

**UNIVERSIDAD DE PANAMÁ
FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**CLASIFICACIÓN DE LA FERTILIDAD DE SUELOS MEDIANTE
MAPAS DE NIVELES CRÍTICOS DE VARIABLES EDAFOLÓGICAS
EN LAS PARCELAS DE USOS AGRÍCOLA, CEIACHI FACULTAD DE
CIENCIAS AGROPECUARIAS CHIRIQUÍ, PROVINCIA DE CHIRIQUÍ.**

**ZADAY A. REYES M.
4-770-1714**

**DAVID, CHIRIQUÍ
REPÚBLICA DE PANAMÁ**

2017

**CLASIFICACIÓN DE LA FERTILIDAD DE SUELOS MEDIANTE
MAPAS DE NIVELES CRÍTICOS DE VARIABLES EDAFOLÓGICAS
EN LAS PARCELAS DE USOS AGRÍCOLA, CEIACHI FACULTAD DE
CIENCIAS AGROPECUARIAS CHIRIQUÍ, PROVINCIA DE CHIRIQUÍ.**

**TRABAJO DE GRADUACIÓN SOMETIDO PARA OPTAR POR EL
TÍTULO DE INGENIERÍA EN MANEJO DE CUENCAS Y AMBIENTE.**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS
ESCUELA DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**

**PERMISO PARA SU PUBLICACIÓN, REPRODUCCIÓN TOTAL O
PARCIAL DEBE SER OBTENIDA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS
AGROPECUARIAS**

APROBADO:

PROF. ING. ALEXIS SAMUDIO

DIRECTOR

PROF. ING. AMILCAR BEITIA

MIEMBRO

PROF. ING. JOSÉ PINEDA

MIEMBRO

**DAVID, CHIRIQUÍ
REPÚBLICA DE PANAMÁ**

2017

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar los más sinceros agradecimientos principalmente a Dios, a todas aquellas personas que sin duda alguna dejaron una huella valiosa en mi vida durante estos cinco años universitarios y en especial al Ingeniero Alexis Samudio por ser un excelente asesor sus enseñanzas, consejos y aprendizajes fueron un respaldo para culminar con éxito esta investigación.

A mi querida madre por acompañarme en este desafío, al señor Jorge Cubilla por ser como un padre, brindarme su cariño y comprensión y a mi padre José Reyes.

A mi hermana Zaskia Reyes por ser mi compañera de enseñanzas y darme sabios consejos, a mi hermano José Reyes y a mis bellos sobrinos Hadassa y Neymar.

Sin duda no puedo olvidar a mi compañero de vida Odavis Moreno gracias por esos detalles que impulsaban mi mente y corazón, por demostrar ser un pilar de paciencia y admiración.

Agradezco a mis amigos y compañeros de universidad por contagiarme esa forma de ser tan diferente de cada uno, de los cuales me llevo grandes enseñanzas que pondré en práctica Mariana, Rodny, Nuvia y Coba amigos del alma. A mis compañeros Fany, Miguel, Gaby, Gary, Pedro, Ever, Franklin, Kenneth, Ambar, Brenda, Lassury, Nayelis, Carlos, Mirian y Abdiel. Por último, pero no menos importante a mis profesores de carrera universitaria, Luz, Ovidio, Felícita, J. Castillo, J. Pineda, Efraín S, Amílcar, Ana María, Liliana, Marianela, Tirso, Lezcano y Noé.

Mil gracias a todos.

DEDICATORIA

Cada paso que me has permitido dar es por tu amor y misericordia Señor. Ante todo, dedico este logro a mi Dios todo poderoso por darme la salud, sabiduría y fuerzas por alcanzar este anhelado deseo de mi corazón; sin ti ni hubiese llegado hasta donde estoy.

De igual manera a mi madre Zaskia Montenegro por apoyarme y estar conmigo en este desafío sin duda algunas eres la persona que encontrabas las palabras claves para darme aliento. A mi familia Reyes- Montenegro, sobrinos, al señor Jorge y Odavis Moreno.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
PÁGINA DE APROBACIÓN	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
DEDICATORIA	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	v
ÍNDICE DE CUADROS	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE ANEXOS	x
RESUMEN	xii
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema	2
1.2 Antecedentes	3
1.3 Justificación	5
1.4 Objetivos	7
1.4.1 General	7
1.4.2 Específicos	7
1.6 Alcances y limitaciones	8
2. MARCO TEÓRICO	10
2.1 Producción agrícola de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA.)	10
2.2 Recurso suelo	10
2.3 Efectos del material parental sobre las propiedades del suelo	11
2.4 Componentes del sistema nutrimental del suelo	13
2.4.1 Físicos	13
2.4.2 Químicos	14
2.4.1 Biológicos	16

2.5 Nutrientos.....	17
2.5.1 Nutrientos en las plantas y síntomas de deficiencias.....	18
2.5.1.1 Fósforo (P).....	18
2.5.1.2 Azufre (S).....	20
2.5.1.3 Calcio (Ca).....	21
2.5.1.4 Magnesio (Mg).....	22
2.5.1.5 Potasio (K).....	24
2.5.2 Funciones y deficiencias de micro/nutrientos	25
2.5.2.1 Hierro (Fe)	26
2.5.2.2 Manganeseo (Mn).....	27
2.5.2.3 Cobre (Cu)	29
2.5.2.4 Boro (B)	30
2.5.2.5 Zinc (Zn)	31
2.5.2.6 Silicio (Si).....	33
2.6 Disponibilidad de los elementos nutritivos en relación con el pH, aluminio y materia orgánica	34
2.6.1 pH	35
2.6.2 Aluminio (Al)	37
2.6.3 Materia orgánica	39
2.7 Fertilidad de suelo.....	41
2.8 Agricultura de precisión.....	43
2.9 Cartografía de suelos.....	44
2.10 Mapas de suelo.....	45
2.11 Generalidades del cultivo de arroz.....	46
3. MARCO METODOLÓGICO	51
3.1 Características del área	51
3.1.1 Localización	51
3.1.2 Clima.....	51
3.1.3 Zona de vida y vegetación	52
3.1.4 Geología	52
3.1.5 Drenaje y disponibilidad de agua.....	53
3.2 Metodología	53

3.2.1.1 Método de Mehlich o de Carolina del Norte para fósforo (P)	54
3.2.1.2 Método de Morgan- Wolf para boro (B) y azufre (S)	54
3.2.1.3 Método de Berthelsen y Kordorfer para silicio	55
3.2.1.4 Determinaciones de muestras para análisis de fertilidad	56
3.3 Interpretación de resultados.....	56
3.4 Confección de mapas	57
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
4.1 Comportamiento de los elementos nutrimentales	58
4.1.1 Mapas temáticos de pH, aluminio y materia orgánica.....	58
4.1.2 Mapas temáticos de fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K)	60
4.1.3 Mapas temáticos de hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu) y zinc (Zn).....	61
4.1.4 Mapas temáticos de boro (B), azufre (S) y silicio (Si)	62
4.2 Análisis Relación de bases calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) en el suelo.....	64
4.2.1 Mapa temático de la relación Ca/K	64
4.2.2 Mapa temático de la relación Ca/Mg	66
4.2.3 Mapa temático de la relación Mg/K.....	66
4.3 Comparación de la disponibilidad de elementos entre los años 1980 y 2015	67
4.4 Clasificación de fertilidad de las parcelas estudiadas	72
5. CONCLUSIONES	74
6. RECOMENDACIONES	76
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXOS	83

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	Pág.
I. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE SUELOS	56
II. CLASIFICACIÓN DE NIVELES DE PH, MATERIA ORGÁNICA Y ALUMINIO	59
III. CLASIFICACIÓN DE NIVELES DE FÓSFORO, CALCIO, MAGNESIO Y POTASIO	60
IV. CLASIFICACIÓN DE NIVELES DE HIERRO, MANGANESO, COBRE Y ZINC.....	61
V. CLASIFICACIÓN DE NIVELES DE AZUFRE Y BORO	62
VI. CLASIFICACIÓN DE LAS RELACIONES DE BASES Ca/Mg, Mg/K Y Ca/K.....	65
VII. CLASIFICACIÓN DE FERTILIDAD.....	72

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA		Pág.
1.	INFLUENCIA DEL PH SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE NUTRIMENTOS EN EL SUELO.....	36
2.	GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE LA RELACIÓN DE BASES POR PARCELAS EVALUADAS.....	64
3.	GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE NIVELES DE PH ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 2015.....	67
4.	GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE LOS PORCENTAJES DE M.O. ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 2015.....	67
5.	GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE LOS NIVELES DE FÓSFORO ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 2015.....	68
6.	GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE LOS NIVELES DE CALCIO ENTRE LOS AÑOS DE 1980 Y 2015.....	69
7.	GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE LOS NIVELES DE MAGNESIO ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 2015.....	69
8.	GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE NIVELES DE POTASIO ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 2015.....	70
9.	GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE NIVELES DE HIERRO ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 2015.....	71
10.	GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE NIVELES DE MANGANESO ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 2015.....	71

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO	Pág.
A. 1	CONTENIDO DE pH, MATERIA ORGÁNICA, ALUMINIO, CICE, POR CENTAJE SATURACIÓN DE BASES Y MACROELEMENTOS 84
A. 2	CONTENIDO DE MICROELEMENTOS 85
A. 3	MAPA SOBRE LA CONDICION DE pH DE LAS PARCELAS 86
A. 4	MAPA DE CONTENIDO DE ALUMINIO (Al) 87
A. 5	MAPA DE CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA (M.O) 88
A. 6	MAPA DE CONTENIDO DE FÓSFORO (P) 89
A. 7	MAPA DE CONTENIDO DE CALCIO (Ca) 90
A. 8	MAPA DE CONTENIDO DE MAGNESIO (Mg) 91
A. 9	MAPA DE CONTENIDO DE POTASIO (K) 92
A. 10	MAPA DE CONTENIDO DE HIERRO (Fe) 92
A. 11	MAPA DE CONTENIDO DE COBRE (Cu) 94
A. 12	MAPA DE CONTENIDO DE MANGANESO (Mn) 95
A. 13	MAPA DE CONTENIDO DE ZINC (Zn) 96
A. 14	MAPA DE CONTENIDO DE AZUFRE (S) 97

A. 15	MAPA DE CONTENIDO DE BORO (B)	98
A. 16	MAPA DE CONTENIDO DE SILICIO (Si)	99
B. 1	MAPA DE LA RELACIÓN Ca/K	100
B. 2	MAPA DE LA RELACIÓN Ca/Mg.....	101
B. 3	MAPA DE LA RELACIÓN Mg/K.....	102

CLASIFICACIÓN DE LA FERTILIDAD DE SUELOS MEDIANTE MAPAS DE NIVELES CRÍTICOS DE VARIABLES EDAFOLÓGICAS EN LAS PARCELAS DE USO AGRÍCOLA. CEIACHI, FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS CHIRIQUÍ, PROVINCIA DE CHIRIQUÍ.

Reyes Montenegro, Z; A, 2017. Clasificación de la fertilidad de suelos, mediante mapas de niveles críticos de variables edafológicas en las parcelas de uso agrícola. CEIACHI, Facultad de Ciencias Agropecuarias Chiriquí, provincia de Chiriquí Tesis Ingeniería en Manejo de Cuencas y Ambiente. Chiriquí, PA, UP.

RESUMEN

En esta investigación se elaboraron 17 mapas para clasificar en niveles alto, medios y bajos el contenido de aluminio, materia orgánica, macro elementos (P, Ca, Mg y K), micro elementos (Fe, Mg, Cu y Zn) y relación de bases Ca/K, Ca/Mg y Mg/K y pH. Las evaluaciones se realizaron en las parcelas 1, 2, 3, 4, 5a,5b, 6, 7b, y 9, de uso agrícola en el CEIACHI, Facultad de Ciencias Agropecuarias Chiriquí. Para determinar los rangos de clasificación del contenido de cada elementos y parámetros se utilizaron los niveles establecidos por la metodología de Morgan-Wolf (boro-azufre), Método de Mehlich I y Método de Berthelsen y Kordorfer para silicio.

La investigación se efectuó en tres etapas. En la primera se determinaron los niveles de fósforo, azufre, boro y silicio contenidos en el suelo. Posteriormente se evaluaron los resultados generados y los datos de análisis de suelo obtenidos de la tesis de caballero (2015) para clasificarlos de acuerdo con su rango de contenido. Por último, se confeccionaron los mapas y se identifican por colores los niveles de clasificación.

Se conocieron los contenidos bajos de materia orgánica y fósforo, los niveles de acidez del suelo. La abundancia de calcio en el suelo genera niveles fuera de rango en las relaciones de Ca/K y Ca/Mg. Además de las altas concentraciones de macro elementos que no son demandados por el cultivo de arroz. El 87.37 por ciento de la superficie evaluada es moderadamente fértil y 12.65 por ciento baja fertilidad. Las recomendaciones fueron la rotación de cultivo para permitir un equilibrio químico del suelo y aplicar enmiendas orgánicas para mejorar las condiciones del suelo.

PALABRAS CLAVES: Mapas de suelo, Fertilidad de suelos, Macro-micro elementos, Niveles críticos.

CLASSIFICATION OF SOIL FERTILITY THROUGH MAPS OF CRITICAL LEVELS OF EDAPHOLOGIC VARIABLES AT THE PLACES OF AGRICULTURAL USE. CEIACHI, FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCES CHIRIQUÍ, PROVINCE OF CHIRIQUÍ.

Reyes Montenegro, Z; A, 2017. Classification of soil fertility, using maps of critical levels of soil variables in plots of agricultural use. CEIACHI, Faculty of Agricultural Sciences Chiriquí, province of Chiriquí Thesis Watershed Engineering and Environment Management. Chiriquí, PA, UP.

ABSTRACT

In this research, 17 maps were prepared to classify high, medium and low levels of aluminum, organic matter, macro elements (P, Ca, Mg and K), micro elements (Fe, Mg, Cu and Zn) Ca/K, Ca/Mg, Mg/K and pH. The evaluations were carried out in plots 1, 2, 3, 4, 5a, 5b, 6, 7b and 9, for agricultural use in CEIACHI, Faculty of Agricultural Sciences in Chiriquí. To determine the content classification ranges of each of the elements and parameters the levels established by the methodology of Morgan-Wolf (boron-sulfur), Mehlich's Method and Berthelsen's and Kordorfer's Method for silicon are used.

The research was conducted in three stages. In the first one the levels of phosphorus, sulfur, boron and silicon contained in the soil were determined. Subsequently, the results obtained and soil analysis data obtained from the Caballero's thesis (2015) were evaluated to classify them according to their content range. Finally, the maps were made and color classification levels are identified.

Low levels of organic matter and phosphorus were known, soil acidity levels. The abundance of calcium in the soil generates levels out of range in the Ca / K and Ca / Mg relations. In addition to high concentrations of macro elements that are not required by rice cultivation. 87.37 % of the area evaluated moderately fertile and 12.65 % low fertility. The recommendations were crop rotation to allow chemical balance of the soil and to apply organic amendments to improve soil conditions.

KEY WORDS: Soil maps, Soil fertility, Macro-micro elements, Critical level.

