

**CALIBRACIÓN DE DOS MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE LA
FERTILIDAD DE SUELOS CULTIVADOS CON YUCA (*Manihot
esculenta Crantz*) EN EL TRÓPICO HÚMEDO DE COSTA RICA**



LOURDES MARÍA SALAZAR PORRAS

Trabajo Final de Graduación presentado a la Escuela de Agronomía como
requisito parcial para optar al grado de Licenciatura en Ingeniería en Agronomía

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
SEDE REGIONAL SAN CARLOS**

2015

CALIBRACIÓN DE DOS MÉTODOS DE DIAGNÓSTICO DE LA FERTILIDAD DE SUELOS CULTIVADOS CON YUCA (*Manihot esculenta Crantz*) EN EL TRÓPICO HÚMEDO DE COSTA RICA

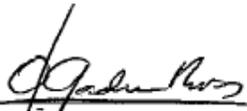
TEC | Tecnológico de Costa Rica



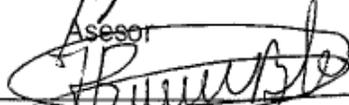
LOURDES MARÍA SALAZAR PORRAS

Aprobado por los miembros del Tribunal Evaluador:

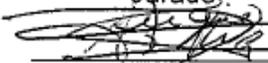
Ing. Agr. Arnoldo Gadea Rivas, M.Sc.


Asesor

Ing. Agr. Parménides Furcal Beriguete, M.Sc.


Jurado

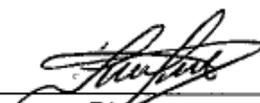
Ing. Agr. Sergio Torres Portuguez, M.Sc.


Jurado

Ing. Agr. Carlos Ramírez Vargas, Ph.D


Coordinador
Trabajos Finales de Graduación

Ing. Agr. Alberto Camero Rey, M.Sc.


Director
Escuela de Agronomía



DEDICATORIA

A Dios, por la salud, la sabiduría y el entendimiento que me brindó, para poder terminar esta etapa de formación profesional.

A mi padre Eladio Salazar Rojas y a mi madre Virginia Porras Núñez, por ser mi gran ejemplo a seguir, porque mediante su apoyo, consejos y amor me han impulsado siempre a alcanzar las metas que me proponga.

A mis hermanos Carlos Salazar Porras y José Eladio Salazar Porras, por ser siempre mis cómplices, por el apoyo brindado y el amor incondicional que siempre me han demostrado.

A mis abuelos, tíos abuelos, tíos y primos porque siempre han estado pendientes y me hacen sentir tan orgullosa de la familia tan linda a la que pertenezco.

A mi amigo el Ing. Alonso Quesada Bolaños, por el tiempo compartido, por los buenos recuerdos y porque fue y será siempre un ejemplo de valentía, paciencia, compañerismo, positivismo, fe y amor por los seres queridos.

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme cumplir esta etapa de formación.

A mi familia por el apoyo incondicional que siempre me han brindado y por ser la principal fuente de inspiración para seguir adelante.

A Luis Esteban Sánchez Villalta por su ayuda y apoyo en la realización de este trabajo.

A mis compañeros de generación y demás amigos que hice en este tiempo de estudio, por el apoyo brindado en la parte académica y haber compartido bonitos momentos en la parte social.

A mi profesor asesor, el Ing Agr. Arnoldo Gadea Rivas, MSc, por todo el conocimiento compartido, por la ayuda en la brindada, por las ideas y aportes para la elaboración, redacción y finalización correcta de este trabajo.

A mis profesores jurado, el Ing. Agr. Parménides Furcal Beriguete, MSc y el Ing. Agr. Sergio Torres Portugal, MSc por la ayuda brindada para el desarrollo y corrección de este trabajo.

Al personal del Laboratorio de Análisis Agronómicos del Tecnológico de Costa Rica, Sailim Rojas Valerio, Diana Vargas Méndez y Fabián Vargas Hernández, por el apoyo que me dieron en la realización de este trabajo, el tiempo invertido, la calidad del trabajo realizado y el trato agradable que tuvieron conmigo.

Contenido

	Página
RESUMEN	vii
ABSTRACT	ix
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Justificación	2
1.2. OBJETIVOS.....	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos.....	3
2. MARCO DE REFERENCIA	4
2.1. Fertilidad de los suelos	4
2.2. Clasificación de algunos suelos.....	7
2.2.1. Andisoles.....	7
2.2.2. Inceptisoles	9
2.2.3. Ultisoles.....	9
2.3. Análisis de fertilidad en laboratorio	11
2.3.1. Análisis de tejidos vegetales	11
2.3.2. Análisis de suelo.....	14
2.4. Soluciones extractoras.....	17
2.4.1. Mehlich 3.....	18
2.4.2. KCl-Olsen Modificada.....	20
2.5. Correlación.....	21
2.6. Calibración	23
2.7. Cultivo de la yuca.....	25
3. MATERIALES Y MÉTODOS	30
3.1. Ubicación del estudio.....	30
3.2. Método de Muestreo	32
3.3. Preparación de muestras para análisis químico de suelo y de tejidos	33
3.4. Análisis químico de las muestras de Suelo.....	34
3.4.1. Cloruro de Potasio 1N (KCl).....	35

3.4.2.	Olsen Modificada (Olsen mod.)	35
3.4.3.	Mehlich 3 (ME 3)	36
3.5.	Análisis químico de los tejidos vegetales	38
3.5.1.	Determinación de elementos menores (Cu, Mn, Fe y Zn)	38
3.5.2.	Determinación de elementos catiónicos (Ca, Mg y K)	38
3.5.3.	Determinación de fósforo (P).....	38
3.6.	Determinación de la cantidad de nutrimentos totales absorbidos por el cultivo de yuca.....	39
3.7.	Correlación entre soluciones extractoras	39
3.8.	Nivel crítico	39
4.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
4.1.	Evaluación de la fertilidad de los suelos estudiados	40
4.1.1.	Extracción con KCl 1 N y Olsen modificada	42
4.1.2.	Extracción con Mehlich 3.....	44
4.2.	Contenidos de nutrientes en suelos cultivados con yuca, evaluados con las soluciones extractoras Mehlich 3, KCl y Olsen modificada	48
4.3.	Correlación entre soluciones extractoras	53
4.4.	Cantidad de nutrimentos totales absorbidos por el cultivo de yuca	62
4.5.	Correlación entre la absorción por la planta y las cantidades extraídas de Ca, Mg, K, Cu, Mn, Fe, Zn y P por las soluciones extractoras KCl-Olsen modificada y Mehlich 3.	66
4.6.	Determinación de niveles críticos	73
5.	CONCLUSIONES	84
6.	RECOMENDACIONES	86
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	87
8.	ANEXOS.....	95

Lista de Cuadros

Cuadro 1. Parámetros que se evalúan en un análisis de suelo para determinar la fertilidad del mismo (Kass 1996):	6
Cuadro 2. Niveles críticos de parámetros del suelo para el cultivo de la yuca (Cadavid 2008).....	25
Cuadro 3. Características agronómicas de la variedad de yuca Valencia, según Chavarría (2003).	27
Cuadro 4. Identificación, localidad, acidez intercambiable (cmol(+)/L) y pH de los suelos en estudio.....	40
Cuadro 5. Coeficientes de correlación entre el pH del suelo y el contenido de nutrientes en los suelos muestreados, analizados con la soluciones extractoras Mehlich 3 y KCl -Olsen modificada.....	41
Cuadro 6. Concentración promedio de nutrimentos en el suelo de los sitios de muestreo, evaluados con las soluciones extractoras KCl y Olsen modificada en el Laboratorio de Análisis Agronómicos (LAA) del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.....	43
Cuadro 7. Concentración promedio de nutrimentos en el suelo de los sitios de muestreo, evaluados con la solución extractora Mehlich 3 en el LAA del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.	45
Cuadro 8. Contenidos de Ca, Mg, K obtenidos con las soluciones extractoras KCl 1 N, Olsen modificada y Mehlich 3, en los diferentes sitios de muestreo evaluados en el LAA del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos y valores reportados en la literatura.	49
Cuadro 9. Contenidos de Cu, Mn y Fe obtenido con las soluciones extractoras Olsen modificada y Mehlich 3, en los diferentes sitios de muestreo, evaluados en el Laboratorio de Análisis agronómicos del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos y valores reportados en la literatura.....	51
Cuadro 10. Contenidos de Zn y P obtenidos con las soluciones extractoras Olsen modificada y Mehlich 3, en los diferentes sitios de muestreo, evaluados en el Laboratorio de Análisis agronómicos del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos y valores reportados en la literatura.	52
Cuadro 11. Cantidad de nutrimentos extraídos (kg) por las plantas de yuca, para producir una tonelada de MS.	62

Cuadro 12. Cantidad de nutrimentos extraídos (kg) para producir una tonelada de MS de raíz de yuca.....	64
Cuadro 13. Cantidad de nutrimentos extraídos (kg) para producir una tonelada de raíz de yuca en peso fresco.	65
Cuadro 14. Coeficientes correlación entre el contenido de Ca y Mg absorbidos por hoja, tallo, raíz y total de plantas de yuca y la cantidad de estos elementos extraídas del suelo con las soluciones KCl y Mehlich 3 en las diferentes localidades estudiadas.....	66
Cuadro 15. Coeficientes de correlación entre el contenido de K y Cu absorbidos por hoja, tallo, raíz y total de plantas de yuca y la cantidad de K y Cu extraída del suelo con las soluciones Olsen mod y Mehlich 3 en los diferentes sitios de muestreo.....	69
Cuadro 16. Coeficientes de correlación entre el contenido de Mn y Fe absorbidos por hoja, tallo, raíz y total de plantas de yuca y la cantidad de Mn y Fe en el suelo según las soluciones extractoras Olsen modificada y Mehlich 3 en los diferentes sitios de muestreo. ...	70
Cuadro 17. Coeficientes de correlación entre el contenido de Zn y P absorbidos por hoja, tallo, raíz y total de plantas de yuca y la cantidad de Zn y P en el suelo extraído con las soluciones Olsen modificada y Mehlich 3 en los diferentes sitios de muestreo.	72

Lista de Figuras

- Figura 1.** Principios básicos de la calibración y correlación de soluciones extractoras, según el método de Cate y Nelson (Bertsch *et al* 2005).....23
- Figura 2.** Tipo de plantas muestreadas, A: señorita, B: MBRA, C: Valencia.....33
- Figura 3.** Proceso de secado y almacenamiento de la muestra de suelo. A: secado al aire libre, B: almacenamiento de las muestras en bolsas plásticas luego de molidas.33
- Figura 4.** Proceso de secado, molido y almacenamiento de las muestras de tejido vegetal. A: separación de partes, B: pesado, C: bolsas con muestras secas, D: molino para tejido vegetal, C: muestras molidas..... 34
- Figura 5.** Proceso extracción y análisis con la solución KCl 1N. A: medición 2,5 ml de suelo, B: Agitador, C: filtrado de la muestra, D: toma de alícuotas, E: análisis con el espectrofotómetro de absorción atómica..... 35
- Figura 6.** Proceso de extracción y análisis con la solución Olsen modificada. A: medición de 2,5 ml de suelo, B: agitación de la muestra con la solución, C: filtrado de la mezcla, D: toma de la alícuota, E: análisis con el espectrofotómetro de absorción atómica.....36
- Figura 7.** Proceso de extracción y análisis con la solución Mehlich 3. A: medición de 2,5 ml de suelo, B: agitación de la muestra con la solución, C: filtrado de la mezcla, D: toma de la alícuota, E: análisis con el espectrofotómetro de absorción atómica.....37
- Figura 8.** Proceso de análisis químico de los tejidos vegetales (no aplica para P). A: muestras de tejido molidas, B: 0,5g de tejido en crisoles, C: muestra incinerada, HCl al y agua destilada, D: análisis con el espectrofotómetro de absorción atómica, E: resultado del análisis.....38
- 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, evaluados en el LAA del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.....54
- Figura 10.** Diagrama de dispersión de Mg extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, evaluados en el LAA del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.....55

Figura 11. Diagrama de dispersión de K extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, evaluados en el LAA del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos. ¡Error! Marcador no definido.	
Figura 12. Diagramas de dispersión de cobre, manganeso, zinc y hierro extraídos con los reactivos Mehlich 3 y Olsen Modificada, en los diferentes sitios de muestreo, evaluados en el LAA del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.	58
Figura 13. Diagrama de dispersión de P extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, evaluados en el LAA del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.	61
Figura 14. Diagrama de dispersión del Ca y Mg absorbido por las plantas de yuca y la cantidad de Ca y Mg en el suelo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo.	67
Figura 15. Diagrama de dispersión del Mn y Fe absorbido por las raíces de yuca y la cantidad de Mn y Fe en el suelo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo.	71
Figura 16. Gráficos diseñados para la determinación del nivel crítico de Ca y Mg con las soluciones extractoras Mehlich 3 y KCl en suelos cultivados con yuca, por medio de la metodología Cate y Nelson (1965).	74
Figura 17. Gráficos diseñados para la determinación del nivel crítico de K y Cu con las soluciones extractoras Mehlich 3 y Olsen modificada en suelos cultivados con yuca, por medio de la metodología Cate y Nelson (1965).	76
Figura 18. Gráficos diseñados para la determinación del nivel crítico de Mn y Fe con las soluciones extractoras Mehlich 3 y Olsen modificada en suelos cultivados con yuca, por medio de la metodología Cate y Nelson (1965).	79
Figura 19. Gráficos diseñados para la determinación del nivel crítico de Zn y P con las soluciones extractoras Mehlich 3 y Olsen modificada en suelos cultivados con yuca, por medio de la metodología Cate y Nelson (1965).	81

RESUMEN

El objetivo principal del presente estudio fue calibrar los métodos de diagnóstico de la fertilidad de suelos KCI-Olsen modificada y Mehlich 3, en suelos cultivados con yuca (*Manihot esculenta Crantz*).

Se muestrearon 12 lotes ubicados en el trópico húmedo de Costa Rica, cultivados con las variedades conocidas como *MBRA 383*, *Valencia* y *Señorita* al momento de la cosecha. De cada sitio de muestreo se extrajeron cuatro plantas y una muestra de suelo compuesta por varias submuestras de los primeros 30 cm de profundidad. Cada planta se separó en hojas, tallos y raíces. A tres plantas de cada lugar se les realizó el análisis de contenido total de nutrimentos de cada una de sus partes. Las 12 muestras de suelo se analizaron tres veces con cada solución extractora para determinar el contenido de nutrientes en el suelo. Cada repetición se realizó en días diferentes con la respectiva calibración del equipo de análisis.

Los resultados se analizaron en la hoja de cálculo *Microsoft Office Excel 2013*. La solución Mehlich 3 extrajo mayor cantidad de Ca, K y Mn que el binomio KCI-Olsen modificada, en los diferentes sitios muestreados, mientras que esta extrajo mayor cantidad de Mg, Cu, Fe, Zn y P. Las cantidades de Ca, Mg, K, Cu, Mn y Zn obtenidas con las soluciones extractoras presentaron correlaciones altamente significativas (p -valor $< 0,001$). Las cantidades de Fe fueron significativas con una confianza de 95% (p -valor $< 0,05$). La correlación de las cantidades de fósforo extraídas con las soluciones Olsen modificada y Mehlich 3 no fue significativa.

Sólo se obtuvo correlaciones lineales significativas al comparar la extracción química de Mn con la concentración de Mn tallo, al comparar la extracción química de Zn con Mehlich 3 con la concentración de Zn en hojas y al comparar la extracción química de Zn con Olsen modificada con la concentración de Zn en tallos. No se pudo determinar los niveles críticos para el cultivo de yuca con las soluciones extractoras estudiadas, porque la dispersión de los puntos de rendimiento absoluto con respecto a la concentración de nutrientes en los sitios de

muestreo presentaron muy poca variabilidad, lo cual no permitió la correcta aplicación del método gráfico Cate y Nelson.

No se determinó una tendencia en el comportamiento de la cantidad de nutrientes absorbidos y el rendimiento del cultivo, con relación a la fertilidad de los suelos evaluados y las soluciones extractoras KCl-Olsen modificada y Mehlich 3.

En promedio para producir una tonelada de raíces de yuca fresca, el cultivo extrae durante todo el ciclo 4,69 kg de N; 1,75 kg de Ca; 0,85 kg de Mg; 4,74 kg de K; 0,36 kg de P; 0,05 kg de Cu; 0,26 kg de Mn; 0,55 kg de Fe y 0,24 kg de Zn.

Palabras claves: Absorción de nutrientes, Rendimiento de yuca, Fertilidad de suelo, Niveles críticos de nutrientes, *Manihot esculenta* Crantz, KCl-Olsen modificada, Mehlich 3.

ABSTRACT

The main objective of this study was to calibrate diagnostic methods of soil fertility KCl-modified Olsen and Mehlich 3, soils cultivated with cassava (*Manihot esculenta Crantz*).

12 lots located in the humid tropics of Costa Rica, cultivated varieties *MBRA 383*, *Valencia* and *Miss* to harvest age were sampled. From each sampling site were extracted four plants and a sample of soil composed of several subsamples of 0-30 cm depth. Each plant was separated in leaves, stems and roots, three floors of each place analysis them the leaf of each of its parts. 12 soil samples three times with each extracting solution were analyzed to determine the content of nutrients in the soil, each repetition was done on different days with the respective calibration analysis team.

The results were analyzed in the spreadsheet *Microsoft Office Excel 2013*. solution Mehlich 3 extracts a greater quantity of Ca, Mg, K, Cu, Mn, Fe and Zn that the binomial KCl-modified Olsen, in the different sites sampled. The amounts of Ca, Mg, K, Cu, Mn and Zn obtained with the extraction solutions showed highly significant correlations (p-value <0.001), the amounts of Fe were significant with a confidence of 95% (p-value <0, 05) correlating the amounts of phosphorus extracted with Olsen mod solutions and ME 3 were not significant.

Only obtained linear correlations significant when comparing the chemical extraction of Mn with the concentration of Mn stem, when comparing the chemical extraction of Zn with Mehlich 3 with the concentration of Zn in leaves and to compare the chemical extraction of Zn with Olsen modified with the concentration of Zn in stems. We could not determine critical levels for the cultivation of cassava with the extractants studied, because the dispersion of the points of absolute performance with respect to the concentration of nutrients in the sampling sites showed little variability, which did not allow the proper application of graphical method Cate and Nelson.

On average to produce a ton of fresh cassava roots, crop extracts during the entire 4,69 kg N; 1,75 kg of Ca; 0,85 kg Mg; 4,74 kg of K; 0,36 kg of P; 0,05 kg of Cu; 0,26 kg Mn; 0,55 kg of Fe and Zn 0,24 kg.

Keywords: Absorption of nutrients, cassava yield, fertility of soil, critical levels of nutrients, *Manihot esculenta Crantz*, KCl-modified Olsen, Mehlich 3.

1. INTRODUCCIÓN

La fertilidad de los suelos es un factor determinante en la magnitud de la producción agrícola, por lo que es de gran importancia evaluar la cantidad de nutrientes y determinar su disponibilidad en la solución de suelo, para así tener información, poder manejar y además recomendar programas de fertilización diferenciados (Morales 2001).

El diagnóstico de la fertilidad química del suelo se puede realizar mediante análisis químico del suelo, análisis de tejido vegetal, utilizando métodos microbiológicos y biológicos o combinando algunos de estos métodos. En el caso del análisis químico de suelos, se requiere la utilización de soluciones extractoras las cuales simulan la absorción que realiza la planta de los nutrimentos. Sin embargo, se debe correlacionar los valores de nutrientes obtenidos con parámetros de crecimiento de los cultivos, ya sea nivel de invernadero o campo con el fin de darle significancia a los valores obtenidos en el análisis. La realización de estudios de correlación permite realizar interpretaciones y recomendaciones correctas de fertilizantes en los cultivos utilizados (Ramos 2003).

Molina y Bornemisza (2006) mencionan que la calibración a nivel de campo establece los niveles críticos definitivos para un método de extracción previamente seleccionado, y que constituye la fase más importante en los estudios de calibración. Vargas *et al* (1992) indican que conocer las cantidades de nutrimentos que pueden ser extraídas por diferentes metodologías de análisis de suelos, permite determinar el comportamiento de cada solución y las semejanzas entre ellas; asimismo, proporciona un mayor criterio para la evaluación del estado nutricional de los suelos.

Furcal *et al* (2014) mencionan que según estadísticas, el cultivo de la yuca es una alternativa, dentro de los productos agrícolas no tradicionales, para los agricultores de la región Huetar Norte y Atlántica de Costa Rica y según las

estadísticas socioeconómicas es de gran importancia para el sector agrícola de la región Huetar Norte. Con respecto a este cultivo Cadavid (2008), indica que la yuca es una planta de aprovechamiento integral, porque sus raíces y hojas son fuentes de carbohidratos y proteínas, además que las raíces son utilizadas en la alimentación humana de diferentes formas, como complemento en la dieta de animales y puede ser empleada como materia prima en la industria.

Conociendo esto y con el fin de ampliar la información en las recomendaciones del cultivo de la yuca, el presente estudio tiene como objetivo calibrar los métodos de diagnóstico de la fertilidad KCL-Olsen modificada y Mehlich 3 en 12 suelos cultivados con yuca (*Manihot esculenta Crantz*) del trópico húmedo de Costa Rica, evaluando la efectividad de las soluciones extractoras en la determinación del contenido de nutrientes disponibles en el suelo, aplicando un método para la determinación de los niveles críticos de Ca, Mg, K, Cu, Mn, Fe, Zn y P con esas soluciones y relacionado la absorción de nutrientes y rendimiento del cultivo con la fertilidad de los suelos evaluados con esas soluciones extractoras.

1.1. Justificación

Los análisis químicos de suelos son la metodología más empleada en el país como herramienta para recomendar la fertilización de los cultivos. Con el fin de que una recomendación de fertilización tenga validez, se debe utilizar soluciones extractoras que extraigan la fracción de nutriente disponible en el suelo y que esta correlacione con los rendimientos de un determinado cultivo; para así poder seleccionar niveles críticos del elemento en el suelo para determinado cultivo.

Los niveles críticos que se utilizan principalmente en el país para interpretar los análisis de suelo fueron establecidos con base en diferentes ensayos a nivel de invernadero utilizando los cuatro principales órdenes de suelo del país y el cultivo de sorgo como planta indicadora (Meléndez y Bertsch 2012).

Conociendo la importancia del cultivo de la yuca para la región del Trópico Húmedo de Costa Rica se buscó complementar estudios realizados en el cultivo de la yuca, tanto de absorción de nutrientes y rendimiento, así como estudios de

calibración y correlación de las soluciones extractoras KCl-Olsen modificada y Mehlich 3; ya que no se han determinado en el país niveles críticos específicos para este cultivo, ni se han realizado este tipo de estudios de calibración en campo con este cultivo.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo general

Calibrar dos métodos de diagnóstico de la fertilidad de suelos cultivados con yuca (*Manihot esculenta Crantz*).

1.2.2. Objetivos específicos

- Evaluar la efectividad de las soluciones extractoras Mehlich 3 y KCl-Olsen modificada en la determinación del contenido de nutrientes disponibles en suelos del trópico húmedo de Costa Rica.
- Determinar los niveles críticos de Ca, Mg, K, Cu, Mn, Fe, Zn y P utilizando las soluciones extractoras Mehlich 3 y KCl-Olsen modificada en suelos cultivados con yuca (*Manihot esculenta Crantz*).
- Relacionar la absorción de nutrientes y rendimiento en el cultivo de yuca (*Manihot esculenta Crantz*) con la fertilidad de los suelos, utilizando dos soluciones extractoras.

2. MARCO DE REFERENCIA

2.1. Fertilidad de los suelos

La fertilidad de un suelo puede definirse como la capacidad que tiene el mismo de proveer las condiciones necesarias para que un cultivo pueda crecer y desarrollarse normalmente (Sánchez 2007, Palacios 2013, Astier 2003, Bernal 2003).

Según Bernal (2003), la fertilidad del suelo está determinada por 3 factores, los cuales son:

- Factores físicos: dentro de estos se encuentran la porosidad, aireación, estructura, capacidad de retención de agua, entre otros; estos factores condicionan principalmente el desarrollo del sistema radicular de la planta y el aporte hídrico del suelo al cultivo.
- Factores químicos: tales como la capacidad de cambio de cationes (CIC), pH, materia orgánica, macronutrientes y micronutrientes; estos factores determinan la cantidad de nutrientes que posee el suelo y la disponibilidad de esos nutrientes para los cultivos.
- Factores Biológicos: corresponde a la actividad microbiana presente en el suelo, ya que la biomasa microbiana, es el principal motor de la descomposición de la materia orgánica porque la utiliza como sustrato y fuente de energía, por lo que interviene en procesos como transformaciones biológicas de nutrientes, humificación y mineralización, asimismo en la producción de enzimas y los ciclos de C y de N.

Se debe tener en cuenta que estos factores no actúan independientemente, sino que deben estar armónicamente interrelacionados, por ejemplo un suelo puede poseer muy buenas características químicas, pero si sus características físicas y biológicas son deficientes la fertilidad del suelo se verá disminuida enormemente

La fertilidad de un suelo no debe tomarse como el único indicador para determinar si es factible o no el crecimiento de un cultivo en determinado sustrato;

se deben tomar en cuenta factores como el clima, entre otros, que pueden generar que un suelo con buena fertilidad no sea capaz de producir buenas cosechas y por lo tanto sea improductivo (Sánchez 2007).

Con respecto a la constitución del volumen general del suelo, se dice que una proporción ideal para una buena fertilidad está dada por 45-48% de partículas minerales, 5-2% de materia orgánica, 25% de aire y 25% de agua para asegurar una buena fertilidad, sin embargo hay que tener en cuenta las situaciones antes mencionadas (Sánchez 2007).

Bernal (2003) menciona que la materia orgánica es un factor clave en la determinación de la fertilidad de un suelo porque esta actúa sobre la porosidad, estabilidad de agregados, aporta nutrientes mediante los procesos de mineralización y que actúa como una reserva nutricional a través de su capacidad de intercambio catiónico, variando las propiedades químicas y también actúa sobre los factores biológicos porque mantiene la actividad microbiana del suelo.

Según Schalatter (1993), el concepto de fertilidad de suelos tiene dos formas más conocidas de ser presentado, la forma de la Escuela Norteamericana que la define como **el estado del suelo con respecto a la cantidad y disponibilidad de los elementos necesarios para el crecimiento de las plantas**+lo cual según el autor quiere decir que el rendimiento de las plantas depende del nivel de fertilidad del suelo, pero que también hay que tener en cuenta factores como el tipo de planta o las condiciones de crecimiento ya que estas pueden afectar significativamente el rendimiento. La otra forma del concepto de fertilidad de suelo es la utilizada por la Escuela Alemana que la define como **la capacidad del suelo de servir como lugar de desarrollo a las plantas y de producir un rendimiento**+es decir que el rendimiento vegetal depende de factores como: el espacio de arraigamiento, los regímenes de agua, aire y calor y el régimen de elementos nutritivos, vistos estos factores como una combinación integral.

Kass (1996), menciona que la fertilidad de un suelo corresponde a una serie de parámetros que se evalúan aplicándoles puntuaciones basadas en escalas previamente establecidas al analizar diferentes suelos del país.

Para Nicolodi *et al* (2009), los parámetros más utilizados para diagnosticar e interpretar la fertilidad de los suelos de una región determinada son: pH, materia orgánica, fósforo y potasio.

Oliveira *et al* (2006), cita tres aspectos que se deben evaluar para determinar la fertilidad:

- Análisis de suelo
- Análisis de las plantas
- Experiencias de campo

Según Kass (1996), para determinar la fertilidad de los suelos se deben evaluar ciertos parámetros en el momento de realizar un análisis de suelos, esos parámetros se describen en el cuadro 1.

