterio de poder emplear un mismo nivel crítico de este elemento, para ambas soluciones.

En la Tabla 8 se observan los modelos de regresión utilizados para definir el nivel crítico de Mg para las soluciones extractoras en los diferentes ordenes de suelos

**Tabla 8.**

*Nivel crítico de Mg en el suelo con la solución Mehlich 3, de acuerdo con el modelo de regresión obtenido, utilizando como referencia el nivel crítico (NC) de 0.80 cmol (+) l<sup>-1</sup>*

Muestras	n	Modelo de Regresión	Nivel Crítico (NC)		Variación KCl/Mehlich
			KCl	Mehlich 3	
Total	320	0.9425 KCl + 0.0589	0.80	0.81	1.25%
Andisoles	155	1.1064 KCl + 0.0051	0.80	0.89	11,25%
Alfisolos	40	0.915 KCl + 0.2108	0.80	0.94	17.5%
Inceptisoles	10	0.7962 KCl + 0.1411	0.80	0.77	3.75%
Ultisoles	115	0.8704 KCl + 0.0865	0.80	0.78	2.5%

Fuente: Elaboración propia

En la presente investigación, en relación con el nivel crítico de Mg, con respecto a la solución extractora Mehlich 3, se obtuvieron valores en un rango entre 0,77 y 0,94 cmol Mg (+) l<sup>-1</sup>, en los que agrónomicamente significan valores muy similares a los obtenidos con la solución KCl. La solución Mehlich 3 siempre tuvo la tendencia de extraer mayor cantidad de Mg en comparación a la solución KCl. En el caso del nivel crítico de Mg con ambas soluciones extractoras, Gadea (1993) encontró que en suelos Ultisoles, el nivel crítico fue de 0,8 cmol (+) Mg l<sup>-1</sup> y en Inceptisoles 1,0 cmol (+) Mg l<sup>-1</sup> esto para la solución extractora KCl. Para el caso de Mehlich 3, Gadea (1993), obtuvo 0,8 y 1 cmol (+) Mg/l<sup>-1</sup> en Ultisoles y Inceptisoles respectivamente. Cabalceta y Molina (2006) reportaron un nivel crítico general de 0,7 cmol (+) l<sup>-1</sup>.

Los modelos de regresión utilizados para definir el nivel crítico de P para las soluciones extractoras en los diferentes órdenes de suelos, se presentan en la Tabla 9

**Tabla 9.**

*Nivel crítico de P en el suelo con la solución Mehlich 3, de acuerdo con el modelo de regresión obtenido, utilizando como referencia el nivel crítico (NC) de 10 mg (+) l<sup>-1</sup>*

Muestras	n	Modelo de Regresión	Nivel Crítico (NC)		Variación
			Olsen	Mehlich	OM/Mehlich
Total	320	0.7227Olsen– 6.7601	10	0.46	95.4%
Andisoles	155	0.4873Olsen + 2.2071	10	7.08	29,2%
Alfisoles	40	0.8786Olsen– 12.921	10	-4.13	-59.75%
Inseptisoles	10	0.6863Olsen– 7.7205	10	-0.85	-91.5%
Ultisoles	115	0.9497Olsen– 13.373	10	-3.87	-61.3%

**Fuente:** Elaboración propia

Para el elemento P no se presentó una respuesta clara por parte de Mehlich 3, en que los valores de nivel crítico quedaron muy por debajo del valor utilizado como base con un NC de 10 mg l<sup>-1</sup>. Esto se confirma que Mehlich 3 tiende a extraer una cantidad menor del elemento en comparación con Olsen Modificado.