1. INTRODUCCIÓN

El aumento de las actividades agrícolas y el deterioro de los recursos naturales son algunos de los tantos factores que han motivado al ser humano a buscar nuevas herramientas tecnológicas e investigativas que eleven la productividad, disminuyan los efectos negativos en los suelos y garanticen la sostenibilidad de la producción. Las actividades agrícolas extensivas con monocultivos generan la reducción de macro y microelementos contenidos en el suelo. Sin embargo, los monitoreos y evaluación constantes de los suelos son importante para diagnosticar problemas o limitaciones en sus propiedades químicas y biológicas en el tiempo.

La implementación de mapas de suelos se constituye una herramienta eficaz y sencilla con georreferenciación para analizar el contenido de los nutrimentos en el suelo. En este sentido, se permite generar propuestas de fertilización eficientes, evitar limitaciones para el cultivo y aplicar estrategia para buen uso del suelo.

La presente investigación tiene por objetivo elaborar 17 mapas de suelos para valorar el contenido en niveles críticos (bajo, medio y alto), de 12 elementos (fósforo, calcio, magnesio, potasio, hierro, cobre, manganeso, azufre, boro, zinc, silicio y aluminio), pH, materia orgánica y tres relaciones catiónicas en las parcelas 1, 2, 3, 4, 5a, 5b, 6, 7b y 9 de uso agrícola del CEIACHI, Facultad de Ciencias Agropecuarias Chiriquí. Además, de la comparación los contenidos nutrimentales resultantes en el estudio agroecológico PRESA, S.A (1980) y los datos de análisis de suelos de Caballero (2015).

1.1 Planteamiento del problema

La Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA.), se caracteriza por su amplia variedad de suelos con potenciales de usos agrícolas (cultivo de arroz y pasturas), forestales y pecuaria. Sin embargo, en estas áreas se pueden originar procesos antropogénicos que pueden afectar los suelos.

Actualmente no cuenta con mapas demostrativos donde se visualizan los niveles críticos (altos, medios y bajos) de fertilidad en cada una de las parcelas de uso agrícola del CEIACHI, donde nos permitan lograr la toma de decisiones técnicas e implementación de políticas de aprovechamiento de tierras de manera correcta o apropiada. Sin efectuar el análisis de suelos tendremos la falta de dos visuales: primeramente, si el contenido de nutrimentos es adecuado o excesivo; segundo ¿la aplicación de enmienda, abono y fertilización será la adecuada para alcanzar los máximos rendimientos sin generar la mínima contaminación natural?

De acuerdo con Molina (2007), con el análisis de suelos se pretende determinar el grado de suficiencia o deficiencia de los nutrimentos del suelo, así como las condiciones adversas que pueden perjudicar a los cultivos, tales como la acidez excesiva, la salinidad, y la toxicidad de algunos elementos.

De acuerdo con Hugo *et al.* citado por López y Zamora (2016), el diagnóstico de la fertilidad del suelo es una herramienta básica para definir la potencialidad del suelo en usos agropecuarios y forestales, ha estado históricamente restringido al análisis químico dirigido a predecir o pronosticar la respuesta relativa de los cultivos a la fertilización.

Adicionalmente Bertsch (2001), señala que químicamente, dada la dinámica que caracteriza al sistema suelo, quizá es el factor que más repercute en generar nuevas limitantes nutrimentales en un suelo. Factores como las prácticas de manejo nutrimental que se ejecuten sobre ese sistema, como pueden ser el encalado, la fertilización y la aplicación de abonos orgánicos.

1.2 Antecedentes

En la actualidad la Facultad de Ciencias Agropecuarias Chiriquí (FCA.), presenta dos estudios agrológicos enfocados a describir las características de los suelos, considerando variables edafológicas y medio ambientales; el realizado por la compañía PRESA, S.A. (1980) y posteriormente Caballero (2015), genera una actualización de datos sirviendo de referencia para la clasificación de capacidad de uso de tierras y generar información que además, puede ser utilizada para confeccionar mapas de fertilidad de suelo.

En el primer estudio agrológico realizado en las tierras patrimoniales de la Facultad de Ciencias Agropecuarias se encontraron cinco clases de suelos (II, III, IV, VI y VIII) y 14 sub-clases de suelo. De acuerdo con PRESA, S.A. (1980), los riesgos al daño o deterioro se hacen progresivamente mayores a medida que se aumenta el número de la clase. Los suelos en las primeras cuatro clases (I-IV), bajo buenas condiciones de manejo son adecuados para la producción de cultivos, árboles y pastos. Mientras que los suelos de clase (V-VIII) no son apropiados para cultivos, pero pueden ser utilizados para producción de pastos, árboles y otros usos. Para elaborar dicho estudio se utilizó

el sistema de clasificación de tierras norteamericano (propuesto por Klingebiel y Montgomery en 1981 y elaborado Soil Conservation Service de los Estados Unidos).

Pasados 35 años del primer estudio agrológico se procede a realizar una segunda investigación donde se encontraron cuatro clases (II, III, V, VIII) de capacidad de uso de la tierra; ordenándose de forma decreciente, basándose en la intensidad de uso soportable sin poner riesgo la estabilidad física del suelo y 22 unidades de manejo (Caballero, 2015). Esta investigación se realizó con la metodología para la determinación de la capacidad de uso de la tierra de Costa Rica.

La autora antes citada señala que la clase II: permite el desarrollo de cualquiera actividad agrícola incluyendo la producción de cultivos anuales y 62.5 por ciento de las tierras estudiadas pertenecían a esta clase. Además, presentan limitaciones leves; dentro de esta clase se incluyen cuatro sub-clases y seis unidades de manejo, La clase III permite el desarrollo de cualquiera actividad agrícola y presenta limitaciones moderadas solas o combinadas. Además de presentar ocho sub-clases. La clase IV presenta cinco sub-clases de suelos y mientras que la VIII incluye una sola sub-clase.

Según la evaluación realizada por Caballero (2015), el mayor porcentaje de las tierras son utilizadas para la actividad agrícola (61.79 por ciento), otro porcentaje importante se encuentra bajo uso pecuario (35.60 por ciento), el cual incluye tierras bajo pastoreo (12.51 por ciento) y pasto de corte (23.09 por ciento): las tierras en barbecho agrícola ocupan un menor porcentaje (1.40 por ciento) y solamente 0.46 y 0.75 por ciento de las tierras se encuentran ocupadas con vegetación de regeneración natural.

En los últimos años, Panamá ha empezado a incursionar en el campo de investigaciones sobre los cambios en el suelo y el entorno, poniendo cada día más énfasis en el uso de herramientas que han resultado efectivas para acercarse a las soluciones de los problemas asociados a la producción de alimentos y el desarrollo rural. A partir de septiembre del 2004, y por primera vez en Panamá, el Instituto de Investigaciones Agropecuarias de Panamá (IDIAP), utilizando diversas capacidades desarrolla mapas que relacionan productos del uso de tierras con otros objetivos entre los que sobresalen los asociados al desarrollo rural y la producción de alimentos, tomando en consideración las limitaciones de fertilidad de los suelos (IDIAP, 2006).

De acuerdo con el IDIAP (2006), los mapas de fertilidad de suelos a nivel nacional realizados proporcionan una noción de la calidad química y física de los suelos existentes en nuestro país. Para la elaboración de los mapas se utilizó la base de datos del laboratorio de suelos del IDIAP, que contiene los resultados de 100,000 muestras de suelos analizados en el país, de las cuales se tomaron 19,163 y fueron analizadas entre 1986 y 2004.

1.3 Justificación

La información obtenida a partir de la medida de las propiedades de los suelos constituye un elemento clave en la toma de decisiones para un adecuado uso y manejo del suelo, protección ambiental y planificación territorial. Por medio de trabajos de campo y análisis de laboratorio, se determinan las principales cualidades de los suelos proporcionando la información que los caracteriza química y físicamente.

De acuerdo con Bertsch (2001) el suelo como componente del sistema de producción suelo-planta-clima-manejo es a su vez un sistema por sí mismo, por lo tanto, funciona como una unidad en la interacción directa de todos sus componentes. Con relativa frecuencia se olvida que el secreto para lograr la expresión concreta de toda la potencialidad de un suelo radica en contribuir a la acción articulada de cada una de sus fracciones particulares. Hay que conocer cada uno de esos componentes del suelo y, sobre todo, la forma en que están interactuando con el resto para poder, mediante manejo, lograr su mejor expresión.

La fertilidad del suelo es considerada de mucha importancia para el crecimiento de las plantas y es definida como el potencial que tiene un suelo para suplir los elementos nutritivos en las formas, cantidades y proporciones requeridas para lograr un buen desarrollo y rendimiento vegetal. Su evaluación con fines agrícolas es el proceso mediante el cual se diagnostican problemas nutrimentales en suelos y en base a ellos se elaboran planes de fertilización (Casanova, 2005).

Analizar los suelos se constituye en una herramienta para evaluar las deficiencias nutrimentales y aplicar recomendaciones de fertilización. Basándonos en la teoría de la existencia de un nivel crítico en el cual los nutrimentos pueden encontrarse por encima o por debajo generando afectaciones positivas o negativas sobre el desarrollo de las plantas según dichas concentraciones.

Según Molina (2007), la fertilidad es vital para que un suelo sea productivo, aunque un suelo fértil no necesariamente es productivo, debido a que existen otros factores de tipo físico como el mal drenaje, escasa profundidad, pedregosidad superficial, déficit de humedad, etc., que pueden limitar la producción, aun cuando la fertilidad del suelo

sea adecuada. El grado de potencial productivo de un suelo está determinado por sus características químicas y físicas.

El Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales (INETER) desarrollará en el 2017 un mapa sobre la fertilidad de sus suelos con el objetivo de potenciar sus usos; permitiendo brindar información sobre los diferentes cultivos y como estos se relacionan con la productividad. Según datos del Ministerio del Ambiente y los Recursos Naturales (MARENA). Con el mapa de fertilidad, el INETER busca elevar la productividad en la medida en que se utilicen de forma más apropiada el recurso suelo. El uso erróneo de los suelos causa una degradación 10 veces más alta de lo permisible en Nicaragua, según el (CIAT) Centro Internacional de Agricultura Tropical (NuevoDiario,2017).

1.4 Objetivos

1.4.1 General

Clasificar mediante mapas los niveles de fertilidad en las parcelas de producción agrícola 1, 2, 3, 4, 5a, 5b, 6, 7b y 9 del CEIACHI Facultad de Ciencias Agropecuarias Chiriquí (FCA).

1.4.2 Específicos

- Elaborar mapas para 12 elementos, tres relaciones catiónicas, pH y materia orgánica, esenciales en la producción de cultivos.

- Valorar el contenido nutrimental de las parcelas de producción en niveles críticos (bajo, medio y alto) mediante mapas.
- Comparar la evolución del contenido de nutrimentos de las parcelas de producción entre el estudio de PRESA, S.A. (1980) y Caballero (2015).

1.5 Hipótesis de trabajo

La evaluación de los niveles de fertilidad de los suelos mediante la utilización de mapas permitirá obtener una herramienta visual factible para un desarrollo adecuado de estrategias de fertilización y diagnósticos de las áreas de producción agrícola, forestal y pecuaria.

1.6 Alcances y limitaciones

1.6.1 Alcances

- La información generada en esta investigación proporciona una forma práctica y sencilla de visualizar las condiciones nutrimentales de los suelos de la Facultad de Ciencias Agropecuarias.
- Herramienta de toma de decisiones para los administradores en las áreas de producción agrícola.

1.6.2 Limitaciones

- La implementación de nuevas metodologías para el análisis de muestras requiere desarrollar protocolos y adaptación a los métodos propuestos.
- La no utilización de la información generada en los mapas.
- Que no se realicen las recomendaciones de fertilidad de acuerdo con análisis de suelo.
- Falta de equipos de laboratorios para el desarrollo de análisis de suelo en el área investigativa.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Producción agrícola de la Facultad de Ciencias Agropecuarias (FCA.)

Los proyectos agrícolas desarrollados para la FCA ciclo 2015 - 2016 fueron: arroz de secano abarcando aproximadamente 106.4 hectáreas, arroz semilla con 19.06 hectárea, maíz para silo nueve hectáreas y pastos para pacas 15 hectáreas. El arroz de secano o comercial emplea la mayoría de las parcelas de producción agrícola (1,2A, 2B, 4,5B, 5C, 6 y mixta) generando una cosecha en 100.28 hectáreas de 1, 261, 940.00 kg (kilogramos) mientras que la parcelas 5b las 6.12 hectáreas se cosecharon para semilla resultando con 73, 420 kg, el rendimiento hectárea del proyecto arroz de secano fue de 125,550 kg (Tejedor 2016).

Para lograr los rendimientos en el arroz comercial indicados en el párrafo anterior se genera un costo de producción de 158, 958. 68 balboas de los cuales un 37. 51 por ciento es decir 59, 636,38 balboas son invertidos en insumos para la fertilización de las parcelas (urea, urea 3015, foliar 11 N - 6 P₂O₅ – 44 K₂O, urea más azufre, urea 46por ciento N, abono 16-30-15, abono 30-0-20 y otros), además de los costos por hora para la maquinaria de abonamiento (Tejedor,2016).

2.2 Recurso suelo

“El suelo es un cuerpo natural compuesto de sólidos (minerales y materia orgánica), líquidos y gases que ocurre en la superficie de la tierra, ocupa un espacio y se caracteriza porque tiene horizontes o capas que se diferencian del material inicial como resultado de las adiciones, pérdidas, traslocaciones, transformaciones de energía y

materia porque es capaz de soportar plantas arraigadas en un ambiente natural” (Jaramillo, 2002).

De acuerdo con Thompson y Troeh, citado por Caballero (2015), el suelo constituye solo una pequeña porción de la masa total de nuestro planeta, cuyo espesor varía entre unos pocos centímetros y dos a tres metros, pudiendo parecer un tanto insignificante. No obstante, en esta delgada capa se relacionan de manera dinámica los seres vivos y las características de este suelo se hallan parcialmente determinadas por la acción de dichos organismos.

Desde el punto de vista agronómico, el suelo es el sitio donde viven y crecen las plantas y animales, los cuales son altamente importantes en el mantenimiento de la vida humana. Mientras que el edafólogo considera el suelo en relación con su uso como un medio para el crecimiento de las plantas. Asimismo, deben entender los factores que causan las variaciones en los suelos y las formas de conservarlos y mejorar la productividad (Casanova, 2005).

2.3 Efectos del material parental sobre las propiedades del suelo

La transformación de roca en suelo se designa como formación del suelo. La roca podría ser gneis, caliza, shale, arena, loes, turba, etc. El suelo es tratado como un sistema dinámico. Se enfatiza que los cambios de las propiedades del suelo están en función del tiempo (Zapata, 2006).

El suelo se desarrolla controlado por varios factores y procesos, a partir de un material parental (roca o sedimentos). Existe una relación entre muchas de las propiedades y

calidades de ese suelo y las características del material de partida. Los materiales de partida de los suelos, cuando son expuestos a las condiciones ambientales superficiales, son sometidos a diferentes procesos de alteración (meteorización) como consecuencia del cambio de condiciones con respecto a aquellas bajo las cuales se formaron (Jaramillo,2002). Cuando se produce la meteorización, generalmente ocurren dos procesos: mecánicos y químicos. El mecánico o también llamado físico conduce a la transformación física de los minerales o desintegración, y el químico conduce a cambios en la estructura y se denomina descomposición (Casanova, 2005).