Cuadro 1. Parámetros que se evalúan en un análisis de suelo para determinar la fertilidad del mismo (Kass 1996):

Parámetro	Unidad de medición
Valor de pH	Unidades de pH, escala de 0 a 14
Materia Orgánica	Porcentaje
Nitrógeno orgánico total	Porcentaje
Carbono orgánico	Porcentaje
Relación C/N	Adimensional
Fósforo aprovechable	Partes por millón (ppm)
Bases intercambiables (K, Ca, Mg)	Milliequivalentes por 100ml de suelo (meq/100ml de suelo)
Aluminio extraíble	Milliequivalentes por 100ml de suelo (meq/100ml de suelo)

La principal aplicación de conocer la fertilidad del suelo es mejorar el rendimiento de los cultivos a través de la nutrición vegetal, mediante la recomendación y aplicación de fertilizantes y correctivos (Nicolodi *et al* 2009).

2.2. Clasificación de algunos suelos

Los suelos donde se realizó los muestreos corresponden al Trópico Húmedo de Costa Rica, donde se pueden encontrar principalmente los siguientes órdenes:

2.2.1. Andisoles

Distribución, extensión y uso

Son suelos derivados de materiales volcánicos, alcanzan el 14,4% del territorio nacional, ocupan las zonas centrales del país, el Valle Central y las faldas de sus volcanes, las faldas de la cordillera de Guanacaste, la región de Coto Brus y la frontera con Panamá, así como algunas regiones de la Zona Atlántica y Norte. Estos suelos son utilizados para la producción de cultivos tradicionales y no tradicionales de exportación como flores, helechos, fresa, así como para ganadería de leche en altura (Bertsch *et al* 1993).

En la Zona Norte son muy favorables para la producción de raíces y tubérculos así como una gama de ornamentales exóticos (Henríquez *et al* 2014).

Un lugar donde se presenta este tipo de suelos es el distrito de la Fortuna de San Carlos.

Origen

Estos suelos se originan a partir de deposiciones de material volcánico, por lo que son rejuvenecidos y enriquecidos nutricionalmente en forma constante. La profundidad de estos suelos depende de la magnitud de las deposiciones (Bertsch *et al* 1993).

Propiedades mineralógicas

La arcilla dominante en este tipo de suelo es la alofana, un coloide amorfo e hidratado que aparece como producto obligatorio de la descomposición de las cenizas volcánicas en zonas húmedas y que por ser inestable y muy reactiva le da

comportamientos muy peculiares a estos suelos, en lugares donde la zona seca es marcada la alofana llega a formar una arcilla cristalina denominada haloisita, típica de suelos pardo rojizos de Alajuela, Heredia y Palmares (Bertsch *et al* 1993, Henríquez *et al* 2014).

Propiedades físicas

Estos suelos presentan muy buena estructura por lo que propician el buen drenaje, pero a su vez, presentan una buena retención de humedad, poseen una baja densidad aparente y baja resistencia al corte tangencial, por lo que son fáciles de arar (Henríquez *et al* 2014).

La textura de estos suelos varía de acuerdo a la posición con respecto al volcán, en zonas cercanas los suelos son de textura franco arenosa o más gruesa, en las partes intermedias se presentan texturas franco limosas o francas y en las zonas más bajas se presentan texturas arcillosas, principalmente en el horizonte B. Cabe destacar que conforme la textura se hace más fina se presenta mayor fijación de nutrimentos (Henríquez *et al* 2014).

Propiedades nutricionales

Estos suelos se catalogan de acuerdo a su nutrición como de fertilidad moderada, donde su potencial se define por las características de las cenizas que los forman. Estos suelos presentan alta fijación de P que por lo general supera el 70% y llega fácilmente a valores de 95% lo cual constituye la principal limitante de este tipo de suelo. Asimismo el B y el S, por su condición de aniones, pueden ser fijados, por lo se muestra respuesta a la aplicación de estos elementos (Bertsch *et al* 1993).

Como parte del manejo de estos suelos se recomienda la aplicación de fórmulas ricas en fosfatos solubles, en grandes cantidades y en forma localizada, o encalados livianos que favorezcan la liberación del P orgánico, esto indiferentemente del cultivo (Henríquez *et al* 2014).

2.2.2. Inceptisoles

Origen y distribución

Estos suelos se encuentran en zonas ligeramente onduladas y planas y se generan por el efecto de meteorización que sufren los sedimentos aluviales, coluviales y coluvioaluviales depositados cuando permanecen sin recibir nuevos aportes por un cierto período de tiempo (Henríquez *et al* 2014).

Las localidades Muelle de San Carlos, Canta Rana de Aguas Zarcas y Palmitas de Cariari presentan este tipo de Suelo.

Extensión y uso

Estos suelos son de origen relativamente reciente y representan cerca del 39% de los suelos de país, estos se encuentran en asocio con otros órdenes de suelo, de modo que es frecuente encontrar Inceptisoles con características líticas, fluvénticas, ándicas, entre otras. Este orden tiene características poco acentuadas, estos suelos son poco problemáticos, permiten una amplia gama de actividades de producción agropecuarias, tales como cultivo de raíces y tubérculos (Bertsch *et al* 1993).

Propiedades

No presentan predominancia de ningún material en especial, por lo general lo que se encuentra en ellos son mezclas de varios tipos de arcillas y minerales primarios, requieren de buenos drenajes. En cuanto a nutrición los Inceptisoles desarrollados a partir de materiales volcánicos depositados en forma aluvial, pueden presentar menor respuesta a la aplicación de K (Henríquez *et al* 2014).

2.2.3. Ultisoles

Distribución, extensión y uso

Estos suelos por lo general ocupan las partes altas de las cuencas y las posiciones más altas de las pendientes (las zonas que no han estado sujetas a proceso alguno de rejuvenecimiento, y por el contrario han estado sometidas a constante livixiación). Son de los suelos más viejos y meteorizados del país,

representa el 21% del territorio nacional, en estos se produce prácticamente toda la piña del país, además de cítricos, mango, aguacate, palmito, tubérculos, raíces, caña de azúcar, entre otros (Bertsch *et al* 1993, Henríquez *et al* 2014).

Las localidades, El Laurel de Pocosol, San Joaquín de Cutris, Paso Real de Los Chiles, Banderas de Los Chiles, Guayabito de Guatuso, Cerro Negro de Sarapiquí, entre otras, son lugares con presencia de este tipo de suelo.

Origen

Estos suelos se originan por la exposición prolongada de cualquier tipo de material parental a altas cantidades de precipitación, en esta condición el Si se lava, mientras que el Al y Fe se concentran; este último se oxida por lo que le confiere coloraciones pardo rojizas o rojizas a estos suelos (Bertsch *et al* 1993).

La principal característica de estos suelos es la formación de un horizonte argílico (arcilla iliviada que migra del horizonte superficial al profundo). La coloración de estos suelos se debe principalmente al grado de hidratación del Fe el cual, en su forma oxidada, confiere tonalidades pardo rojizas o rojizas y en su forma hidratada colores pardo amarillentos o amarillentos (Henríquez *et al* 2014).

Propiedades mineralógicas

Mineralógicamente, predomina la presencia de arcillas 1:1 (principalmente caolinita) y óxidos de Fe y Al, los cuales se agregan entre sí dando estructuras más desarrolladas como la pseudoarena. Dichos agregados le confieren una condición física excelente, favorecen la lixiviación de nutrimentos, especialmente las bases (Ca, Mg, K) lo que conduce a acentuados problemas de acidez y restringen la superficie específica, por lo que ofrecen una muy pobre capacidad de intercambio de cationico efectivo, generando una muy baja fertilidad (Bertsch *et al* 1993, Henríquez *et al* 2014).

Propiedades nutricionales

El problema de acidez de estos suelos puede reducirse mediante el encalado con lo que se aumenta su fertilidad, o a través de la selección de especies, variedades o cepas tolerantes a la acidez y a bajo contenido de P, del mismo

modo una fertilización abundante y fraccionada de NPK puede sostener la producción en dichos suelos, siempre y cuando se complemente con la adición de elementos menores en el momento oportuno (Bertsch *et al* 1993, Henríquez *et al* 2014).

2.3. Análisis de fertilidad en laboratorio

Los análisis químicos permiten realizar una evaluación de la fertilidad y a la vez diagnosticar problemas de nutrición, además de realizar recomendaciones de fertilización (Molina y Cabalceta 1990).

Para determinar la fertilidad se realizan análisis de tejidos vegetales y análisis de suelo, sin embargo, para realizar estas pruebas los laboratorios deben seleccionar un método de análisis que sea apropiado y efectivo y a su vez cumpla con los criterios establecidos por Bray (1948) citado por Molina y Cabalceta (1990); Gadea (1993), los cuales son:

- El método debe extraer todas las formas disponibles o una parte proporcional del nutriente en condiciones diferentes.
- Debe ser rápido, reproducible y de bajo costo.
- Las cantidades de nutrimento extraídas deben correlacionar con el crecimiento y respuesta de cada cultivo en diferentes condiciones.

Asimismo el método de análisis debe ser rápido y de bajo costo y que permita ser utilizado ampliamente por agricultores y empresas (Molina 2007).

2.3.1. Análisis de tejidos vegetales

El análisis de tejido vegetal se basa en un principio muy sencillo referido a que el funcionamiento y producción adecuada de una planta depende de que cada uno de sus tejidos tenga una determinada cantidad de nutrientes; por lo que si se conocen esas concentraciones en determinado órgano y a una edad específica, es posible establecer una comparación entre esos valores y los obtenidos al muestrear ese mismo tejido a la misma edad y así determinar si la planta está bien nutrida o presenta deficiencia de algún nutriente (Bertsch 2007).

Para Aldana (2011), este análisis consiste en la determinar la cantidad precisa que contiene la planta de once elementos esenciales, dos elementos no esenciales (Sodio (Na) y Aluminio (Al)) y la determinación del Molibdeno que es opcional; de modo que permite definir el estado nutricional de una planta o el flujo de sus nutrientes hacia la parte aérea en la etapa de crecimiento, asimismo detectar la denominada *hambre oculta* y confirmar síntomas visuales de deficiencia.

INEA (2014), menciona que el análisis foliar determina la cantidad de nutrientes que han sido absorbidos por la planta y sirve para determinar si existe carencia de alguno en los cultivos. Aunado a esto, señala que los parámetros aconsejados para determinar el nivel nutricional de las plantas son: nitrógeno, fósforo, boro y cationes (Ca, Mg, Na, K, Fe, Mn, Cu, Zn), los cuales son los once elementos esenciales mencionados por Aldana (2011).

Bertsch (2007) indica que ***antes de hacer un análisis foliar hay que tener a la mano la o las tablas de niveles críticos foliares que existan para el cultivo que se desea muestrear, para saber con cual tejido y edad fueron hechos***, lo que implica que de querer realizar una análisis foliar, se deben tomar muestras de tejido que puedan ser comparadas válidamente.

Según Aldana (2011), los análisis foliares se utilizan para:

- Confirmar un diagnóstico a partir de síntomas visibles.
- Identificar carencias ocultas que aún no producen síntomas.
- Ubicar áreas de suelo con deficiencias de nutrientes.
- Determinar cuáles nutrientes ha absorbido la planta.
- Aprender sobre interacciones entre nutrientes.
- Estudiar el funcionamiento de los nutrientes en las plantas.
- Sugerir estudios o pruebas adicionales.

Muestreo de tejido vegetal

Para que el análisis foliar sea una herramienta útil en el diagnóstico nutricional es necesario que se efectúe un buen muestreo (Bertsch 2007).

Aldana (2011), establece que para considerar una muestra válida se deben seguir los siguientes aspectos generales:

- Muestrear plantaciones que se encuentren en etapa de producción o aquellas que sean sospechosas de tener problemas nutricionales.
- Hacer el muestreo cuando el contenido de nutrientes en la hoja es constante es decir en etapa fenológica F2 o 50% flor abierta.
- Las hojas a muestrear deben ser de la zona media del cultivo.

Se debe muestrear el tejido que sea más representativo, el cual no siempre son las hojas, en caso de ser las hojas se deben muestrear hojas recientemente maduras y de plantas en una etapa temprana del desarrollo, ya que la mayoría de tablas de niveles críticos foliares han sido elaboradas con este tipo de tejido; también se debe tener en cuenta ciertas condiciones específicas de muestreo para determinados cultivos como el caso de la yuca (*Manihot esculenta Crantz*) que para el análisis foliar se descartan los peciolos y sólo se utiliza la lámina de la hoja (Bertsch 2007).

Recolección y preparación de la muestra

Generalmente de 150 a 200 gramos de material vegetal fresco es una cantidad suficiente para llevar a cabo el análisis foliar (Aldana 2011), ya que para lo que se requiere es al menos 5g de material vegetal seco, en caso de tenerse una idea aproximada de del peso de las hojas del cultivo se puede estimar el número de hojas que se requerirán para hacer el análisis (Bertsch 2007); por ejemplo en el caso de la yuca (*Manihot esculenta Crantz*) con una cantidad de 50-60 hojas es suficiente para realizar el análisis.

La muestra debe identificarse adecuadamente y llevarse al laboratorio lo más rápido posible, en caso de no poder enviarla rápidamente se debe colocar en un sitio donde se conserve en buen estado como a la sombra, en una hilera o en la parte baja de la nevera (Bertsch 2007).

2.3.2. Análisis de suelo

Un análisis de suelo consiste en extraer los nutrientes del suelo mediante la utilización de soluciones extractoras, dando como resultado valores numéricos que pueden reflejar o no la disponibilidad de un nutriente para las plantas; esos valores de extracción sólo tienen sentido si existe relación entre estos y la acción que hacen las raíces de las plantas en el suelo (Ramos 2003).

El análisis de suelo es una herramienta que permite diagnosticar el estado nutricional del suelo y establecer recomendaciones de fertilización en caso de que se diagnostiquen problemas nutricionales (Molina y Bornemisza 2006, Molina 2007).

Un análisis de suelo de rutina describe la disponibilidad de nutrientes y el potencial de absorción de nutrientes de un determinado cultivo, sin embargo al momento de su interpretación hay que tener en cuenta que los suelos poseen grandes cantidades de los nutrientes esenciales para el crecimiento de las plantas, pero solo una pequeña fracción es la que se encuentran en una forma que las raíces pueden absorber (menos del 1%) (Espinoza *et al.* 2013).

La cantidad de nutrientes que se extrae en el análisis no es igual a la cantidad de nutrientes que absorbe el cultivo, pero se relaciona estrechamente con ella, es por ello que se puede afirmar que el análisis de suelo es sólo un índice de disponibilidad de nutrientes para el cultivo. Hay que entender que si bien muchas veces se utiliza el término disponible para referirse a la fracción de nutrientes extraídos en el análisis, esa fracción solo representa una parte de los nutrientes que están en rápidamente en equilibrio con la solución del suelo y pueden ser absorbidos por las plantas (García y Ciampitti 2010).

Quiroga y Bono (2012), señalan que existe la necesidad de realizar una evaluación de suelos con el fin de: definir una estrategia de fertilización para un determinado cultivo ya que indica los niveles nutricionales en el suelo, controlar variaciones de las propiedades físicas y químicas que se presenten en el suelo a lo largo del tiempo, caracterizar un lote de acuerdo a su fertilidad, monitorear en

forma regular los cambios en la fertilidad del suelo que ocurren como consecuencia de la explotación agrícola y evaluar problemas específicos como: acidez, alcalinidad, sodicidad y toxicidad.

Según Bertsch s.f. los análisis de suelos son efectivos como herramienta de diagnóstico en la medición de Acidez, Calcio (Ca), Magnesio (Mg), Potasio (K), Fósforo (P) y Zinc (Zn), mientras que no son tan útiles para medir Boro (B), Hierro (Fe), Manganeso (Mn) y Nitrógeno (N), cabe destacar que la determinación de la materia orgánica del suelo presenta problemas, pues ofrece valores muy generales que realmente dicen poco sobre lo que la materia orgánica puede aportar al cultivo.

Preparación y recolección de la muestra

Según Parra *et al* (2002), un análisis de suelos conlleva tres pasos esenciales:

1. Toma de muestras de suelo

Corresponde a la mayor fuente de error en el proceso de análisis, ya que la muestra que se toma es de sólo 0,5 kg y representa varios millones de kg provenientes de varias hectáreas, por lo que el muestreo debe ser representativo y con el suficiente número de submuestras (Molina 2007).

La muestra tomada representa todo el volumen de suelo explorado por las raíces en la parcela en que se está interesado, ya que el contenido de nutrientes en el suelo difiere en gran cantidad tanto en dirección horizontal como en dirección vertical (Parra *et al* 2002).

El momento, la frecuencia, la profundidad entre otras consideraciones a la hora de realizar el muestreo atenúan los efectos de variación espacial y temporal (García y Ciampitti 2010).

Según Quiminet (2006), para obtener una correcta muestra de suelo se deben seguir los siguientes pasos:

- * Dividir la finca en parcelas homogéneas de muestreo con base en color, textura, tratamientos y cultivos.
- * Tomar de 15 a 40 muestras en cada parcela, haciéndolo en zig-zag y metiendo todas las muestras en una bolsa común.
- * Desechar los primeros 5 cm de suelo superficial. Para la mayoría de los cultivos basta con tomar muestras de los primeros 20-40 cm del suelo.
- * Utilizar barrenas o tubos de muestreo de suelo para la recolección de la muestra sin embrago también se puede utilizar una pala.
- * Una vez terminada la toma de muestras, se recomienda mezclar todas las muestras juntas para obtener una mezcla de suelo homogénea.
- * Tomar aproximadamente 1 kg de esta mezcla, dejarla secar al aire y enviarlo al laboratorio de análisis, especificando al máximo todos los datos de la parcela.

2. El análisis propiamente dicho

Según Molina (2007), existen gran cantidad de procedimientos analíticos que pueden ser utilizados para realizar el análisis de suelos, los cuales varían según las características de los suelos, tales como su mineralogía de arcillas, el tipo de carga iónica, la Capacidad de Intercambio Catiónico, el pH, etc. El problema es que muchos de esos procedimientos fueron diseñados para condiciones específicas de suelos, por esta razón se deben establecer en cada región estudios de calibración y correlación de análisis de suelos con el fin de escoger el método más apropiado para las condiciones de suelos que predominen.

En la mayoría de laboratorios de Costa Rica se utiliza la solución Olsen Modificada para análisis de P, K, Fe, Cu, Zn, y Mn disponibles, y el KCl para acidez intercambiable, Ca y Mg, mientras que en muy pocos se utiliza la solución Mehlich 3 para el análisis simultáneo de todos los nutrientes (Cabalceta y Molina 2006, Molina 2007, Fallas 2013)

3. La interpretación de los resultados

Como indica Molina (2007), la interpretación de los análisis de suelos está sujeta a la utilización de tablas de fertilidad previamente establecidas las cuales contienen los valores de referencia de los nutrientes con base en el concepto de nivel crítico. Estas tablas se realizan con información derivada de investigaciones de invernadero y campo en calibración y correlación de análisis de suelos, y con la experiencia acumulada por laboratorios y especialistas en el tema. Dichas tablas suelen clasificar los contenidos de nutrientes en diferentes categorías: bajo o deficiente, medio o suficiente, óptimo o adecuado, y alto o excesivo y con base en estas categorías se establece la posible respuesta a la aplicación de cierto nutriente.

2.4. Soluciones extractoras

Al momento de realizar un análisis químico de suelos, el procedimiento óptimo es la utilización de una solución extractora de carácter universal (Molina y Bornemisza 2006). Este término hace referencia a una solución con la capacidad de extraer diferentes formas de nutrientes disponibles para las plantas simultáneamente, tal como lo hacen las plantas, de manera rápida, reproducible y de bajo costo (Cabalceta y Molina 2006). Se requiere 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) citado por Cabalceta y Molina 2006).

Bertsch et al (2005), señala que %las soluciones extractoras, para poder ser adoptadas como metodologías útiles, deben presentar ante todo, una correlación satisfactoria 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+

La correspondencia entre los valores de extracción de un elemento con los valores de absorción del mismo elemento determina el nivel de eficiencia de la solución extractora (Ramos 2003).

Los extractantes más utilizados han sido ácidos y bases diluidas, donde los ácidos diluidos se utilizan en suelos ácidos, mientras que las bases, como carbonatos y bicarbonatos, se utilizan principalmente en suelos alcalinos (Cabalceta y Molina 2006).

Los agentes quelatantes y acomplejantes como el DTPA (ácido dietilentriaminotetracético) y el EDTA (ácido etilendiaminotetracético) han sido efectivos para extraer elementos menores, es por ello que han sido incluidos tanto en extractantes ácidos y como básicos, tal es el caso de la solución Mehlich 3 y Olsen modificada respectivamente. Asimismo otras soluciones de sales como el KCl y NH₄OAc también son utilizadas como agentes extractantes, ya que extraen nutrimentos catiónicos de la solución del suelo y las fracciones intercambiables (Cabalceta y Molina 2006).

2.4.1. Mehlich 3

Esta es una solución de tipo Amoniaca, compuesta por 0,2 N de Ácido Acético (CH₃COOH), 0,25 N de Nitrato de Amonio (NH₄NO₃), adicionada de 0,015 N de Fluoruro de Amonio (NH₄F), 0,013 N de Ácido Nítrico (HNO₃) y 0,001 M de Agente quelante EDTA, y tiene un pH de 2,5 (Frank *et al* (2011) y Wolf y Beegle (2011). Es denominada una solución universal porque puede extraer simultáneamente del suelo P, Ca, Na, K, Mg y micronutrientes como Cu, Zn y Mn (entre otros) (Cabalceta y Molina 2006).

Schoninger *et al* (2012) indican que la solución ME 3 ha sido ampliamente estudiada en la extracción simultánea de Ca, Mg, K, P, Cu, Zn, Fe y Mn.

Cabalceta y Molina (2006) mencionan que esta solución permite analizar gran cantidad de nutrimentos en forma simultánea, disminuyendo los costos y el tiempo de análisis, asimismo, permite determinar la concentración de nutrimentos utilizando el Espectrómetro de Plasma, contrario a la solución Olsen modificada que por su viscosidad no da buenos resultados al correr muestras con este moderno instrumento.

Esta solución se adapta muy bien a suelos ácidos de los trópicos, por lo que ha generado gran interés a nivel mundial, en Costa Rica no es la excepción ya que se han hecho estudios donde se han encontrado muy buenas correlaciones de esta solución con otros extractantes de uso actual (Gadea 1993, Cabalceta y Cordero 1994b, Cabalceta 1995, Molina y Bornemisza 2001).

La solución Mehlich 3 es una buena alternativa para realizar los análisis de P en los suelos del país, ya que es de fácil manejo en la extracción, para los análisis de las muestras, asimismo el procedimiento es más económico debido a que se puede utilizar en diferentes tipos de suelos y extraer simultáneamente todos los nutrientes, además que presenta buena correlación con otros métodos de análisis como Olsen modificada. Presenta la desventaja de que en suelos Ultisoles el valor del nivel crítico encontrado en P es muy bajo (3mg/L), pero esto se puede solucionar con una buena calibración a nivel de campo (Cabalceta y Cordero 1994a).

Molina y Cabalceta (1990), encontraron que la solución Mehlich 3 presenta una tendencia a extraer más P y Cu y menos K que la solución Olsen Modificada (para la extracción de estos nutrientes se obtuvieron las siguientes correlaciones entre ambas soluciones: 0,7 para K, 0,889 para P y 0,640 para Cu), en cuanto a la extracción de Ca Mehlich 3 actúa en forma muy semejante al KCl (obtuvieron una correlación de 0,85 entre ambas soluciones), asimismo las cantidades de Mg extraídas con KCl y Mehlich 3 tuvieron una correlación de 0,944, siendo la relación de extracción de ambas soluciones de 1:1 para Mg. Sin embargo Mehlich es insuficiente para detectar cantidades menores a 0,20 cmol(+)/L extraídos con Olsen Modificada, asimismo esta solución no es tan efectiva en la extracción de Cu y Zn.

Bertsch *et al* (2005), determinaron que existe una asociación muy clara y definida entre las soluciones Mehlich 3 y KCl-Olsen modificada, ya que ambas soluciones extraen lo mismo de Ca y Mg, Mehlich 3 extrae 1,5 veces más K que Olsen Modificada; en el caso del Zn, en suelos ricos en Ca (>10 cmol(+))⁻¹,

Mehlich 3 extrae más Zn, mientras que en suelos bajos en Ca ($<10 \text{ cmol}(+) \text{ l}^{-1}$) Mehlich 3 extrae menos que Olsen modificada.

Cabalceta y Cordero (1994b), muestran que la solución Mehlich 3 extrae niveles críticos muy semejantes en todos los órdenes de suelos estudiados, lo que sugiere que la solución puede resultar efectiva en un amplio ámbito de suelos con condiciones físicas, químicas y microbiológicas diferentes.

Los niveles críticos de P obtenidos al analizar diferentes órdenes de suelo con esta solución son los siguientes: 3mg P/L en Ultisoles (se piensa que el P se extrae en la solución al reaccionar el ácido acético y el fluoruro de amonio ya que en los Ultisoles el fluoruro se acompleja fuertemente al Al y libera el P), 6 mg P/L en Inceptisoles (se supone que el P se libera por el F de los P-Ca al precipitar el Ca o de los P-Al al acomplejar el aluminio, o por medio de los H^+ presentes en las soluciones ácidas que disuelven P-Ca, P-Al y P-Fe, en ese orden y magnitud) y 16 mg P/L en Andisoles (es importante recordar que esta solución posee NHO_3 que extrae una porción de P-Ca (Cabalceta y Cordero 1994a).

2.4.2. KCl-Olsen Modificada

La solución Olsen modificada es una solución básica compuesta por: 0,5 N de NaHCO_3 , 0,01M EDTA con 0,15 gr de superfloc 127 0,01%, y tiene un pH de 8,5 (Cabalceta y Molina 2006, Ramos 2003).

La combinación KCl-Olsen Modificada como binomio de soluciones extractoras es utilizada desde los años 70 para realizar los análisis de rutina en Costa Rica, el KCl determina acidez intercambiable, Ca y Mg y la solución Olsen Modificada para análisis de P, K, Fe, Cu, Zn, y Mn disponibles (Bertsch *et al* 2005, Molina 2007).

Abdu (2006) menciona que Olsen Modificada por ser una solución básica es mejor utilizarlo en suelos caracterizados por la naturaleza calcárea.

Alvarado *et al* (2009) indican que Olsen Modificada presenta una correlación alta y significativa con la solución Mehlich 3, asimismo en su estudio concluyen

que dicha solución se considera el mejor método para determinar la cantidad de fósforo retenido en el suelo.

La solución Olsen Modificada presenta varias desventajas, tiende a sobrestimar la disponibilidad de los micronutrientes, debido a que el extractante ataca la materia orgánica liberando parte del Fe y Mn que se encuentra acomplejado en ella (Molina 2007), asimismo debido a su viscosidad obstruye las mangueras de los equipos y se da una interferencia generada por el color amarillo proveniente de la materia orgánica (Cabalceta y Molina 2006, Cabalceta 1995).

2.5. Correlación

Dahnke y Olson (1990) citados por Gadea (1993), Molina y Bornemisza (2006), definen la correlación como el proceso que se utiliza para determinar cuál es el grado de asociación entre dos variables de modo que una influya sobre la otra, visto de una forma más aplicada, se puede decir que la correlación permite determinar cuál es la relación existente entre un nutriente del suelo extraído mediante cualquier solución extractora y la respuesta del cultivo a la aplicación de dicho nutriente.

Los estudios de correlación permiten realizar diferentes comparaciones entre métodos de extracción, es decir, se puede comparar el comportamiento de una solución extractora con respecto a otra y por tanto, facilitar la interpretación de los resultados (Alvarado *et al* 2009). Tanto las características de los extractantes como las propiedades de los suelos determinan los valores de correlación que se presenten entre las soluciones (Cabalceta 1995).

Una correlación satisfactoria se obtiene cuando bajas concentraciones de nutriente extraídas coinciden con bajos rendimientos y cuando altas concentraciones extraídas coinciden con altos rendimientos (Bertsch *et al* 2005).

La importancia y utilidad de asociar soluciones entre sí, se debe a que los resultados obtenidos con una metodología se puedan transformar a otra y de modo que se posibilite una mejor interpretación (Cabalceta 1995).

Si se desea realizar un programa de correlación y calibración de análisis de suelos se requieren 3 fases: laboratorio, evaluación en invernadero y calibración en campo. En la primer fase se selecciona una solución extractante que tenga la capacidad de disolver una parte proporcional de las formas disponibles de nutrimentos en el suelo, la segunda fase comprueba si los contenidos de los elementos extraídos con la solución extractora escogida en la primer fase, se relacionan con las cantidades absorbidas por la planta o con su rendimiento en invernadero y la última fase consiste en calibrar el método de análisis en el campo con un cultivo específico (Molina y Bornemisza 2001).