## 7. Conclusiones

- 1- La solución extractora Mehlich 3 en esta investigación representa una opción de cambio para pasar de Olsen modificada KCl a el uso de Mehlich 3 como solución extractora en el laboratorio químico del ICAFE, los datos obtenidos para los elementos de Ca, Mg y K lo respaldan de esta manera en donde Mehlich 3 tuvo la tendencia de extraer mas de estos elementos en comparación de Olsen modificada KCl tanto en suelo como en la parte foliar. Con el elemento P no hubo una buena correlación a nivel de suelo, pero a nivel foliar Mehlich 3 extrajo mayor contenido de este elemento indicando que es necesario realizar estudios de calibración a nivel de invernadero con este elemento.
- 2- Al considerar el total de muestras, se presentó una alta correlación ( $r=0.99^{**}$ ) para la extracción de calcio por las soluciones KCl y Mehlich 3. El modelo de regresión lineal presenta un elevado coeficiente de determinación ( $R^2=0.98$ ), al despejar la ecuación permite concluir que ambas soluciones extraen cantidades muy similares del calcio en el suelo, por lo que el nivel crítico para las dos soluciones sería el mismo ( $3.00 \text{ cmol } (+) \text{ l}^{-1}$ ).
- 3- Al separar la extracción de calcio por órdenes, el comportamiento entre ambas soluciones es similar al descrito para el total de muestras, con elevados coeficientes de correlación en todos los casos ( $\geq 0.97$ ), al despejar las curvas de regresión el nivel crítico para Mehlich 3, variaría entre  $3.33 \text{ cmol } (+) \text{ l}^{-1}$  en Andisoles y  $2.72 \text{ cmol } (+) \text{ l}^{-1}$  en Inceptisoles.
- 4- Para el magnesio, también las soluciones KCl y Mehlich 3 presentaron una alta correlación ( $0.98^{**}$ ) y una curva de regresión ( $R^2=0.96$ ), al despejar la ecuación, indica que las dos soluciones extraen cantidades similares del magnesio en el suelo y por lo tanto el nivel crítico sería el mismo ( $0,80 \text{ cmol } (+) \text{ l}^{-1}$ ).
- 5- La correlación entre KCl y Mehlich 3 para la extracción del magnesio en el suelo es elevada ( $\geq 0.95$ ) en los 4 órdenes estudiados, y al despejar la curva de regresión, los niveles críticos

serían de  $0.77 \text{ cmol (+)}1^{-1}$  en Inceptisoles,  $0.89 \text{ cmol (+)}1^{-1}$  en Andisoles y  $0.78 \text{ cmol (+)}1^{-1}$  en Ultisoles.

- 6- En el total de muestras, aunque significativa ( $0.78^{**}$ ) la correlación para la extracción de potasio entre las soluciones Mehlich 3 y Olsen fue la más baja de los cuatro elementos estudiados. La curva de regresión indica que Mehlich 3 mostró una tendencia a extraer un poco más potasio en el suelo que Olsen, lo que concuerda con estudios anteriores. Al despejar la curva de regresión lineal, el nivel crítico para Mehlich 3 sería de  $0.23 \text{ cmol (+)}1^{-1}$ ; mientras que a nivel de orden sería de 0.21 en Andisoles, 0.22 en Ultisoles, 0.31 en Inceptisoles y 0.33 en Alfisoles.
- 7- Mehlich 3 tendió a extraer considerablemente menos fósforo del suelo que Olsen, tanto al tomar el total de muestras como en cada uno de los órdenes estudiados. Al despejar las curvas de regresión los niveles críticos para Mehlich 3, tienden a ser muy bajos e inclusive negativos, de forma que no es recomendable establecer los niveles críticos para Mehlich con base al establecido para Olsen.
- 8- Las correlaciones entre lo extraído del suelo por Mehlich y Olsen contra lo extraído por las plantas, fue muy similar para Ca y Mg; mientras Mehlich 3 correlacionó mejor para potasio y fósforo.

## **8. Recomendaciones**

- 1- Realizar ensayos a nivel de campo, para evaluar las soluciones KCl-Olsen modificada y Mehlich 3 en la extracción de los nutrientes P, K, Ca y Mg, y comparar resultados con los obtenidos en esta investigación.
- 2- Desarrollar investigación adicional en la extracción de P con la solución Mehlich 3, para poder determinar un nivel crítico con mayor claridad.