El fraccionamiento y disgregación de los minerales primarios, así como la transformación de algunos de ellos en minerales secundarios; se origina entonces un material terroso, suelto que conserva muchos rasgos del material original: saprolito (verdadero material parental del suelo). Estos productos de la alteración de los materiales originales quedan expuestos a los procesos de formación del suelo (pedogénesis), los cuales, actuando a través del tiempo con diferentes características e intensidades, llegan a confeccionar la gran variedad de suelos que se encuentran en la naturaleza (Jaramillo, 2002).

De acuerdo con Zapata (2006), Muchos agricultores han reconocido por mucho tiempo que las propiedades importantes del suelo son heredadas del material parental. Expresiones como suelos calcáreos, suelos graníticos son encontrados en textos viejos de suelo sobre temas agrícolas. Ellos están claramente convencidos de la importancia del material parental en la formación del suelo. Sin embargo, Hilgard en América y Dokuchaev, citado por el autor antes mencionado, en forma independiente, hicieron el importante descubrimiento que un material parental dado podría formar

diferentes tipos de suelo dependiendo de las condiciones ambientales, particularmente clima y vegetación. Material parental, clima y organismos son designados, comúnmente, como factores formadores del suelo.

2.4 Componentes del sistema nutrimental del suelo

2.4.1 Físicos

El desconocimiento de las propiedades físicas que poseen los suelos muchas veces los hace propensos a degradación y con ello la pérdida de sus principales funciones ecosistémicas y su capacidad productiva. Con ello se expone a sus propietarios como a las poblaciones que dependan de la agricultura a escasez de alimentos, inundaciones, sequias, deslizamientos de suelos y otros daños (Universidad en el campo (UNICA), 2011).

Las propiedades físicas de los suelos determinan en gran medida, la capacidad de muchos de los usos agrícolas. La condición física de un suelo determina, la rigidez y la fuerza de sostenimiento, la facilidad para la penetración de las raíces, la aireación, la capacidad de drenaje y de almacenamiento de agua, la plasticidad y la retención de nutrimentos (Rucks et al, citado por López y Zamora 2016).

De esos componentes del suelo que afecta la potencialidad nutrimental de un suelo, los físicos son los primeros que saltan a la vista. La que más se mide es la textura, sin embargo, para una identificación de problemas quizá esta característica resulte muy general (Bertsch 2001).

Tres de las propiedades físicas más relevantes, por su interacción con el aspecto nutrimental, son:

- Profundidad de la capa arable.
- Compactación, desde el punto de vista de capa dura que dificulta la penetración física de las raíces e inhibe su desarrollo por falta de oxígeno.
- Contenido de humedad, que podría propiciar la falta de oxigenación y modificar la disponibilidad de los elementos sensibles a las reacciones REDOX.

2.4.2 Químicos

Las propiedades químicas del suelo están determinadas principalmente por la materia orgánica y las arcillas, por ser estos las fuentes principales aportadoras de nutrimentos. La materia orgánica cualquiera sea su origen, es junto a las arcillas los elementos esenciales para que se den una serie de aportes de nutrimentos en los suelos.

La relación carbono/nitrógeno desde el punto de vista químico, constituye un índice de gran utilidad en la interpretación de la calidad de la materia orgánica respecto a su fertilidad. Por otro lado, el pH debido a la influencia que tiene sobre el desarrollo de las plantas y la fauna del suelo incide además en la velocidad y calidad de los procesos de humificación y mineralización, así como en el estado de determinados nutrimentos (UNICA, 2011).

Según Bertsch (1998), desde un punto de vista de fertilidad de suelos, la solución de suelo es el eje central en la dinámica nutrimental del sistema suelo, por dos razones: La solución del suelo es de donde principalmente las plantas absorben nutrimentos. A

partir de este componente se da la principal salida del sistema nutricional, lo que lo convierte en el personaje más directo de la producción. Todos los otros componentes del suelo involucrados en mayor o menor grado de nutrición vegetal están relacionados con esta solución.

De acuerdo con Bertsch (2001), desde un enfoque propiamente químico, las limitantes nutrimentales que se presentan con más frecuencia, por lo general, pueden asociarse con alguno de estos cuatro aspectos:

- El tipo de sistema coloidal dominante y el conocimiento y comprensión que se tenga del mismo.
- El tipo de elemento del que se trate.
- El tipo de sistema de cultivo que se tenga.
- El manejo que se le ha efectuado.

Cada nutrimento tiene propiedades particulares que lo hacen desenvolverse particularmente según sea el sistema coloidal al que se enfrente. Las limitantes que ofrecerá el nitrógeno (N) en un suelo dominado por materiales caoliníticos serán tremendamente diferentes a las que ofrezca un suelo volcánico, y aún más, si este es manejado con un fuerte componente orgánico, por ejemplo. Igualmente, la magnitud de la limitante que representa para el fósforo (P) de un suelo la presencia de alofana, como ocurre en volcánicos, en comparación con la fijación que puede ocurrir por presencia de calcio (Ca), como ocurre en vertisoles, es diametralmente diferente. También, las limitantes químicas cambiarán según las exigencias que tengan cada cultivo y el grado de intensidad de manejo que tenga el sistema (Bertsch, 2001).

2.4.1 Biológicos

El suelo presenta una gran variedad de organismos vivos que enriquecen las características nutrimentales del suelo al transformar la materia orgánica y modificar algunas propiedades físicas como la porosidad, aireación, drenaje, etc.

Los microorganismos del suelo son responsables de la mayor parte de la liberación de nutrimentos a partir de materia orgánica. Cuando los microorganismos descomponen la materia orgánica, ellos utilizan el carbono y los nutrimentos de la materia orgánica para su propio crecimiento. A su vez, liberan el exceso de nutrimentos en el suelo, donde pueden ser absorbidos por las plantas (Valoragrocultura, 2015).

De acuerdo con Chavarría citado por UNICA (2011), como se indicó en el párrafo anterior, el papel de la fauna del suelo es de vital importancia para que se forme y transforme la materia orgánica. De allí que surge la necesidad de estudiarlos y valorizar el aporte a la economía rural, ya que al facilitar el ciclaje de nutrimentos se ahorrara buena suma de dinero, a la vez que se evita la contaminación de los suelos con la aplicación de fertilizantes edáficos sintéticos.

La inclusión del componente biótico como integrante indiscutible, participante activo, e incluso, si se le conoce y se le maneja adecuadamente, como factor determinante de la función nutritiva de un suelo, es definitivamente un avance notable en el estudio de la fertilidad de los suelos (Bertsch, 1988). Actualmente, la información disponible hace inconcebible la omisión de este factor.

Dos aspectos del componente biológico que van a ser discutidos a continuación son:

- La rizosfera.
- El poder amortiguante y la capacidad almacenadora del componente orgánico.

Por rizosfera se entiende la zona del suelo que está en contacto con la raíz, que no se puede considerar ni suelo ni raíz, dada la fuerte interacción entre ambos componentes. En esta zona ocurren una serie de reacciones químicas producto de las condiciones específicas del sitio, y una actividad particularmente alta de la población microbiana.

2.5 Nutrientes

Según Graetz (2008), para mantener un crecimiento sano de la planta, es necesario que el suelo posea un amplio rango de nutrientes. Las plantas absorben los elementos nutritivos en ciertas proporciones. Es importante que los nutrientes se mantengan balanceados en el suelo, para satisfacer las necesidades individuales de los cultivos. Los elementos nutritivos se clasifican en macro elementos, elementos secundarios y micro elementos, de acuerdo con las cantidades que las plantas necesitan para su desarrollo.

Existen 16 nutrientes que se consideran esenciales para el desarrollo vegetal. Del suelo la planta absorbe como elementos mayores N (nitrógeno) y K (potasio). Aunque el P (fósforo) generalmente se incluye, no se consume en grandes cantidades por la planta, sino que su uso a partir del suelo resulta ser ineficiente (Bertsch, 1998).

En el suelo la movilidad de los nutrimentos es importante porque permite planificar su disponibilidad para las plantas. Este conocimiento influye en las decisiones de fertilización como dosis, frecuencia y tipo de fertilizante, así como del método de aplicación correcto. La movilidad de los nutrimentos en el suelo en su forma iónica depende de su carga, y del pH, la temperatura y la humedad del suelo (Jones y Jacobsen; citado por Barrera, Cruz y Melgarejo, SF). Además, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, boro, hierro y azufre se consideran nutrimentos de intermedia a baja movilidad. Puede llegar a diagnosticarse la deficiencia de algún nutrimento con la observación de síntomas en la planta.

El antagonismo entre los nutrientes se produce por las interacciones entre iones con propiedades fisicoquímicas similares como es la valencia y/o el diámetro del ión. La competencia que se da entre los iones puede darse por la entrada a un mismo canal proteico o por la unión a una proteína transportadora. Dentro del grupo de elementos antagónicos podemos resaltar la competencia entre sulfato y molibdato, sulfato y selenato, potasio y magnesio, nitratos y cloruros, potasio y magnesio o la que se da entre potasio con amonio (Cakmak, 2015).

2.5.1 Nutrimentos en las plantas y síntomas de deficiencias

2.5.1.1 Fósforo (P)

Según Kass (1998), en el suelo el P (fósforo) se encuentra en dos formas; orgánica e inorgánica. La inorgánica incluye fósforo nativo presente en el suelo originario de la descomposición y desintegración de rocas y materiales parentales que contiene apatita. El P se encuentra en el suelo como partículas pequeñas de fluorapatita,

hidroxiapatita y fosfato de hierro, aluminio o en combinaciones con fracciones de arcillosas.

Las plantas lo absorben rápidamente como fosfato monovalente $(\text{H}_2\text{PO}_4)^{-1}$. La forma de absorción está más ligada a las condiciones de pH del suelo, un buen ámbito esta entre valores de 6.0 y 6.8 en pH. El fósforo después de ser absorbido por las plantas de la solución del suelo se encuentra dentro ellas en forma orgánicas e inorgánicas (Kass, 1998).

Dos factores adicionales que ayudan a la absorción de P (Kass, 1998):

- La presencia de micorrizas en el ambiente de la raíz aumenta la superficie absorbente y acelera la velocidad de absorción de fósforo.
- A un pH cercano a neutralidad (7.0) y un contenido adecuado de magnesio puede tener un efecto sinérgico, incrementando la cantidad de fósforo que absorbe la planta.

El papel del fósforo es fundamental en procesos fisiológicos y bioquímicos de las plantas. Este elemento reacciona muy rápidamente con otros elementos químicos del suelo, por lo cual se forman componentes menos solubles; por lo tanto, solo reducidas proporciones quedan disponibles a la planta (Graetz, 2008).

Los principales síntomas que se observan cuando falta P, es una coloración verde oscura o azulada en las hojas. Además de la formación de pigmentos antociánicos que confieren a la hoja coloraciones púrpura. Por la gran movilidad del elemento, las hojas viejas son las primeras en presentar los síntomas (Bertsch, 1998).

La deficiencia de fósforo deprime el crecimiento radical, las hojas y tallos muestran un crecimiento reducido. Se reduce la floración y la madurez de los frutos, además que el tamaño de las semillas y frutos se reduce más de lo normal. Cuando el abastecimiento del suelo a las raíces de las plantas es insuficiente, el fósforo de los tejidos viejos es transferido a regiones meristemáticas en crecimiento activo (Kass, 1998).

2.5.1.2 Azufre (S)

El azufre llega al suelo desde el aire, en la lluvia y el agua de riego, y en la materia orgánica. Ayuda a la liberación de los nutrientes en el caso de alto contenido de calcio en el suelo., porque baja el pH (Graetz, 2008). La planta absorbe azufre del suelo en forma oxidada, como sulfato (SO_4^{2-}). También puede absorber azufre gaseoso vía foliar, directamente de la atmósfera, como dióxido de azufre (SO_2) (Kass, 1998).

De acuerdo con el autor antes citado este elemento en el sistema suelo- raíz se encuentra en su mayor parte unido a la fracción orgánica. El azufre es un componente de las proteínas, cuando los residuos orgánicos se incorpora al suelo y se transforman en sustancias húmicas, una importante fracción del elemento permanece en el humus, esta condición predomina en suelos de regiones húmedas. Después de varios años de manejo agrícola en un suelo, el contenido de materia orgánica se estabiliza, usualmente con bajos niveles, ya que hay poco aporte de tejidos lignificados, especialmente si son cultivos hortícolas; generando un bajo aporte de azufre orgánico. Se estima que esta fracción contribuye a suplir las necesidades de las plantas, porque usualmente es rápidamente disponible.

Las funciones del S dentro de la planta son principalmente (Kass, 1998) y (Bertsch, 1998):

- Mayormente absorbido por la planta como ión sulfato; luego es reducido e incorporado en compuestos orgánicos.
- Óptima actividad fotosintética y respiratoria.
- Fijación simbiótica eficiente de nitrógeno molecular principalmente en plantas leguminosas.

En las plantas las deficiencias de azufre se inician con un color verde pálido seguido de una clorosis generalizada, asociada a un crecimiento débil o reducción en incremento de biomasa. Debido a la inmovilidad de este elemento dentro de la planta, los síntomas aparecen primeros en las hojas jóvenes. En las plantas de la familia de las crucíferas, las deficiencias se identifican por un color rojizo en el envés de la hoja (Kass, 1998; Bertsch, 1998).

2.5.1.3 Calcio (Ca)

Es un macronutriente absorbido por la planta en forma catiónica y dependiendo de la concentración de calcio, potasio y magnesio en la solución del suelo disminuye la velocidad de absorción del elemento que tiene menos concentración en el sistema. Constituye las principales fuentes de los compuestos cálcicos del suelo son los carbonatos, sulfatos y los silicatos de calcio (Kass, 1998).

De acuerdo con Kass (1998), El calcio es muy conocido como enmienda de suelos ácidos del trópico, es absorbido por las raíces de las plantas como ión calcio (Ca^{+2}).

Este se encuentra abundantemente en los suelos y para que existan bajos niveles de Ca en él, deben existir situaciones especiales. Desde ellas son: alta cantidad de lluvia, que lava el calcio hacia estratos inferiores del suelo o poco aporte de calcio a partir de la meteorización de minerales primarios.

Debido a la alta movilidad del elemento y a su función de rigidez las deficiencias se presentan en las regiones meristemáticas, falla el desarrollo terminal de los ápices de la raíz. El síntoma característico es la malformación de las hojas o curvatura de las láminas foliares en forma de cuchara, asociados a clorosis marginal y necrosis de tejidos, cuando la deficiencia es severa (Bertsch, 1998 y Kass, 1998).

El crecimiento deficiente en suelos ácidos puede deberse a deficiencias directas de calcio y magnesio, especialmente en las primeras etapas de acidificación de los suelos. En el trópico muchos suelos ácidos son deficientes de calcio sin que tengas problemas de aluminios (Bertsch, 1998 y Kass, 1998).