Los pocos estudios de correlación y calibración que se han realizado en el país han utilizado principalmente el cultivo de sorgo forrajero (*Sorghum bicolor*) como planta indicadora (Cabalceta y Molina 2006).

Método Cate y Nelson

Este método lleva ese nombre porque fue desarrollado por Cate y Nelson en 1965, es un método gráfico sencillo que permite determinar con gran aproximación un nivel crítico (Ramos 2003; Pacheco 2008).

Tal como lo indican Ramos (2003), Cabalceta y Molina (2006), y Pacheco (2008) este método consiste en graficar los rendimientos relativos (eje de las ordenadas) en función del análisis de suelos (eje de las abscisas) y luego elaborar un sistema de coordenadas cartesianas sobre una hoja transparente de superposición, de modo que el mayor número de puntos se ubiquen en los cuadrantes inferior izquierdo y superior derecho (cuadrantes positivos), y el menor número de puntos en los cuadrantes superior izquierdo e inferior derecho (cuadrantes negativos), obteniendo un nivel crítico en el punto donde la línea vertical corta el eje X tal como se observa en la figura 1.

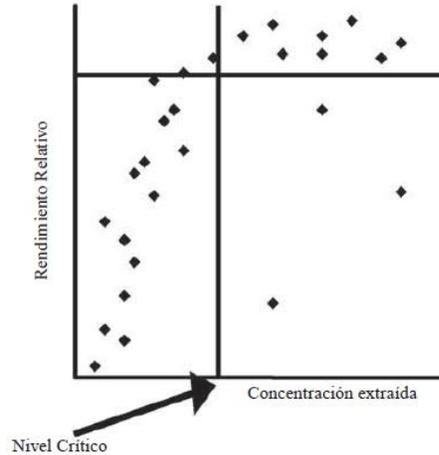


Figura 1. Principios básicos de la calibración y correlación de soluciones extractoras, según el método de Cate y Nelson (Bertsch *et al* 2005).

La línea horizontal de la figura 1 divide los suelos en dos grupos, uno que presenta respuesta a la adición del nutriente analizado y otro que no presenta respuesta, esta línea corta el eje de rendimiento relativo en valores que oscilan de 80-90% (Cabalceta y Molina 2006)

Este método tiene varias ventajas, una de ellas es que al separar los datos en dos poblaciones, sigue la ley de Liebig, la cual establece que el nivel crítico es el punto más allá del cual el nutriente de que se trata deja de ser un factor limitante, otra ventaja es que ante puntos de inflexión no debe recurrir a agrupamientos arbitrarios como en el caso modelos de regresión, asimismo el método identifica los suelos que la solución extractora no trabaja bien (los puntos que quedan en los cuadrantes negativos) (Ramos 2003).

2.6. Calibración

Según Molina y Bornemisza (2006) **la calibración consiste en determinar la probabilidad de obtener una respuesta en crecimiento a la aplicación de un nutriente, con base en el valor obtenido por un procedimiento seleccionado de análisis.** La calibración se relaciona con la correlación e interpretación de un análisis, debe ser evaluada en gran cantidad de suelos, lo cual puede realizarse a nivel de invernadero o campo, siendo las evaluaciones en invernadero las más utilizados principalmente por la facilidad de controlar fuentes

de variación, como el clima, el efecto del subsuelo, las plagas, entre otras; asimismo, porque resulta más rápidos y económicos; con la evaluación en invernadero se comparan métodos de extracción a la vez y se determina los niveles críticos ~~%tentativos+~~, con la calibración a nivel de campo se establecen los niveles críticos ~~%definitivos+~~ para un método de extracción previamente seleccionado, y constituye la fase más importante en los estudios de calibración.

Chicaiza (2001), indica que el nivel crítico es la concentración de cualquier elemento sobre la cual si se aplica dicho elemento no se presentará ninguna respuesta en el rendimiento del cultivo, mientras que si la concentración de cualquier elemento es menor se presentará un respuesta en el rendimiento del cultivo.

Por otra parte Molina y Bornemisza (2006) indican que un método de calibración corriente, consiste en correlacionar la respuesta en rendimiento con el valor del análisis de suelos. Se ha observado que cuando se utilizan valores de rendimiento absoluto, tiende a presentarse una considerable dispersión de puntos y una gran variabilidad, es por ello que en muchos de los casos, se utiliza el rendimiento relativo o porcentaje de rendimiento, con el fin de eliminar algo de esta dispersión.

Según Howeler (1983) citado por Cadavid (2008) ***los niveles críticos o los rangos publicados en la literatura agrícola para cada cultivo son muy importantes como una guía para interpretar los datos de los análisis obtenidos. Pero estos datos solamente deben utilizarse como una guía, porque los contenidos de nutrimentos varían con las variedades, con el estado del tiempo y con el suelo.***

Howeler (1981), Howeler y Cadavid (1990), Cadavid (1988) y Cadavid (2002) citados por Cadavid (2008) han reportado una serie de parámetros los cuales son una herramienta para la interpretación de análisis de suelo cultivados con yuca, estos valores se presentan en el cuadro 2.

Cuadro 2. Niveles críticos de parámetros del suelo para el cultivo de la yuca (Cadavid 2008).

pH	Sat Al	CE	P	S	Zn	Mn	Fe	Sat Na	N	K	Ca	Mg
1:1	%	mmos/cm	mg/kg				%	g/kg	cmol/kg			
4,0 - 7,5	80	0,5 - 0,6	10	8	1,0	5,0	< 2,0	3,0	< 1,5	0,15	0,25	0,12

2.7. Cultivo de la yuca

La yuca (*Manihot esculenta Crantz*) es una planta de la familia Euphorbiaceae, originaria de Sudamérica, es una planta leñosa que puede alcanzar de uno a tres metros de altura, es de fácil adaptación, con costos de producción bajos y con amplio uso en la industria, así como en alimentación, en el país lo que más se consume es la raíz y su área cultivada ronda las 3000 hectáreas (Zotyen 2002).

El cultivo de la yuca se puede dar en diferentes condiciones de clima y suelo, desde el nivel del mar tanto en la costa Atlántica y como en la Pacífica hasta cualquier zona del país cuya altitud sea menor de 1000 msnm. Sin embargo se ha encontrado que su cultivo es más rentable en lugares donde sea posible la mecanización de las labores (Zotyen 2002).

En cuanto a las condiciones edafoclimáticas necesarias para el desarrollo de este cultivo Cadavid (2008) indica que esta planta se adapta a alturas desde el nivel del mar hasta los 2000 m, requiere temperaturas de 20-30°C, siendo 24°C la temperatura óptima, humedad relativa de 50-90% siendo 72% el nivel óptimo y precipitación anual entre 600 y 3000 mm.

La yuca se puede cultivar en suelos de fertilidad media y baja, siendo más óptimos los francos, ricos en potasio, con un pH entre 5,2 - 6 y un buen drenaje interno ya que el encharcamiento es lo que más afecta al cultivo porque propicia la pudrición de las raíces y muerte de la planta (Zotyen 2002). Usualmente se cultiva en suelos de los órdenes Oxisol, Ultisol, Inceptisol, Entisoles arenosos y en menor grado en Alfisoles, Vertisoles y Mollisoles

Suelos con muy bajos contenidos de N, P, K, Ca, Mg, S, B, Zn, Mn presentan grandes limitantes para el desarrollo, crecimiento y la obtención de buenos rendimientos productivos (Cadavid 2008).

En Costa Rica las zonas donde más se produce yuca son: la Zona Norte, principalmente el cantón de San Carlos, la Zona Atlántica, en Guácimo y Pococí y Alajuela, en Grecia, Atenas, San Ramón y Palmares, siendo las variedades Valencia y Mangi las más conocidas (Zotyen 2002).

Para la propagación del cultivo la mayoría de agricultores utilizan semilla asexual (estacas o pedazos de tallos), sin embargo, está creciendo el uso de plantas obtenidas mediante técnicas de cultivo in vitro o propagación clonal in vitro, debido a que presenta ventajas como: recuperación del vigor y la productividad de las plantas, se produce semilla de alta calidad, libre de virus y de cualquier otro patógeno, entre otras (Suarez y Mederos 2011).

Tanto la calidad como la cantidad del material de siembra responden a un conjunto de factores como: tipo de planta, vigor de la variedad, hábito de crecimiento y ramificación, porción del tallo dentro de la planta, número de tallos por planta, sistema de cultivo, edad del cultivo, entre otros factores (Cadavid 2008).

Yuca Variedad Valencia

En el cuadro 3. Se muestran las principales características agronómicas que presenta esta variedad, valores como el número de nudos se tomaron en un metro de tallo Chavarría (2003).

Cuadro 3. Características agronómicas de la variedad de yuca Valencia, según Chavarría (2003).

Nº	Descriptor / Variedad	Valencia
1	Altura de planta (m)	2,97
2	Tipo de planta	Compacta
3	Altura de horqueta (m)	0,99
4	Número de nudos	20
5	Rendimiento (ton/ha)	20,2
6	Forma de la raíz	Cilíndrica
7	Diámetro de la raíz (cm)	5
8	Longitud de raíz (cm)	24
9	# raíces tuberosas/ planta	4
10	Longitud pedúnculo raíz (cm)	6,9
11	Forma del lóbulo central	Lanceolado
12	Posición del pecíolo	Horizontal
13	Color del pecíolo	Rojo oscuro
14	Color de la parte externa del tallo	Marrón claro
15	Color del cortex de la raíz	Blanco
16	Hábito de crecimiento	Dicotómica
17	Ancho de lóbulo central (cm)	4,37
18	Largo de lóbulo central (cm)	16,13
19	Largo de pecíolo (cm)	25,7
20	Color de los brotes tiernos	Verde claro
21	Color de la hoja desenvuelta	Verde oscuro
22	Número de lóbulos en la hoja	7
23	Textura de la raíz	Rugosa

Chavarría (2003), menciona que esta variedad es resistente a la sequía, por lo que en zonas secas se puede sembrar de Mayo. Octubre y en zonas más húmedas se puede sembrar de Mayo. Enero. Asimismo por ser un cultivo de ciclo intermedio (10-12 meses para la cosecha), se observa buen desarrollo a una densidad de siembra de 13333 plantas/ha es decir sembrada a una distancia de 1,5x0,5 m.

Para la siembra se recomienda utilizar varetas provenientes de la parte media de las otras plantas, de aproximadamente 15-20 cm con 5-7 yemas, lo ideal es utilizar varetas cortadas el mismo día o con menos de 3 días de cortadas y

guardadas a la sombra, se recomienda desinfectarlas antes de la siembra (Casaca 2005).

Cadavid (2008) indica que la aplicación de fertilizantes al cultivo de la yuca presenta un efecto benéfico sobre la producción y a su vez se recupera la fertilidad del suelo cultivado.

Cabe destacar que una adecuada fertilización, si bien, aumenta los rendimientos del cultivo de la yuca, debe ser determinada con base (Cadavid 2002).

Según Chavarría (2003), la fertilización debe realizarse en forma fraccionada a los 30, 90, 120 y 180 días después de la siembra, donde la cantidad de nutrientes extraídos por hectárea para producir una tonelada de yuca son 2,14 kg de N, 0,46 kg de P, 3,5 kg de K, 0,69 kg de Ca y 0,39 kg de Mg.

Por otra parte Cadavid (2011), indica que en promedio un cultivar de yuca para producir una tonelada de raíces frescas extrae 4,42 kg de N, 0,67 kg de P, 3,58 kg de K, 1,36 kg de Ca, 0,82 kg de Mg y 0,42 kg de S. Este mismo autor indica que en suelos arcillosos, francos, franco arcillosos o franco arcillo arenosos se debe realizar una única aplicación de fertilizante 25-35 días después de siembra, mientras que en suelos arenosos, franco arenosos o arenosos francos recomienda fraccionar la dosis de fertilizante a los 30 y 60, o máximo 90 días después de siembra.

Solórzano (1975), López (2002), Mejía de Tafur (2002), De Diego y Quirós (2006), Cadavid (2008) y Furcal *et al* (2009) citados por Andrade (2013) coinciden que a partir de los 30 días después de siembra se inicia la absorción de nutrientes por parte del cultivo y alcanza la máxima extracción a los 150 dds ya que después de esta se muestra un descenso en la cantidad de nutrientes absorbidos, es por ello que los planes de fertilización debieran ser programados entres los 30 y 150 dds.

Gadea *et al.* (2012) en una plantación de yuca en el Tanque de La Fortuna de San Carlos encontraron que la absorción total de elementos (Kg/ha) comenzó a incrementarse después de los 30 dds. Dándose la mayor absorción de nutrientes entre los 30 - 150 dds. Asimismo encontraron que la cantidad de nutrientes absorbidos por el cultivo durante su ciclo presenta el siguiente orden $K > N > Ca > P$. En este mismo estudio los autores llegaron a la conclusión de que para producir una hectárea de yuca es necesario aportar 87,76 kg de N, 106,83 de P_2O_5 y 113,43 kg de K_2O .

Cadavid (2011) recomienda aplicar una fórmula que contenga 100 g de N/kg de yuca, 50 mg de P/kg de yuca, 100 cmol de K/kg, 50 cmol de Mg/kg, 0 mg de B/kg, 100 cmol de Ca/kg, 20 mg de S/kg, 10 mg de ZN/kg y 10 mg de Mn/kg.

El tipo y la cantidad de fertilizante a utilizar debe responder a la cantidad de nutrientes disponibles que indique un previo análisis de suelo (Cadavid 2009).

Asimismo Cadavid (2009) menciona que si se trata de fertilizantes de alta solubilidad en agua estos se pueden aplicar durante los primeros meses de emergencia de la planta, en banda, pero requieren que exista buena humedad en el suelo; en el caso de fertilizantes de lenta solubilidad en agua u orgánicos, es necesario aplicarlos de 20 a 30 días antes de la siembra; los fertilizantes de alta solubilidad se deben aplicar preferiblemente en dos dosis (30 y 60 días después de siembra), esto porque el primer mes la planta utiliza las reservas que posee la estaca.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación del estudio

Para la realización de las evaluaciones se tomó muestras de suelo y plantas de diferentes lotes cultivados con yuca en la Región Huetar Norte y el Caribe; dichas muestras se analizaron en el Laboratorio de Análisis Agronómico del Instituto Tecnológico de Costa Rica, sede regional San Carlos. Los lotes muestreados se localizan en el cantón de San Carlos, distrito La Fortuna, cantón Los Chiles, distrito Los Chiles, Cantón de Sarapiquí, distrito Horquetas, cantón de Pocosí, distrito Cariari, cantón de Guatuso, distrito de Buenavista.

El distrito de la Fortuna de San Carlos se ubica a 253 msnm y limita con el Cantón de Tilarán y con el Distrito de Tronadora, perteneciente a la Provincia de Guanacaste, con el Distrito de Peñas Blancas Cantón de San Ramón y con Cutris, Florencia y Venado que pertenecen al Cantón de San Carlos. La precipitación anual media es de 3385 mm y la temperatura oscila entre los 23 y 32°C. El principal río que presenta es el Arenal el cual es fuente de abastecimiento de agua para el Proyecto Hidroeléctrico Arenal y además provee de agua al Proyecto Arenal Tempisque (Ecoterra 2011).

Es una zona dedicada al turismo y recibe más de 3000 turistas diarios. Así mismo uno de los distritos más productivos del cantón de San Carlos debido a la riqueza de sus suelos Andisoles, y se produce principalmente ganado de carne y leche, también de doble propósito y productos agrícolas como raíces y tubérculos (yuca, tiquizque, ñampí, ñame, papa china, jengibre) así como plátano y papaya (Ecoterra 2011).

El poblado de Los Chiles lleva el mismo nombre del cantón, se ubica a 43 msnm, el cantón de Los Chiles limita con la República de Nicaragua y los cantones de Upala, San Carlos y Guatuso de la provincia de Alajuela. La precipitación anual media es de 3000 mm y la temperatura oscila de los 24-34°C. Las principales cuencas son las de los ríos Pocosol, Frío y Zapote, asimismo se encuentra en el área la laguna Caño Negro. El cantón se divide en tres

subunidades, denominadas Planicie Aluvial con influencia del lago de Nicaragua, Llanuras Altas Viejas en proceso de erosión, y Pantano Permanente o Temporal. La base de la economía es fundamentalmente agropecuaria, con la siembra de hortalizas, yuca, frijoles y la crianza de ganadería de engorde (Guías de Costa Rica 2013).

El cantón de Sarapiquí se ubica en las siguientes coordenadas geográficas 10° 29'23" latitud norte y 83°56'15" longitud oeste, es el cantón número diez de la provincia de Heredia, se constituye geológicamente por materiales de los períodos Terciario y Cuaternario, siendo las rocas volcánicas del Cuaternario las que predominan en la región, presenta dos unidades geomórficas, denominadas forma de Sedimentación Aluvial y de Origen Volcánico. Las alturas de los principales centros van desde los 37 a 187 msnm. El sistema fluvial del cantón de Sarapiquí, corresponde a la subvertiente Norte de la vertiente del Caribe; el cual pertenece a las cuencas de los ríos Sarapiquí, Chirripó y Cureña (Guías de Costa Rica 2013).

El cantón de Pococí ubicado 10°30'10+ latitud norte y 83° 38q 51+ longitud oeste, es el cantón número dos de la provincia de Limón, está constituido geológicamente por materiales de los períodos Terciario y Cuaternario; siendo las rocas sedimentarias del Cuaternario las que predominan en la región, presenta tres unidades geomórficas, denominadas forma de sedimentación aluvial, de origen volcánico, y litoral de origen marino. Las alturas de los principales centros van desde los 5 a 262 msnm. Las temperaturas oscilan entre los 24 . 33°C y la precipitación tiene un promedio de 2100 milímetros al año (Guías de Costa Rica 2013).

El cantón de Guatuso está ubicado 10° 42' 22" latitud norte y 84° 49'57', longitud oeste. Está geológicamente constituido por materiales de los periodos terciario y cuaternario. Presenta dos unidades geomórficas, las cuales se denominan de origen volcánico y de sedimentación aluvial. Las alturas de los centros urbanos más importantes son: 42, 50 y 310 msnm para Buenavista, San Rafael y Cabanga. Con respecto al sistema fluvial el cantón corresponde a la

subvertiente Norte, de la vertiente del Caribe; el cual pertenece a las cuencas de los ríos Frío y Zapote. Las temperaturas oscilan entre los 18 . 32°C y la precipitación varían de 1 500 hasta 6 000 milímetros al año (Guías de Costa Rica 2013).

3.2. Método de Muestreo

Los muestreos se realizaron en doce lotes de fincas dedicadas a la producción de yuca, que tuvieran plantas a edad de cosecha y ubicadas en el trópico húmedo de Costa Rica. Se recolectó una muestra de suelo y se cosechó cuatro plantas de cada variedad en cada lote, de forma al azar, a las cuatro plantas se les midió rendimiento (kg yucas/planta) y a tres de esas se les realizó análisis de contenido total de nutrimentos en hojas, tallo y raíz para determinar la cantidad de nutrientes absorbidos al momento de la cosecha.

Cada muestra de suelo estaba compuesta de mínimo 20 submuestras de 150 g aproximadamente (5 cm de diámetro por 30 cm de profundidad), las cuales se homogenizaron y se seleccionaron aproximadamente 1000 g para ser procesados en el laboratorio.

En total se obtuvo 12 diferentes muestras de suelo, 52 datos de rendimiento productivo y 39 muestras de hoja, 39 de tallo y 39 de raíz.

Las plantas cosechadas de la variedad conocida como Señorita, correspondieron a plantas con un único tallo principal el cual se bifurcaba en tres ramificaciones, las de la variedad conocida como MBRA 383 fueron plantas de dos tallos principales y las plantas de variedad Valencia cosechadas fueron de uno o dos tallos principales (ver Figura 2).

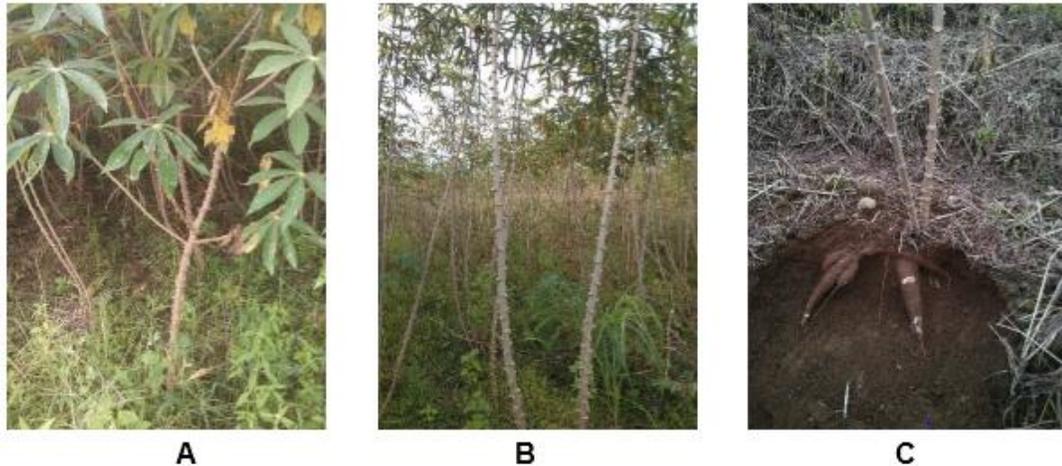


Figura 2. Tipo de plantas muestreadas, A: Señorita, B: MBRA 383, C: Valencia.

Estos muestreos se realizaron del 23 de setiembre de 2014 al 17 de diciembre del 2014.

3.3. Preparación de muestras para análisis químico de suelo y de tejidos

Los suelos se secaron al aire libre y a la sombra. Una vez secos se molieron con un molino eléctrico, la muestra molida se separó utilizando un tamiz de 2mm, y se guardó en una bolsa plástica la parte más fina y homogénea para su posterior análisis de laboratorio (ver Figura 3).

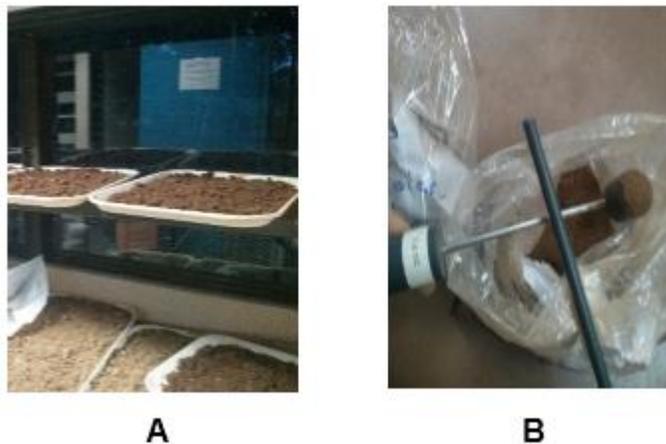


Figura 3. Proceso de secado y almacenamiento de la muestra de suelo. A: secado al aire libre, B: almacenamiento de las muestras en bolsas plásticas luego de molidas.

Las muestras de tejido vegetal se secaron en un horno de circulación de aire caliente forzado, a una temperatura de 55°C durante 76 horas, luego se trituraron en un molino Wiley para muestras de tejido vegetal, el cual tiene una criba de 2 mm. La muestra obtenida se colocó en bolsas plásticas para ser analizarla posteriormente (Figura 4).

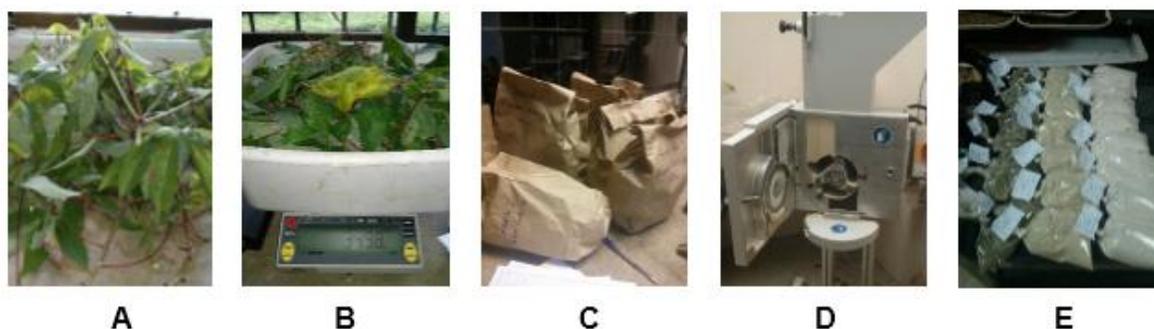


Figura 4. Proceso de secado, molido y almacenamiento de las muestras de tejido vegetal. A: separación de partes, B: pesado, C: bolsas con muestras secas, D: molino para tejido vegetal, E: muestras molidas.

3.4. Análisis químico de las muestras de Suelo

Las 12 muestras de suelo molidos se analizaron con las soluciones extractoras KCl . Olsen modificada y Mehlich 3. Se realizaron tres repeticiones con cada solución. Cada repetición fue analizada en distintas fechas y en cada una se realizó el proceso de calibración del equipo para valorar la precisión del proceso de laboratorio.

Así mismo se hizo un análisis preliminar de la fertilidad de los suelos (pH en agua y acidez intercambiable) empleando la metodología de Díaz-Romeu y Hunter (1982).

Las determinaciones de laboratorio se realizaron de diciembre 2014 a abril 2015, para los análisis del 2015 se prepararon soluciones nuevas.

Se siguieron los siguientes procedimientos de acuerdo con las diferentes soluciones extractoras:

3.4.1. Cloruro de Potasio 1N (KCl)

Se utilizó esta solución para determinar Ca, Mg y acidez intercambiable.

Para preparar la disolución se agregó 74,55 g de KCl (reactivo analítico) en un balón aforado de 1 litro, y se disolvió en aproximadamente 400ml de agua destilada y posteriormente se aforó hasta el volumen de un litro, con pH de 5,5.

Para la extracción se tomó 2,5 ml de suelo con una cuchara volumétrica y se agregó a un vaso de extracción, luego se añadió 25 ml de KCl 1N y se agitó por 10 min en un agitador automático a 400 rpm, posteriormente la suspensión suelo-KCl se filtró a través de un papel Whatman #2 y se tomó una alícuota de 1 ml, a la cual se le agregó 9ml de agua y 15ml de solución de Lantano al 1% para determinar la concentración de Ca y Mg. Esta medición se realizó en un espectrofotómetro de absorción atómica (Molina y Cabalceta 1990; Molina y Bornemisza 2001). El Ca se midió a una longitud de onda de 422,7 nm y el Mg a 285 nm (Figura 5).

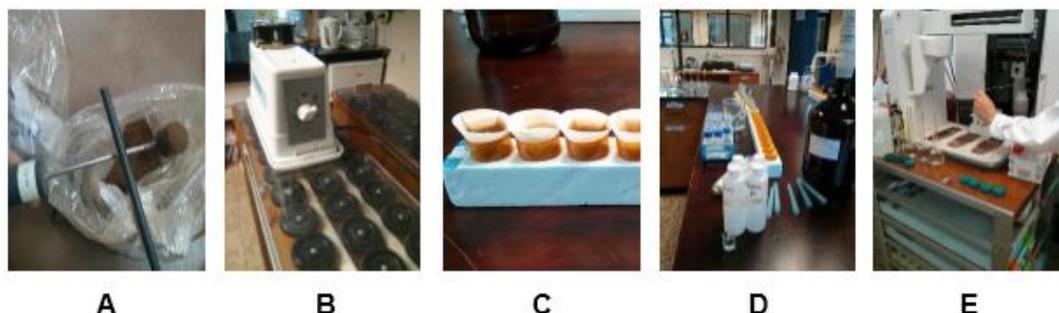


Figura 5. Proceso extracción y análisis con la solución KCl 1N. A: medición 2,5 ml de suelo, B: Agitador, C: filtrado de la muestra, D: toma de alícuotas, E: análisis con el espectrofotómetro de absorción atómica.