## 9. Referencias bibliográficas

- Alvarado, A., Iturriaga, I., Smyth, J., Portuguez, E. y Ureña, J. (2009). Efecto residual del fertilizante fosfatado adicionado al cultivo de la papa en un andisol de Juan Viñas, Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 33(1): 63-76
- Bertsch, F., Bejarano, J. y Corrales, M. (2005). Correlación entre las soluciones extractoras KCl-Olsen modificada y Mehlich 3, usadas en los laboratorios de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 29(3): 137-142.
- Cabalceta, G. (1993). *Niveles críticos de fósforo, azufre y correlación de soluciones extractoras en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica*. Tesis de maestría, Universidad de Costa Rica, San José, Costa Rica.
- Cabalceta, A. G. y Cordero, A. (1994a). Niveles críticos de fósforo en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 18(2): 147-161.
- Cabalceta, A. G. y Cordero, A. (1994b). Niveles críticos de azufre en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 18(2): 163-174.
- Cabalceta, G. (1995). Correlación de soluciones extractoras de fósforo en suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*. 19(1): 29-37.
- Cabalceta, G. y Molina, E. (2006). Niveles críticos de nutrimentos en suelos de Costa Rica utilizando la solución extractora Mehlich 3. *Agronomía Costarricense*. 30(2): 31-44.
- Camacho, Tamayo. (2010). Variabilidad espacial de algunas propiedades químicas en un entisol. *Rev. U.D.C.A Act. & Div. Cient.* 13 (1): 87-95, 2010
- Chonay Pantzay, JJ. (2002). Correlación de soluciones extractoras para la evaluación de la fertilidad de los suelos de las Tierras Altas Volcánicas de Guatemala. San Carlos, GT. USAC.
- Cox, F. R. y Kamprath, E. J. (1972). Micronutrient soil test. En J. J. Morvedt *et al.* (eds). *Micronutrients in Agriculture* (pp. 45-72). SSSA, Madison, Wisconsin.
- Dahnke, W. C. y Olson, R. A. (1990). Soil test calibration, correlation and recommendation. En R. L. Westerman (ed). *Soil testing and plant analysis* (pp. 45-72). SSSA, Madison, Wisconsin.
- Diaz-Romeu, R. y Hunter, A. (1978). *Metodología de muestreo de suelo, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigación en invernadero*. CATIE, Turrialba, Costa Rica.
- Frank, K; Beegle, D; Denning, J. (2011). Phosphorus. En M, Nathan; R, Gelderman (eds.), *Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region* (pp. 27-35). Missouri, US. NCR. no. 221.

- Gadea, A.J. y Briceño, J.A. (1994). *Correlations of cation extractants in Costa Rican soils*. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 25(7/8), 1109-1118.
- Gadea Rivas, A.J. (1993). *Niveles críticos de Calcio, Magnesio, y Potasio en cuatro ordenes de suelo de Costa Rica* [Tesis de maestría]. Universidad de Costa Rica.
- Henríquez, C., Bertsch, F. y Salas, R. (1995). *Fertilidad de suelos: manual de laboratorio*. ACCS, San José, Costa Rica.
- Instituto de la Potasa y el Fosfato. (1997). *Manual Internacional de la Fertilidad del Suelo*. INPOFOS, Quito, Ecuador.
- Instituto del Café de Costa Rica. (2013). *Guía técnica para el cultivo del Café* (ICAFE). ICAFE-CICAFE, Heredia, Costa Rica.
- Instituto del Café de Costa Rica. (2012). *Manual de laboratorio para la determinación de los análisis físicos y químicos en las muestras de suelo en café* (ICAFE). ICAFE-CICAFE, Heredia, Costa Rica.
- Instituto del Café de Costa Rica. (sf). Historia del café de Costa Rica. Recuperado 3 de julio de 2017, a partir de <http://www.icafe.cr/nuestro-cafe/historia/>
- Jones, J. B. y Wolf, B. 1984. *Manual of soil testing procedure using modified (Wolf) Morgan extracting reagent*. Benton Laboratories, Athens, Georgia. 61 p.
- Jones, J. B. (1990). Universal soil extractants: their composition and use. Communications in *Soil Science and Plant Analysis*, 21, (13-16):1091-1101.
- Kamprath, E. J. (1970). Exchangeable aluminum as a criterion for liming leached mineral soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, 34, 252-254.
- Lanyon, L. E. y Heald, W. R. (1982). Magnesium, calcium, strontium and barium. En A.L. Page *etal.* (eds). *Methods of soil analysis, Part 2*. Agronomy Monograph N.o 9 (159-165), ASA-SSSA.
- Lindsay W. L. y Cox F. R. (1985). *Micronutrients soil test for tropics*. *Fertilizer Research* 7:169-200.