2.5.1.4 Magnesio (Mg)

La planta lo absorbe de la solución del suelo como ión magnesio (Mg^{+2}). Este elemento tiene relaciones antagónicas con el calcio y potasio. Si la cantidad de magnesio es baja en relación con esos dos elementos en forma catiónica, disminuye su velocidad de absorción por las raíces de las plantas (Kass, 1998).

El comportamiento del Mg es similar al calcio. Es parcialmente soluble en agua y por esto susceptible a la lixiviación. El magnesio favorece la formación de azúcares en los cultivos (Graetz, 2008). Algunos efectos que causa el Mg en la planta: producir el color

verde y ayudar a la absorción de P (Bertsch, 1998). El Mg es un elemento móvil dentro de las plantas, es constituyente básico de la molécula de clorofila, que confiere autonomía autotrófica a los organismos vegetales (Kass, 1998).

Interviene en varias funciones vitales para la planta en procesos metabólicos y reacciones como: fotofosforilación (formación de ATP en los cloroplastos), fijación fotosintética del dióxido de carbono (CO₂), síntesis de proteínas, formación de clorofila, recarga de floema, participación y asimilación de los productos de la fotosíntesis, generación de las formas reactivas de oxígeno y fotooxidación de los tejidos de las hojas (Cakmak y Yazici, 2010).

Según Cakmak y Yazici (2010), varios procesos fisiológicos y bioquímicos críticos para la planta se alteran cuando existen deficiencias de Mg, afectando el crecimiento y el rendimiento de la planta. En la mayoría de los casos la intervención de mg en procesos metabólicos radica en la activación de numerosas enzimas. Una importante enzima activada por este es la ribulosa-1.5-bisfosfato carboxilasa, que es básica en el proceso de fotosíntesis.

En las plantas su deficiencia se identifica por clorosis intervenal en las hojas viejas, porque es un elemento de alta movilidad dentro de ellas. Si hay deficiencia, solo las venas tienen el color verde, pero el área foliar entre las venas se vuelve clorótica. Si la deficiencia avanza las hojas adquieren un color pardo y posteriormente ocurre una necrosis de tejido (Kass, 1998 y Bertsch, 1998). Si son plantas monocotiledóneas la clorosis tiene un patrón longitudinal, asociada a la nervadura de la lámina foliar, pero si son dicotiledóneas la clorosis es transversal a la nervadura central (Kass, 1998).

A pesar del conocido papel del Mg en varias funciones críticas en las plantas, pero existen pocas investigaciones conducidas a la capacidad de este nutrimento al rendimiento y calidad de los cultivos. Por esta razón a menudo se considera como elemento olvidado. Sin embargo, la deficiencia de Mg ha pasado a ser un importante factor limitante en los sistemas de producción intensivos, especialmente en suelos fertilizados solo con nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K). Además, existe una preocupación creciente por el agotamiento del mg en suelos dedicados a agricultura de alta productividad. Se requiere de este nutrimento para que la plantas liberen efectivamente los iones orgánicos ácidos para modificar una rizosfera cargada de Al (aluminio) toxico (Cakmak y Yazici, 2010).

2.5.1.5 Potasio (K)

De acuerdo con García y Quinke (2012), el potasio existe en el suelo en cuatro formas cada una de ellas con diferente disponibilidad para los cultivos. Estas son en orden creciente de disponibilidad: el potasio mineral, el no intercambiable, el intercambiable y el presente en la solución. La importancia relativa de cada una de ellas depende de la mineralogía.

El K está sujeto fuertemente en los minerales como el feldespato y las micas, resistentes a la meteorización. El K fijado o no intercambiable está presente dentro de las capas de cierto tipo de arcilla, el menor tamaño de esas partículas hace que la liberación de potasio sea más fácil. Debido a la extracción de potasio de los cultivos, y al lavado, ocurren trasformaciones entre las formas de potasio donde el estado de

equilibrio estable es difícil que se logre, sino que se trata de un equilibrio dinámico (García y Quinke, 2012).

De acuerdo con Kass (1998), las raíces de las plantas lo absorben de la solución del suelo de forma iónica (K^+), mediante dos mecanismos: flujo de masa y difusión. La absorción se reduce si su contenido, en la solución del suelo, es muy bajo respecto al calcio y magnesio.

Es un elemento de fuerte demanda por las plantas. Si existe gran disponibilidad en el suelo, las plantas lo absorben en forma indiscriminada (más allá de sus necesidades), proceso conocido como consumo de lujo. Tiene diferencias funcionales, comparado con el N, P y S, porque no se combina con otros elementos para formar compuestos grasos (Kass, 1998).

Una deficiencia en plantas provoca una disminución de la síntesis de proteínas y hasta muerte de las células oclusivas. El potasio se mueve libremente por floema, por lo que se exporta desde hojas viejas, donde recién aparecen los síntomas, para luego exportarse a zonas jóvenes. Las deficiencias severas se observan en plántulas, con ápices muertos o enanas (Hernández, et al 2010). La deficiencia de K reduce en alto grado el rendimiento de la cosecha, y aumenta la susceptibilidad del cultivo al ataque de enfermedades, rompimiento de tallos y estrés por sequía (Kass, 1998).

2.5.2 Funciones y deficiencias de micro/nutrientes

Los siete micronutrientes que acompañan a los macronutrientes son esenciales para que las plantas realicen sus funciones fisiológicas y metabólicas. Estos son: Fe

(hierro), Mn (manganeso), Cu (cobre), Zn (zinc) y B (boro). Todos son mejor absorbidos por las raíces de las plantas en condiciones de pH ácido. Los primeros cuatro elementos se conocen como de transición. Como forman parte del mismo grupo, entre ellos existen reacciones antagónicas en los procesos de absorción (Kass, 1998).

2.5.2.1 Hierro (Fe)

El hierro es uno de los nutrimentos vegetales que más problemas presenta en cuanto a nutrición de los cultivos. Esto se debe en gran medida a que, en sistemas airados en el rango de pH fisiológicos, la concentración de los iones Fe^{3+} y Fe^{2+} es inferior a 10-15 M, insuficiente para cubrir las necesidades del vegetal.

Este elemento de transición que se caracteriza por la relativa facilidad con la que puede cambiar su estado de oxidación y por su capacidad para formar complejos octaédricos con distintos ligandos. El hierro es el cuarto elemento más abundante en la corteza terrestre después de silicio, oxígeno y aluminio, representa el 5,1 por ciento de su peso total, su contenido en suelo se estima en un 3,8 por ciento (Según Lindsay, citado por Juárez, et al 2007).

El hierro puede ser absorbido por la planta como ion ferroso (Fe^{+2}) y como ion férrico (Fe^{+3}). La forma ferrosa predomina en suelos mal drenados y con aireación deficiente. El exceso de cal en un suelo disminuye su absorción, porque se hace menos soluble. Además, las altas concentraciones de cobre, zinc, manganeso y calcio reducen la absorción de hierro en el ambiente rizosférico (Kass, 1998).

Los primeros síntomas visibles de deficiencias de hierro se producen en las hojas especialmente en los cloroplastos que se ven alterados su estructura y función. Esto reduce la membrana tilacoides va acompañado de disminución de todos los pigmentos que recogen la luz: clorofila y carotenos. Se genera el color amarillo de las hojas cloróticas en consecuencia del desequilibrio de clorofila y carotenos (Juárez *et al.* 2007).

En la mayoría de las especies, la clorosis aparece entre las nervaduras en un reticulado fino, sin embargo, la nervadura permanece verdes acentuando contraste con el fondo verde más claro o amarillento del resto del tejido (Kirbky y Romheld, 2008). La deficiencia de Fe es muy similar a la del Mg la única diferencia es que el Fe es un elemento inmóvil dentro las plantas; por eso el patrón indicador de deficiencias en brotes y hojas jóvenes (Kass, 1998).

2.5.2.2 Manganeso (Mn)

El manganeso se halla principalmente como óxido, pero también en forma de silicato o carbonato. A través de procesos de meteorización de estos compuestos entran iones de Mn^{2+} a la solución del suelo. Estos iones pueden ser adsorbidos/fijados después en las superficies positivas de los cationes de intercambio. Además del contenido de minerales arcillosos del suelo, en la retención del Mn son sobre todo importantes el valor del pH y el potencial redox del suelo. Al decrecer el valor del pH y bajar el potencial redox, aumenta la concentración de iones de Mn^{+2} disponible para las plantas en la solución del suelo (K+S KALI, 2017).

El manganeso es absorbido activamente por la planta como Mn^{+2} . Si en el ambiente suelo-raíz existen altas concentraciones de formas iónicas como potasio, calcio, magnesio, cobre y zinc, su velocidad de absorción disminuye. Sus principales funciones incluyen: fotosíntesis actúa como donador de electrones para la clorofila activada, en la síntesis de clorofila y en la formación, multiplicación y funcionamiento de cloroplastos. Participa en procesos de óxido-reducción, reacciones de descarboxilación (Kass, 1998). Los suelos ácidos tienen generalmente grandes cantidades de manganeso soluble, este catión reduce la absorción de magnesio por las plantas. También altas cantidades de manganeso disminuyen la tasa de absorción del potasio (Cakmak, 2015).

Es un importante micronutriente para las plantas y, después del hierro, es el que las plantas requieren en mayor cantidad. Al igual que sucede con cualquier otro elemento, su deficiencia o su toxicidad pueden representar una limitante para el desarrollo de las plantas. En varias formas se asemeja al hierro, por lo que su deficiencia o su toxicidad suelen ser confundidas con las de éste (ProMix, 2016).

La deficiencia de manganeso se manifiesta en las hojas jóvenes, porque es un elemento inmóvil dentro la planta. Síntomas son muy similares a la deficiencia de hierro, con clorosis intervenal (Kass, 1998 y Bertsch, 1998). Según Kirkby y Romheld (2008), la deficiencia de Mn afecta la tasa de germinación de las semillas. Los cloroplastos además son organelos sensibles a esta deficiencia, lo que lleva la desorganización del sistema laminar y síntomas visibles de clorosis. Por esta razón, la deficiencia de Mn se parece a la de Mg, porque ambas aparecen como clorosis intervenal en las hojas.

2.5.2.3 Cobre (Cu)

Es un micronutriente, esto significa que el contenido de Cu en las plantas es menor que el de otros nutrientes como el nitrógeno (N). En efecto, las plantas contienen 2,500 veces menos Cu que N y aun así el cobre es tan necesario para el crecimiento como lo es el N. Las plantas necesitan el cobre para completar su ciclo de vida, es decir para producir semillas viables (Instituto Internacional de Nutrición de Plantas(IPNI), 2015).

El cobre es retenido por la materia orgánica con mayor fuerza que cualquier otro micronutriente. Los suelos con textura de arcilla generalmente contienen más Cu en forma intercambiable, disponible para los cultivos. Otros componentes del suelo, como óxidos y carbonatos, puede reducir aún más la disponibilidad de cobre. Por otra parte, la solubilidad del cobre disminuye a medida que el pH aumenta a 7 y por encima. Un pH más alto incrementa la fuerza con la cual el Cu es retenido por las arcillas y materia orgánica, haciéndolo menos disponible para los cultivos. (IPNI, 2015).

El cobre es absorbido como ion cúprico (Cu^{+2}), o cuproso, $\text{Cu}(\text{OH})^{+1}$, o como parte de complejos orgánicos, pero en muy bajas cantidades. Si el ambiente suelo-raíz hay altas concentraciones de zinc (Zn), fósforo (P), aluminio (Al) y hierro (Fe) en los suelos pueden deprimir la absorción de Cu por las raíces y agravar la deficiencia de Cu (Kass, 1998). Los riesgos de deficiencia de Cu también aumentan con tasas aplicación de nitrógeno (N).

Funciones del Cobre en las plantas (Kass, 1998; Kirbkby y Romheld 2008):

El Cu se parece en algo al Fe, debido a que forma quelatos altamente estables que permite la transferencia de electrones. Por esta razón, desempeña un papel comparable al del Fe en los procesos redox de la fisiología de la planta. Sin embargo, a diferencia del hierro, las enzimas que contienen cobre pueden reaccionar con oxígeno molecular y catalizan preferentemente procesos terminales de oxidación.

Cuando se presenta una deficiencia de Cu, las actividades enzimáticas se reducen drásticamente, se disminuye el transporte fotosintético de electrones como consecuencia de un menor contenido de una proteína que contiene el cobre, reduciendo de igual manera la tasa de fijación de CO₂ de modo que el contenido de almidón y carbohidratos se reduce. Este es el principal factor de provoca reducción de producción de materia seca en plantas durante el crecimiento vegetativo (Kirbkby y Romheld 2008).

2.5.2.4 Boro (B)

El contenido de boro en el suelo en climas húmedos varía entre 5 - 80 mg kg⁻¹. Los suelos arenosos presentan valores menores de boro (5-20 mg kg⁻¹) que los suelos con altos contenidos de arcillas y materia orgánica (30-80 mg kg⁻¹). Valores extremadamente altos de boro, con un efecto fitotóxico, se pueden presentar en suelos salinos (K+S KALI,2017).

Es el menos entendido de todos los nutrimentos, a pesar de que, en términos molares, las dicotiledóneas lo requieren en mayores cantidades que otros micronutrimentos (Kirbkby y Romheld, 2008). La planta lo absorbe en forma de ácido bórico, (H₃ BO₃), y

en menor cantidad en forma de boratos como él (H_2BO_3)⁻¹. Sus funciones básicas destacan en participar: en el crecimiento celular de los tejidos meristemáticos, en la síntesis de aminoácidos y regulación del metabolismo de carbohidratos (Kass, 1998).

De acuerdo con el autor antes citado, los síntomas de deficiencia se caracterizan por crecimientos lentos y anormales de los brotes y zonas meristemáticos, con deformaciones de las yemas terminales; generando en algunas dicotiledóneas el llamado crecimiento en palmilla.

De acuerdo con Bertsch (1998), debido a su inmovilidad, los síntomas se presentan en primer lugar en las zonas más jóvenes, tanto de raíces como los tallos y los ápices pueden acabar muriendo. Las hojas presentan texturas duras y los tallos se vuelven quebradizos.

2.5.2.5 Zinc (Zn)

Según Kirbkby y Romheld (2008), en contraste con el Fe, Mn, Cu y Mo, el Zn es un elemento de transición que no está sujeto a cambios de valencia y está presente en las plantas solamente con Zn (II). Este elemento participa en diversos mecanismos enzimáticos y en la estabilidad de compuestos enzimáticos que contiene iones metálicos ligados a la estructura (Kass, 1998).

De acuerdo con Kass (1998), el Zn es absorbido rápidamente en su forma iónica por las plantas y poco absorbido en su forma de complejos orgánicos, lo que es una diferencia con el hierro y manganeso. Un alto contenido de fósforo en el sistema de suelo- raíz, disminuye su disponibilidad para las raíces absorbentes. El zinc disponible

en la solución del suelo es adsorbido/fijado especialmente por la materia orgánica del suelo. Además, es adsorbido por los óxidos de hierro, aluminio y manganeso o fijado en la red de minerales arcillosos y silicatos. Una fijación adicional del zinc ocurre cuando el contenido de sulfatos y fosfatos en la solución del suelo es alto (K+S KALI, 2017).