3.4.2. Olsen Modificada (Olsen mod.)

Se utilizó esta solución para determinar P, K, Cu, Fe, Zn y Mn.

Para preparar la solución extractora se siguió el siguiente procedimiento: en un recipiente con capacidad para 2 litros se adicionó 84 g de carbonato ácido de sodio, se agregó 7,44 g de EDTA y se añadió 0,15 g de Superfloc 127 previamente disuelto agua caliente, se llevó hasta 2 litros, se ajustó el pH a 8,5 con NaOH 1M. La solución se guardó en un frasco de polietileno.

Para la realización de la extracción con esta solución se añadió en un vaso de extracción 2,5 ml de la muestra de suelo y 25 ml de Solución Olsen modificada. Dicha mezcla se agitó por 10 min en un agitador automático a 400rpm. Luego se filtró mediante un papel Whatman # 2. El filtrado obtenido se utilizó para realizar las diferentes determinaciones (Molina y Bornemisza 2001) (Figura 6).

Del filtrado se tomó una alícuota de 2 ml, se le agregó 8ml de agua y 10 ml de solución de molibdato de amonio y mediante espectrofotómetro visible a 660 nm se determinó la concentración de P.

El filtrado restante se utilizó para determinar la concentración de K, Cu, Fe, Zn y Mn, mediante espectrofotometría de absorción atómica (Molina y Cabalceta 1990).

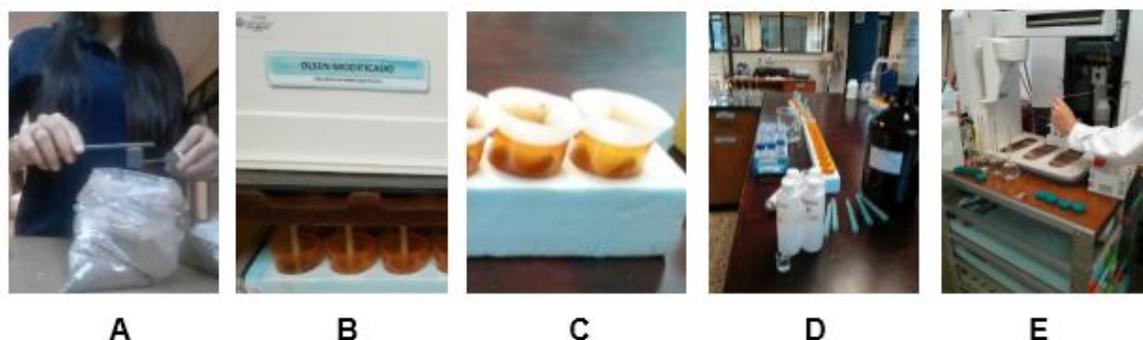


Figura 6. Proceso de extracción y análisis con la solución Olsen modificada. A: medición de 2,5 ml de suelo, B: agitación de la muestra con la solución, C: filtrado de la mezcla, D: toma de la alícuota, E: análisis con el espectrofotómetro de absorción atómica.

3.4.3. Mehlich 3 (ME 3)

Esta solución se utilizó para determinar la concentración de Ca, Mg, K, P, Cu, Zn, Fe y Mn en las diferentes muestras de suelo.

Para la preparación de la solución extractora, previamente se debió preparar 8 ml de solución de fluoruro de amonio y EDTA. Para eso se pesó 1,111 g de NH_4F y 0,584 g de EDTA .

En un recipiente con capacidad para 2 litros se añadió 100 ml de agua destilada, se disolvió 40 g de nitrato de amonio, se adicionó 8 ml de a solución de

fluoruro/EDTA, se añadió 22,8 ml de ácido acético, 1,64 ml de ácido nítrico y se aforó con agua destilada hasta los 2 L (Frank *et al* (2015) y Wolf y Beegle (2011); el pH de la solución fue de 2,54.

Para el proceso de extracción se midió 2,5 ml de suelo en un vaso de extracción de 100ml y se le agregó 25 ml de solución ME 3, se agitó por 10 min en un agitador automático a 400rpm y se filtró con un papel Whatman # 2 (Molina y Bornemisza 2001) (Figura 7).

Del filtrado se tomó una alícuota para ser analizada mediante colorimetría y determinar la cantidad de P. Así mismo, mediante absorción atómica se determinó la cantidad de Ca, Mg, K, Cu, Mn, Fe y Zn (Molina y Cabalceta 1990; Morales 2001).

Para determinar el K se requirió hacer una dilución de la muestra de 25 veces y de las curvas de calibración. De la muestra concentrada se tomó una alícuota de 1 ml a la cual se le adicionó 9ml de agua y 15ml de solución de Lantano al 1% para determinar la concentración de Ca y Mg; asimismo en el caso del Cu, Mn y Fe se realizó una dilución de 3 veces de las muestras y de las respectivas curvas, todas estas soluciones se analizaron utilizando el equipo de Absorción atómica Agilent Technologies 200 series AA, modelo 240FS AA.

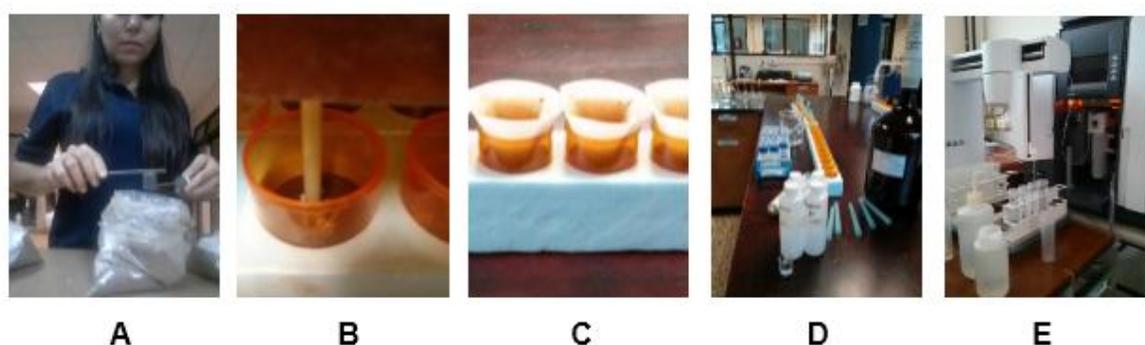


Figura 7. Proceso de extracción y análisis con la solución Mehlich 3. A: medición de 2,5 ml de suelo, B: agitación de la muestra con la solución, C: filtrado de la mezcla, D: toma de la alícuota, E: análisis con el espectrofotómetro de absorción atómica.

3.5. Análisis químico de los tejidos vegetales

De las muestras molidas se pesó 0,5g en un crisol de porcelana, se llevó a la estufa a 600°C durante 2 horas (incineración), se dejó enfriar y se agregó 10 ml de HCl al 20%, posteriormente se enjuagó con agua caliente, se filtró y trasvasó en balones de 100 ml, se llevó a la marca de aforo con agua fría (Figura 8).

3.5.1. Determinación de elementos menores (Cu, Mn, Fe y Zn)

Se tomó una porción de la disolución de 100ml de las muestras y se leyó directamente en el espectrofotómetro de absorción atómica, utilizando las siguientes longitudes de onda: Fe: 248,8 nm; Mn: 280,1nm; Cu: 324,5 nm; Zn: 214,0 nm.

3.5.2. Determinación de elementos catiónicos (Ca, Mg y K)

Se tomó 1 ml de la disolución de 100ml de las muestras y se le adicionó 9ml de agua destilada, se agregó 15ml de solución de cloruro de lantano al 1% y se leyó la muestra en el espectrofotómetro de absorción atómica a las siguientes longitudes de onda: K: 767,1 nm; Ca: 442,7 nm; Mg: 285 nm.

3.5.3. Determinación de fósforo (P)

En un tubo de 100 ml se tomó 1 ml del concentrado foliar resultante de la digestión, se agregó 25 ml de solución diaria de molibdato, se adicionó 24 ml de agua, se dejó reposar 10 min, posteriormente se leyó a 660 nm en el espectrofotómetro.

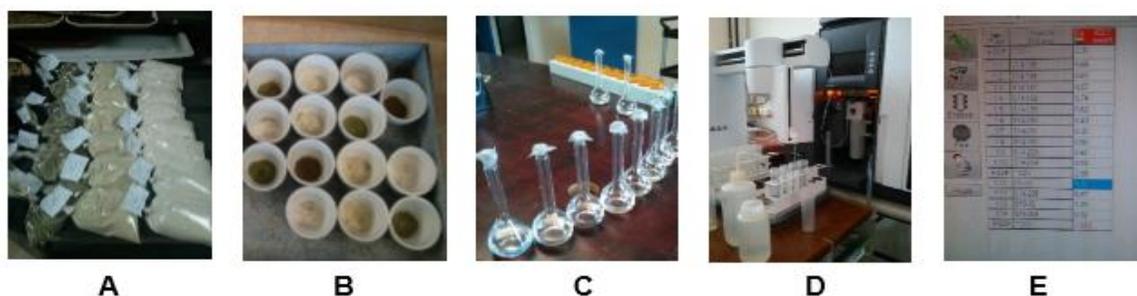


Figura 8. Proceso de análisis químico de los tejidos vegetales (no aplica para P).

A: muestras de tejido molidas, B: 0,5g de tejido en crisoles, C: muestra incinerada, HCl al y agua destilada, D: análisis con el espectrofotómetro de absorción atómica, E: resultado del análisis.

3.6. Determinación de la cantidad de nutrimentos totales absorbidos por el cultivo de yuca

La concentración de cada nutriente y el peso seco de cada estructura permitió estimar la cantidad de cada elemento absorbido en dicha parte de la planta.

Los cantidad de nutrientes absorbidos por cada una de las diferentes estructuras de la planta se sumaron para obtener el valor de absorción total de cada elemento por parte de la planta de yuca.

Con los resultados de esa estimación se calculó la cantidad necesaria de cada elemento para producir una tonelada de materia seca.

3.7. Correlación entre soluciones extractoras

Los coeficientes de correlación entre soluciones extractoras se determinaron utilizando el programa Microsoft office Excel, al igual que los respectivos análisis de varianza, y demás análisis estadísticos, todo esto con base en los resultados de los análisis químicos de suelo y de tejido vegetal.

3.8. Nivel crítico

La determinación de niveles críticos se realizó para cada elemento con cada solución extractora, estos niveles se determinaron con base en el método gráfico Cate y Nelson (1965), el cual consiste en colocar en el eje Y el rendimiento absoluto y en el eje X la concentración de cada uno de los elementos y con una lámina plástica transparente dividida en cuadrantes, buscar el punto donde se encuentren la mayor cantidad de puntos en los cuadrantes positivos, de modo que la línea horizontal va a coincidir con un rendimiento relativo o absoluto bajo el cual las respuestas serán medias o altas, mientras que la línea vertical indicará un valor de concentración del elemento en el suelo sobre el cual el grupo de suelos mostrará respuestas medias o altas (Morales 2001; Yool 2001).

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Evaluación de la fertilidad de los suelos estudiados

En el cuadro 4 se presenta la identificación, localidad y valores de pH y acidez intercambiable de los suelos de los diferentes sitios de muestreo analizados en el Laboratorio de Análisis Agronómicos del Tecnológico de Costa Rica.

Cuadro 4. Identificación, localidad, acidez intercambiable (cmol(+)/L) y pH de los suelos en estudio.

ID	Tipo de Suelos	Cantón y distrito	Localidad	pH en agua	Acidez intercambiable (cmol(+)/L)
1	Inceptisol	San Carlos, Florencia	Muelle	4,9	1,30
2	Andisol	San Carlos, La Fortuna	Aeropuerto Fortuna	5,5	0,60
3	Ultisol	San Carlos, Pocosol	El Laurel	5,3	0,37
4	Ultisol	San Carlos, Cutris	Lote 11, San Joaquín	5,3	0,40
5	Ultisol	San Carlos, Cutris	Lote 14 San Joaquín	5,4	0,29
6	Ultisol	Los Chiles, Los Chiles	Banderas	4,8	1,00
7	Inceptisol	San Carlos, Aguas Zarcas	Canta Rana	4,8	1,65
8	Ultisol	San Carlos, Cutris	Paso Real	5,1	0,59
9	Ultisol	Guatuso, Buenavista	Guayabito	4,6	1,11
10	Ultisol	Sarapiquí, Horquetas	Cerro Negro	4,5	3,19
11	Inceptisol	Pococí, Cariari	Palmitas	5,3	1,10
12	Andisol	San Carlos, La Fortuna	Sonafluca	6,4	0,20

* Determinación con la solución extractora KCl 1N

El valor más alto de la acidez en los suelos estudiados se presentó en Cerro Negro de Sarapiquí (3,19 cmol(+)/L) y el más bajo en Sonafluca (0,20 cmol(+)/L) (cuadro 4). Sólo los suelos 4, 5, 6 y 12 presentan acidez inferior a 0,5 cmol(+)/L. Según Fallas (2013) a partir de 0,5 cmol(+)/L algunas plantas pueden presentar problemas moderados en el crecimiento y rendimiento.

Como se observa en el cuadro 4 los suelos evaluados en general presentan pH ácido o moderadamente ácido. El valor mínimo fue de 4,5 correspondiente a la localidad de Cerro Negro de Sarapiquí (de baja fertilidad) y el valor más alto 6,4 en Sonafluca de La Fortuna (fertilidad alta).

Según Molina y Meléndez citados por Molina (2007) los suelos con ID 1, 6, 7, 9 y 10 se clasifican como suelos de pH bajo, los suelos 2, 3, 4, 5, 8 y 11 de pH

medio y el suelo 12 de pH óptimo. La diversidad en los valores de pH de los suelos en estudio se debe a que son de diferentes órdenes, entre ellos Andisoles, Inceptisoles y Ultisoles.

El cuadro 5 muestra los coeficientes de correlación entre el pH en agua del suelo y los contenidos de Ca, Mg, K, Cu, Mn, Fe, Zn y P de los suelos, analizados con las soluciones extractoras Mehlich 3 y KCl-Olsen modificada. Se observa que solo para calcio y magnesio estas correlaciones presentan nivel significativo.

Cuadro 5. Coeficientes de correlación entre el pH del suelo y el contenido de nutrientes en los suelos muestreados, analizados con la soluciones extractoras Mehlich 3 y KCl -Olsen modificada.

Extractor	Coefficiente de Correlación
Ca Mehlich 3	0,90 **
Ca KCl	0,90 **
Mg Mehlich 3	0,68 *
Mg KCl	0,73 **
K Mehlich 3	0,39 ns
K Olsen modificada	0,35 ns
Cu Mehlich 3	0,17 ns
Cu Olsen modificada	0,08 ns
Mn Mehlich 3	0,35 ns
Mn Olsen modificada	0,42 ns
Fe Mehlich 3	0,48 ns
Fe Olsen modificada	0,44 ns
Zn Mehlich 3	0,001 ns
Zn Olsen modificada	0,22 ns
P Mehlich 3	0,04 ns
P Olsen modificada	0,28 ns

ns: no significativo, *:p<0,05 **: p< 0,01

La cantidad de Ca extraída con ambas soluciones correlaciona significativamente con los valores de pH del suelo, el mismo comportamiento se presenta con el Mg, pero en este caso, con la solución KCl se encontró mayor significancia que con la Mehlich 3. La relación entre el contenido de Ca y Mg de los suelos con el pH se debe a procesos naturales entre ellos lixiviación de cationes básicos, mediante la cual se pierde la cantidad de Ca y Mg en el suelo, generando la acidificación de los suelos (Bernier 2000). Con base en lo anterior es

esperable observar que a menor pH del suelo menor contenido de Ca y Mg en el mismo.

Los resultados de correlación del cuadro 5 indican que la cantidad de nutrientes que extrae la solución Mehlich 3 y KCl-Olsen modificada son independientes del pH del suelo. Sadeghian (2012) indica que el pH presenta una relación con el contenido de Ca y Mg en el suelo, porque a mayor contenido de estos elementos en el suelo el valor del pH aumenta, entonces la correlación significativa entre las extracciones de Ca y Mg y el pH se debe a esta relación existente y no a la extracción realizada por las soluciones en estudio. Fallas (2013) determinó que para una serie de extractores (entre ellos Mehlich 3 y Olsen modificada) la variable pH no tiene relación con el método de extracción que se utilice, lo cual coincide con lo obtenido en la presente investigación.

En el anexo 1 se evidencia que si bien en este estudio se utilizaron algunos suelos con acidez intercambiable superior a 0,5 cmol(+)/L, el rendimiento del cultivo no se vio afectado por la condición de acidez, ya que el gráfico y la línea de ajuste muestran que no existe relación entre estas variables.

4.1.1. Extracción con KCl 1 N y Olsen modificada

Con base en estudios previos de establecimiento de niveles críticos (Molina (2007)), se realizó un análisis de la fertilidad de los suelos en estudio, se aplicó una clasificación de acuerdo a la concentración promedio de cada elemento. El color rojo significa baja concentración del elemento en el suelo, el amarillo indica que la concentración es media, el verde es rango de concentración óptimo y el color gris indica que la concentración es alta; los resultados se muestran en el cuadro 6.

Los rangos utilizados para clasificación permiten interpretar los resultados de los análisis de suelo y están hechos con base en la posible respuesta a la fertilización y en los niveles críticos de los nutrimentos en el suelo. Bertsch *et al* (2005) utilizaron niveles críticos extraídos con Olsen modificada y KCl para realizar

estimaciones de niveles críticos probables con la solución de Mehlich 3, la misma que ha sido utilizada en este estudio.

Cuadro 6. Concentración promedio de nutrimentos en el suelo de los sitios de muestreo, evaluados con las soluciones extractoras KCl y Olsen modificada en el Laboratorio de Análisis Agronómicos (LAA) del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.

ID	cmol(+)/L			mg/L				
	Ca	Mg	K	Cu	Mn	Fe	Zn	P
1	4,11	1,55	0,49	8	59	168	3,1	16
2	3,55	1,02	0,48	3	20	76	1,6	16
3	4,08	1,07	0,15	11	89	111	2,8	3
4	4,43	1,80	0,11	7	81	126	2,4	6
5	4,14	1,36	0,13	7	58	110	1,6	5
6	2,83	1,18	0,09	6	25	215	2,0	4
7	1,84	0,69	0,23	6	53	129	2,6	4
8	3,81	1,30	0,11	6	20	171	1,8	7
9	2,83	0,82	0,54	12	134	116	4,1	15
10	0,84	0,46	0,49	17	35	677	4,6	16
11	3,36	1,39	0,28	7	11	127	1,7	8
12	9,85	1,97	0,88	13	10	132	3,8	7

Según Molina (2007) los suelos 2, 6, 7, 8, 9,10 y 11 se clasifican como bajos en calcio por que contienen menos de 4 cmol(+)/L de Ca. Los suelos 1, 3, 4 y 5 se consideran medios porque poseen de 4 a 6 cmol(+)/L de Ca. El suelo 12 se clasifica como óptimo porque su valor se encuentra entre 6 y 15 cmol(+)/L de Ca.

En el caso de Mg las localidades 7, 9 y 10 contienen baja concentración porque tienen menos de 1 cmol(+)/L de Mg y las localidades 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 11 y 12 son de concentración media porque contienen de 1 a 3 cmol(+)/L (Molina 2007). Con respecto al K se encuentran suelos de bajo a alto contenido. Bertsch (1987) menciona que es poco frecuente encontrar niveles bajos de K, sin embargo, cantones como Los Chiles, Siquirres, Guácimo y otros, presentan contenidos bajos de K; por lo que se justifica que los datos obtenidos en las localidades 3, 4, 5 y 8 sean bajos en K (0,2 cmol(+)/L), ya que los sitios 6 y 8 pertenecen al cantón de Los Chiles y las localidades 3, 4 y 5 son de sus alrededores.

Según Méndez y Bertsch (2012), todos los suelos se consideran óptimos en el contenido de Cu porque los valores están entre 2 y 20 mg/L. En cuanto al manganeso Molina (2007), considera un contenido de 5 a 10 mg/L como medio, lo cual coincide con la localidad 12, considerándose los demás lugares óptimos y altos porque están entre 10 y 50 mg/L y 50 mg/L respectivamente. Según este mismo autor, todos los suelos tienen alta concentración de Fe (50 mg/L).

En el caso del Zn se presentan valores de concentración bajos (2, 5, 6, 8 y 11), medios (3, 4 y 7) y óptimos (1, 9, 10 y 12). Con respecto al P las localidades 3, 4, 5, 6, 7, 8, 11 y 12 presentan concentraciones bajas (<12 mg/L) y los sitios 1, 2, 9 y 10 presentan un contenido medio de P (12 . 20 mg/L).

La clasificación en rangos de fertilidad tanto con la solución KCL . Olsen modificada, como con la solución Mehlich 3 se realizó para reflejar que los suelos utilizados presentan diferentes niveles de fertilidad; con el fin de comprobar que las soluciones extractoras deben reflejar todas las formas disponibles o una parte proporcional de los nutrimentos en suelos, aunque estos presenten propiedades ampliamente diferentes (Molina y Cabalceta 1990).

4.1.2. Extracción con Mehlich 3

El análisis de la fertilidad de los suelos evaluados, utilizando la solución extractora ME 3 se presenta en el cuadro 7; el color rojo significa baja concentración del elemento, el amarillo media, el verde es el valor óptimo y el gris significa que la concentración es alta.

Cuadro 7. Concentración promedio de nutrimentos en el suelo de los sitios de muestreo, evaluados con la solución extractora Mehlich 3 en el LAA del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.

ID	cmol(+)/L			mg/L				
	Ca	Mg	K	Cu	Mn	Fe	Zn	P
1	4,88	1,53	0,55	6,4	141	189	2,9	7
2	4,45	0,98	0,49	2,4	56	105	1,5	13
3	4,32	1,04	0,17	7,4	333	129	2,4	1
4	5,44	1,85	0,14	5,1	248	122	2,1	1
5	4,67	1,50	0,16	4,4	166	94	1,1	2
6	2,93	1,18	0,12	4,2	61	129	1,6	3
7	1,92	0,72	0,26	4,0	185	100	1,8	3
8	4,00	1,38	0,13	4,2	80	110	1,1	1
9	2,91	1,02	0,60	4,6	718	126	3,0	6
10	1,28	0,44	0,51	8,5	68	184	2,8	3
11	3,39	1,22	0,42	2,9	17	94	1,0	17
12	10,64	1,95	1,03	5,7	69	107	3,3	3

La concentración de Calcio en los suelos 7 y 10 es baja porque contienen menos de 2 cmol(+)/L, las localidades 1, 2, 3, 5, 6, 8, 9 y 11 tienen concentración media porque el valor obtenido se encuentra entre 2 . 5 cmol(+)/L y los suelos 4 y 12 contienen un valor óptimo de concentración (Cabalceta y Molina 2006).

Gadea (1993), Bertsch *et al* (2005) y Rodríguez *et al* (2005) señalan que la cantidad de Ca extraída por ME 3 es similar a la extraída por KCl, lo cual coincide con los resultados obtenidos en el presente estudio.

Loide *et al* (2005) indican que la solución Mehlich 3 extrae el calcio por la acción del nitrato de amonio y el ácido nítrico; Molina y Cabalceta (1990) confirman lo anterior y mencionan que el NH_4NO_3 y HNO_3 actúa de forma muy similar al KCl, por lo cual se justifica la semejanza de los valores de Calcio con ambas soluciones.

Las cantidades de Mg extraídas por la solución Mehlich 3 son muy similares a las obtenidas con KCl. Sin embargo, utilizando la clasificación propuesta por Cabalceta y Molina (2006) la localidad 10 se considera de contenido medio (0,4 .

0,7 cmol(+) Mg/L) y las demás de contenido óptimo (0,7 - 5 cmol(+)/L), mientras que con la solución KCl las localidades se clasifican en contenidos bajos y medios.

Si bien la relación de extracción de Mg entre las soluciones Olsen modificada y Mehlich 3 es cerca de 1:1 como la reportada por Molina y Cabalceta (1990), con la solución ME 3 los resultados se consideran medios y óptimos porque los valores de clasificación son más bajos a los utilizados para categorizar los valores de obtenidos con Olsen modificada.

Con respecto al K las localidades 3, 4, 5, 6 y 8 presentan un valor medio en el contenido de este elemento (0,1 . 0,2 cmol(+)/L), los sitios 2, 7 y 11 tienen un contenido óptimo de K (0,2 . 0,5 cmol(+)/L) y los suelos 1, 9, 10 y 12 contienen un nivel alto de K porque su valor es superior a 0,5 cmol(+)/L.

Cabe destacar que los valores de extracción de K con la solución ME 3 son ligeramente superiores a los obtenidos con Olsen modificada. Sin embargo, las diferencias en clasificación se deben a que los valores de las categorías para la solución ME 3 son inferiores a las utilizadas para Olsen modificada, esto aunque las relaciones de extracción entre ambas soluciones sean tan similares. Es por eso que los suelos categorizados como bajos con la solución Olsen modificada, se consideran medios con la solución ME 3 y los óptimos con Olsen modificada se clasifican como altos.

La solución Mehlich 3 extrajo menor cantidad Cu que la solución Olsen modificada, asimismo las cantidades extraídas de Fe fueron variables, ya que en algunos suelos Olsen modificada extrajo mayor contenido y en otros ME 3 fue la solución de mayor extracción. Con respecto al Mn la solución ME 3 extrajo mayor cantidad de este elemento, todos los suelos se clasificaron como de contenido alto de Mn con respecto a los rangos mencionados por Cabalceta y Molina (2006), por lo que se encuentran en color gris.

Los valores de Fe no se categorizaron de acuerdo a su contenido en niveles bajos, medios, óptimos y altos debido a que no se encontró referencias de Costa Rica que incluyeran al Fe en sus estudios.

Las cantidades de Zn extraídas con la solución Mehlich 3 fueron inferiores a las obtenidas con Olsen modificada. Bertsch *et al* (2005) indican que cuando los suelos analizados presentan valores de calcio inferiores a 10 cmol(+)/L la solución Olsen modificada extrae mayor contenido de Zn que la solución Mehlich 3.

Utilizando la clasificación establecida por Cabalceta y Molina (2006) para Zn con la solución ME 3, se obtuvo lo siguiente: las localidades 1, 3, 4, 9, 10 y 12 se consideran óptimas (2 . 5 mg Zn/L), las localidades 6 y 7 se clasifican como medias (1,5 . 2 mg Zn/L) y las demás localidades se consideran de contenido bajo (menos de 1,5 mg de Zn/L). Si bien la extracción con ME 3 fue inferior, al momento de la categorización con esta solución presenta mayor cantidad de suelos clasificados como óptimos y medios en comparación con la solución Olsen modificada.

Con respecto al P los suelos 1 y 9 presentan contenido medio de este elemento (5 . 10 mg/L), los suelos 11 y 2 presentan un nivel óptimo de este elemento en el suelo (10 . 20 mg/L) y las demás localidades presentan valores bajos de este elemento (<5 mg/L) (Cabalceta y Molina 2006).

La solución Mehlich 3 extrajo menor cantidad de P en todas las localidades en comparación con la solución Olsen modificada; sin embargo, las localidades 1 y 9 también se caracterizaron como de contenido medio con la solución ME 3, mientras que la localidad 2 se caracterizó como de contenido óptimo.

Boniche *et al* (2008) indican que la solución Olsen modificada extrae mayor contenido de P porque este elemento se extrae principalmente de las formas ligadas a óxidos e hidróxidos de Al y Fe por medio de la hidrólisis de OH⁻, mientras que Mehlich 3 lo extrae principalmente de los P-Al, mediante el ácido acético (ácido débil) y el fluoruro de amonio, el cual puede acomplejar fuertemente al Al y liberar el P, o por medio de los iones H⁺ presentes en soluciones ácidas. Cabe destacar que estos mismos autores mencionan que en los suelos de la Zona Norte del país los fosfatos inorgánicos dominantes son de Fe y Al, donde los que

predominan son los de Fe y presentan mayor solubilidad que los de Al, justificando por qué la solución Olsen modificada extrajo mayor cantidad de P.

Cabalceta y Cordero (1994a) mencionan que en suelos Ultisoles, Inceptisoles y Andisoles de Costa Rica la solución Olsen Modificada extrae mayores contenidos de P que la solución Mehlich 3. Contrario a lo reportado por Molina y Cabalceta (1990) quienes obtuvieron que la solución ME 3 extrajo más P que la solución Olsen modificada.