- Molina, E., Cabalceta, G. (1990). Correlación de diferentes soluciones extractoras en vertisoles y Ultisoles de Costa Rica. *Agronomía costarricense*, 14(1), 37-44.
- Molina, E. (1993). *Calibración de métodos de análisis de cobre, zinc y manganeso disponible en Ultisoles, Vertisoles, Inceptisoles y Andisoles de Costa Rica* [Tesis de maestría. Universidad de Costa Rica.
- Molina, E. (2007). *Análisis de suelos y su interpretación*. San José, CR, CIA-UCR Amino Grow International.
- Molina, E. y Bornemisza, E. (2001). Correlación entre métodos de análisis de Zn disponible en cuatro órdenes de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 25(2), 65-72.
- Molina, E. y Bornemisza, E. (2006). Nivel crítico de Zinc en suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense*, 30(2), 45-59.
- Ramos, S. N. A. (2003). *Evaluación del fósforo extraído con dos soluciones extractoras en 19 suelos del altiplano occidental de Guatemala* [Tesis de licenciatura]. USAC.
- Sánchez, P. A. (1981). *Suelos del trópico características y manejo*. Trad. por E. Camacho. San José, Costa Rica. IICA. p. 187-192.
- Soltampur, P.N. 1991. Determination of nutrient availability and elemental toxicity by AB-DTPA soil test and ICPS. *Advances in Soil Science*. 16:165-190.
- Valencia, G., Carrillo, F., Pachon, I. y Hoyos, E. (1989). *La fertilización del cafetal según el análisis de suelos*. Caldas, Colombia. Cenicafe.

## 10. Anexos

### Metodologías de laboratorio utilizadas en los análisis de las muestras de suelo recibidas por el Instituto del Café de Costa Rica.

Se utilizará una fracción de la muestra compuesta de los suelos previamente homogeneizada, para la determinación de sus características físicas y químicas de acuerdo con las metodologías que se presentan.

### Metodologías utilizadas en la caracterización física y química de las muestras de suelo (Instituto del Café de Costa Rica, 2012).

#### Instructivo para la determinación de textura en Suelos por el método de Bouyoucos

##### Análisis de la muestra

Trasvasar a un Bouyoucos de 1000 mL cada muestra y llevar a la marca con agua destilada  
Agitar vigorosamente por un minuto.

Iniciar el cronómetro para medir los 40 s.

Colocar el hidrómetro en la muestra cuidadosamente para que se mantenga estable.

A los 40 segundos leer el Hidrómetro. No detener el cronómetro.

Colocar el termómetro, permitir que se estabilice y leer la temperatura.

Sacar el termómetro.

Dejar reposar por 2 horas.

Tomar la lectura del Hidrómetro.

Introducir el termómetro y leer la temperatura.

Cálculos:

Corrección de Temperatura

$$CT = [(Temperatura - 20,0) + 0,6] * 0,3 + Lectura$$

%Material en Suspensión

$$\%MaterialSuspensión = \frac{LecturaCorregida40segundos}{PesoMuestra} * 100$$

%Arenas Totales

$$\%ArenasTotales = 100 - \%materialsuspensión$$

%Arcillas Totales:

$$\%ArcillasTotales = \frac{LecturaCorregida2horas}{PesoMuestra} * 100$$

%Limos Totales:

$$\%LimosTotales = 100 - (\%Arenas + \%Arcillas)$$

Instructivo para la determinación de pH en Suelos por el método Potenciométrico

## **Extracción de la muestra - pH**

Se mide 10 mL de suelo utilizando la cuchara para medir, agregar 25 mL de agua destilada utilizando para ello el dispensador de pH, agitar durante 5 minutos a 260 min<sup>-1</sup>.

Dejar reposar 20 minutos y agitar nuevamente 1 minuto.

Medición

Agitar la muestra con un policía.

Colocar el electrodo en la muestra de suelo agitando suavemente sin tocar el sólido y esperar que se establezca la lectura.

Anotar la lectura en el F-08-ICAFE-PS-01 Resultados de pH en Suelos.

Lavar el electrodo con agua destilada y secar, antes de colocar en la siguiente muestra.