Los suelos deficientes en zinc son especialmente comunes en áreas donde el pH del suelo es alto. La deficiencia de Zn se induce mediante la aplicación de cantidades altas de cal. El aplicar fósforo a un suelo con niveles adecuados de Zn no produce deficiencia de este nutrimento. Los suelos arenosos son frecuentemente más deficientes en Zn, que suelos más pesados y los suelos con pH alto (alcalinos), sin importar la textura, tienen mayor posibilidad de ser deficientes en Zn que suelos de pH bajo (ácidos). Un análisis completo de suelo es una herramienta fundamental e infaltable para tomar decisiones a la hora de aplicar correctivos (Blandon, 2013).

De acuerdo con el autor antes citado, la deficiencia de Zn suele ocurrir en los ciclos de crecimiento tempranos particularmente en suelos húmedos. El sistema radicular creciendo lentamente no puede absorber suficiente zinc para satisfacer las necesidades de tallo y hojas. En algunas ocasiones las plantas parecen controlar estas deficiencias a medida que crecen, pero el daño ya ha sido hecho y los rendimientos se han reducido significativamente. La mayor parte del Zn disponible en el suelo está asociada con la materia orgánica que se acumula en la capa arable.

2.5.2.6 Silicio (Si)

El silicio es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre y se puede encontrar una gran cantidad de él en la tierra; sin embargo, el silicio solo puede ser absorbido por la planta en forma de ácido monosilícico. La mayoría de las dicotiledóneas (plantas de hojas amplias) recogen pequeñas cantidades de silicio y acumulan menos del 0,5 por ciento en sus tejidos. Algunas monocotiledóneas como el arroz y otros pastos de humedales acumulan entre un 5 y un 10 por ciento de silicio en sus tejidos, lo que es más alto que los valores normales de nitrógeno o potasio (ProMix, 2016).

El carácter benéfico del Si es atribuido principalmente al aumento en la resistencia de enfermedades en plantas acumuladoras de este elemento, se localiza en la pared celular o cerca de la misma dificultando la penetración del agente patógeno y por la disminución del efecto tóxico del exceso de Mn, Fe y Al en suelos ácidos (Ortega y Malavolta, 2012).

La mayor proporción del Si en la planta se encuentra como sílice amorfa hidratada ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). En ciertas especies, particularmente de gramíneas, es común la presencia de cuerpos silicosos insolubles. Después de solidificado se vuelve inmóvil en la planta: en las células epidérmicas del arroz, debajo de la cutícula, aparece una capa de sílica, que ayudaría a limitar la pérdida de agua por transpiración y dificultar la penetración de hifas de los hongos. En las dicotiledóneas esa capa no aparece (Malavolta, citado por Ortega y Malavolta, 2012).

Se ha comprobado que el silicio ayuda a incrementar la resistencia del tallo. Por ejemplo, las investigaciones demostraron que cuando el arroz y el trigo tienen deficiencia de silicio, sus tallos se debilitan y colapsan bajo la lluvia o el viento (ProMix,2016).

De acuerdo con el autor antes citado, como el silicio no se considera un elemento esencial, la mayoría de las plantas crecerán de manera normal sin él. No obstante, unas pocas plantas han manifestado efectos perjudiciales si no se aplica silicio. Como se mencionó anteriormente, el arroz, el trigo y otros cultivos gramíneos exhiben una incidencia reducida de encorvamiento cuando se les proporciona silicio. Los tomates pueden tener un desarrollo anormal de su flor, y al igual que los pepinos y las fresas, pueden tener un conjunto reducido y posiblemente deforme de frutas. En algunas plantas, la deficiencia de silicio también puede incrementar la posibilidad de que adquieran toxicidad por manganeso, cobre o hierro.

2.6 Disponibilidad de los elementos nutritivos en relación con el pH, aluminio y materia orgánica

La existencia de los dieciséis elementos de importancia para la nutrición de las plantas, así como de algunos otros específicos como el cobalto y silicio. Puede ser afectados por factores ligados al suelo como el pH, el contenido de materia orgánica y tipo de arcilla.

2.6.1 pH

Un factor de gran influencia que afecta la disponibilidad de nutrimentos en el suelo. El mismo puede presentarse en condiciones de alcalinidad, como los suelos situados en áreas secas con precipitación menores que la evapotranspiración real del cultivo. Las condiciones de pH ácido son frecuente en suelos de regiones tropicales (Kass, 1998). Según Bertsch (1998), el pH químicamente afectara la solubilidad, disponibilidad y absorción de algunos nutrimentos, así como el por ciento de saturación de bases y CIC. Por otra parte, biológicamente los tipos de organismos presentes y su actividad en pH de menores a 5.5 será baja; además los procesos de fijación de N, mineralización prosperan mejor en condiciones neutras.

Los suelos de acuerdo con Andrade y Martínez (2014), que presente pH ácido son desfavorables para el desarrollo radicular, pobres en bases (Ca, Mg, k), reducción de actividad microbiana y disminución en la asimilación de P, que precipita dando formas insolubles con Mn, Al y Fe. Mientras que el suelo de pH básicos tiene alto contenido de bases de cambio (Mg y Ca), la asimilación de Fe, Mn y Zn se dificulta por la presencia de carbonato de calcio. Los pH neutros son condiciones óptimas para el desarrollo de cultivo y asimilación de la mayoría de nutrimentos. De acuerdo con Kass (1998), la disponibilidad de P, en la mayor parte de suelos tropicales, alcanza el máximo cuando en el suelo hay valores de pH entre 5.5 y 6.5.

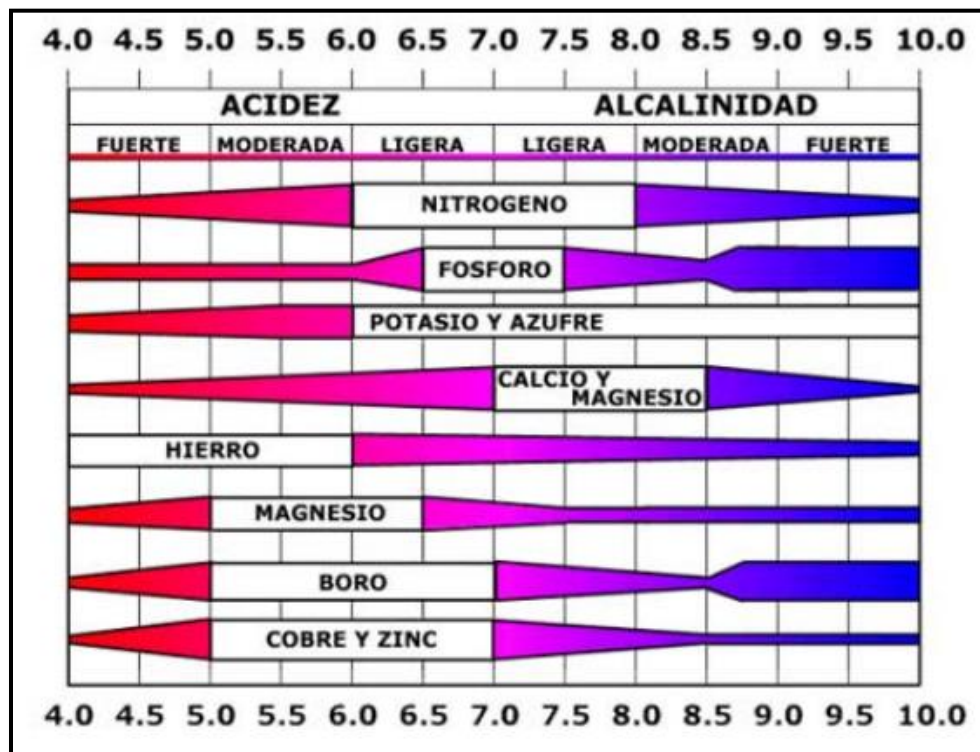


FIGURA 1. INFLUENCIA DEL PH SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE NUTRIMENTOS EN EL SUELO

Fuente: Ginés y Mariscal-Sancho (2002).

El pH del suelo influye de forma decisiva en la asimilabilidad de los diferentes nutrientes vegetales. Los pHs que proporciona mejores condiciones de asimilabilidad son ligeramente ácidos (pH entre 6 y 7).

La acidificación es la tendencia del complejo de cambio del suelo a cargarse con iones H^+ , con el consiguiente detrimento del resto de los cationes minerales. Los suelos sin una importante reserva de calcio pueden presentar un proceso de acidificación, tanto más rápido cuanto más intensivo es el cultivo y cuanto mayores son los aportes de fertilizantes acidificantes. La descalcificación se produce con el abandono de cationes

Ca^{+2} del complejo de cambio del suelo. Si en el suelo no existe una reserva de calcio, la descalcificación aparece como una fase preliminar de la acidificación. Generalmente el calcio es el catión más abundante y su salida facilita la fijación de iones H^+ para contrarrestar la carga del complejo (Ginés y Mariscal-Sancho 2002).

De acuerdo con los autores antes citados el suelo tiene un poder amortiguador por el cual, la aplicación de ácidos o bases no varía en gran medida su pH. Este poder amortiguador está relacionado, por un lado, con la existencia de coloides en su composición; y por otro, está relacionado con su capacidad de intercambio iónico; cuanto mayor sean estos dos factores, mayor poder de amortiguamiento tendrá el suelo. La capacidad de amortiguación es distinta según el tipo de suelo: Suelos húmicos > suelos arcillosos > suelos francos > suelos arenosos.

2.6.2 Aluminio (Al)

De acuerdo con Rivera *et al.* (2016), en el mundo, aproximadamente el 30 por ciento de la superficie agrícola, y el 50 por ciento de la superficie potencialmente arable está formada por suelos ácidos, de esta cifra, el 41 por ciento se encuentra en América. El 81 por ciento de los suelos tropicales de América son ácidos y con alta concentración de aluminio soluble.

El aluminio es el factor más limitante del crecimiento y productividad en los suelos ácidos del mundo. La magnitud de la toxicidad por aluminio depende del contenido de elementos nutritivos en el suelo, especialmente magnesio y calcio; por tanto, la relación Ca/Al , Mg/Al y $(\text{Ca}+\text{Mg}+\text{K})/\text{Al}$ en la solución del suelo resultan ser parámetros de gran importancia para determinar la posibilidad de toxicidad por aluminio. En esta

última relación, se considera que el aluminio presenta condiciones de toxicidad para la planta, cuando el cociente es menor o igual que la unidad (De acuerdo con Instituto Colombiano Agropecuario (ICA) citado por Aguilar y Casierra 2007).

El suelo está compuesto por diversos elementos, entre los que se destaca el aluminio. En los suelos ácidos, especialmente en aquellos cuyo pH es menor a 4,5, el aluminio se solubiliza y se convierte en su catión trivalente Al^{3+} , que en alta cantidad es tóxico para la planta. La acidificación es una de las causas más importantes de degradación de los suelos agrícolas a nivel mundial. En la región oriental, aproximadamente, el 90 por ciento de los suelos presentan como unas de las primeras limitaciones para uso agrícola la alta acidez, elevada concentración de aluminio y, por ende, baja fertilidad (Rojas,2016).

La concentración de Al^{3+} en la solución del suelo a pH menor de 5,0 se encuentra en el rango de 10 - 100 μM , e incluso, en suelos minerales de ecosistemas forestales, la concentración de Al^{3+} soluble puede alcanzar valores cercanos a 1.000 μM (Matzner y Prenzel, citado por Aguilar y Casierra, 2007).

El efecto de exceso de aluminio genera la disminución de la solubilidad del fósforo y del molibdeno, y al descenso de la concentración de macronutrientes en la solución del suelo y en la planta, causa una alteración del metabolismo general, especialmente inhibe el crecimiento radical, lo cual tiene como consecuencia una reducción en la toma de agua y nutrientes. Sin embargo, la magnitud de estos efectos depende de las propiedades físico-químicas del suelo y de la tolerancia de las especies vegetales (Rivera et al, 2016).

Kass (1998), señala que cuando la cantidad de Al en la solución del suelo alcanza concentraciones superiores a 1.0 mg L^{-1} , está comprobado que existirá implicaciones directas sobre el crecimiento de las plantas por intoxicación. El efecto primario de la toxicidad de este elemento consiste en un daño directo sobre el sistema radicular. El desarrollo de las raíces se restringe, se vuelven más gruesas y presentan algunos puntos muertos. Además, el Al tiende acumularse en la raíz impidiendo la absorción y traslado de Ca y P a la parte aérea de la planta.

La adición de materiales orgánicos al suelo es de gran ayuda en la corrección de la toxicidad por aluminio, por su capacidad para formar complejos estables aluminio-orgánicos que reducen la fitotoxicidad del elemento. Esta práctica agrícola, complementada con la inoculación de las plantas con micorrizas y el encalado del suelo, reduce sustancialmente la posibilidad de estrés por aluminio para los vegetales (Aguilar y Casierra, 2007).

2.6.3 Materia orgánica

El hombre ha aplicado toda clase de materias orgánicas a los suelos cultivados. Durante 150 años los fisiólogos mantuvieron la teoría húmica, que consideraba que las plantas se nutrían directamente del humus del suelo y la presencia de este material marcaba su fertilidad (Navarro *et al.* Otiniano *et al.* 2006).

Para Gros y Domínguez citado por Otiniano *et al.* (2006), el nivel deseable de materia orgánica en los suelos arcillosos medios es del 2 por ciento, descender a 1,65 por ciento en suelos pesados y llegar a un 2,5 por ciento en los arenosos. La materia orgánica del suelo contiene cerca del 5 por ciento de N total, pero también contiene y

suministra otros elementos esenciales para las plantas, tales como fósforo, magnesio, calcio, azufre y micronutrientes.

Los científicos agrícolas han reconocido los beneficios de la materia orgánica en el suelo (MOS) para la productividad de los cultivos. El efecto benéfico de la MOS sobre la fertilidad de los suelos especialmente sobre aquellos altamente meteorizados es de una importancia dramática con relación a sus contenidos, pues está demostrado que incrementos mínimos benefician simultáneamente las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo (Meléndez y Soto, 2003).

Los autores denominan indistintamente materia orgánica Navarro et al., o humus Gros y Domínguez; citado por Otiniano et al (2006), a la parte orgánica que cumple un papel esencial en el suelo. El humus tiene efecto sobre las propiedades físicas del suelo, formando agregados y dando estabilidad estructural, uniéndose a las arcillas y formando el complejo de cambio, favoreciendo la penetración del agua y su retención, disminuyendo la erosión y favoreciendo el intercambio gaseoso. Cuando se refiere al efecto sobre las propiedades químicas del suelo, aumenta la capacidad de cambio del suelo, la reserva de nutrientes para la vida vegetal.

Aunque no se conoce a ciencia cierta la naturaleza de los procesos implicados ni las fracciones de MOS que afectan las propiedades del suelo, es claro que ésta presenta efectos benéficos como los siguientes (Meléndez y Soto 2003): actúa como agente quelatante del aluminio y de micronutrientes previniendo su lixiviación y evita la toxicidad de los mismos, regula los fenómenos de adsorción especialmente la inactivación de plaguicidas. Además de mejorar la capacidad de intercambio del suelo y aumentar la buena reserva de elementos nutritivos (Andrades y Martínez, 2014).