4.2. Contenidos de nutrientes en suelos cultivados con yuca, evaluados con las soluciones extractoras Mehlich 3, KCl y Olsen modificada

El cuadro 8 contiene el ámbito, el promedio y la desviación estándar de los nutrimentos extraídos con las diferentes soluciones extractoras en los sitios analizados. La solución Mehlich 3 presenta ámbitos de extracción, promedio y desviación estándar superiores en los elementos Ca y K; en cuanto al Mg los ámbitos de extracción son muy similares con ambas soluciones, así como el promedio y la desviación estándar.

Cuadro 8. Contenidos de Ca, Mg, K obtenidos con las soluciones extractoras KCl 1 N, Olsen modificada y Mehlich 3, en los diferentes sitios de muestreo analizados en el LAA del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos y valores reportados en la literatura.

Elemento	Solución Extractora	Ámbito cmol(+)/L	Promedio cmol(+)/L	D.E.	Referencias
Ca	KCl	0,84 - 9,85	3,78	2,08	Presente estudio
		0,71 - 7,25	2,68	2,19	Molina y Cabalceta (1990)
		0,45 -21,63	4,36	4,73	Gadea (1993), Cabalceta y Molina (2006)
	Mehlich 3	1,28- 10,64	4,24	2,26	Presente estudio
		0,61- 6,21	2,63	1,79	Molina y Cabalceta (1990)
		0,31 -21,0	4,62	4,41	Gadea (1993), Cabalceta y Molina (2006)
Mg	KCl	0,46 - 1,97	1,25	0,44	Presente estudio
		0,05 - 3,08	0,95	0,76	Molina y Cabalceta (1990)
		0,15 - 8,33	1,31	1,68	Gadea (1993), Cabalceta y Molina (2006)
	Mehlich 3	0,44 - 1,95	1,23	0,44	Presente estudio
		0,06 - 2,04	1,21	0,60	Molina y Cabalceta (1990)
		0,08 - 8,47	1,50	1,86	Gadea (1993), Cabalceta y Molina (2006)
K	Olsen mod.	0,09 - 0,88	0,32	0,24	Presente estudio
		0,01 - 0,60	0,27	0,17	Molina y Cabalceta (1990)
		0,05 - 0,81	0,25	0,19	Gadea (1993), Cabalceta y Molina (2006)
	Mehlich 3	0,12 - 1,03	0,38	0,27	Presente estudio
		0,03 - 0,66	0,15	0,16	Molina y Cabalceta (1990)
		0,05 - 1,24	0,38	0,30	Gadea (1993), Cabalceta y Molina (2006)

Se utilizaron suelos que se cultivan frecuentemente con yuca en la región del Trópico Húmedo de Costa Rica. La utilización de sitios de muestreo con características edáficas diferentes se justifica en el principio de que las soluciones extractoras deben reflejar todas las formas disponibles o una parte proporcional de los nutrimentos en suelos, aunque estos presenten propiedades ampliamente diferentes (Molina y Cabalceta 1990).

Se observa que los ámbitos de extracción, promedios y desviaciones estándar de Ca con KCl y ME 3 son similares. El ámbito de extracción, el promedio y la desviación estándar de Ca obtenidos con KCl y ME 3 se encuentran dentro de los ámbitos reportados en Ultisoles por Gadea (1993), Molina y Cabalceta (1990) y Cabalceta y Molina (2006) (que son los mismos de Gadea (1993)). Rodríguez et al

(2005) indica que la solución ME 3 extrae Mayor contenido de Ca, igual a lo obtenido en la presente investigación.

Al realizar la prueba F para varianzas de dos muestras se encontró que las varianzas entre los métodos de extracción de Ca son iguales y al aplicar la prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales, se obtuvo que no hay diferencias significativas entre los valores obtenidos con KCl y Mehlich 3 (ver anexo 2).

El Mg extraído con KCl (0,46 - 1,97 cmol(+)/L) se encuentra dentro de los rangos reportados por Molina y Cabalceta (1990) (0,05 - 3,08 cmol(+)/L) y Cabalceta y Molina (2006) (0,15 - 8,33 cmol(+)/L), el promedio extraído también es similar al encontrado por estos autores, pero la desviación estándar del presente estudio (0,44) es menor con respecto a esos estudios (1,21 y 1,68) respectivamente, lo cual indica mayor precisión en este estudio.

La solución ME 3 presentó un rango de extracción de Mg (0,44 - 1,95 cmol(+)/L) que coincide con el reportado en Ultisoles por Molina y Cabalceta (1990) y Gadea (1993), mismo de Cabalceta y Molina (2006) (0,06 - 2,04 cmol(+)/L) y (0,08 - 8,47 cmol(+)/L) respectivamente. Así mismo la extracción promedio (1,23 cmol(+)/L) y la desviación estándar obtenidas (0,44), son similares a las reportadas por los autores anteriormente mencionados (1,21 y 1,50 cmol(+)/L) y (0,60 y 1,86) respectivamente; cabe destacar que la desviación estándar de esta investigación es inferior a las reportadas en la literatura, confirmándose una buena repetitividad de los datos obtenidos en el Laboratorio de Análisis Agronómicos.

El contenido de K evaluado con las soluciones Olsen modificada y Mehlich 3 presenta rangos de extracción similares para las diferentes muestras analizadas (0,09 - 0,88 cmol(+)/L) y (0,12 - 1,03 cmol(+)/L) respectivamente; estos rangos coinciden con estudios previos en suelos de Costa Rica realizados por Molina y Cabalceta (1990), Gadea (1993) y Cabalceta y Molina (2006). Los valores promedio y desviación estándar coinciden con los reportados por dichos autores.

Al comprar los rangos de extracción obtenidos en el presente estudio con las soluciones Olsen modificada y ME 3, se confirma lo indicado por Bertsch *et al* (2005), que sin importar el tipo de suelo la solución ME 3 siempre extrae más K que la solución Olsen modificada.

El cuadro 9 contiene el rango, promedio y desviación estándar de la extracción de cobre, manganeso y hierro utilizando las soluciones extractoras Olsen modificada y Mehlich 3, de los suelos en estudio. Se observa que la solución Mehlich 3 extrae mayor cantidad de Cu, Mn y Fe que la solución Olsen modificada.

Cuadro 9. Contenidos de Cu, Mn y Fe obtenido con las soluciones extractoras Olsen modificada y Mehlich 3, en los diferentes sitios de muestreo, analizados en el Laboratorio de Análisis Agronómicos del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos y valores reportados en la literatura.

Elemento	Solución Extractora	Ámbito mg/L	Promedio mg/L	D.E.	Referencias
Cu	Olsen mod.	3,33 - 16,67	8,56	3,68	Presente estudio
		0,40 - 4,10	1,13	0,91	Molina y Cabalceta (1990)
		4,5 - 25,8	10,4	5,4	Cabalceta y Molina (2006)
	Mehlich 3	2,4 . 8,46	4,99	1,76	Presente estudio
		1,40 - 7,60	3,43	1,93	Molina y Cabalceta (1990)
		1,6 - 9,9	3,9	2,1	Cabalceta y Molina (2006)
Mn	Olsen mod.	9,67 - 134,33	46,95	37,31	Presente estudio
		0,20 - 40,40	6,27	10,1	Molina y Cabalceta (1990)
		1,3 . 377	88,1	28,3	Cabalceta y Molina (2006)
	Mehlich 3	16,9- 717,9	178,5	193,0	Presente estudio
		15,9 - 71,25	-	-	Sande <i>et al</i> (2007)
		2,0 . 391	96,7	33,6	Cabalceta y Molina (2006)
Fe	Olsen mod.	58,33 . 677	170,44	157,41	Presente estudio
	Mehlich 3	93,5 . 188,6 107,3 - 350,4	124,1 -	31,6 -	Presente estudio Sande et al (2007)

El rango de extracción de Cu y Mn con la solución Olsen modificada y el de Cu con la solución ME 3 coinciden con el rango de valores obtenidos por Molina y Cabalceta (1990) y Cabalceta y Molina (2006). Con respecto al Mn extraído con ME 3, la mayoría de valores se encuentra dentro del rango obtenido por Cabalceta y Molina (2006), sin embargo, el rango es superior debido a que se presentó un suelo con contenido muy alto de Mn (717,9 mg/L de Mn), excluyendo este valor el

rango se vuelve muy semejante e incluso los valores promedio se acercan en gran medida (16,9 . 332,5 el rango y 124,1 mg/L el promedio). Cabe destacar que la mayoría de los suelos en estudio presentan contenidos de Mn superiores al rango obtenido por Sande *et al* (2007).

En el caso del Fe no se encontraron en Costa Rica estudios que comparen la extracción de este elemento por medio de las soluciones extractoras Olsen mod. y ME 3; Sande *et al* (2007) encontraron en suelos desarrollados sobre granodiorita en España valores similares y superiores de Fe a los de esta investigación.

El contenido de Zn y P de los diferentes sitios de muestreo evaluados con la soluciones Olsen modificada y Mehlich 3 se muestra en el cuadro 10. Se observa que la solución ME 3 extrajo menor cantidad de Zinc que Olsen modificada y que el promedio de Zn y la desviación estándar con Olsen modificada son mayores. El rango de extracción de P del estudio fue similar con ambas soluciones extractoras, Olsen modificada presentó un promedio de extracción superior, al igual que la desviación estándar.

Cuadro 10. Contenidos de Zn y P obtenidos con las soluciones extractoras Olsen modificada y Mehlich 3, en los diferentes sitios de muestreo, analizados en el Laboratorio de Análisis Agronómicos del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos y valores reportados en la literatura.

Elemento	Solución Extractora	Ámbito mg/L	Promedio mg/L	D.E.	Referencias
Zn	Olsen mod.	1,59 - 4,57	2,62	1,01	Presente estudio
		0,30 - 1,70	0,83	0,42	Molina y Cabalceta (1990)
		0,65 - 11,1	4,23	2,57	Molina y Bornemisza (2001), Cabalceta y Molina (2006)
	Mehlich 3	0,98 - 3,27	2,04	0,82	Presente estudio
		0,20 - 3,70	1,66	0,99	Molina y Cabalceta (1990)
		0,73 - 28,8	3,99	5,48	Molina y Bornemisza (2001), Cabalceta y Molina (2006)
P	Olsen mod.	3,24 - 16,12	8,77	5,01	Presente estudio
		0,10 - 13,40	3,8	3,97	Molina y Cabalceta (1990)
		1,3 - 21,9	5,2	4,3	Cabalceta (1995) y Cabalceta y Molina (2006)
	Mehlich 3	0,79 - 16,73	4,81	4,86	Presente estudio
		0,60 - 21,90	5,57	6,79	Molina y Cabalceta (1990)
		1,2 - 14,2	2,7	2,7	Cabalceta (1995), Cabalceta y Molina (2006)

Los valores de Zinc encontrados con ambas soluciones, los promedios de extracción y las desviaciones estándar, coinciden con los rangos de extracción obtenidos en suelos de orden Ultisol por Molina y Cabalceta (1990), Molina y Bornemisza (2001) que son los mismos datos de Cabalceta y Molina (2006). Esta similitud en las cantidades extraídas se debe al alto nivel de correlación que presentan estas soluciones ($R = 0,90^{**}$), asimismo, los resultados obtenidos coinciden con lo reportado por Bertsch *et al* (2005) donde indican que cuando los contenidos de Calcio en el suelo son inferiores a $10 \text{ cmol}(+)/\text{L}$ la solución Olsen modificada presenta mayor nivel de extracción de Zn que la solución Mehlich 3.

Los ámbitos de P obtenidos de las soluciones Olsen modificada y ME 3 son similares, al realizar la prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales, se obtuvo que no existe diferencia entre las cantidades de P extraídas con Olsen modificada y ME 3 (ver anexo 2). Bertsch *et al* (2005) hace referencia a que la solución Mehlich 3 por ser más ácida que Olsen modificada extrae cantidades desde más bajas a más altas o iguales a esta, ligado posiblemente a la cantidad de P-Ca en los suelos.

4.3. Correlación entre soluciones extractoras

En la Figura 9 se observa el gráfico de correlación entre el promedio de calcio extraído en los diferentes sitios de muestreo, utilizando la solución extractora ME 3 y la solución extractora KCl, la ecuación de regresión lineal y el coeficiente de correlación con su debida significancia (**:altamente significativo).

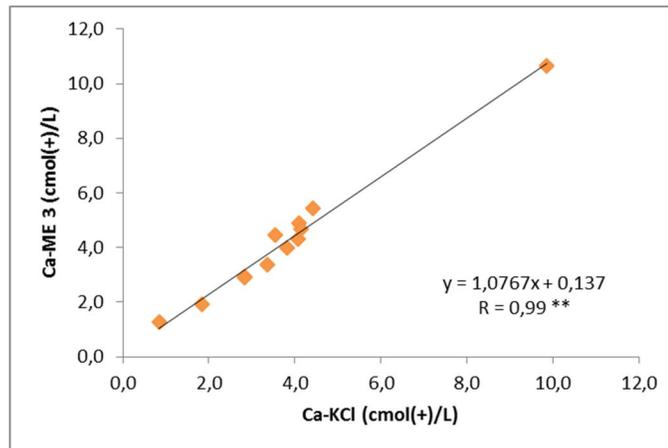


Figura 9. Diagrama de dispersión de Ca extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, evaluados en el LAA del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.

La cantidad de Calcio extraída por ambas soluciones tiene un coeficiente de correlación (R) muy alto (0,99), la ecuación de la recta presenta una pendiente cercana a uno, es decir que los valores extraídos por ME 3 son muy similares a los extraídos por KCl y proporcionales entre sí; gráficamente (Figura 9) se puede observar la gran asociación entre la extracción de ambas soluciones.

Mediante un análisis de varianzas realizado con el programa Microsoft office Excel se determinó que la correlación entre estas soluciones es altamente significativa (p-valor < 0,001). La similitud en la cantidad de Ca extraído por ambas soluciones se debe a que el ácido nítrico y el nitrato de amonio de la solución ME 3 actúan de manera muy similar al KCl (Molina y Cabalceta 1990).

Bertsch *et al* (2005) encontró que el comportamiento de estas soluciones en la extracción de Ca es casi igual ($R^2= 0,93$) y la pendiente de la recta ($Y= 1,07x$) coincide con la obtenida en este estudio; asimismo, Gadea (1993) encontró que las soluciones ME 3 y KCl tienen un coeficiente de correlación ($r=0,99^{**}$), confirmándose el $R= 0,99^{**}$ obtenido en esta investigación.

La correlación entre los valores obtenidos de Mg con la solución extractora ME 3 y KCl se presenta gráficamente en la figura 10, se observa que existe un alto

grado de asociación entre variables y que dicha asociación es de manera proporcional, es decir, conforme aumenta la cantidad de Mg extraído por ME 3 aumenta la cantidad de Mg extraído por KCl.

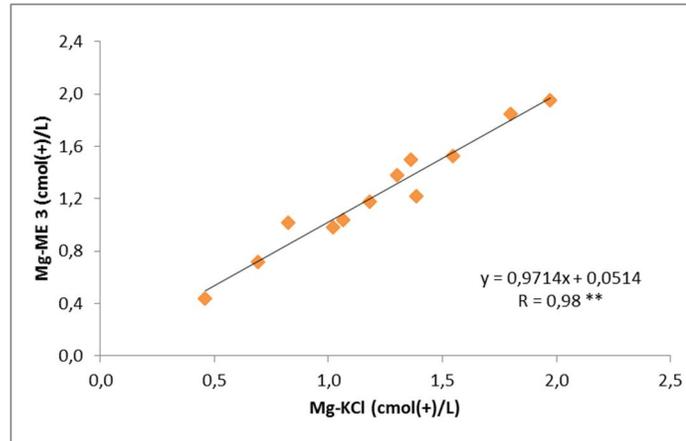


Figura 10. Diagrama de dispersión de Mg extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora KCl, en los diferentes sitios de muestreo, evaluados en el LAA del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.

Los valores de Mg extraídos con las soluciones KCl y Mehlich 3 presentan un coeficiente de correlación $R = 0,98$; al realizar el análisis de varianzas se obtuvo que la correlación entre ambas soluciones es altamente significativa.

Molina y Cabalceta (1990) mencionan un coeficiente de correlación $R = 0,944$ al relacionar los valores de Mg extraídos con ME 3 y KCl en suelos de orden Ultisol. Gadea (1993) obtuvo una correlación de $R = 0,98$ para estas soluciones en suelos Ultisoles. Bertsch *et al* (2005) indican que existe una correlación $R = 0,99$ entre ambas soluciones. Los datos obtenidos y los encontrados por estos autores confirman que si existe una alta relación con los valores extraídos por ambas soluciones.

Gadea (1993) con respecto al comportamiento general de los suelos obtuvo que las soluciones ME 3 y KCl son las que presentan el valor de correlación más alto ($R = 0,97$), el cual es semejante al obtenido en este estudio.

La pendiente de la ecuación de regresión entre el contenido de Mg extraído con ME 3 y KCl es 0,971; es decir, la relación entre ambos extractantes es de casi 1:1, donde una unidad extraída con ME 3 es igual a una unidad extraída por KCl, de ahí que los valores de las extracciones sean tan similares. Este resultado coincide con lo obtenidos por Molina y Cabalceta (1990), Gadea (1993), y Bertsch *et al* (2005) quienes obtuvieron las siguientes pendientes en las ecuaciones de regresión respectivamente: $y=1,132 x$; $y=1,09x$; $y=1,00x$.

La similitud entre las extracciones de Mg con ambas soluciones se debe a la capacidad semejante de sustitución de Mg por los iones K^+ del KCl 1N y los iones NH_4^+ del NH_4NO_3 0,25 N de la solución Mehlich 3 (Vargas *et al* 1992).

Las cantidades de K extraído por las soluciones Olsen modificada y ME 3 presentan una correlación altamente significativa ($r = 0,99$) (ver Figura 4), estos valores de correlación coinciden con el $r = 0,98$; $r = 0,949$ y $r = 0,96$ reportados por Gadea (1993), Chonay (2002) y Bertsch *et al* (2005) respectivamente.

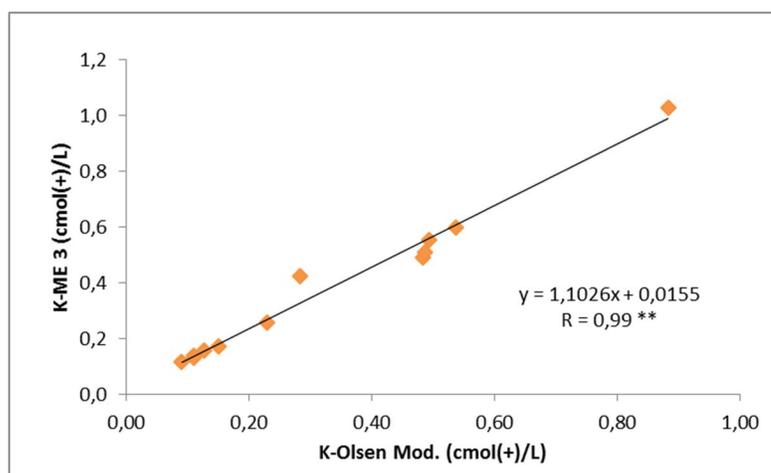


Figura 11. Diagrama de dispersión de K extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, evaluados en el LAA del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.

Los valores de K extraídos por ME 3 son mayores a los obtenidos con Olsen modificada, lo cual se evidencia en el valor de la pendiente de la ecuación de regresión ($ME\ 3 = 1,1026\ Olsen\ mod + 0,0155$) donde una unidad de Mehlich 3

equivale a 1,1026 unidades de Olsen modificada. Molina y Cabalceta (1990) obtuvieron una ecuación de regresión con pendiente inferior a la obtenida en esta investigación ($y=0,756x$), mientras que Gadea (1993), Chonay (2002) y Bertsch *et al* (2005), obtuvieron pendientes superiores ($y=1,60x$; $y=1,509x$; $y=1,52x$ respectivamente).

Bertsch *et al* (2005) indican que sin importar el tipo de suelo la solución ME 3 siempre extrae mayor cantidad de K que Olsen modificada (como sucedió en el presente estudio), mientras que Molina y Cabalceta (1990) obtuvieron que la solución Olsen modificada extrajo más que ME 3.

En la figura 5 se presentan los diagramas de dispersión de Cu, Mn, Fe y Zn extraídos con las soluciones Olsen modificada y Mehlich 3, se observa que existe un alto grado de asociación entre los valores extraídos con ambas soluciones, sin embargo, si bien estos valores son proporcionales se debe aclarar que la solución Olsen modificada extrae mayor cantidad de Cu, Fe y Zn que la solución ME 3, mientras que la solución Mehlich 3 extrae mayor cantidad de Mn que Olsen modificada. Se observa que los contenidos de elementos extraídos presentan un alto coeficiente de correlación, en el caso de Cu, Mn y Zn el coeficiente de correlación es altamente significativo ($p\text{-valor}<0,01$) mientras que para Fe es significativo al 95% ($p\text{-valor}<0,05$)

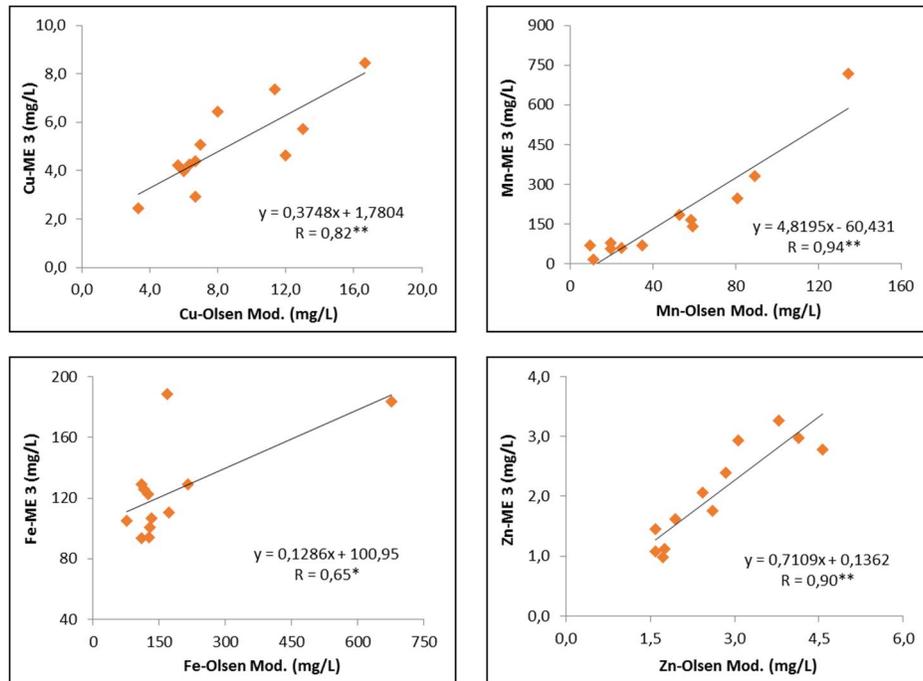


Figura 12. Diagramas de dispersión de cobre, manganeso, zinc y hierro extraídos con los reactivos Mehlich 3 y Olsen Modificada, en los diferentes sitios de muestreo, evaluados en el LAA del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.

Las cantidades extraídas de Cobre con la solución Olsen modificada con respecto a la extracción con ME 3 presentan un coeficiente de correlación de 0,82, el cual es altamente significativo (ver figura 12). Valores de correlación inferiores han sido reportados por Molina y Cabalceta (1990) y Chonay (2002) 0,640 y 0,586 respectivamente; estos autores reportan niveles de extracción de Cu con ME 3 inferiores a los obtenidos en esta investigación. Comparando las ecuaciones de regresión de estos autores $y = 0,260x$, $y = 1,426x$ respectivamente, la ecuación más parecida a la encontrada en este estudio es la reportada por Molina y Cabalceta (1990) quienes realizaron su estudio en suelos Ultisoles de Costa Rica

Se observa que los valores de extracción de Mn por parte de la solución ME 3 son muy superiores a los extraídos por la solución Olsen modificada (ver figura 12), sin embargo estos son proporcionales para las dos soluciones ya que al realizar el análisis de varianzas se obtuvo que la correlación entre estas dos soluciones es altamente significativa ($p\text{-valor} < 0,001$).

Molina y Cabalceta (1990), no encontraron la relación entre la extracción de Mn con las soluciones Olsen modificada y ME 3, ya que no pudieron determinar la cantidad de Mn extraído por ME 3, pero indican que la extracción con Olsen modificada tiene una correlación alta con DTPA ($R= 0,957$); Chonay (2002) reporta un coeficiente de correlación de 0,675 entre Olsen modificada y ME 3, pero no se reporta una ecuación de equivalencia entre estas dos soluciones, de modo que el valor de correlación encontrado en este estudio es más alto que el reportado por este autor, pero no se puede comparar la ecuación obtenida. Por otra parte Sande *et al* (2007) encontraron que el coeficiente de correlación entre el Mn extraído con ME 3 y DTPA tienen un coeficiente de correlación cercano a 0 por lo cual no es significativa dicha relación.

Las cantidades de Fe extraído por Mehlich 3 en algunos de los suelos estudiados fue superior a las extraídas por Olsen modificada y la correlación entre soluciones es significativa al 95% ($p\text{-valor} < 0,05$). Chonay (2002) evaluando la fertilidad de los suelos de las Tierras Altas Volcánicas de Guatemala, encontró un coeficiente de correlación entre Olsen modificada y ME 3 de $R = 0,843$, superior al encontrado en este estudio; la ecuación de equivalencia entre soluciones reportada por este autor es $y = 1,039x$.

Con respecto al Zn el grado de asociación entre las cantidades extraídas por las soluciones es altamente significativa y con un coeficiente de correlación de $R= 0,901$, y la ecuación de regresión lineal es $y = 0,7109x + 0,1362$. El valor del coeficiente de correlación reportado por Molina y Bornemisza (2001), Chonay (2002) y Bertsch *et al* (2005), los cuales son 0,82; 0,99 y 0,92 respectivamente, presenta un alto grado de aceptación como coeficiente de correlación obtenido en la presente investigación. Molina y Cabalceta (1990) reportan un coeficiente de correlación baja para las soluciones estudiadas ($R= 0,464$).

Con respecto a la ecuación de regresión Molina y Cabalceta (1990), Molina y Bornemisza (2001), Chonay (2002) y Bertsch *et al* (2005) obtuvieron las siguientes ecuaciones respectivamente, $y = 0,246x + 0,641$; $y = 1,41x - 1,91$; $y = 1,46x$; $y=0,86x$; la ecuación obtenida en este estudio presenta pendiente superior a la

reportada por Molina y Cabalceta (1990), cercana a la obtenida por Bertsch et al (2005) cuando los valores de Ca son inferiores a 10 comol(+)/L e inferior a la reportada por Molina y Bornemisza (2001) y Chonay (2002).

Molina y Bornemisza (2001) obtuvieron una alta correlación entre las cantidades de Zn extraídas por las soluciones Mehlich 3 y Olsen Mod, quizás debido a que ambas soluciones contienen EDTA como agente quelatante, el cual disuelve parcialmente el Zn acomplejado a la materia orgánica y evita la re-adsorción de Zn por la materia orgánica mediante el filtrado de la muestra.

Cabe destacar que los agentes quelatantes son muy eficientes para la extracción de micronutrientes catiónicos, porque al acomplejar los elementos menores libres en la solución del suelo, disminuyen su actividad iónica en solución, lo que origina su reemplazo a partir de la fase sólida disponible (Molina y Bornemisza 2001).

La cantidad de micronutrientes extraídos por el quelato está relacionada con la actividad de los cationes en solución y con la capacidad para reemplazar esas iones. De esta forma el agente quelatante tiende a simular la remoción de nutrientes por las raíces y la restitución de estos por el suelo que los rodea (Molina y Bornemisza 2001).

El coeficiente de correlación entre las cantidades extraídas de P por Olsen modificada y Me 3 es $R= 0,430$ (Figura 13), el cual no es significativo, por lo que si bien gráficamente pareciera existe cierto nivel de asociación, estadísticamente esas semejanzas no son importantes.