Instructivo para la determinación de Cobre, Zinc, Manganeso y Hierro en Suelos extracción mediante Olsen Modificada

## **Preparación de reactivos:**

### **Olsen modificada**

Pesar 42 g de bicarbonato de sodio y 3,72 g de EDTA disódico en agua, agregar 10 mL de Superfloc al 0,5 %. Ajustar el pH a 8,5 con hidróxido de sodio 5 mol/L y llevar a 1 L en balón aforado (rinde para 33 muestras).

Superfloc al 0,5 % m/v

Pesar 5,00 g de Superfloc 127, agregar 500 mL de agua destilada (preferiblemente agregarle el agua caliente), se pone a calentar, pero sin ebullición, agitando hasta disolver completamente, aproximadamente dos días, se atempera la solución y se lleva a 1 L en un balón aforado. Se guarda en una botella ámbar en refrigeración.

Hidróxido de sodio 5 mol/L

Disolver 200 g de hidróxido de sodio en 1 L de agua desionizada. (Se trabaja en una capilla para gases, se utiliza equipo de seguridad.)

Extracción de la muestra

Se mide 2,5 mL de suelo utilizando la cuchara para medir, agregar 25 mL de disolución de Olsen modificada utilizando para ello el dispensador de Olsen, agitar durante 10 minutos a 260 min<sup>-1</sup> y filtrar.

Medición

Determinar la absorbancia en un Espectrofotómetro Absorción Atómica de acuerdo con las condiciones presentes.

## **Instructivo para la determinación de Potasio en Suelos por el método de Olsen Modificada**

### **Extracción de la muestra**

Se mide 2,5 mL de suelo utilizando la cuchara para medir, agregar 25 mL de disolución de Olsen modificada utilizando para ello el dispensador de Olsen, agitar durante 10 minutos a 260 min<sup>-1</sup> y filtrar.

## Dilución

Realizar la dilución con el dilutor: Dilución Olsen Suelos (K) 1/25.

## Medición

Determinar la absorbancia en un Espectrofotómetro Absorción Atómica de acuerdo a las siguientes condiciones:

Elemento	Longitudes (nm)	Slit	Rango lineal
Potasio	766,5	1,4	(0,1 a 1,5) mg/L
	769,9		(0,2 a 4,4) mg/L

## Instructivo para la determinación de Fósforo en Suelos mediante el extractante Olsen Modificada

### Preparación de reactivos:

#### Olsen modificada

Pesar 42 g de bicarbonato de sodio y 3,72 g de EDTA disódico en agua, agregar 10 mL de superfloc al 0,5 %. Ajustar el pH a 8,5 con hidróxido de sodio 5 mol/L y llevar a 1 L en balón aforado (rinde para 33 muestras).

Superfloc al 0,5 % m/v

Pesar 5,00 g de Superfloc 127, agregar 500 mL de agua destilada (preferiblemente agregarle el agua caliente), se pone a calentar, pero sin ebullición, agitando hasta disolver completamente, aproximadamente dos días, se atempera la solución y se lleva a 1 L en un balón aforado. Se guarda en una botella ámbar en refrigeración.

Hidróxido de sodio 5 mol/L

Disolver 200 g de hidróxido de sodio en 1 L de agua desionizada. (Se trabaja en una capilla para gases, se utiliza equipo de seguridad.)

Disolución madre de molibdato de amonio.

Pesar 6,50 g de subcarbonato básico de bismuto. Disolverlo en un poco de agua desionizada fría, añadir rápidamente 250 mL de ácido sulfúrico concentrado y agitar hasta disolver. Pesar 15,0 g de molibdato de amonio y disolverlos en 400 mL de agua.

Mezclar ambas disoluciones cuando estén frías y llevar con agua desionizada hasta un volumen total de 2 L. Mantener en una botella ámbar en refrigeración.

#### Disolución de trabajo.

Pesar 1,00 g de ácido ascórbico. Agregar 200 mL de disolución madre. Llevar a 1 L (rinde para 3 bandejas y la curva de calibración). Preparar esta disolución cada vez que se vaya a utilizar.

### **Extracción de la muestra**

Se mide 2,5 mL de suelo utilizando la cuchara para medir, agregar 25 mL de disolución de Olsen modificada utilizando para ello el dispensador de Olsen, agitar durante 10 minutos a 260 min<sup>-1</sup> y filtrar.