De acuerdo con Meléndez y Soto (2003), una de las contribuciones más importante de la materia orgánica a la fertilidad de suelo es su capacidad de suplir nutrimentos, especialmente nitrógeno, fósforo, y azufre. La materia orgánica es anfotérica (tiene cargas positivas y negativas) y su carga depende de pH y generalmente es netamente negativa, por eso, el Ca, Mg, y K están ligados electrostáticamente a la materia orgánica del suelo. La cantidad potencial de cargas negativas es alta, pero muchos sitios están bloqueados por interacciones con Al y Fe o cambios con pH. Generalmente más del 95 por ciento del N y entre el 20-75 por ciento del fósforo están en la materia orgánica. El contenido de fósforo es similar a azufre, pero más variable debido a cierta independencia de su ciclo relativo al carbono, nitrógeno y azufre.

2.7 Fertilidad de suelo

El conocimiento de los niveles de nutrimentos en el suelo, la composición físico-química del mismo, los niveles de extracción de distintos cultivos es la fase inicial de cualquier intento de una mejora cuantitativa y cualitativa de la producción, así como el elemento básico para lograr un uso racional y equilibrado de los fertilizantes, que permitirán un ahorro económico y posibles consecuencias respecto a la contaminación de suelos y aguas (Andrades y Martínez, 2014).

De acuerdo con Graetz (2008), para que un suelo sea productivo es necesario que sea fértil; sin embargo, un suelo fértil no es necesariamente productivo. Un suelo fértil suministra a las raíces adecuadas cantidades de nutrimentos, agua y aire para que el cultivo crezca y produzca.

El análisis de fertilidad de suelo es el procedimiento por el cual se mide las reservas de elementos esenciales que tiene el mismo, para saber su capacidad de suministrar nutrimentos, lo cual puede proporcionar a los investigadores y agricultores una base precisa y confiable para que puedan tomar decisiones apropiadas respecto a las enmiendas y fórmulas de fertilización que requieren sus experimentos o parcelas (Calderón *et al.* 2012).

La fertilidad del suelo se define como su estado con relación a la capacidad que posee de suministrar elementos esenciales para el crecimiento de las plantas, sin presentar concentraciones tóxicas de ningún elemento. Tanto las necesidades de elementos esenciales como la tolerancia a elementos tóxicos varían con el tipo de planta, por lo que el nivel de fertilidad no puede expresarse solamente con relación al suelo, sino que debe referirse también al cultivo (Ansorena, citado por López y Zamora 2016).

De acuerdo con Solís, citado por López y Zamora (2016), la fertilidad del suelo es una cualidad resultante de la interacción entre las características físicas (capacidad de brindar condiciones estructurales adecuadas para el sostén y crecimiento de los cultivos), químicas (capacidad para suministrar los nutrimentos apropiados, en cantidades adecuadas y balanceadas) y biológicas (vinculado con los procesos biológicos del suelo, relacionados con sus organismos), del mismo y que consiste en la capacidad de poder suministrar condiciones necesarias para el crecimiento y desarrollo de plantas.

Según Graetz (2008), si los suelos son incapaces de suministrar uno o más de los nutrimentos necesarios, los cultivos no podrán beneficiarse al máximo del efecto favorable de una temperatura y precipitación adecuadas. Por lo tanto, es importante

que el productor conozca: las necesidades de nutrimentos del cultivo, cantidades de nutrimentos disponibles en el suelo, a forma de establecer y mantener las condiciones óptimas del suministro de nutrimentos. La carencia de uno o más de los nutrimentos requeridos por la planta para su desarrollo normal, se manifiesta a través de la aparición de síntomas específicos en los cultivos.

2.8 Agricultura de precisión

De acuerdo con el (CITRA) Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agroclimatología (2009), la agricultura de precisión es un concepto agronómico de gestión de parcelas agrícolas, basado en la existencia de una importante variabilidad espacial a nivel de campo. Requiere del uso de varias herramientas tecnológicas dentro de las cuales destacan, los sistemas de posicionamiento global (GPS), sensores remotos, imágenes aéreas y/o satelitales junto con sistemas de información geográfico (SIG) para estimar, evaluar y entender dichas variaciones. Estas tecnologías contribuyen a una adecuada toma de decisiones, desde el punto de vista del manejo técnico-productivo, económico y ambiental.

El uso de tecnologías de la información para adecuar el manejo de suelos y cultivos a la variabilidad presentes dentro de un lote. Este método permite satisfacer una de las exigencias de la agricultura moderna: el manejo óptimo de grandes extensiones. Por ejemplo, los rendimientos de dos cultivos pueden ser idénticos si se usan los promedios, pero diametralmente opuesto a una situación de loma y un bajo en un mismo lote. Este dato solo podrá obtenerse mediante la realización de un mapa de rendimientos (García y Flego, s.f).

2.9 Cartografía de suelos

La producción agrícola es una actividad económica que tiene la finalidad de producir de manera rentable los productos necesarios para el consumo. Dicha producción está fuertemente influenciada por el manejo agronómico del cultivo y controlada por la calidad o potencial del sitio en que este se encuentra.

Para establecer las medidas necesarias o recuperar la fertilidad del suelo bajo un sistema de explotación agrícola o pecuaria hay que recurrir a la tecnología de los sectores de referencia. Y estos sectores se seleccionan a partir de una “pequeña región natural”, que en cierta forma coincide con las regiones geográficas de los suelos, que se establecen sobre la base de su génesis, en los trabajos de regionalización geográfica de los suelos (Hernández *et al.* citato por López y Zamora, 2016).

La representación cartográfica de los suelos de un territorio determinado constituye una visualización de las propiedades intrínsecas de los suelos y la delimitación de su ámbito concreto de distribución. Un mapa de suelos debe integrar de una manera armónica la escala de trabajo, la cantidad de información que se debe representar, la calidad en la definición y delimitación de unidades y la capacidad de interpretación de los usuarios de la información (Instituto de Estudio Catalanes (IEC), 2008).

La cartografía de suelos toma un rol significativo para futuros planes y proyectos de desarrollo, previamente acordados. Los avances tecnológicos producidos a partir de 1990 han permitido profundizar y precisar con mayor eficiencia la información cartográfica y edáfica, con base en técnicas de teledetección espacial y aplicación de

sistemas de información geográfica (SIG). A partir del desarrollo de software y hardware específicos, incluyendo sistemas de posicionamiento global (GPS), que permiten precisar y verificar posiciones en terreno a tiempo real, hoy es posible modelizar aspectos ambientales y productivos, generando escenarios de desarrollo preventivos y prospectivos, inimaginables hace poco tiempo atrás (Ligier,2014).

2.10 Mapas de suelo

Los mapas no representan la realidad de un terreno, sino el conocimiento estructural sobre la distribución de los suelos. Tratándose entonces de una aproximación a la realidad, cuanto mayor sea la densidad de observaciones del área mayor será el detalle generado en escala.

Los mapas de suelos muestran un conjunto de propiedades interrelacionadas que caracterizan al suelo como un cuerpo natural. Esto excluye a los mapas que muestran la distribución de una sola propiedad tal como la textura, pendiente o profundidad, solas o en una combinación limitada; mapas que muestran cualidades de los suelos como la productividad y mapas de los factores de formación de los suelos (Fadda, citato por López y Zamora, 2016).

Finalidad de los mapas de suelo (IEC, 2008):

- Sintetizar en un único documento las propiedades clave de los suelos por medio de un juego de codificaciones y leyendas que permitan una interpretación rápida de los resultados.

- Contribuir a la difusión del conocimiento del suelo y la situación en el espacio de suelo. Frecuentemente, el mapa de suelo es el único documento que permite a una persona no especializada el acceso a la información sobre el suelo.
- Acceder de manera rápida a la información del suelo, en tanto es un documento específico, visual, sintético y de representación bidimensional de los suelos de una zona determinada. El mapa de suelo debe facilitar un acceso a la información que permite una explotación racional de los datos de los suelos representados.

2.11 Generalidades del cultivo de arroz

De acuerdo con Rodríguez citado por Meléndez y Molina (2001), los suelos ideales para el cultivo de arroz son aquellos con textura arcillosa, arcillo arenosa o arcillo limosa, de topografía muy plana. De igual manera los suelos arenosos no son aconsejables, pues tienen poca capacidad para retener agua y producen pérdida de nutrimentos por lavado. Es recomendable evitar la acidez excesiva (pH menor o igual a 4,5) y la alcalinidad elevada (pH mayor o igual a 8).

El pH óptimo para el cultivo se encuentra entre 5,5 y 6,5. Con pH de 6.0 la liberación microbiana de nitrógeno y fósforo de la materia orgánica, y la disponibilidad de fósforo son altas y además las concentraciones de sustancias que interfieren la absorción de nutrimentos, tales como aluminio, manganeso, hierro, dióxido de carbono y ácidos orgánicos están por debajo del nivel tóxico (InfoAgro,2012). Los principales nutrimentos en el cultivo del arroz están el fósforo (P), potasio (K) y nitrógeno (N), siendo este último el principal en rendimiento del grano, siempre cuando las

condiciones de crecimiento del cultivo sean las idóneas en cuanto a las malezas, enfermedades, plagas y la suficiencia de la totalidad de nutrimentos (Rodríguez, SF).

La cantidad de nutrimentos removidos del suelo por una cosecha de arroz varía con el cultivar, la producción de biomasa, el suelo, el clima y el manejo. De esta forma se pueden encontrar diferencias muy grandes de extracción de nutrimentos por el arroz en diferentes condiciones y latitudes, no sólo por cantidades totales sino por distribución en el tiempo (Rodríguez, 1999).

Según el autor antes citado, específicamente en lo que respecta a absorción de nutrimentos, variedades modernas de alta producción (un promedio de 5.0 T ha⁻¹ de grano) en general pueden remover del suelo 110 kg N, 34 kg P₂O₅, 156 kg K₂O, 23 kg MgO, 20 kg CaO, 5 kg S, 2 kg Fe, 2 kg Mn, 200 g Zn, 150 g Cu, 150 g B, 250 kg Si y 25 kg de Cl por hectárea. La extracción de Si y K₂O es particularmente alta en las panículas y paja que se saca de la plantación al momento de la cosecha. Sin embargo, si sólo se remueve el grano y la paja es devuelta e incorporada de nuevo al suelo, la extracción de Si y K₂O se reduce considerablemente, aunque cantidades significativas de N y P₂O₅ sean removidos.

- **Nitrógeno**

Gran parte del nitrógeno del suelo se encuentra en formas orgánicas, formando parte de la materia orgánica y de los restos de cosecha, pero la planta de arroz solo absorbe el nitrógeno de la solución en forma inorgánica (InfoAgro,2002).

Es un elemento esencial en la formación de proteínas, que estimula el crecimiento de la planta. La concentración alta de N en las hojas aumenta la tasa de fotosíntesis la cual promueve el crecimiento de la planta y el llenado de los granos. El N es necesario a lo largo del todo el ciclo, pero la mayor demanda se presenta al inicio del macollamiento y panícula (De acuerdo con Dobermann y Fairhurt, 2000 citado por Rodríguez, s.f).

▪ **Fósforo**

El P promueve el macollamiento, desarrollo de la raíz, la floración temprana y maduración (en temperaturas bajas). La mayor cantidad de P se recomienda aplicar en las primeras fases de crecimiento, el cual es almacenado y utilizado en las fases posteriores (De acuerdo con Dobermann y Fairhurt, 2000 citado por Rodríguez, s.f).

El arroz necesita encontrar fósforo disponible en las primeras fases de su desarrollo, por ello es conveniente aportar el abonado fosforado como abonado de fondo. Las cantidades de fósforo a aplicar van desde los 50-80 kg de P_2O_5 /ha. Las primeras cifras se recomiendan para terrenos arcillo limosos, mientras que la última cifra se aplica a terrenos sueltos y ligeros (InfoAgro,2002).

▪ **Potasio**

A diferencia del N y P, el K no tiene efectos en el macollamiento, pero tiene efectos directos en aumentar los niveles de clorofila (fotosíntesis) y retrasa la senescencia, por lo que se da mayor crecimiento y acumulación de fotoasimilado. Las cantidades

de K en suelo es la principal fuente de potasio en la planta, comúnmente se recomienda aplicar cantidades superior o iguales a las de nitrógeno en relación 1:1.4 o 1:1 (Rodríguez, s.f).

El potasio aumenta la resistencia las enfermedades y a las condiciones climáticas desfavorables. La absorción del potasio durante el ciclo de cultivo transcurre de manera similar a la del nitrógeno. Las dosis de potasio a aplicar varían entre 80-150 kg de K_2O /ha (InfoAgro,2002).

▪ **Azufre y magnesio**

La deficiencia de azufre es común en el arroz de secano, pero raramente ocurre en el arroz en tierras húmedas. El uso continuo de fertilizantes fosfatados y de urea, que no contienen azufre, pueden inducir a largo plazo la deficiencia de azufre en las tierras bajas. Los síntomas de la deficiencia de azufre son similares a los de la deficiencia de nitrógeno.

Los granos de arroz contienen más magnesio que la paja, pero menos K y Ca que esta. El arroz de secano tiene el mejor nivel de magnesio del suelo para el crecimiento de la planta cuando cerca del 10 por ciento de la capacidad de intercambio de cationes (CIC) está saturada con magnesio. En el caso del arroz en tierras húmedas, las deficiencias de magnesio son raras, pero pueden aparecer cuando su concentración cae a menos de 3 - 4 por ciento del CIC y el pH es menor de 5.0 por ciento (FAO,2003).

- **Silicio**

El silicio no es clasificado como un elemento esencial. Sin embargo, un buen cultivo de arroz toma del terreno 1 000 - 1 200 kg/ha de óxido de silicio. Los silicatos se encuentran en la paja, la cáscara del grano y en los granos. El silicio tiene varias funciones en el crecimiento de la planta de arroz (FAO,2003).

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Características del área

3.1.1 Localización

El área de estudio se encuentra ubicado en los predios de la Facultad de Ciencias Agropecuarias dentro de las coordenadas geográficas 8° 23 35.16 y 8° 24 29 latitud Norte y 82°19 17.4 y 82°19 52.45 Longitud Oeste en el corregimiento de Chiriquí, distrito de David, provincia de Chiriquí. Colinda al Noreste con la carretera Panamericana; al Sureste con la comunidad de Chiriquí y hacia el Noroeste limita con el Río Chiriquí (Caballero, 2015).

3.1.2 Clima

De acuerdo con Caballero (2015), esta área corresponde al clima subecuatorial con estación seca, según el sistema climática de Panamá elaborado por A. Mackay en el 2000 (modificado de Martonne, 1974). Este clima es cálido con promedios anuales de temperaturas de 26.5 a 27.5 grados Celsius en tierras bajas, en tanto que las tierras altas (aproximadamente mil metros) la temperatura puede llegar a 20 grados Celsius.