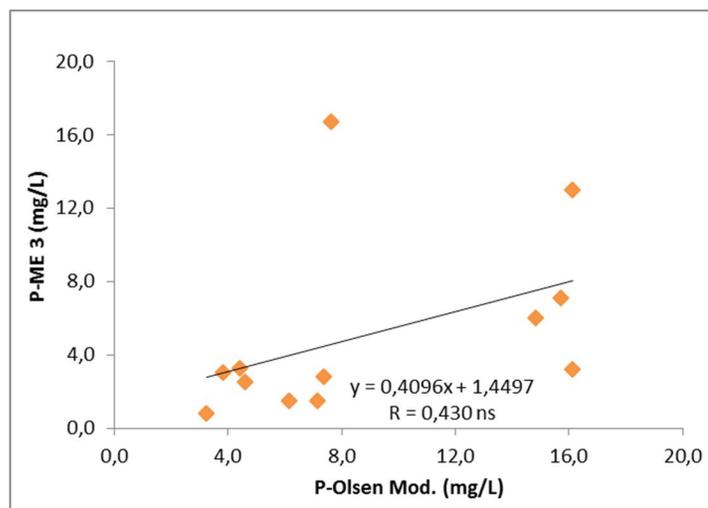


Figura 13. Diagrama de dispersión de P extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo, analizados en el LAA del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.

El coeficiente de correlación entre las cantidades extraídas de P por Olsen modificada y ME 3 es $R = 0,430$, el cual no es significativo, por lo que si bien gráficamente pareciera existe cierto nivel de asociación, estadísticamente esas semejanzas no son importantes.

Bertsch et al (2005) indica que la correlación de P con ME 3 y Olsen modificada no es clara en absoluto, y que con el número de muestras de su estudio no fue posible establecer una correlación significativa o una tendencia definida, debido a que la solución ME 3 extrae cantidades de P mucho más altas, iguales o mucho más bajas que las que extrae Olsen modificada.

Cabalчета (1995) correlacionando el contenido general de P en 100 suelos de Costa Rica encontró que Olsen modificada y ME 3 extraen cantidades de P muy parecidas y las cantidades extraídas presentaron una correlación de $R = 0,828$ (altamente significativa), la ecuación de regresión fue la siguiente $y = 0,647$ (ME 3) + 2,829. Chonay (2002) obtuvo una correlación de $R = 0,88$ para estas soluciones en la extracción de P. Los datos en este estudio coinciden con lo indicado por Bertsch et al (2005), no así por lo encontrado por los otros autores mencionados.

4.4. Cantidad de nutrimentos totales absorbidos por el cultivo de yuca

El análisis de tejidos vegetales permitió obtener los valores del contenido de nutrientes en cada una de las partes de la planta (hoja, tallo y raíz). Con la suma de los resultados de cada parte, se calculó los valores de absorción total de cada elemento por parte de las plantas de yuca durante su ciclo de cultivo. Dichos valores de absorción se presentan en el cuadro 11. Estos están expresados como cantidad de nutrientes absorbidos por cada tonelada de materia de seca del cultivo.

Cuadro 11. Cantidad de nutrimentos extraídos (kg) por las plantas de yuca, para producir una tonelada de MS total.

Localidad	N	Ca	Mg	K	Cu	Mn	Fe	Zn	P
Muelle	7,76	3,71	1,16	12,02	0,08	0,42	0,85	0,31	0,45
Muelle	9,17	4,02	1,47	12,44	0,10	0,78	1,11	0,52	0,55
Aeropuerto F.	6,28	2,83	1,30	6,50	0,12	0,12	0,79	0,42	1,35
El Laurel	6,60	2,54	1,04	7,54	0,15	0,33	0,66	0,39	0,33
Lote 11, S.J.	7,31	1,98	1,34	4,54	0,13	0,27	0,53	0,37	0,30
Lote 14, S.J.	7,71	2,46	1,85	6,83	0,07	0,30	0,99	0,30	0,35
Banderas	7,24	1,94	1,52	5,12	0,08	0,30	1,25	0,56	0,47
Canta Rana	7,39	1,68	1,34	6,98	0,06	0,48	0,77	0,37	0,37
Paso Real	7,47	1,75	1,42	4,14	0,06	0,29	0,72	0,33	0,42
Guayabito	9,08	2,90	1,49	4,85	0,07	0,65	1,06	0,33	0,40
Cerro Negro	7,99	2,82	0,95	8,83	0,07	0,85	0,70	0,39	0,53
Palmitas	6,66	2,80	1,30	8,59	0,04	0,26	0,60	0,35	0,66
Sonafluca	7,00	5,09	1,57	10,75	0,05	0,26	1,38	0,39	1,12
Promedio	7,51	2,81	1,37	7,63	0,08	0,41	0,88	0,39	0,56

- Los valores expresados en el cuadro corresponden a kg de elemento extraídos/tonelada de MS de la planta de yuca.

Según Chavarría (2003), la fertilización debe realizarse en forma fraccionada a los 30, 90, 120 y 180 días después de la siembra. Cadavid (2002), De Diego y Quirós (2006) y Cadavid (2008) indican que la planta presenta un aumento en la acumulación de nutrimentos después de los dos meses, presentando un pico máximo de extracción entre los 120 y los 150 después de siembra, lo cual coincide con la tasa de acumulación de materia seca más alta. Con base en esto se fundamenta lo propuesto por Furcal *et al* (2009) quienes indican que este comportamiento en la acumulación marca diferentes etapas fisiológicas del cultivo,

siendo importante establecer programas de fertilización entre los 30 y 150 después de siembra.

En el presente estudio se obtuvo que en promedio para producir una tonelada de materia seca de plantas de yuca el cultivo extrae 7,51 kg de N, 2,81 kg de Ca, 1,37 kg de Mg 7,67 kg de K y 0,56 kg de P principalmente (ver cuadro 11). La mediana de extracción de estos elementos es similar al promedio 7,43 kg de N, 2,80 kg de Ca, 1,35 kg de Mg 7,26 kg de K y 0,46 kg de P.

El orden de extracción promedio de elementos por parte de diferentes plantas de yuca obtenido en este estudio fue: K>N>Ca>Mg>P este orden de extracción coincide con el reportado por Chavarría (2003) y Gadea *et al* (2012), mientras que difiere con lo reportado por Cadavid (2002), Barbona (2003), De Diego y Quirós (2006), Rodríguez *et al* (2009) y Cadavid (2011) quienes obtuvieron el siguiente orden de extracción de nutrientes para diferentes variedades de yuca: N>K>Ca>P. Utilizando la mediana de los valores de absorbidos por la planta, el orden de extracción cambia y coincide con lo reportado por los autores anteriormente mencionados.

El cuadro 12 contiene la cantidad de cada nutriente (kg), extraídos por las plantas de yuca para producir una tonelada de raíz.

Cuadro 12. Cantidad de nutrimentos extraídos (kg) para producir una tonelada de MS de raíz de yuca.

Localidad	N	Ca	Mg	K	Cu	Mn	Fe	Zn	P
Muelle	13,34	6,37	1,99	20,65	0,13	0,72	1,46	0,54	0,77
Muelle	15,58	6,83	2,50	21,14	0,17	1,32	1,89	0,88	0,93
Aeropuerto F.	11,52	5,20	2,38	11,93	0,22	0,23	1,45	0,77	2,49
El Laurel	10,31	3,98	1,63	11,78	0,23	0,52	1,03	0,61	0,51
Lote 11, S.J.	12,95	3,51	2,37	8,04	0,23	0,47	0,94	0,65	0,53
Lote 14, S.J.	12,41	3,96	2,97	11,00	0,11	0,49	1,60	0,49	0,56
Banderas	12,46	3,34	2,62	8,82	0,14	0,52	2,14	0,97	0,82
Canta Rana	12,24	2,78	2,22	11,55	0,09	0,79	1,27	0,61	0,61
Paso Real	10,25	2,41	1,95	5,69	0,09	0,39	0,99	0,46	0,57
Guayabito	17,35	5,54	2,84	9,27	0,13	1,25	2,02	0,63	0,77
Cerro Negro	14,99	5,29	1,79	16,56	0,13	1,60	1,31	0,73	1,00
Palmitas	11,95	5,02	2,33	15,40	0,08	0,47	1,08	0,62	1,19
Sonafluca	14,83	10,78	3,32	22,78	0,10	0,54	2,92	0,82	2,36
Promedio	13,09	5,00	2,38	13,43	0,14	0,72	1,55	0,67	1,01

Los valores del cuadro corresponden a kg de elemento extraídos/tonelada de MS de raíz de yuca.

Si bien se requiere mayor extracción de nutrientes para producir una tonelada de materia seca de raíz, se mantiene la proporción de extracción de nutrientes igual que para producir una tonelada de materia seca de la planta de yuca: K>N>Ca>Mg>P.

Con base en el cuadro 12 se observa que en promedio para producir una tonelada de materia seca de raíz de yuca, se extrae 13,09 kg de N; 5 kg de Ca; 2,38 kg de Mg; 13,43 kg de K; 1,01 kg de P; 0,14 kg de Cu; 0,72 kg de Mn; 1,55 kg de Fe y 0,67 kg de Zn, contenidos superiores a los extraídos para producir una tonelada de materia seca de la planta completa.

El cuadro 13 contiene la cantidad de nutrientes en kilogramos que extrae el cultivo de yuca para producir una tonelada de raíces frescas. Se observa que los valores de extracción son menos de la mitad de los requeridos para producir una tonelada de materia seca de raíz.

Cuadro 13. Cantidad de nutrimentos extraídos (kg) para producir una tonelada de raíz de yuca en peso fresco.

Localidad	N	Ca	Mg	K	Cu	Mn	Fe	Zn	P
Muelle	4,64	2,22	0,69	7,19	0,04	0,25	0,51	0,19	0,27
Muelle	5,01	2,20	0,80	6,80	0,06	0,42	0,61	0,28	0,30
Aeropuerto F.	4,43	2,00	0,92	4,59	0,08	0,09	0,56	0,30	0,96
El Laurel	3,59	1,39	0,57	4,10	0,08	0,18	0,36	0,21	0,18
Lote 11, S.J.	4,62	1,25	0,85	2,87	0,08	0,17	0,34	0,23	0,19
Lote 14, S.J.	5,00	1,59	1,20	4,43	0,04	0,20	0,64	0,20	0,23
Banderas	4,70	1,26	0,99	3,33	0,05	0,20	0,81	0,36	0,31
Canta Rana	4,49	1,02	0,81	4,24	0,03	0,29	0,47	0,22	0,22
Paso Real	3,40	0,80	0,65	1,88	0,03	0,13	0,33	0,15	0,19
Guayabito	6,63	2,12	1,09	3,54	0,05	0,48	0,77	0,24	0,29
Cerro Negro	5,59	1,97	0,67	6,18	0,05	0,60	0,49	0,27	0,37
Palmitas	4,56	1,92	0,89	5,89	0,03	0,18	0,41	0,24	0,46
Sonafluca	4,30	3,12	0,96	6,60	0,03	0,16	0,85	0,24	0,69
Promedio	4,69	1,76	0,85	4,74	0,05	0,26	0,55	0,24	0,36

Los valores del cuadro corresponden a kg de elemento extraídos/tonelada de raíz de yuca fresca.

En la presente investigación se obtuvo que en promedio para producir una tonelada de raíces de yuca fresca el cultivo extrae durante todo el ciclo 4,69 kg de N; 1,75 kg de Ca; 0,85 kg de Mg; 4,74 kg de K; 0,36 kg de P; 0,05 kg de Cu; 0,26 kg de Mn; 0,55 kg de Fe y 0,24 kg de Zn. Se realizó esta determinación ya que de esta manera es que se contabiliza el rendimiento del cultivo de yuca en el país (ton yuca PF).

Cadavid (2011), establece que en promedio un cultivar de yuca para producir una tonelada de raíces frescas extrae 4,42 kg de N, 0,67 kg de P, 3,58 kg de K, 1,36 kg de Ca, 0,82 kg de Mg y 0,42 kg de S. Chavarría (2003) indica que la cantidad de nutrientes extraídos por hectárea para producir una tonelada de yuca son 2,14 kg de N, 0,46 kg de P, 3,5 kg de K, 0,69 kg de Ca y 0,39 kg de Mg. Los valores de N, K, Ca y Mg obtenidos por estos autores son inferiores a los obtenidos en esta investigación, mientras que el valor de extracción de P es superior.

Cabe destacar que aunque se presenta similitud en la cantidad extraída de los elementos, Cadavid (2002), Barbona (2003), Cadavid (2011) y Rodríguez *et al*

(2009) indican que la relación de extracción de nutrientes por el cultivo de yuca es N>K>Ca>Mg>P, mientras que en este estudio se obtuvo que el orden de extracción es K>N>Ca>Mg>P, que coincide con el reportado por Chavarría (2003) y Gadea *et al* (2012).

4.5. Correlación entre la absorción por la planta y las cantidades extraídas de Ca, Mg, K, Cu, Mn, Fe, Zn y P por las soluciones extractoras KCl-Olsen modificada y Mehlich 3.

El cuadro 14 contiene coeficientes de correlación resultantes de correlacionar la cantidad de Ca y Mg absorbidas por hoja, tallo, raíz y total de plantas de yuca, con la cantidad extraída de estos nutrientes con las soluciones KCl y Mehlich 3. Se observa que dichos coeficientes no son significativos.

Cuadro 14. Coeficientes correlación entre el contenido de Ca y Mg absorbidos por hoja, tallo, raíz y total de plantas de yuca y la cantidad de estos elementos extraídas del suelo con las soluciones KCl y Mehlich 3 en las diferentes localidades estudiadas.

Elemento	Parte de la planta	Solución	Coefficiente de correlación
Ca	Hoja	KCl	R = 0,39 ns
		Mehlich 3	R = 0,36 ns
	Tallo	KCl	R = 0,38 ns
		Mehlich 3	R = 0,39 ns
	Raíz	KCl	R = 0,36 ns
		Mehlich 3	R = 0,38 ns
	Total	KCl	R = 0,44 ns
		Mehlich 3	R = 0,39 ns
Mg	Hoja	KCl	R = 0,01 ns
		Mehlich 3	R = 0,08 ns
	Tallo	KCl	R = 0,17 ns
		Mehlich 3	R = 0,08 ns
	Raíz	KCl	R = 0,02 ns
		Mehlich 3	R = 0,04 ns
	Total	KCl	R = 0,15 ns
		Mehlich 3	R = 0,07 ns

Tanto para calcio como para magnesio los coeficientes de correlación no son significativos ya que al realizar el análisis de varianza el p-valor fue superior a

0,05, por lo que no existe relación entre la cantidad absorbida de Ca y Mg por las plantas y la cantidad extraída por las soluciones.

Se observa que para ambos elementos los coeficientes de correlación son muy similares para cada una de las partes y el total. Esta semejanza se da por que la correlación entre las cantidades de Ca y Mg extraído por las soluciones ME 3 y KCl presentaron una correlación muy alta ($R= 0,99$ y $R=0,98$ respectivamente) haciendo que la relación con respecto a la absorción sea muy semejante.

En la figura 14 se observa gráficamente la correlación entre el Ca y el Mg absorbidos por las plantas y la disponibilidad de este elemento según las soluciones extractoras KCl y ME 3. La diferencia principal entre la relación de absorción-extracción de Ca y Mg es que la solución ME 3 extrajo más cantidad de Mg que la solución KCl, por otro lado, con respecto al Ca ambas soluciones extrajeron cantidades similares. Si bien se observa cierto grado de asociación entre variables dichas relaciones no son significativas estadísticamente.

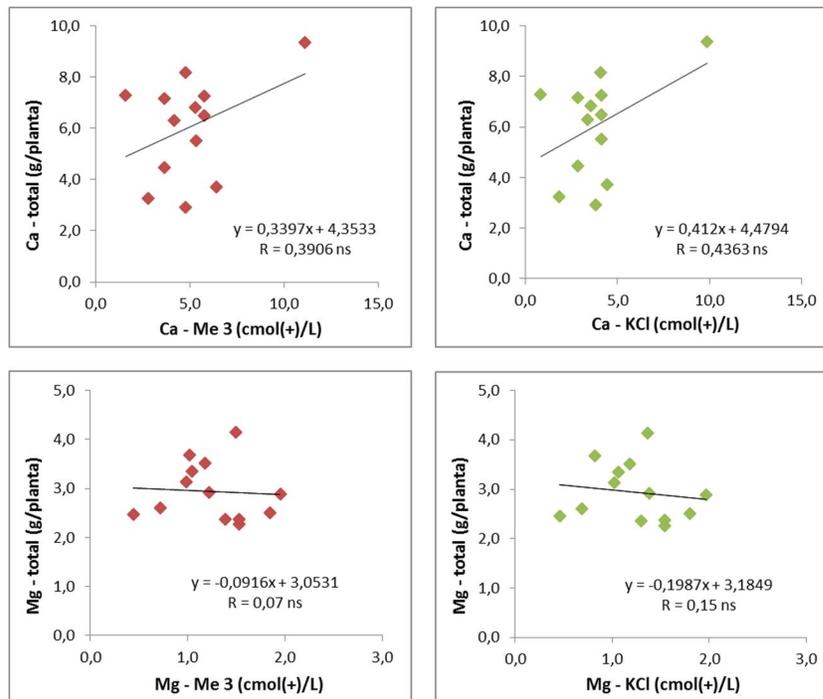


Figura 14. Diagrama de dispersión del Ca y Mg absorbido por las plantas de yuca y la cantidad de Ca y Mg en el suelo extraído con las soluciones extractoras Mehlich 3 y KCl, en los diferentes sitios de muestreo.

La dispersión de los valores de absorción total de Ca y Mg con respecto a lo extraído por ambas soluciones presenta una tendencia similar al relacionar lo absorbido por cada parte de la planta y las cantidades de los elementos extraídos.

Los valores de absorción de cada elemento por la planta se encuentran en un rango el cual es independiente de la cantidad de nutriente disponible en el suelo, por ejemplo, en la localidad 10 con 0,44 cmol (+) Mg/L (ME 3) y 0,46 cmol (+) Mg/L (KCl) las plantas absorbieron 2,46 mg de Magnesio, mientras que en el primer sitio de muestreo con 1,53 cmol (+) Mg/L (ME 3) y 1,55 cmol (+) Mg/L (KCl) las plantas absorbieron 2,38 mg de Mg (similar a lo absorbido en la localidad 10). Se puede decir que por características propias de la planta esta absorbe cierta cantidad de cada nutrimento independientemente de la cantidad disponible. Rodríguez *et al* (2009) obtuvieron en plantas de yuca cv. `Tempranita' al momento de la cosecha una absorción total por planta de 2,45 g de Mg y 11,39 g de Ca, en el presente estudio la cantidad promedio de Mg en las plantas de Valencia, Señorita y MBRA 383 fue de 2,94g Mg parecido al obtenido por dichos autores, pero la cantidad promedio de calcio fue de inferior (6,06g Ca por planta).

Es importantes destacar que Ramírez (1989a) y Ramírez (1989b) indican que el cultivo de la yuca presenta gran variabilidad en la respuesta a la fertilización, la cual puede considerarse como una respuesta media, sin importar la fertilidad de los suelos. Por lo cual es de esperar que aunque se hayan presentado niveles de fertilización diferentes en los sitios de muestreo, debido a la respuesta del cultivo a la fertilización los valores de extracción sean similares, como se presentó en esta investigación.

En el cuadro 15 se presentan los coeficientes de correlación resultantes de relacionar la cantidad de nutrientes absorbidos por cada una de las partes del cultivo de yuca y su total con la cantidad de K y Cu disponible en el suelo según las soluciones extractoras ME 3 y Olsen modificada; se observa que dichas relaciones no son significativas (p-valor 0,05).

Cuadro 15. Coeficientes de correlación entre el contenido de K y Cu absorbidos por hoja, tallo, raíz y total de plantas de yuca y la cantidad de K y Cu extraída del suelo con las soluciones Olsen modificada y Mehlich 3 en los diferentes sitios de muestreo.

Elemento	Parte de la planta	Solución	Coefficiente de correlación
K	Hoja	Olsen mod.	R = 0,48 ns
		Mehlich 3	R = 0,50 ns
	Tallo	Olsen mod.	R = 0,53 ns
		Mehlich 3	R = 0,54 ns
	Raíz	Olsen mod.	R = 0,20 ns
		Mehlich 3	R = 0,19 ns
	Total	Olsen mod.	R = 0,46 ns
		Mehlich 3	R = 0,46 ns
Cu	Hoja	Olsen mod.	R = 0,02 ns
		Mehlich 3	R = 0,16 ns
	Tallo	Olsen mod.	R = 0,03 ns
		Mehlich 3	R = 0,25 ns
	Raíz	Olsen mod.	R = 0,10 ns
		Mehlich 3	R = 0,30 ns
	Total	Olsen mod.	R = 0,08 ns
		Mehlich 3	R = 0,29 ns

La cantidad de K y Cu extraído por las soluciones extractoras y la cantidad de estos elementos absorbidos por las plantas de yuca durante el ciclo de cultivo no presentaron una correlación significativa, ni al relacionar lo absorbido por hoja, tallo o raíz. Se observa que la solución ME 3 presentó mayores valores de correlación que Olsen modificada. Los gráficos de correlación entre la cantidad total de K y Cu absorbidos por las plantas y las cantidades extraídas por las soluciones se pueden observar en el anexo 3.

De Diego y Quirós (2006) encontraron que las plantas variedad Valencia absorben durante todo el ciclo de cultivo 17,54 g de K , similar al valor promedio de absorción total de K obtenido en la presente investigación (16,42 g K/planta); esto confirma que las plantas de yuca tienen una capacidad de absorción determinada de cada tipo de elemento.

Cuadro 16. Coeficientes de correlación entre el contenido de Mn y Fe absorbidos por hoja, tallo, raíz y total de plantas de yuca y la cantidad de Mn y Fe en el suelo según las soluciones extractoras Olsen modificada y Mehlich 3 en los diferentes sitios de muestreo.

Elemento	Parte de la planta	Solución	Coefficiente de correlación
Mn	Hoja	Olsen mod.	R = 0,54 ns
		Mehlich 3	R = 0,53 ns
	Tallo	Olsen mod.	R = 0,33 ns
		Mehlich 3	R = 0,28 ns
	Raíz	Olsen mod.	R = 0,75 **
		Mehlich 3	R = 0,73 **
	Total	Olsen mod.	R = 0,43 ns
		Mehlich 3	R = 0,40 ns
Fe	Hoja	Olsen mod.	R = 0,33 ns
		Mehlich 3	R = 0,22 ns
	Tallo	Olsen mod.	R = 0,34 ns
		Mehlich 3	R = 0,31 ns
	Raíz	Olsen mod.	R = 0,44 ns
		Mehlich 3	R = 0,37 ns
	Total	Olsen mod.	R = 0,02 ns
		Mehlich 3	R = 0,01 ns

** significa diferencia estadística

La cantidad de Mn contenido en las raíces presentó una correlación altamente significativa (p-valor 0,01) al relacionarla con la disponibilidad de Mn en el suelo según las soluciones extractoras Olsen modificada y ME 3. En la Figura 15 se observa que a mayor disponibilidad de Mn en el suelo, más contenido de este elemento absorbieron las raíces del cultivo a lo largo del ciclo. La razón por la cual sólo la cantidad de Mn en las raíces presente correlación altamente significativa puede deberse a las características de movilidad del elemento dentro de la planta.

En el caso del Fe las cantidades absorbidas de este elemento no correlacionaron con la cantidad disponible en el suelo. Gráficamente (Figura 15) se observa que los valores están muy dispersos y no tienen una relación claramente definida. Con ambas soluciones se observa una leve tendencia a que conforme aumenta la cantidad de Fe absorbido por la raíz menor es la cantidad de Fe disponible en el suelo; en ME 3 es más clara, pero no es significativa. Cabe

destacar que tanto para el Mn y el Fe el coeficiente de correlación obtenido con la solución Olsen modificada fue mayor que el obtenido con ME 3.

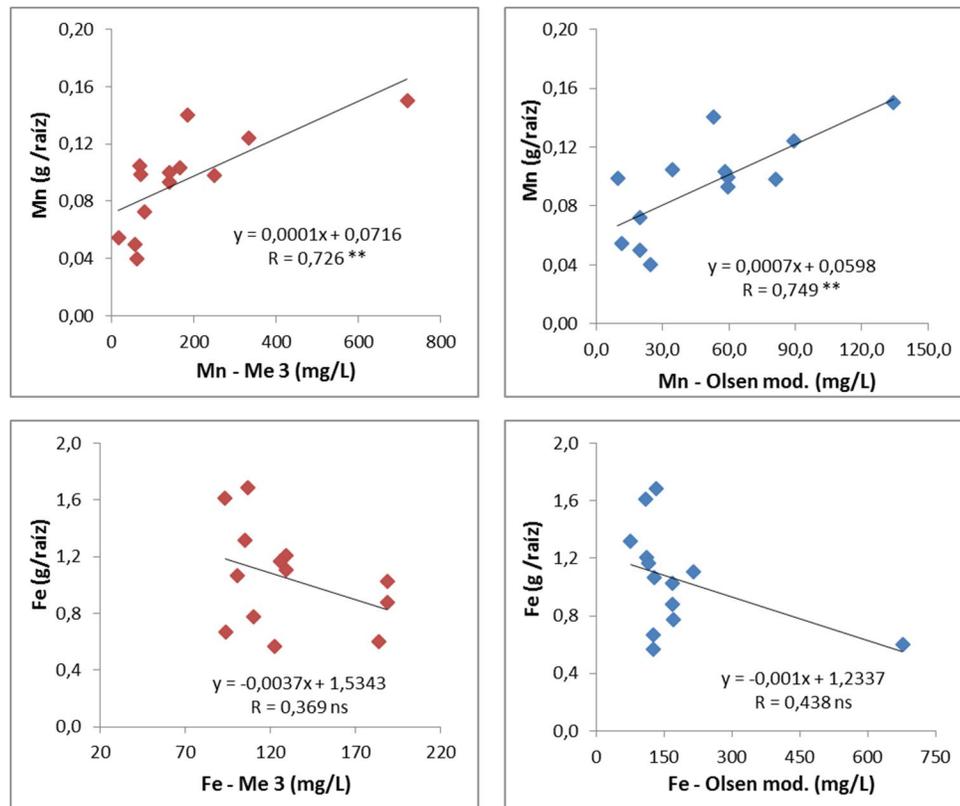


Figura 15. Diagrama de dispersión del Mn y Fe absorbido por las raíces de yuca y la cantidad de Mn y Fe en el suelo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo.

En el cuadro 17 se muestran coeficientes de correlación del contenido de Zn y P disponible en los diferentes sitios de muestreo y la cantidad de Zn y P absorbida por hojas, tallo, raíz y total durante todo el ciclo del cultivo. Se observa que la cantidad de Zn extraída con Olsen modificada presenta un coeficiente de correlación significativo con respecto a la cantidad de Zn absorbido por los tallos. En el caso de ME 3 la cantidad de Zn disponible en el suelo según esta solución correlaciona con un 95% de confianza con la cantidad de Zn absorbido por las hojas al final ciclo de cultivo.

Cuadro 17. Coeficientes de correlación entre el contenido de Zn y P absorbidos por hoja, tallo, raíz y total de plantas de yuca y la cantidad de Zn y P en el suelo extraído con las soluciones Olsen modificada y Mehlich 3 en los diferentes sitios de muestreo.

Elemento	Parte de la planta	Solución	Coefficiente de correlación
Zn	Hoja	Olsen mod.	R = 0,43 ns
		Mehlich 3	R = 0,56 *
	Tallo	Olsen mod.	R = 0,62 *
		Mehlich 3	R = 0,47 ns
	Raíz	Olsen mod.	R = 0,32 ns
		Mehlich 3	R = 0,28 ns
	Total	Olsen mod.	R = 0,05 ns
		Mehlich 3	R = 0,04 ns
P	Hoja	Olsen mod.	R = 0,43 ns
		Mehlich 3	R = 0,53 ns
	Tallo	Olsen mod.	R = 0,14 ns
		Mehlich 3	R = 0,20 ns
	Raíz	Olsen mod.	R = 0,33 ns
		Mehlich 3	R = 0,51 ns
	Total	Olsen mod.	R = 0,36 ns
		Mehlich 3	R = 0,54 ns

* : correlación al 95% de probabilidad

La correlación entre las cantidades absorbidas de P por hojas, tallos, raíces y total y las cantidades de P extraídas del suelo por las soluciones ME 3 y Olsen modificada no presentaron coeficientes de correlación significativos. El total absorbido no refleja mayor o menor disponibilidad del elemento en el suelo, esto se evidencia en la dispersión de los datos ya que se presentan valores de absorción similares para diferentes niveles de concentración del elemento en el suelo (ver anexo 4).