### **Dilución**

Realizar el análisis de fósforo el mismo día que se realiza la extracción de Olsen.

Realizar la dilución con el dilutor: Fósforo Suelos y Foliare.

Realizar la dilución de Olsen modificada para utilizar como blanco.

Realizar la dilución de la curva de calibración.

Realizar la dilución de las muestras a analizar.

### **Medición**

La lectura se realiza a los 10 minutos de agregar la disolución de trabajo al blanco.

Leer en el mismo orden que se agregó la disolución de trabajo, de modo que tenga el mismo tiempo de haberse desarrollado el color al momento de determinar la absorbancia.

Determinar la absorbancia en un Espectrofotómetro Visible de acuerdo a las siguientes condiciones:

Elemento	Longitudes (nm)	Rango lineal
Fósforo	660	(0,5 a 30,0) mg/L

Instructivo para la determinación de Calcio y Magnesio en Suelos extracción mediante KCl 1 mol/L

### **Preparación de reactivos:**

KCl 1 mol/L

Se pesa 74,56 g de cloruro de potasio y se diluye en 1 L de agua destilada (rinde para 33 muestras).

Cloruro de lantano al 3%.

Pesar 351,9 g de óxido de lantano y añadir suficiente agua para que la reacción no sea tan violenta.

Adicionar 1500 mL de ácido clorhídrico concentrado, lentamente, con precaución y agitando hasta disolver. Llevar luego a un volumen de 10 L. (La reacción es fuertemente exotérmica).

### **Extracción de la muestra**

Se mide con una cuchara especial 2,5 mL de suelo

Llenar la cuchara con el suelo, luego apoyando el palito de la cuchara en una caja de madera, de las que se utilizan para secar las muestras, golpear con la varilla de enrasar en el palito de

la cuchara, para compactar el suelo, si es necesario volver a llenar, golpear y luego enrasar la medida.

Añadir 25 mL de la disolución de cloruro de potasio 1 mol/L. Se agita durante 10 minutos. Se utiliza un agitador excéntrico a 260 min<sup>-1</sup>. Se filtra.

### Dilución de Curva y Muestras

Realizar verificación dilutor, ver apartado 4.6

Realizar la dilución con el dilutor2: Dilución KCl 1 mol/L (Ca y Mg) 0,5/30.

0,5 mL de muestra+6,0 mL LaCl<sub>2</sub>+23,5 mL H<sub>2</sub>O=30 mL

Realizar la dilución de KCl 1 mol/L para utilizar como blanco.

Realizar la dilución de la curva de calibración.

Realizar la dilución de las muestras a analizar.

### Medición

Determinar la absorbancia en un Espectrofotómetro Absorción Atómica de acuerdo con las siguientes condiciones:

Elemento	Longitudes	Slit	Rango lineal
Calcio	422,7	0,7	(0,0 a 4,0) mg/L
	239,9		(2,0 a 760,0) mg/L
Magnesio	285,2		(0,0 a 0,4) mg/L
	202,6		(0,30 a 20) mg/L

### Instructivo para Determinación de Acidez y Aluminio Extraíble

#### Preparación de reactivos:

Hidróxido de sodio 0,1 mol/L.

Se pesa 8,0 g de hidróxido de sodio y se disuelven en 2 L de agua, se guarda en una botella plástica bien cerrada.

Hidróxido de sodio 0,01 mol/L

Se toma 100 mL de hidróxido de sodio 0,1 y se diluye a 1 L.

Valoración Hidróxido de Sodio 0,01 mol/L

Se deseca ftalato ácido de potasio 1 o 2 horas a 105 °C y se deja enfriar, se guarda dentro de un desecador con sílica gel. Se pesa en una balanza analítica, 0,1000 g de ftalato se transvasa a un balón de 100 mL con agua destilada. Se toman tres alícuotas de 10 mL y se colocan cada una en un Erlenmeyer de 125 mL, se añade 2 gotas de disolución de Fenolftaleína y se valora el hidróxido de sodio 0,01 N, hasta el primer color rosado persistente durante 30 seg.

Fórmulas de cálculo de la concentración de hidróxido de sodio 0.1N

$C_{NaOH} = (0.1)/100 * 1/204.23 * 1000/1 * 10 * 1/1000 * 1000 / vol. NaOH(mL)$

Dónde: V NaOH = Volumen consumido de hidróxido de sodio 0,01N.