Según la autora antes citada, la estación meteorológica CEIACHI, durante el periodo comprendido entre 1984-2013, se registró una precipitación pluvial promedio anual de 2634.5 milímetros. La temperatura promedio anual para el periodo de 1984-2012 es de 27.1 grados Celsius.

3.1.3 Zona de vida y vegetación

Según la clasificación de Zonas de Vida de Holdridge, Tosi (1971) identifico un mapa de Panamá con un total de 12 zonas. Dentro de la zona perteneciente al Bosque Húmedo Tropical basal de Transición seca se ubica el área de estudio. Esta zona se caracteriza por tener una precipitación promedio anual que va desde 1850-3400 milímetros, con biotemperaturas media anual de 26 grados Celsius y 2000-2800 milímetros a una biotemperatura de 24 grados Celsius.

La vegetación del sitio presenta remanentes de bosque tropical húmedo en el margen oeste del Rio Chiriquí y a lo largo de la quebrada la Berrona. Existen también sectores dispersos, con vegetación secundaria. Dentro de las especies que se pueden observar se encuentran: *Simarouba glauca*, *Bambusa vulgaris*, *Swetenia macrophylla*, *Cedrela odorata*, *Bombacopsis quinatum*, *Enterolobium cyclocarpum*, *Ficus sp*, *Samanea saman*, *Genipa americana*, *Anacardium occidentale*, *Tabebuia rosea*, *Diphysa americana*, entre otras (FAO, citado por Caballero 2015).

3.1.4 Geología

Las formaciones sedimentarias tipo volcánico no se diferencian del terciario y las formaciones de ígneas extrusivas de tipo máfico como basalto y andesita del oligoceno- mioceno constituyen la geología del área. Estos materiales dan origen a suelos rojos arcillosos de las terrazas altas, producto de la meteorización.

Atravesando el terreno y en la parte baja del campo existen suelos desarrollados sobre planicies fluviales formadas por deposiciones de origen más reciente las cuales

consisten en materiales cascajosos sobre los cuales se han formado suelos de textura liviana con horizontes muy diferenciados. Estos materiales no consolidados al final de plioceno o inicio del pleistoceno se depositaron en el río Chiriquí (PRESA, S.A. 1980).

3.1.5 Drenaje y disponibilidad de agua

El río Chiriquí sirve de límite en la parte occidental de la finca y la quebrada Berrona que divide las terrazas fluviales, constituyendo las principales vías de drenaje y abastecimiento de agua en este sector de la finca. Además, se puede encontrar un drenaje detrítico siendo más desordenado en la región Este (PRESA, S.A. 1980).

En la actualidad el caudal del río Chiriquí y la quebrada La Berrona disminuye considerablemente especialmente en la época seca, ya que cada vez es más prolongada debido a las variaciones climáticas afectando así los suministros de aguas.

3.2 Metodología

La presente investigación se realizó en las parcelas de producción agrícola del CEIACHI de la Facultad de Ciencias Agropecuarias de Chiriquí. La metodología seleccionada se dirigió hacia la determinación de contenidos de P (Fósforo), B (Boro), S (Azufre) y Si (Silicio) en el suelo, interpretación de los valores resultantes en dicho análisis y en los resultados de la tesis de Caballero (2015), confección de mapas temáticos.

3.2.1 Determinación de fósforo (P), boro (B), azufre (S) y silicio (Si)

Para el desarrollo de este punto se procedió a la preparación y etiquetado de las muestras de suelos por parcelas. Luego se aplicaron tres metodologías para la determinación de los elementos.

3.2.1.1 Método de Mehlich o de Carolina del Norte para fósforo (P)

Se evaluó el fósforo disponible en el suelo, con una relación de 1:10 se aplicó 25 ml de la solución extractora doblemente ácida (HCl 0.05 N y H₂ SO₄ 0.025 N) en 2.5 gr. de suelo de cada muestra, se transfirieron cinco ml del extracto filtrado, se pipetearon 10 ml de molibdato de amonio y agregaron siete gotas de ácido ascórbico en solución (0.1 gr en 10 ml H₂ O destilada). La lectura se realizó por colorimetría a una longitud de onda de 660 nm (Samudio, 1998).

3.2.1.2 Método de Morgan- Wolf para boro (B) y azufre (S)

La solución extráctante de acetato de sodio 1 N, taponada con ácido acético pH 4.8, de Morgan (1941), se realizó de la siguiente manera: Se pesaron 15 g de suelo y luego se le agregaron 30 ml de solución extractora de Morgan.

- Agitado por 15 minutos, se filtró el extracto,
- Se Tomaron cuatro ml del extracto filtrado, se adicionó 1 ml de solución Buffer y 1 ml de solución Azometina- H.
 - Solución Buffer “amortiguadora” (1600 ml de agua tratada con carbón a 1000 g de acetato de amonio, 100 g de sal tetra-sódica de EDTA y 40 g de NTA en envases plásticos de 2000 ml. Se disolvieron los ingredientes

y adicionaron 500 ml de ácido acético suavemente, y mezclando rápidamente se almacenó en una botella plástica).

- Solución Azometina- H (3.6 g de Azometina-H y 8 g de ácido ascórbico en 40 ml de agua tratada con carbón, contenida en un vaso plástico. Se disuelve colocando el vaso en un baño agua tibia. La Azometina- H se agregaron 100 ml de agua tratada con carbón. Se almacena en botella plástica).

Luego de una hora, realicé la lectura en el colorímetro a 430 nm para boro (B) y 425 nm para azufre (S) (Wolf, 1982).

3.2.1.3 Método de Berthelsen y Kordorfer para silicio

El método para la extracción de Si (silicio). Se utilizó ácido acético a 0.5 M con una relación de 1:10. Se pesó 3.0 g de suelo y se adicionaron 30 ml de ácido acético; luego se agitó por una hora y se filtró. Se tomaron cinco ml de extracto, a los cuales se les aplicó 0.5 ml solución Molibdica al 7.5 por ciento (7.5 g de molibdato de amonio + 10 ml de ácido sulfúrico 9 M en 100 ml).

- Luego de 10 minutos adicionamos un ml de solución de ácido tartárico 20 por ciento (20 g de ácido tartárico en 100 ml de H₂O destilada).
- Después de cinco minutos adicionamos cinco ml de ácido ascórbico 0.3 por ciento (0.3 g en 100 ml de agua destilada).

Después de una hora, realice la lectura de Si (silicio) a una longitud de onda de 660 nm.

3.2.1.4 Determinaciones de muestras para análisis de fertilidad

En los resultados de análisis de suelo de Caballero (2015), se aplicaron las metodologías siguientes:

CUADRO I. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS DE SUELOS

Ph	En agua, relación suelo agua 1:2.5
Aluminio intercambiable (Al⁺³)	Extracción con KCL 1N, determinado por titulación
Ca, Mg, K, Fe, Cu, Mn y Zn	Extracción con solución Carolina del Norte (0.05 N HCL + 0.025 N H ₂ SO ₄). Determinado por absorción atómica.
Materia orgánica	Método Walkley y Black, combustión húmeda.

3.3 Interpretación de resultados

Para el análisis de datos obtenidos se registraron los resultados en tablas de Excel, utilizando formulas establecidas para indicar los niveles de absorbancia de cada muestra respecto a la del patrón del elemento. La evaluación de los datos resultantes se hizo utilizando los rangos de clasificación proporcionados en las metodologías.

La clasificación de fertilidad se realizó utilizando la referencia del manual para interpretar la fertilidad de los suelos de Costa Rica (Bertsch,1986) en donde los parámetros edáficos fueron agrupados para evaluar su contenido en acidez, materia orgánica, fósforo y bases (Ca, Mg y K).

3.4 Confección de mapas

Con base en los parámetros de clasificación se confeccionaron 17 mapas (pH, aluminio, materia orgánica, fósforo, calcio, magnesio, potasio, hierro, manganeso, cobre, zinc, boro, azufre, silicio, relación Ca/K, Ca/Mg y Mg/K), de acuerdo con los rangos de niveles críticos. Se digitalizaron los mapas empleando el programa Autocat.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La clasificación de fertilidad a través de mapas temáticos muestra el comportamiento químico de los elementos nutritivos y sus variaciones por parcelas; con tres niveles de concentración en rangos alto (naranja), medio (rosado) y bajo (amarillo) indicativos de la proporción de los elementos en el suelo.

La zona evaluada comprende para los mapas de aluminio, pH, materia orgánica, silicio 308 hectáreas, 281.64 hectáreas para el resto de los elementos (P, K, S, Ca, Mg, Fe, Mn, Cu, Zn y B) y 329.54 para la relación de bases abarcando un aproximado de ocho parcelas empleadas en la producción agrícolas de arroz (*Oryza sativa*), maíz (*Zea mays*) y pastos (elaboración de pacas). El 85 por ciento del terreno es dedicado a la producción de arroz un rubro de alto valor comercial. Son cortos los periodos de descanso que tiene el suelo para recuperar los elementos que requieren los cultivos en su desarrollo; puesto que cada año son sometidos a labores de labranza mecanizada, así como los procesos de control de maleza y fertilización.

4.1 Comportamiento de los elementos nutrimentales

4.1.1 Mapas temáticos de pH, aluminio y materia orgánica

En el mapa I (Ver Anexo A.3) se aprecia que el 64.28 por ciento (197.98 has) de las parcelas son suelos con pH ácido, el 32.34 por ciento (99.61 has) ligeramente ácidos y un 3.38 por ciento (10.41 has) muy ácidos. Confirmando lo expuesto por Andrade y Martínez (2014) los pH ligeramente ácidos generan condiciones para la asimilación de elementos como nitrógeno, fósforo, potasio, azufre, calcio y magnesio. Contrario de

los pH ácidos que beneficia a los micro elementos como hierro, magnesio, boro, cobre y zinc. De acuerdo con los resultados del mapa II (Ver anexo A.4) la distribución del aluminio evidencia niveles bajos en las parcelas 1, 2, 3, 4, 5a, 5b, 6, 7b, 9 y medios en las parcelas 7a, 7d y 7c que no exceden 1.00 mgL^{-1} . Los valores bajos abarcan una superficie aproximada de 89.12 por ciento (274.5 has) y la porción restante de terreno lo constituyen 10.88 por ciento (33.5 has) con valores medios. Respecto al mapa III (Ver anexo A.5) predomina en 81.84 por ciento suelos con bajo contenido de materia orgánica en las parcelas 1, 2, 3, 4, 5b, 5a, 6, 7b, 9 y con menores proporciones un 9.60 por ciento entre la parcela 5a y 6 altos 8.56 por ciento en las parcelas 7a, 7c, 7d.

CUADRO II. CLASIFICACIÓN DE NIVELES DE pH, MATERIA ORGÁNICA Y ALUMINIO

Rango Ph	Área (has)	% Área	CLASIF.	Rango (Al) cmol kg^{-1}	Área (has)	% Área	Rango (MO%)	Área (has)	% Área
(5.4- 6.0) Poco ácido	99.61	32.34	BAJO	(0.0 - 0.5)	274.5	89.12	(0 - 3.0)	252.06	81.84
(4.7-5.3) Ácido	197.98	64.28	MEDIO	(0.6 -1.0)	33.5	10.88	(3.1- 6)	29.57	9.60
(4.0-4.6) Muy Ácido	10.41	3.38	ALTO	(> 1.1)			(>6.1)	26.37	8.56

* Los valores de pH son en función al aumento de acidez.

En el cuadro II se muestran los niveles de clasificación y la superficie que abarca cada rango de acuerdo con las concentraciones de los parámetros evaluados en las parcelas de producción agrícola del CEIACHI.

4.1.2 Mapas temáticos de fósforo (P), calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K)

CUADRO III. CLASIFICACIÓN DE NIVELES DE FÓSFORO, CALCIO, MAGNESIO Y POTASIO

CLASIF.	RANGO (P) mg L ⁻¹	Área (Has)	% Área	CLASIF.	RANGO (Ca) cmol kg ⁻¹	Área (Has)	% Área
BAJO	0 – 15	281.64 Bajo	100	BAJO	< 2.0	281.64 Alto	100
MEDIO	15.1 – 30			MEDIO	2.1- 5.0		
ALTO	> 30			ALTO	> 5.0		
CLASIF.	RANGO (Mg) cmol kg ⁻¹	Área (Has)	% Área	CLASIF.	RANGO (K) cmol kg ⁻¹	Área (Has)	% Área
BAJO	< 0.60			BAJO	< 0.12	35.65	12.66
MEDIO	0.61 - 1.50	10.81	3.84	MEDIO	0.13 - 0.38	98.64	35.02
ALTO	> 1.50	270.83	96.16	ALTO	> 0.38	147.35	52.32

Los datos que muestra el cuadro III se aprecian los rangos de clasificación de los resultados de concentraciones de los macro elementos P, Ca, Mg y K de acuerdo con las metodológicas de Mehlich I para análisis de suelos.

Actualmente la zona presenta limitaciones en el contenido de P. El 100 por ciento de las parcelas evaluadas cuenta con niveles bajos que fluctúan entre los 0 a 3.5 mg L⁻¹. El contenido de Ca a diferencia del fósforo está en la clasificación alta abarcando una superficie de 281. 64 has (Ver anexo A.6 Y A.7).

En el mapa (Ver anexo A.8) que describe el contenido de magnesio, el 96.16 por ciento de la superficie de las parcelas 2, 3, 4, 5a, 5b, 6, 7b y 9 indica una tendencia de contenido alto del elemento. Mientras que la porción restante con 10.81 has. son representadas por la parcela uno (1) clasificadas como media. Los resultados de

potasio indican que la distribución del catión sugiere una tendencia alta-media-baja; dispuesta en la siguiente forma: el 52.32 por ciento con alta presencia en el suelo, el 35.02 por ciento contenido medio y el 12.66 por ciento bajo (Ver anexo A.9). Kass (1998), señala que dependiendo de la concentración de calcio, potasio y magnesio en la solución del suelo se disminuye la velocidad de absorción del elemento que tiene menos concentración en el sistema.

4.1.3 Mapas temáticos de hierro (Fe), manganeso (Mn), cobre (Cu) y zinc (Zn)

CUADRO IV. CLASIFICACIÓN DE NIVELES DE HIERRO, MANGANESO, COBRE Y ZINC

RANGO (Fe) mg L ⁻¹	Área (Has)	% Área	CLASIF.	RANGO (Cu) mg L ⁻¹	Área (Has)	% Área
BAJO < 25			BAJO	< 15		
MEDIO 26 - 74			MEDIO	16 – 49	41.49	14.73
ALTO > 75	281.64	100	ALTO	> 49	240.15	85.27
RANGO (Mn) mg L ⁻¹	Área (Has)	% Área	CLASIF.	RANGO (Zn) mg L ⁻¹	Área (Has)	% Área
BAJO < 15	33.31	11.83	BAJO	< 4	118.82	42.19
MEDIO 16 - 49	41.49	14.89	MEDIO	5 – 14	162.82	57.81
ALTO > 50	206.39	73.28	ALTO	> 14		

El cuadro IV refleja los rangos de clasificación respecto con el contenido en micro elementos que presentaba la superficie (281.64 has) evaluada. Detallándose de la siguiente manera:

El hierro (ver anexo A.10) es el principal micro elemento de abundancia en las parcelas de producción agrícola, sitúa sus resultados entre valoraciones de 75 - 150 mg L⁻¹ con

clasificación de alto contenido en el suelo. El segundo micro elemento de este grupo con concentraciones alta es el cobre (ver anexo A.11) variando sus rangos entre altos a medios; siendo el primero de estos el que abarca unas 240.15 hectáreas y el segundo 41.49 hectáreas (rango medio).