De Diego y Quirós (2006) encontraron que las plantas de yuca variedad Valencia al final de su ciclo absorbieron 3,27 g de P/planta en el presente estudio las plantas absorbieron en promedio 1,22 g de P/planta.

En el caso del P la pendiente de ambas soluciones es muy similar para cada una de las partes y el total y cercana a cero; si bien el coeficiente de correlación no es significativo, es superior con la solución ME 3 con respecto a Olsen modificada. En el caso del Zn tanto las pendientes como los coeficientes de correlación obtenidos con la solución Olsen modificada son superiores a los obtenidos con ME 3 (con la excepción de los coeficientes de correlación en hojas).

Los gráficos de correlación entre la cantidad total de P absorbido por las plantas y la cantidad de ese elemento disponible en el suelo con ambas soluciones se muestran en el anexo 4; asimismo este contiene la relación entre la cantidad de Zn absorbida por las hojas de yuca y la cantidad del mismo elemento en el suelo según las solución Me, así como la relación entre la cantidad de Zn en tallo y la cantidad del mismo elemento en el suelo según las solución Olsen modificada.

Es importante mencionar que Peralta (2000) no encontró correlaciones significativas, al comparar la extracción química y la concentración de nutrientes en el tejido vegetal de plántulas de café con las soluciones Olsen modificada y Mehlich 3.

4.6. Determinación de niveles críticos

Por la dispersión de los valores de correlación entre el rendimiento absoluto (kg de materia seca por planta de yuca) y la cantidad de cada nutriente disponible en el suelo no se pudo obtener valores de niveles críticos para ninguno de los elementos evaluados.

En la Figura 16 se presenta el diagrama de dispersión del rendimiento absoluto (g MS/planta) en cada sitio de muestreo y la concentración de Ca y Mg evaluados con las soluciones KCl y ME 3. Ninguno de los gráficos presenta las líneas transversales y longitudinales utilizadas para establecer los niveles críticos según el método gráfico de Cate y Nelson, porque debido a la poca variabilidad en la dispersión de los puntos no se pudo separar valores con mayor rendimiento que coincidieran con valores de mayor disponibilidad de los elementos en el suelo.

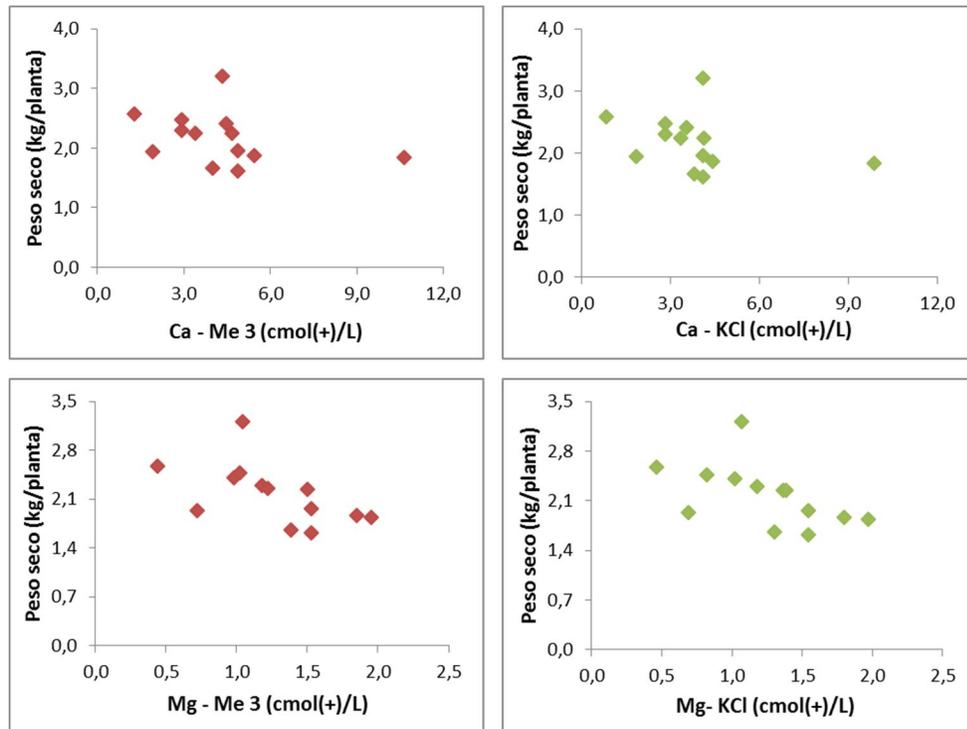


Figura 16. Gráficos diseñados para la determinación del nivel crítico de Ca y Mg con las soluciones extractoras Mehlich 3 y KCl en suelos cultivados con yuca, por medio de la metodología Cate y Nelson (1965).

Cabalчета y Molina (2006) indican que para la determinación de un nivel crítico adecuado la mayoría de puntos (al sobre poner las líneas de un plano cartesiano), deben ubicarse en la parte superior derecha e inferior izquierda, porque si la mayoría se encuentra en los cuadrantes superior izquierdo e inferior derecho, indica que el método de extracción no es apropiado para los suelos bajo estudio, o que no existe correlación entre el análisis de suelos y el rendimiento de la planta.

En el presente estudio los puntos de relación entre los valores de rendimiento absoluto con respecto a la cantidad de Ca y Mg en el suelo extraído por las soluciones extractoras KCl y ME 3, no pudieron ser agrupados en su mayoría en los cuadrantes positivos, por lo que no se pudo determinar ningún nivel crítico.

Cabe destacar que Cabalчета y Molina (2006) mencionan que una correlación perfecta para las soluciones extractoras colocaría más del 90 % de los datos en estas 2 poblaciones (superior derecha e inferior izquierda), lo cual no sucedió en esta investigación.

Con respecto al nivel crítico de Calcio obtenido con la solución KCl: Gadea (1993) encontró en suelos Ultisoles e Inceptisoles utilizando Sorgo como planta indicadora, niveles críticos de 4,2 cmol(+)C/L y 5,0 cmol(+)Ca/L respectivamente. Chicaiza (2001) reporta en su estudio realizado en suelos ecuatorianos un nivel crítico de 2,4 meq de Ca/100ml de suelo, asociado a un 30% de rendimiento relativo en peso seco del cultivo de maíz en invernadero. Arias *et al* (2003) obtuvieron en Ultisoles y utilizando plantas in vitro de banano (*Musa AAA cv. Gran Enano*) sembradas en bolsas, un nivel crítico de 4,2 cmol(+)/L. Bertsch *et al* (2005) y Méndez y Bertsch (2012) indican que 4 cmol(+)/L es el nivel crítico general para el elemento Ca. Es importante destacar que los valores de nivel crítico anteriormente mencionados fueron obtenidos con base en rendimientos relativos y no con respecto a valores absolutos como se pretendía en la presente investigación.

Utilizando la solución extractora Mehlich 3 Gadea (1993) en suelos Ultisoles e Inceptisoles obtuvo los siguientes valores de nivel crítico 4,0 cmol(+)Ca/L y 3,1 cmol(+)Ca/L, respectivamente. Chonay (2002) reporta un nivel crítico de 3 cmol(+)Ca/L utilizando la misma solución en suelos de las tierras altas volcánicas de Guatemala y con sorgo como planta indicadora. Arias *et al* (2003) con dicha solución utilizando plantas in vitro de banano obtuvieron un nivel crítico de Ca de 5 cmol(+)/L; Bertsch *et al* (2005) reportan que el nivel crítico de calcio general usando la solución ME 3 es igual a obtenido con KCl (4 cmol(+)/L). Cabalceta y Molina (2006) encontraron que para 100 suelos de Costa Rica (sin dividirlos en ordenes), un nivel crítico fue de 5 cmol(+)Ca/L, al igual que Arias *et al* (2003).

En el caso del nivel crítico de Mg con respecto a la solución extractora KCl Gadea (1993), encontró en suelos Ultisoles que el nivel crítico fue de 0,8 cmol(+)Mg/L y en Inceptisoles de 1,0 cmol(+)Mg/L. Arias *et al* (2003) obtuvieron 2,3 cmol(+) Mg/L como nivel crítico. Bertsch *et al* (2005) y Méndez y Bertsch (2012) mencionan para esta solución un nivel crítico general de 1cmol(+) Mg/L.

Los niveles críticos de Mg reportados utilizando la solución extractora ME 3 son los siguientes: Gadea (1993) obtuvo 0,8 y 1,1 cmol(+)Mg/L en Ultisoles e

Inceptisoles. Chonay (2002) indica un nivel crítico de 0,5 cmol(+)Mg/L. Arias *et al* (2003) reportan 2,3 cmol(+) Mg/L como nivel crítico para esta solución. Bertsch *et al* (2005) mencionan un nivel crítico general de 1cmol(+) Mg/L. Cabalceta y Molina (2006) reportaron un valor de 0,7 cmol(+)/L de Mg como nivel crítico general.

El nivel crítico entre el rendimiento en MS del cultivo de yuca y la cantidad del elemento disponible según las soluciones extractoras KCl y ME 3, no se pudo determinar ya que los valores no presentaron un comportamiento que permitiera asociar valores de mayor rendimiento con mayor disponibilidad y viceversa; si no que el rendimiento fue similar indistintamente de la disponibilidad del elemento en el suelo.

El diagrama de dispersión del rendimiento absoluto (g MS/planta) en cada sitio de muestreo con respecto a la concentración de K y Cu en el suelo evaluado con las soluciones ME 3 y Olsen modificada se presenta en la Figura 17.

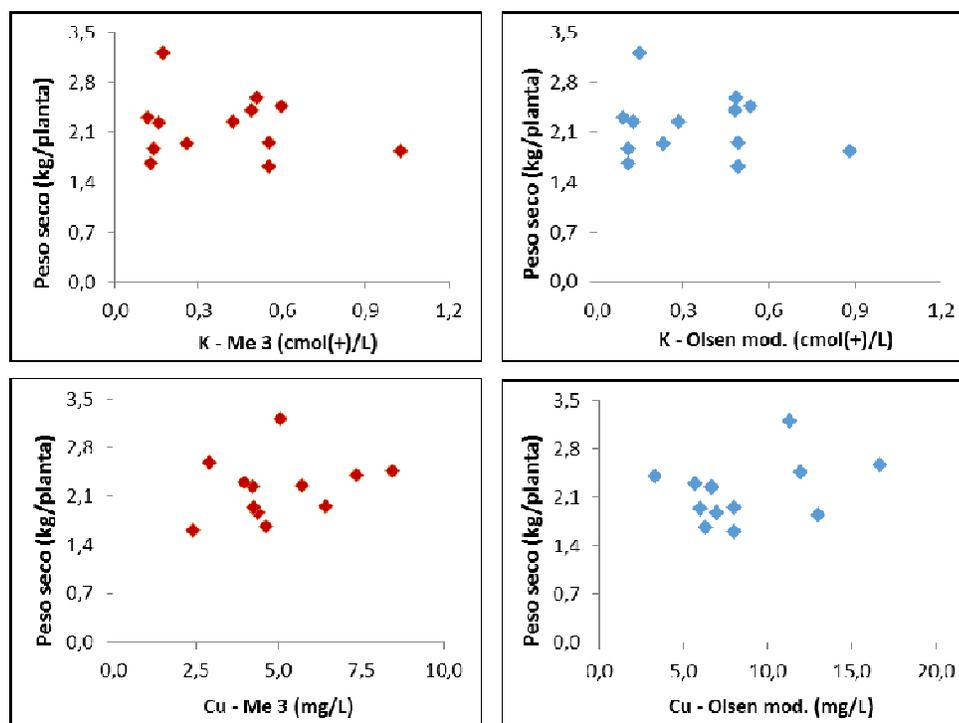


Figura 17. Gráficos diseñados para la determinación del nivel crítico de K y Cu con las soluciones extractoras Mehlich 3 y Olsen modificada en suelos cultivados con yuca, por medio de la metodología Cate y Nelson (1965).

Los valores de rendimiento absoluto en cada lugar de muestreo no reflejan mayor o menor disponibilidad de K y Cu, por ejemplo, con respecto al K en los sitios de muestreo 1, 4, 7 y 12 se obtuvieron rendimientos de 1,96; 1,87; 1,94 y 1,84 kg/planta de materia seca respectivamente, la disponibilidad de K según la solución extractora ME 3 fue de 6,96; 1,57; 3,12 y 13,5 cmol(+)/L en cada uno de los sitios y la concentración de K en el suelo según la solución Olsen modificada fue de 0,49; 0,11; 0,23 y 0,88 cmol(+)/L respectivamente. Se evidencia que valores de rendimiento similares están asociados a valores de concentración del elemento en el suelo muy variables, lo cual no permite el establecimiento de niveles críticos. En el caso del Cu la situación es similar, no sucede lo que se espera teóricamente, que valores de menor rendimiento coincidan con valores de menor concentración de los elementos en el suelo.

Para el K se reportan una serie de niveles críticos, con base en la solución extractora Olsen Modificada. Gadea (1993) obtuvo 0,14 y 0,18 cmol(+)Mg/L en Ultisoles e Inceptisoles. Morales (2001) no logró determinar el nivel crítico de K en suelos del Pie de Monte Neovolcánico del Pacífico Guatemala. Yool (2001) tampoco pudo determinar el nivel crítico de Potasio al igual que Morales (2001), debido a que la correlación entre el rendimiento relativo y la cantidad de K en el suelo mostró mucha dispersión, como sucedió en la presente investigación. Chonay (2002) indica un nivel crítico de 0,51 cmol(+)K/kg con la solución Olsen modificada. Arias *et al* (2003) encontraron un nivel crítico de 0,5 cmol(+)/L de K. Bertsch *et al* (2005) y Méndez y Bertsch (2012) mencionan un nivel crítico general de 0,2cmol(+) K/L para esta misma solución.

Con respecto a la solución extractora ME 3 los niveles críticos reportados para K son los siguientes: Gadea (1993) reporta 0,8 y 1,1 cmol(+)K/L en Ultisoles e Inceptisoles. Morales (2001) obtuvo un nivel crítico de 180 ppm de K. Yool (2001) no pudo determinar el nivel crítico de Potasio porque los valores de correlación presentaron mucha dispersión. Chonay (2002) indica un nivel crítico de 70 mg/kg de K. Arias *et al* (2003) encontraron un nivel crítico de 0,6 cmol(+)/L de K. Bertsch *et al* (2005) mencionan un nivel crítico general de 0,3cmol(+) K/L. Cabalceta y

Molina (2006) reportaron un valor de 0,17 cmol(+)/L de K como nivel crítico general.

Con respecto al Cobre, Díaz-Romeu y Hunter citados por Molina y Cabalceta (1990) indican que el nivel crítico de Cu es 1 mg/L con la solución Olsen modificada. Chonay (2002) también obtuvo 1,0 mg/kg de nivel crítico para Cu con la misma solución. Bertsch *et al* (2005) y Méndez y Bertsch (2012) mencionan que el nivel crítico de Cu con dicha solución es < 2 mg/L.

Molina (1993) no determinó valores de nivel crítico con Olsen modificada para el Cu debido a que los valores obtenidos en su investigación indicaron que dichos contenidos eran suficientemente altos para satisfacer las necesidades del sorgo por lo cual era poco probable encontrar deficiencia de este elemento en dicho cultivo.

Chonay (2002) con la solución ME 3 un nivel crítico de Cu de 1,0 mg/kg. Bertsch *et al* (2005) no pudieron establecer un nivel crítico para Cu con esta solución debido a que no fue posible obtener una adecuada correlación con el rendimiento. Cabalceta y Molina (2006) solo pudieron obtener el nivel crítico de Cu en Ultisoles, colocando un único valor en el cuadrante inferior izquierdo dando como resultado un 1,6 mg/L de Cu, el cual corresponde al valor más bajo del elemento encontrado en este orden de suelos. Todos los valores de nivel crítico son superiores al 0,5 mg/L de Cu propuesto originalmente por Mehlich citado por Cabalceta y Molina (2006) para la solución ME 3.

En la Figura 18 se presentan los diagramas de dispersión de los valores de rendimiento absoluto con respecto a la cantidad de Mn y Fe disponibles en los diferentes sitios de muestreo evaluados con las soluciones Olsen modificada y ME 3. Tal como se explicó anteriormente la dispersión de los valores no permitió tampoco establecer niveles críticos para los elementos Mn y Fe.

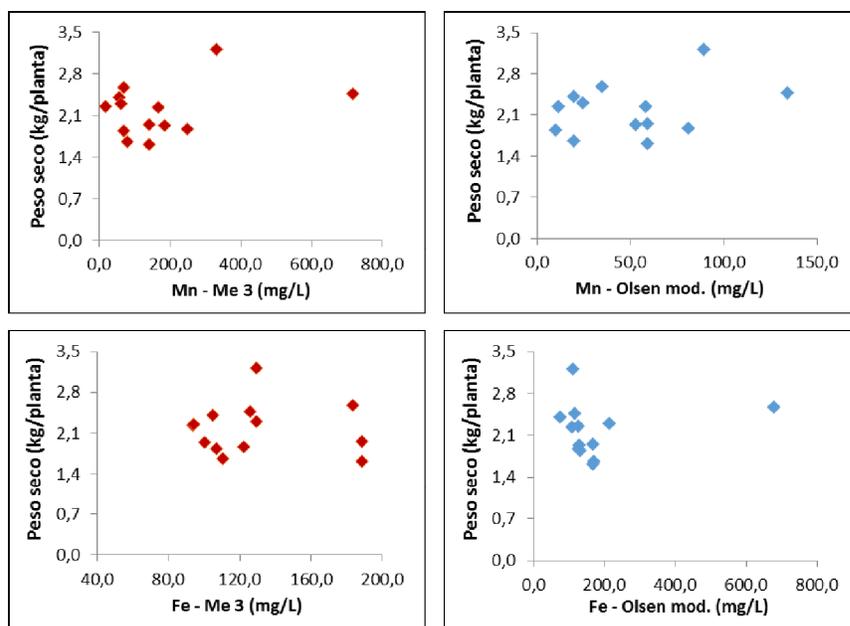


Figura 18. Gráficos diseñados para la determinación del nivel crítico de Mn y Fe con las soluciones extractoras Mehlich 3 y Olsen modificada en suelos cultivados con yuca, por medio de la metodología Cate y Nelson (1965).

Con respecto al Mn Rohman y Cox citado por Molina y Cabalceta (1990) reportan un nivel crítico con la solución Olsen modificada de 3 mg/L. Con esta misma solución Chonay (2002) obtuvo un NC de 7,0 mg/kg en los suelos de las Tierras Altas Volcánicas de Guatemala. Bertsch *et al* (2005) y Méndez y Bertsch (2012) indican un valor de nivel crítico general 5 mg/L de Cu.

Molina (1993) no determinó el valor crítico de Mn con Olsen modificada debido a que la cantidad de este elemento en el suelo era lo suficientemente alto como para que el sorgo no presentara deficiencias.

Con respecto a la solución ME 3 Chonay (2002) obtuvo un NC de 10,0 mg/kg. Bertsch *et al* (2005) indican que no se puede establecer un nivel crítico de Mn debido a que la correlación con el rendimiento no pudo ser obtenida adecuadamente.

Cabalceta y Molina (2006) mencionan que para el Mn con la solución Mehlich 3 solo pudieron obtener un nivel crítico tentativo en los suelos de orden Ultisol (5 mg/L), ubicando solo un suelo en el cuadrante inferior izquierdo. Indican que la

imposibilidad de determinar los niveles críticos en los demás órdenes de suelo se debe a que estos presentaron contenidos de Mn superiores. Asimismo, atribuyen un posible aumento en contenido Mn en las muestras de suelo debido al secado prolongado de las muestras al aire libre en el invernadero, basándose en lo informado por Obando *et al* citados por Cabalceta y Molina (2006) quienes encontraron un aumento en la cantidad de Mn extraíble con Olsen modificada y DTPA después de secar las muestras al aire.

En el caso del Fe con la solución Olsen modificada, Chonay (2002) encontró un NC de 10 mg/Kg, mientras que Bertsch *et al* (2005) y Méndez y Bertsch (2012) indican un valor de nivel crítico general es 10 mg/L.

Con respecto a los niveles críticos de Fe establecidos con la solución ME 3: Chonay (2002) obtuvo un NC de 25 mg/Kg y Bertsch *et al* (2005) no pudieron establecer un nivel crítico de Fe debido a que no obtuvieron una adecuada correlación con el rendimiento.

La Figura 19 contiene los diagramas de dispersión de los valores de rendimiento absoluto con respecto a la cantidad de Zn y P disponibles en los diferentes sitios de muestreo evaluados con las soluciones Olsen modificada y ME 3.

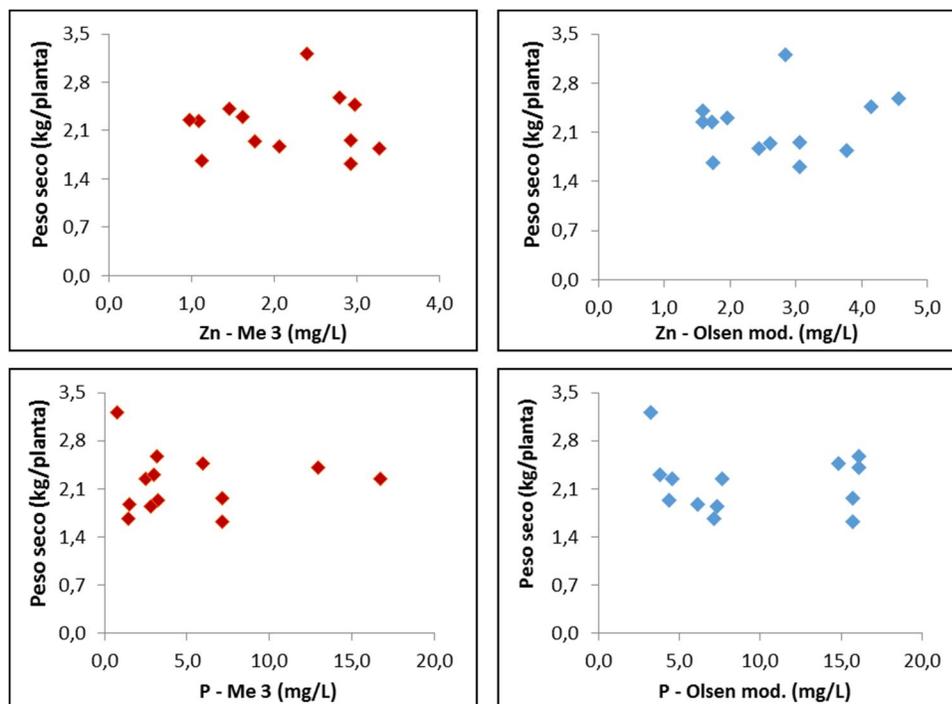


Figura 19. Gráficos diseñados para la determinación del nivel crítico de Zn y P con las soluciones extractoras Mehlich 3 y Olsen modificada en suelos cultivados con yuca, por medio de la metodología Cate y Nelson (1965).

Al igual que con los demás elementos los niveles críticos de Zn y P tampoco pudieron ser determinados en la presente investigación, porque no se pudo obtener una adecuada correlación con el rendimiento.

Algunos de los niveles críticos reportados de P con la solución Mehlich 3 son los siguientes: Cabalceta y Cordero (1994a) encontraron en 100 suelos de Costa Rica un nivel crítico de 3,8 mg/L de P. Peralta (2000) obtuvo en la región cafetalera sur de Guatemala en Ultisoles un NC de 3,1. Morales (2001) obtuvo en un NC de 15 ppm de P en suelos del pie de monte de Guatemala (utilizando sorgo). Ese mismo año Yool (2001) determinó en suelos de la región cañera del sur de Guatemala que el nivel crítico de P era 4 ppm, usando sorgo para determinar el rendimiento relativo. Chonay (2002) menciona que utilizando sorgo como planta indicadora obtuvo un valor de 15 mg P/kg como nivel crítico. Ramos (2003) menciona un NC de 19 mg/kg de P con ME 3 los suelos del Altiplano Occidental de Guatemala. Cabalceta y Molina (2006) evaluando 100

suelos de Costa Rica sin caracterizarlos por órdenes obtuvieron un NC de 3 mg/L de P, mientras que en suelos de orden Ultisol obtuvieron un NC de 10 mg/L de P.

Con respecto a la solución extractora Olsen modificada se reportan los siguientes niveles críticos en P: Cabalceta y Cordero (1994a) encontraron al igual que con ME 3 un NC de 3,8 mg/L de P en 100 suelos de Costa Rica. Peralta (2000) utilizando sorgo como planta indicadora de rendimiento relativo obtuvo un NC de 2,4 mg/kg de P; de igual manera Morales (2001) utilizando sorgo obtuvo un NC de 19,5 ppm de P en suelos del pie de monte de Guatemala. Chonay (2002) indica que el NC de P con la solución extractora Olsen Modificada es de 16,5 mg/kg. Méndez y Bertsch (2012) mencionan que el NC de P general utilizado en Costa Rica es 10 mg/L.

Corrales et al citados por Cabalceta y Molina (2006) señalan que existe un ámbito de variación específica de cada determinación (25-30% para el P), con las soluciones Olsen modificada y Mehlich 3. Conocer esta variabilidad tiene la utilidad de que una persona que interprete un análisis con alguna de estas soluciones considerando la variación del elemento con respecto a ese porcentaje entenderá que un valor de 10 mg/L debe interpretarse como un valor entre 7-13 mg/L debido a esta fluctuación causada por el análisis.

Con respecto al Zinc utilizando la solución extractora ME 3, Peralta (2000) indica que no pudo determinar el nivel crítico porque la dispersión de los puntos no permitió aplicar correctamente el método gráfico de Cate y Nelson, Chonay (2002) obtuvo un NC de 1,0 mg/kg. Bertsch *et al* (2005) reportan que el nivel crítico de Zinc varía de acuerdo a la cantidad de Calcio disponible en el suelo, en suelos con niveles de Ca >10 cmol(+)/L de Ca el NC debe incrementarse a 3,5 mg/L, mientras que en suelos con niveles de Ca <10 cmol(+) el nivel crítico que debe usarse es 2,5 mg/L. Molina y Bornemisza (2006) encontraron un NC de 2 mg/L. Cabalceta y Molina (2006) en 100 suelos de Costa Rica encontraron que el NC es de 2 mg/L.

Utilizando la solución Olsen modificada los valores de nivel crítico de Zinc reportados son: Molina (1993) obtuvo un NC de 2 mg/L. Chonay (2002) obtuvo

utilizando sorgo como planta indicadora un NC de 1,0 mg/kg, Méndez y Bertsch (2012) reportan 2 mg/L de Zn como el NC general utilizado en Costa Rica, Bertsch *et al* (2005) indica 3 mg/L como NC de Zn y por último Molina y Bornemisza (2006) también obtuvieron que el NC de Zinc es 2 mg/L.