Fenolftaleína

Se pesa 0,125 g de Fenolftaleína, se disuelve en 125 mL de alcohol etílico, se lleva a 250 mL con agua destilada.

### Extracción de la muestra

Se mide con una cuchara especial 2,5 mL de suelo

Llenar la cuchara con el suelo, luego apoyando el palito de la cuchara en una caja de madera, de las que se utilizan para secar las muestras, golpear con la varilla de enrasar en el palito de la cuchara, para compactar el suelo, si es necesario volver a llenar, golpear y luego enrasar la medida.

Añadir 25 mL de la disolución de cloruro de potasio 1 mol/L. Se agita durante 10 minutos. Se utiliza un agitador excéntrico a 260 min<sup>-1</sup>. Se filtra.

Medición

Se toma una alícuota de 10 mL del extracto de KCl, en un Erlenmeyer de 50 mL y se añade 2 gotas de disolución de fenolftaleína y se titula con hidróxido de sodio 0,01 M, hasta el color rosado pálido permanente.

Cálculo

$$\text{cmol (+)H/L} = \left( \frac{\text{Vgastado} * \text{Cn NaOH}}{\text{Alícuota}} \right) * \left( \frac{25\text{mL}}{2,5\text{mL}} \right) * (100)$$

### Mehlich 3

Determinación de metales en las muestras de suelo

Equipo

Cuchara especial 2,5 mL

Agitador Excéntrico

Dispensadores

Espectrofotómetro de Absorción Atómica

Reactivos

0.2N CH<sub>3</sub>COOH

0.25N NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>

0.015N NH<sub>4</sub>F

0.013N HNO<sub>3</sub>

0.001M EDTA

Para 2L de reactivo, se pesa 277.8g de NH<sub>4</sub>F y se agrega 1200 mL de agua destilada, se agita.

Luego adiciones 146.1g de EDTA hasta disolver completamente. Se afora a 2L en balón.

Guardar en plástico. Esta disolución alcanza para un aproximado de 10000 repeticiones.

Extractante

En un envase plástico con capacidad para 50L, adiciones 40L de agua destilada.

Disuelva 1000g de NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> en agua destilada, aproximadamente 2000 mL.

Adicione 200 mL de reactivo M3 (NH<sub>4</sub>F – EDTA) y mezcle.

Luego agregue 575 mL de ácido acético y 41 mL de HNO<sub>3</sub>.

Se mezcla y se lleva a un volumen total de 50 L. Esta solución de trabajo alcanza para 2000 repeticiones.

M3 (3.75M NH<sub>4</sub>F – 0.25M EDTA)

Reactivo	Cantidad			
	200 mL	250 mL	1000 mL	2000 mL
NH <sub>4</sub> F	27.78 g	34.73	138.9 g	277.8 g
EDTA	14.61 g	18.26	73.05 g	

\*Utiliza 200 mL para volumen total de 50 L de disolución.

\*Utiliza 100 mL para volumen total de 25 L de disolución.

\*Utiliza 20 mL para volumen total de 5 L de disolución.

Extractante

Reactivo	Cantidad		
	2 L	5 L	50 L
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	40 g	100 g	1000 g
CH <sub>3</sub> COOH conc	23 mL	57.5 mL	575 MI
HNO <sub>3</sub> conc	2 mL	4.1 mL	41 MI

Disolución para Curva de Calibración (doble de concentración)

Reactivo	Cantidad	
	200 mL	250 mL
NH <sub>4</sub> F	27.78 g	34.73
EDTA	14.61 g	18.26

\*Utiliza 200 mL para volumen total de 50 L de disolución.

\*Utiliza 100 mL para volumen total de 25 L de disolución.

\*Utiliza 20 mL para volumen total de 5 L de disolución.

Reactivo	Cantidad		
	0.5 L	1 L	2 L
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	20g	40 g	80 g
CH <sub>3</sub> COOH	11.50 mL	23 mL – 30	46 MI



conc		mL	
HNO3 conc	1.00 mL	2.00 mL	3.50 MI

Esta solución se utilizará para determinar la concentración de Ca, Mg, K, P en las Diferentes muestras de suelo.