5. CONCLUSIONES

1. El binomio KCl - Olsen modificada extrajo mayor contenido de Mg, Cu, Fe, Zn y P que la solución Mehlich 3.
2. La solución Mehlich 3 extrajo cantidades levemente superiores de Ca y K con respecto a las cantidades extraídas por las soluciones KCl . Olsen modificada de estos mismos elementos.
3. La solución Mehlich 3 extrajo mayor contenido de Mn en todos los suelos analizados.
4. Las soluciones extractoras evaluadas presentaron una correlación altamente significativa (p -valor $< 0,01$) en la extracción de Ca, Mg, K, Cu y Zn; correlación significativa (p -valor $< 0,05$) en la determinación de Fe y correlación no significativa (p -valor $> 0,05$) en la determinación de P.
5. Los valores de extracción de nutrientes de las soluciones KCl, Olsen modificada y Mehlich 3 no fueron afectados por los valores de pH y acidez de los suelos.
6. El binomio KCl . Olsen modificada se considera la mejor alternativa de análisis de suelos para el laboratorio de Análisis Agronómicos debido a que presentó mayores niveles de extracción en la mayoría de los elementos y muy cercana relación de extracción con los demás, además de buena consistencia en la estimación del elemento P el cual suele ser de difícil determinación, asimismo, porque en el país existen mayor cantidad de estudios con base en esta metodología de análisis.
7. La solución Mehlich 3 se muestra promisorio para ser utilizada como metodología de análisis alternativo en caso de que no se cuente con algún reactivo para preparar la solución KCl . Olsen modificada o algún inconveniente similar.
8. No se pudo determinar los niveles críticos para el cultivo de yuca con las soluciones extractoras KCl-Olsen modificada y Mehlich 3 porque el rendimiento absoluto presentó muy poca variabilidad en suelos con distinta fertilidad, lo cual no permitió la aplicación del método gráfico Cate y Nelson.

9. No se determinó una tendencia entre la absorción de nutrientes y el rendimiento del cultivo con relación a la fertilidad de los suelos evaluados con las soluciones extractoras KCl-Olsen modificada y Mehlich 3.
10. Se presentó correlación lineal altamente significativa entre las cantidades de Manganeso extraídas con las soluciones Olsen modificada y Mehlich 3 de los suelos analizados y la concentración de Mn en la raíz de las plantas de yuca, lo cual puede deberse a las características de movilidad del elemento dentro de la planta.
11. Se presentó correlación significativa al 95% entre el contenido de Zn en hojas y la cantidad de Zn extraído con la solución Mehlich 3 y entre el contenido de Zn en tallos de yuca y las cantidades de Zn en el suelo extraídas con la solución Olsen modificada.
12. En promedio para producir una tonelada de materia seca de yuca, el cultivo extrae 7,51 kg de N; 2,81 kg de Ca; 1,37 kg de Mg; 7,67 kg de K; 0,56 kg de P; 0,08 kg de Cu; 0,41 kg de Mn; 0,88 kg de Fe y 0,39 kg de Zn.
13. En promedio para producir una tonelada de materia seca de raíz de yuca, se extrae 13,09 kg de N; 5 kg de Ca; 2,38 kg de Mg; 13,43 kg de K; 1,01 kg de P; 0,14 kg de Cu; 0,72 kg de Mn; 1,55 kg de Fe y 0,67 kg de Zn.
14. En promedio para producir una tonelada de raíces de yuca fresca el cultivo extrae durante todo el ciclo 4,69 kg de N; 1,75 kg de Ca; 0,85 kg de Mg; 4,74 kg de K; 0,36 kg de P; 0,05 kg de Cu; 0,26 kg de Mn; 0,55 kg de Fe y 0,24 kg de Zn.
15. El orden de extracción de nutrientes por parte de las variedades de yuca conocidas como Señorita, MBRA 383 y Valencia fue: $K > N > Ca > Mg > Fe > P > Mn > Zn > Cu$.

6. RECOMENDACIONES

1. Hacer ensayos de dosis crecientes de fertilización para el cultivo de yuca, con el fin de evaluar el comportamiento del cultivo en cuanto a rendimiento y absorción de nutrientes, y determinar si se puede generar grupo de mayor y menor respuesta a la fertilización, de modo que se pueda emplear el método gráfico Cate y Nelson (1965) y establecer niveles críticos a nivel de campo para el cultivo de yuca.
2. Hacer ensayos regionales donde se maneje en forma homogénea misma semilla, época de siembra manejo en general fertilización, con el fin de estandarizar las variables de estudio.
3. Evaluar si con ajustes analíticos (p. e. calibración de equipos con concentraciones mayores de los estándares) se podría evitar el proceso de dilución de los extractos de las muestras de suelo, con el fin de reducir el riesgo de errores de determinación.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Abdu, N. 2006. Soil-phosphorus extraction methodologies: A review. *African Journal of Agricultural Research* 1(5): 159-161
- Andrade Carballo, WE. 2013. Evaluación del efecto de dos métodos de fertilización y su combinación en el crecimiento y rendimiento del cultivo de yuca en la zona norte de Costa Rica. Tesis Lic. Alajuela, CR, ITCR. 117 p.
- Aldana, JM. 2011. Análisis Foliare. Guadalajara, MX, Laboratorios A-L de México, S.A. de C.V. 21 p.
- Alvarado, A; Iturriaga, I; Smyth, J; Portuguez, E; 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
- Arias, F; Segura, R; Serrano, E; Bertsch, F; López, M; Soto, E. 2003. Niveles Críticos de calcio, magnesio, potasio y fósforo en suelos Dedicados al cultivo de banano (Musa AAA) en Costa Rica. *CORBANA* 29(56): 69-81
- Astier, M. 2003. Hacia la Recuperación de la Vida en el Suelo. *LEISA. Revista de Agroecología*. 18: 1
- Barbona, SA. 2003. Fertilización del cultivo de Mandioca. INTA EEA Colonia Benítez. Chaco, AR. 4 p.
- Bernal Calderón, MP. 2003. Fertilidad y Contaminación de Suelos Agrícolas. Aplicación al cultivo de la Vid. Centro de Edafología y Biología Aplicada del Segura., Murcia, ES. 3 p.
- Bernier Villaroel, R. 2000. Diagnóstico de la fertilidad del suelo. **In** Seminario Taller para Productores. Técnicas de Diagnóstico de Fertilidad del Suelo, Fertilización de Praderas, Cultivos y Mejoramiento de Praderas. INIA. Osorno, CL. 1-15p
- Bertsch, F. 1987. Manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica. 2 ed. San José, CR. UCR. 86 p.
- Bertsch, F. 2007. Muestreo Foliar. San José, CR, CIA-ACCS. 6 p.

- Bertsch, F. s.f. Análisis de suelo. San José, CR, CIA-ACCS. 6 p.
- Bertsch, F; Mata, R; Henríquez, C. 1993. Características de los principales órdenes de suelo presentes en Costa Rica. San José, CR. CIA-UCR. 19 p.
- Bertsch, F; Bejarano, J; Corrales, M. 2005. Correlación entre las soluciones extractoras KCl-Olsen Modificado y Mehlich 3, usadas en los laboratorios de suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 29(3): 137-142
- Boniche, J; Alvarado, A; Molina, E; Ares, A; Smyth, T. 2008. Respuesta del pejibaye para palmito a la fertilización con fósforo en la Zona Norte de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 32(1): 31-54
- Cabalceta, G. 1995. Correlación de soluciones extractoras de fosforo en suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 19(1): 29-37
- Cabalceta, G; Cordero, A. 1994a. Niveles críticos de fósforo en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 18(2): 147-161.
- Cabalceta, G; Cordero, A. 1994b. Niveles críticos de azufre en Ultisoles, Inceptisoles, Vertisoles y Andisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 18(2): 163-174.
- Cabalceta, G; Molina, E. 2006. Niveles críticos de nutrimentos en suelos de Costa Rica utilizando la solución extractora Mehlich 3. *Agronomía Costarricense* 30(2): 31-44.
- Cadavid, L.F. 2002. Suelo y Fertilización para la Yuca. **In** La Yuca en el Tercer Milenio: Sistemas modernos de producción, procesamiento, utilización y comercialización. Compilado por: Bernardo Ospina. y Hernán Ceballos. Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT) y Consorcio Latinoamericano y del Caribe de Apoyo a la Investigación y al desarrollo de la Yuca (CLAYUCA). Cali, CO. 76-103 p.
- Cadavid López, LF. 2008. Fertilización del cultivo de la yuca *Manihot esculenta* Crantz. Cali, CO, CLAYUCA. 55 p.

- Cadavid López, LF. 2009. Aspectos tecnológicos sobre producción de la yuca *Manihot esculenta Crantz*. Cali, CO, CLAYUCA. 29 p.
- Cadavid López, LF. 2011. Manual de nutrición vegetal/ una visión de los aspectos nutricionales del cultivo de la yuca. Cali, CO, CARAMBA Desing. 175 p.
- Casaca, AD. 2005. El cultivo de la yuca (*Manihot esculenta*). San José, CR, PROMOSTA. 12 p.
- Chavarría Medina, E. 2003. Evaluación agronómica de siete variedades de yuca, (*Manihot esculenta Crantz*) en las condiciones del municipio de Nueva Guinea / Nicaragua. Nueva Guinea, NI, UNA. 77 p.
- Chicaiza Hidalgo, NE. 2001. Correlación y calibración de métodos de análisis químico y determinación del nivel crítico de calcio en suelos Ecuatorianos. Tesis Lic. Quito, EC, UCE. 131 p.
- 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. 76 p.
- De Diego Salas, GE; Quirós Argüello, BJ. 2006. Análisis de crecimiento y absorción de nutrimentos en yuca (*Manihot esculenta*) en El Tanque de la Fortuna, San Carlos, Alajuela. Tesis Lic. Alajuela, CR. ITCR. 143 p.
- Díaz-Romeu, R; Hunter, A. 1982. Metodologías de muestreos y análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigaciones en invernadero. Turrialba, CR. CATIE. 62 p.
- Ecoterra. 2011. Acerca de La Fortuna (en línea). Consultado el 17 may. 2014. Disponible en <http://www.ecoterracostarica.com/es/acerca-de-la-fortuna>.
- Espinoza, L; Slaton, N; Mozaffari, M. 2013. Como interpretar los resultados de los análisis de suelos. Trad. L Espinoza. Arkansas, US, Universidad de Arkansas. 4 p.

- Fallas Corrales, RA. 2013. Avaliação e calibração de estratores de fósforo em três diferentes ordens de solo da Costa Rica. Tesis M.Sc. Piracicaba, BR, USP. 89 p.
- Frank, K; Beegle, D; Denning, J. 2015. Phosphorus. In Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region. Eds. M, Nathan; R, Gelderman. Missouri, US. NCR. no. 221. p 27 . 35.
- Furcal, P., A. Gadea, G.E. De Diego, y B.J. Quirós A. 2009. Absorción de nutrimentos en yuca (*Manihot esculenta*) Crantz. Análisis de crecimiento del cultivo de la yuca. XVIII Congreso Latinoamericano de la Ciencia del Suelo. Del 16 al 20 de noviembre del 2009. San José Costa Rica.
- Furcal Beriguete, P; Torres Portuguez, S; Andrade Carballo, W. 2014. Evaluación del manejo de la fertilización inorgánica al suelo y foliaren el cultivo de la yuca (*Manihot esculenta* Crantz) en la zona de San Carlos, Costa Rica. Alajuela, CR. ITCR. 56 p.
- Gadea Rivas, AJ. 1993. Niveles críticos de Calcio, Magnesio y Potasio en cuatro órdenes de suelo de Costa Rica. Tesis M.Sc. San José, CR, UCR. 130 p.
- Gadea, A; Furcal, P; De Diego, G; Quirós, B. 2012. Absorción de nutrimentos en el cultivo de yuca. IV Congreso Internacional CLAYUCA Costa Rica. 4 y 5 de octubre 2012, CTEC del Tecnológico de Costa Rica, Santa Clara, San Carlos.
- García, F; Ciampitti, I. 2010. Enfoque Alternativo para el diagnóstico de fertilidad de suelos el enfoque tradicional. In XXII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo, (2010, Rosario, AR). Memoria. Rosario, AR. AACCS. p. 17-25.
- Guías de Costa Rica. 2013. Los Chiles (en línea). Consultado el 18 may. 2014. Disponible en <http://www.mapasdecostarica.info/provi/loschiles.htm>.
- Henríquez, C; Cabalceta, G; Bertsch, F; Alvarado, A. 2014. Principales suelos de Costa Rica (en línea). CR. Consultado 4 jun. 2014. Disponible en http://www.mag.go.cr/biblioteca_virtual_ciencia/suelos-cr.html

- INEA. (Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Agrícola) 2014. Análisis Foliar (en línea) Valladolid, ES. Consultado 21 abr. 2014. Disponible en http://www.inea.uva.es/index.php?option=com_content&view=article&id=72&Itemid=154#arriba
- Kass, D. 1996. Fertilidad de suelos. San José, CR, EUNED. 233 p.
- Loide, V; Nõges, M; Rebane, J. 2005. Assessment of the agrochemical properties of the soil using the extraction solution Mehlich 3 in Estonia. *Agronomy Research* 3(1): 73 . 80.
- Méndez, J. Bertsch, F. 2012. El uso de bases de datos en el estudio de la fertilidad de los suelos agrícolas de Costa Rica: Estado actual y principales cambios en el tiempo. San José, CR. UCR. 33 p.
- Molina Rojas, E. 1993. Calibración de métodos de análisis de cobre, zinc y manganeso disponible en Ultisoles, Vertisoles, Inceptisoles y Andisoles de Costa Rica Tesis M.Sc. San José, CR, UCR. 146 p.
- Molina, E. 2007. Análisis de suelos y su interpretación. San José, CR, CIA-UCR-Amino Grow International. 8 p.
- Molina, E. 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; Bornemisza, E. 2006. Nivel crítico de Zinc en suelos de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 30(2): 45-59
- Molina, E; Cabalceta, G. 1990. Correlación de diferentes soluciones extractoras en Vertisoles y Ultisoles de Costa Rica. *Agronomía Costarricense* 14(1):37-44
- Morales García, SE. 2001. Determinación de niveles críticos de fósforo y potasio con cuatro soluciones extractoras a nivel de invernadero en suelos del pie del monte neovolcánico de Guatemala. Tesis Lic. San Carlos, GT, USAC. 51 p.

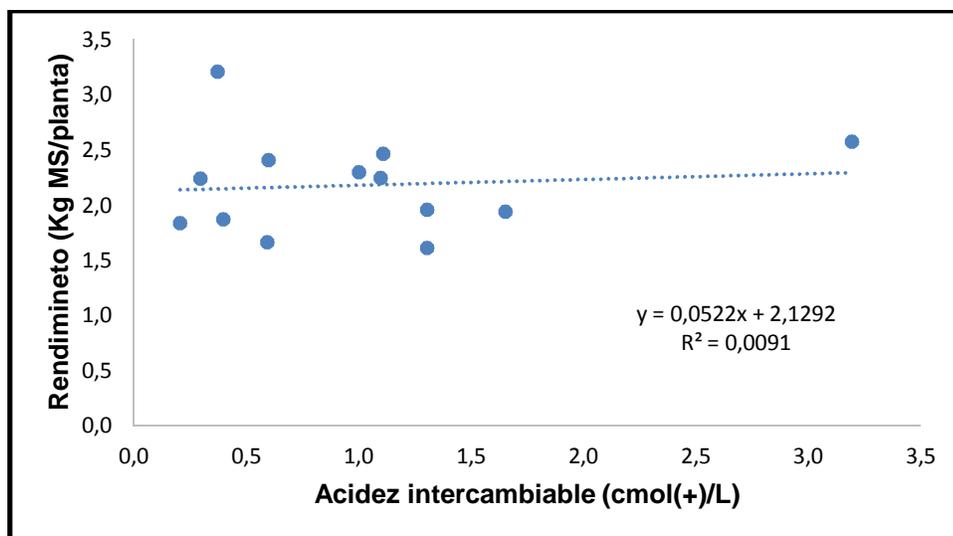
- Nicolodi, M; Gianello, C; Anghinoni, I. 2009. Evolução da fertilidade do solo do Planalto do Rio Grande do Sul nas últimas quatro décadas. Revista Plantio Direto. 111(1):10-16. Consultado 7 Ago. 2014. Disponible en http://www.plantiodireto.com.br/?body=cont_int&id=924
- Oliveira Prendes, JA; Afif Khouri, E; Mayor López, M. 2006. Análisis de suelos y plantas y recomendaciones de abonado. Oviedo, ES, EDIUNO. 161 p.
- Pacheco Cabrera, AR. 2008. Evaluación de soluciones extractoras de azufre en suelos de Guatemala y actividades realizadas en el laboratorio de análisis de suelo, agua y planta. El Salvador Castillo Orellana+ de la facultad de agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala. Tesis Lic. San Carlos, GT, USAC. 66 p.
- Palacios Delgado, MP. 2013. Evaluación de la Respuesta a la Fertilización química y orgánica de la uvilla *Physalis peruviana L.* en la Provincia de Imbabura cantón de Antonio Ante. Quito. Tesis Lic. Quito, EC: Escuela Politécnica Nacional. 121 p.
- Parra, M; Fernández-Escobar, R; Navarro, C; Arquero, O. 2002. Los suelos y la fertilización del olivar cultivado en zonas calcáreas. Madrid, ES, Mundi-Prensa S.A. 255 p.
- Peralta Santos, MG. 2000. Determinación del nivel crítico de Fósforo, Azufre y Zinc en Andisoles y Ultisoles de la región cafetalera del sur de Guatemala. Tesis Lic. San Carlos, GT, USAC. 71 p.
- Quiminet. 2006. Procedimientos para análisis del suelo (en línea). Consultado 4 jun. 2014. Disponible en <http://www.quiminet.com/articulos/procedimientos-para-analisis-del-suelo-5681.htm>
- Quiroga, A; Bono, A. 2012. Manual de fertilidad y evaluación de suelos. La Pampa, AR, INTA. 162 p.
- Ramírez, R. 1989a. Estimación del requerimiento de fertilizante potásico por la yuca con base en el análisis de suelo. Agronomía Tropical. 39(1-3): 163-177

- Ramírez, R. 1989b. Relación entre el fósforo del suelo con la respuesta de la yuca a la fertilización fosfatada. *Agronomía Tropical*. 39(1-3): 163-177
- Ramos Santos, NA. 2003. Evaluación del fósforo extraído con dos soluciones extractoras en 19 suelos del altiplano occidental de Guatemala. Tesis Lic. San Carlos, GT, USAC. 38 p.
- Rodríguez, P; Lema, MJ; González, G; González, S. 2005. Evaluación del reactivo Mehlich 3 como extractante multielemental. **In** V Congreso Ibérico de Ciencias Hortícolas (2005, Porto, PT). Libro de actas. Porto, PT. Associação Portuguesa de Horticultura. Vol. 3. p 499 . 455.
- Rodríguez, Z; Mármol, L; Martínez, J; Montiel, M. 2009. Acumulación total y por órganos de macronutrientes en plantas de yuca (*Manihot esculenta* Crantz) cv. 'Tempranita' en la altiplanicie de Maracaibo. *Revista de la Facultad de Agronomía*. 26 (4): 470-489
- Sadeghian Khalajabadi, S. 2012. Efecto de los cambios en las relaciones de calcio, magnesio y potasio intercambiables en suelos de la zona cafetera colombiana sobre la nutrición de café (*Coffea arabica* L.) en la etapa de almácigo. Tesis Ph.D. Medellín, CO. Universidad Nacional de Colombia. 157 p.
- Sánchez V, J. 2007. Fertilidad del Suelo y Nutrición Mineral de Plantas. San José, CR, FERTITEC S.A. 19 p.
- Sande P; Miras, J; Abreu, C; Paz, A. 2007. Elementos minoritarios extraídos con DTPA y Mehlich-3 en suelos dedicados a cultivo, pradera y monte. *Cuadernos Lab. Xeolóxico de Laxe*. 32: 237 . 248
- Schalatter, JE. 1993. Fertilidad del Suelo, Concepto y su Aplicación a la Producción Forestal. Valdivia, CL, Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Austral de Chile. 7 p.
- Schoninger, E; Colpo, L; Lihnares, D. 2012. Método Mehlich 3 como substituínte ao HCl para extração de Cobre e Zinco em solos com alto teor de matéria orgânica do sul do Brasil. *Ciência Rural*. 42(7):1200 - 1203

- Suarez Guerra, L; Mederos Vega, V. 2011. Apuntes sobre el cultivo de la yuca (*Manihot esculenta Crantz*). Tendencias actuales. Cultivos Tropicales 32(3): 27 - 35
- Vargas, M; Bertsch, F; Cordero, A. 1992. Comparación de métodos de extracción de fósforo, potasio, calcio y magnesio disponible en Vertisoles de Guanacaste, Costa Rica. Agronomía Costarricense 16(1): 115-123.
- Wolf, A; Beegle, D. 2011. Chapter 5: Recommended Soil Tests for Macro and Micronutrients Phosphorus. In Recommended Chemical Soil Test Procedures for the North Central Region (3rd Edition). The Northeast Coordinating Committee for Soil Testing. NCR. no. 493. p 39 . 48.
- Yool Rosales, ER. 2001. Determinación de niveles críticos de fósforo y potasio con cuatro soluciones extractoras, a nivel de invernadero, en suelos de la región cañera del sur de Guatemala. Tesis Lic. San Carlos, GT, USAC. 52 p.
- Zotyen Quan, C. 2002. Cultivo de la Yuca, *Manihot esculenta Crantz*. Nueva San Salvador, SV, Ministerio de Agricultura y Ganadería. 46 .p

8. ANEXOS

Anexo 1. Gráfico de la relación entre el rendimiento (kg de materia seca/planta) del cultivo de la yuca y la acidez (cmol(+)/L) de los suelos en estudio.



*Acidez determina con KCl 1N

Anexo 2. Resultados de las pruebas T de Student de las cantidades de Ca extraído con las soluciones KCl y Mehlich 3 y las cantidades de P extraídas con Olsen Modificada y Mehlich 3.

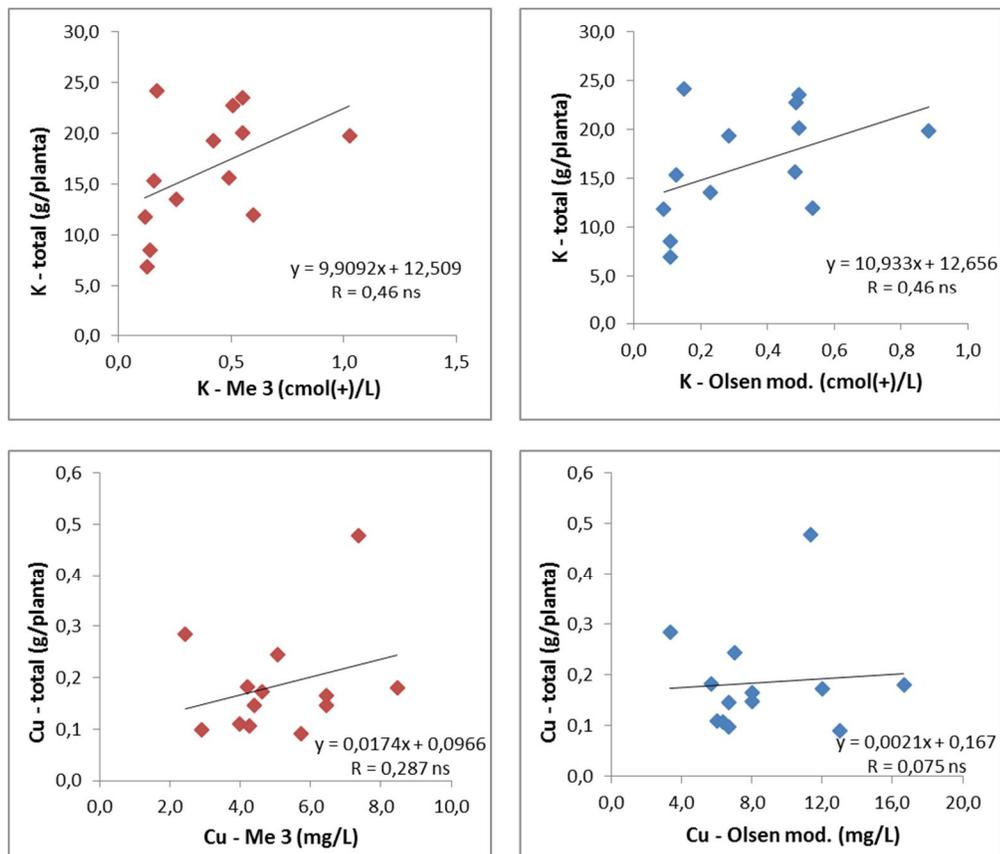
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas iguales

	<i>Ca M3</i>	<i>Ca KCl</i>
Media	4,235555556	3,80638889
Varianza	5,587113805	4,73155648
Observaciones	12	12
Varianza agrupada	5,159335143	
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	22	
Estadístico t	0,462812136	
P(T<=t) una cola	0,324022137	
Valor crítico de t (una cola)	1,717144374	
P(T<=t) dos colas	0,648044273	
Valor crítico de t (dos colas)	2,073873068	

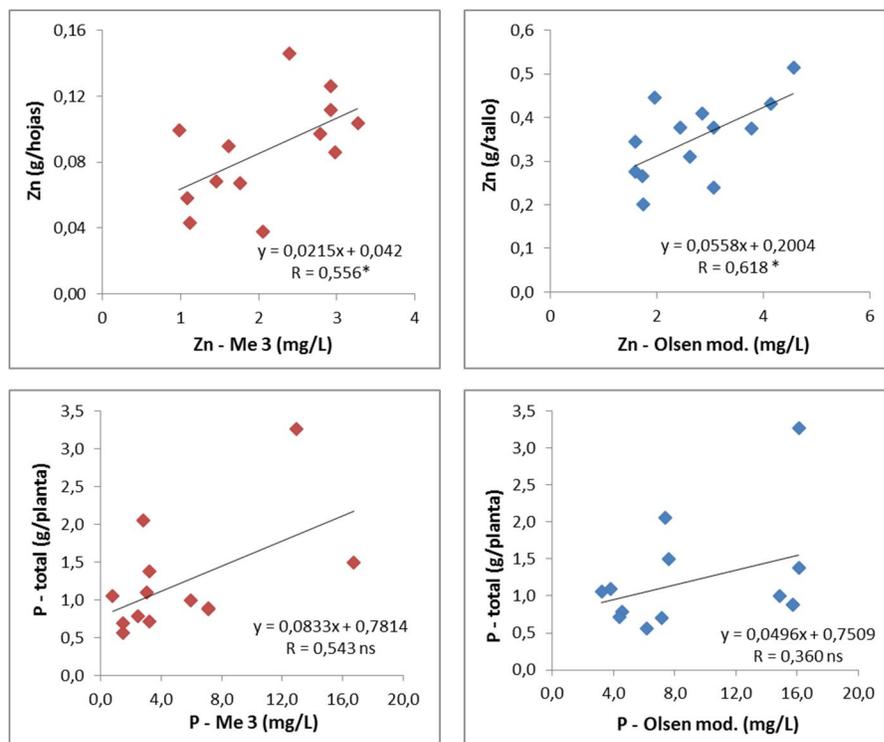
Prueba t para dos muestras suponiendo varianzas desiguales

	<i>P M3</i>	<i>P Olsen</i>
Media	5,1075	8,92972222
Varianza	24,56489116	27,0169262
Observaciones	12	12
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	22	
Estadístico t	-1,84356407	
P(T<=t) una cola	0,039379877	
Valor crítico de t (una cola)	1,717144374	
P(T<=t) dos colas	0,078759754	
Valor crítico de t (dos colas)	2,073873068	

Anexo 3. Diagrama de dispersión del K y Cu absorbido por las plantas de yuca y la cantidad de K y Cu en el suelo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo.



Anexo 4. Diagrama de dispersión del Zn en hojas y tallo y P absorbido por las plantas de yuca, con respecto la cantidad de Zn y P en el suelo extraído con la solución extractora Mehlich 3 y la solución extractora Olsen modificada, en los diferentes sitios de muestreo.



Anexo 5. Identificación del lugar, localidad de los diferentes sitio de muestreo, variedad de las plantas muestreadas y edad de cosecha de las diferentes plantas analizadas.

ID	Localidad	Variedad	Edad Cosecha (meses)
1,1	Muelle	Señorita	9
1,2	Muelle	MBRA 383	7
2	Aeropuerto Fortuna	Valencia	10
3	El Laurel	Valencia	10
4	Lote 11, San Joaquín	Valencia	12
5	Lote 14 San Joaquín	Señorita	10
6	Banderas	Valencia	11
7	Canta Rana	Valencia	10
8	Paso Real	Valencia	11
9	Guayabito	Valencia	10
10	Cerro Negro	Señorita	11
11	Palmitas	Señorita	10
12	Sonafluca	Valencia	13