El Manganeso (Ver anexo A.12) ocupa el tercer lugar de los microelementos evaluados con alto contenido, reflejando 73.28 por ciento del terreno (parcelas 1, 2, 3, 4, 5a, 5b, 6, 7b y 9) y las porciones restantes entre medios (parcela 6 y 7b) y bajos en las parcelas 6 y 7. De manera descendente el Zinc (Ver anexo A.13) presenta contenidos medio y bajo respectivamente. La condición media engloba una extensión de 162.82 has y la condición baja representa 118. 82 has. Comparando los resultados de los mapas del grupo tres destacamos que el elemento zinc es el único que no presenta concentraciones altas sobre el suelo.

4.1.4 Mapas temáticos de boro (B), azufre (S) y silicio (Si)

CUADRO V. CLASIFICACIÓN DE NIVELES DE AZUFRE Y BORO

CLASIF.	RANGO (B) mg L ⁻¹	Área(Has)	% Área	CLASIF.	RANGO (S) mg L ⁻¹	Área(Has)	% Área
BAJO	0.0 - 0.9	103. 96	36.91	BAJO	0.0 – 5.0		
MEDIO	1.0 - 1.9	160.32	56.92	MEDIO	5.1 – 14.0	236.39	83.93
ALTO	2.0 - 4.0	17.36	6.16	ALTO	>15.0	45.25	16.07

El cuadro V muestra los rangos de clasificación del contenido de boro y azufre en las parcelas evaluadas de acuerdo con la metodología de Wolf, seleccionada para el análisis de suelos. Describiendo de la siguiente manera los resultados encontrados:

Concerniente a este grupo se presentan niveles altos, medios y bajos en la mayoría de la superficie. El azufre (Ver anexo A.14) exhibe valores clasificados como medios entre 5.1 – 14.0 mg L⁻¹ (83.93 por ciento) y contenidos altos >15.0 mg L⁻¹ (16.07 por ciento); representado una menor disponibilidad en el terreno. Los niveles medios abarcan las parcelas cercanas a la rivera del río Chiriquí, área donde el nivel freático es mayor durante la época lluviosa.

El elemento boro (Ver anexo A.15), evidencia rangos que varían por parcelas en tres categorías. El 6.16 por ciento de la superficie abarca niveles altos, el 56.92 por ciento medio y el 36.91 por ciento bajo. El contenido medio a bajo de boro y azufre se relaciona de acuerdo con Otiniano *et al.* (2006), con la baja disponibilidad de materia orgánica en el suelo que no contribuye a suministrar estos elementos esenciales.

Los datos del mapa de silicio (Ver anexo A.16), muestran una clasificación media (30 mg L⁻¹), que abarca 266.60 has (86.56 por ciento) del terreno y rangos déficit (menores a 15 mg L⁻¹) en 41.40 has (13.44 por ciento) especialmente en la parcela 6, parte baja de la 5a y a mayores niveles las 7a,7c y 7d. Según Malavolta y Ortega (2012), este contenido de silicio puede ser un punto focal como carácter benéfico al aumentar la resistencia a enfermedades y disminuir el efecto tóxico del exceso de Mn, Fe y Al en suelos ácidos.

4.2 Análisis Relación de bases calcio (Ca), magnesio (Mg) y potasio (K) en el suelo

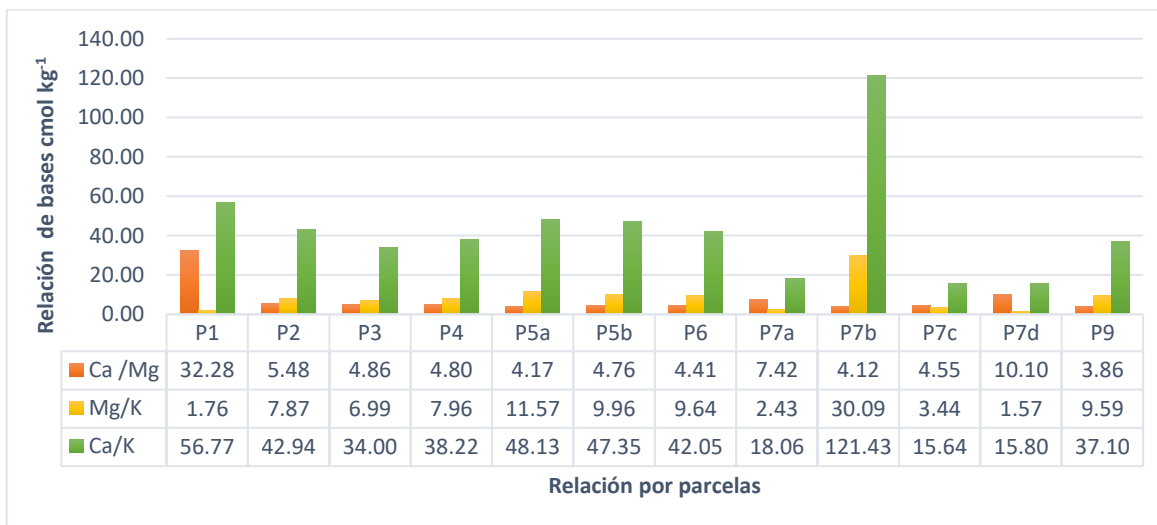


FIGURA 2. GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE LA RELACIÓN DE BASES POR PARCELAS EVALUADAS

En la figura dos de manera general se muestra la comparación de las relaciones de bases en las parcelas muestreadas. La relación de Ca/K presenta la mayor cantidad de parcelas fuera de rangos, en donde las concentraciones altas del elemento Ca son el principal indicador que generan variaciones respecto a los otros cationes resultando en la siguiente interpretación:

4.2.1 Mapa temático de la relación Ca/K

Con un porcentaje inicial de 92 por ciento (302.16 has) la superficie evidencia valores mayores a 25.0 situando su relación fuera de rango y solo un 8 por ciento (26.37 has)

en niveles adecuados de 5.0 – 25.0 (Ver anexo B.1). El potasio como elemento muestra valores altos de acuerdo con su clasificación individual, pero respecto con las estimaciones de Ca es relativamente bajo, generando una relación inadecuada. Por otro lado, la parcela 7b de 35.65 hectáreas de cultivo de arroz presenta los niveles más bajos de potasio, por ello su relación con el Ca es la menos adecuada, llegando a valores de 121.43 (Ver cuadro VI). Comprobamos según lo indicado por Kass (1998) que dependiendo de la concentración de calcio, potasio y magnesio en la solución del suelo; disminuye la velocidad de absorción del elemento que tiene menos concentración en el sistema.

CUADRO VI. CLASIFICACIÓN DE LAS RELACIONES DE BASES Ca/Mg, Mg/K Y Ca/K

Parcelas	Ca /Mg	Rangos	Mg/K	Rangos	Ca/K	Rangos
P1	32.28	> 5	1.76	< 2.5	56.77	> 25
P2	5.48	> 5	7.87	2.5 - 15	42.94	> 25
P3	4.86	2.0- 5.0	6.99	2.5 - 15	34.00	> 25
P4	4.80	2.0 - 5.0	7.96	2.5 - 15	38.22	> 25
P5a	4.17	2.0 - 5.0	11.57	2.5 - 15	48.13	> 25
P5b	4.76	2.0 - 5.0	9.96	2.5 - 15	47.35	> 25
P6	4.41	2.0 - 5.0	9.64	2.5 - 15	42.05	> 25
P7a	7.42	>5	2.43	< 2.5	18.06	5.0 - 25.0
P7b	4.12	2.0 – 5.0	30.09	> 15	121.43	> 25
P7c	4.55	2.0 – 5.0	3.44	2.5 - 15	15.64	5.0 - 25.0
P7d	10.10	> 5	1.57	< 2.5	15.80	5.0 - 25.0
P9	3.86	2.0 – 5.0	9.59	2.5 - 15	37.10	> 25
Clasificación	2.0- 5.0	Adecuado	< 2.5	Fuera de rango	5.0 - 25.0	Adecuado
	> 5.0	Fuera de rango	2.5 - 15	Adecuado	> 25.0	Fuera de rango
			> 15.0	Fuera de rango		

El cuadro seis muestra los valores para clasificar las relaciones de bases (Ca/K, Ca/Mg y Mg/K) adecuadas y fuera de rango por parcela evaluada.

4.2.2 Mapa temático de la relación Ca/Mg

El mapa de la relación de Ca/Mg (Ver anexo B.2) muestra un promedio de 82.78 por ciento de la superficie (272.8 has) siendo adecuadas (2.0 – 5.0) y 17.21 por ciento (56.72 has) fuera de rango (>5.0). Esta relación es acorde debido a que el contenido existente de magnesio y calcio son altos. La parcela uno (1) evidencia en la gráfica anterior la valoración fuera de rango debido a que el contenido magnesio es más bajo en esta área respecto al contenido de calcio (Ver cuadro VI).

4.2.3 Mapa temático de la relación Mg/K

Según, los resultados expuestos no se detectan variaciones sobresalientes en las relaciones (Ver anexo B.3) de estos elementos a diferencia de las anteriores. El 7.8 por ciento (25.91 has) del terreno evaluado presenta rangos por debajo (< 2.5) de niveles apropiados, un 69.30 por ciento (228.36 has) son adecuado (2.5 – 15) y los restantes 22.83 por ciento (75.25 has) están encima del rango óptimo (>15). Por las concentraciones altas y medias de Mg se registran en 4 parcelas (5a, 5b, 6 y 7), relaciones fuera de rango debido a que el contenido de potasio es más bajo ((Ver cuadro VI).

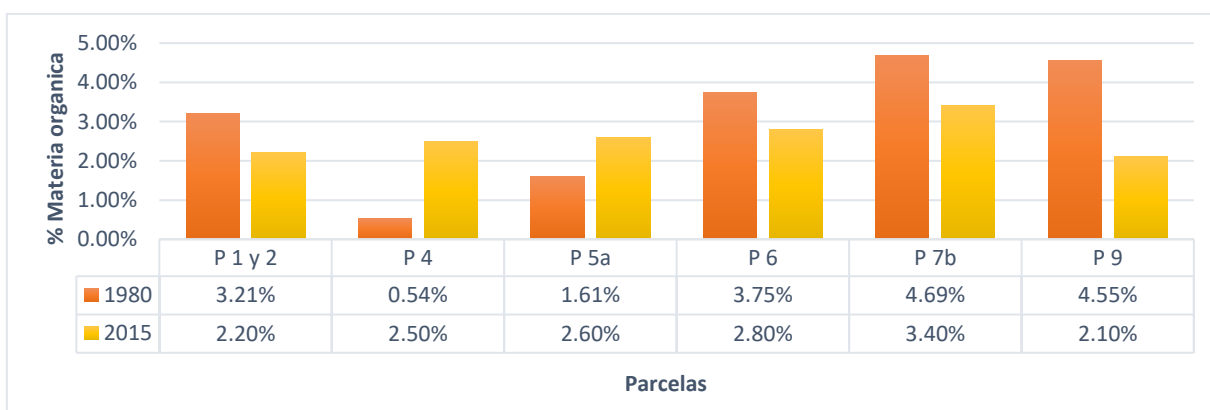
4.3 Comparación de la disponibilidad de elementos entre los años 1980 y 2015



FIGURA 3. GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE NIVELES DE PH ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 2015

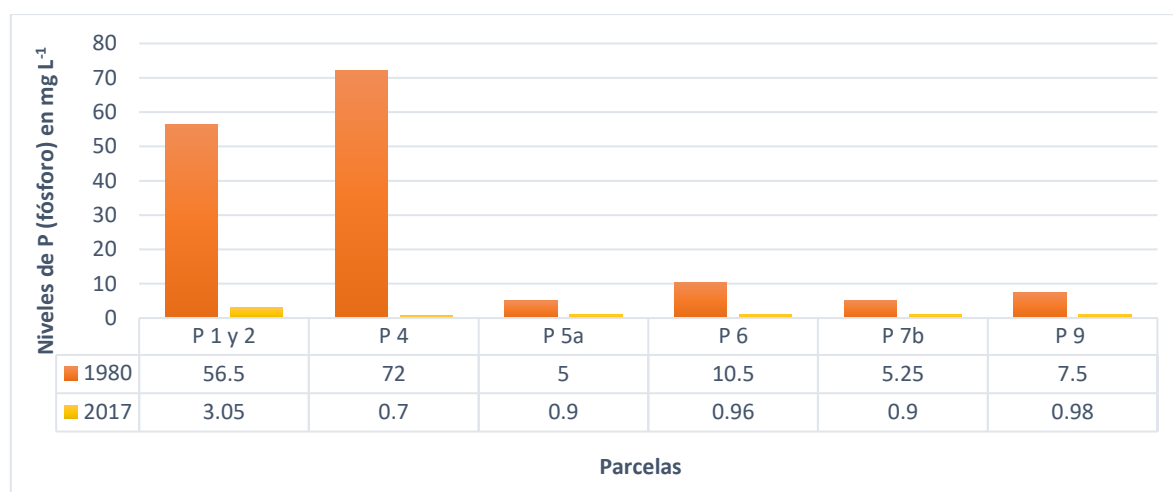
Según los resultados de la figura tres, los valores entre 1980- 2015 de pH han reducido 4 -5 su nivel de pH generando suelos con mayor grado de acidez. A diferencia de la parcela 7b redujo el contenido de acidez a ligeramente ácidos.

FIGURA 4. GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE LOS PORCENTAJES DE M.O. ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 2015



Por otro lado, en la figura cuatro las concentraciones de materia orgánica con niveles medios de 3- 5 por ciento para 1980 se presentaron en cuatro de las seis parcelas analizadas. El 2015 estos valores registraron niveles muy bajos (0.0-3.0 por ciento), siendo la principal causa el monocultivo.

FIGURA 5. GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE LOS NIVELES DE FÓSFORO ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 2015



En cuanto al contenido de macro elementos en la figura cinco el fósforo en 1980 presentaba concentraciones altas en las parcelas 1 y 2 (56.5 mg L^{-1}) y en el 2017 decrece a niveles de $0 - 3.5 \text{ mg L}^{-1}$ (bajo), la parcela 4 con valores de 72 mg L^{-1} redujo sus contenidos a 0.7 mg L^{-1} (bajo) y las parcelas restantes 5a, 6, 7 y 9 no evidencian grandes cambios en los valores de contenido.

En la figura seis los niveles de calcio con pocas variaciones desde 1980 al 2015, ya que han mantenido contenidos alto a moderadamente altos en todas las parcelas de producción. La parcela 7b en 1980 refleja los valores bajos de calcio (clasificación media). En el 2015 la parcela 7b aumentó su contenido de calcio a valores de rango alto.

FIGURA 6. GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE LOS NIVELES DE CALCIO ENTRE LOS AÑOS DE 1980 Y 2015

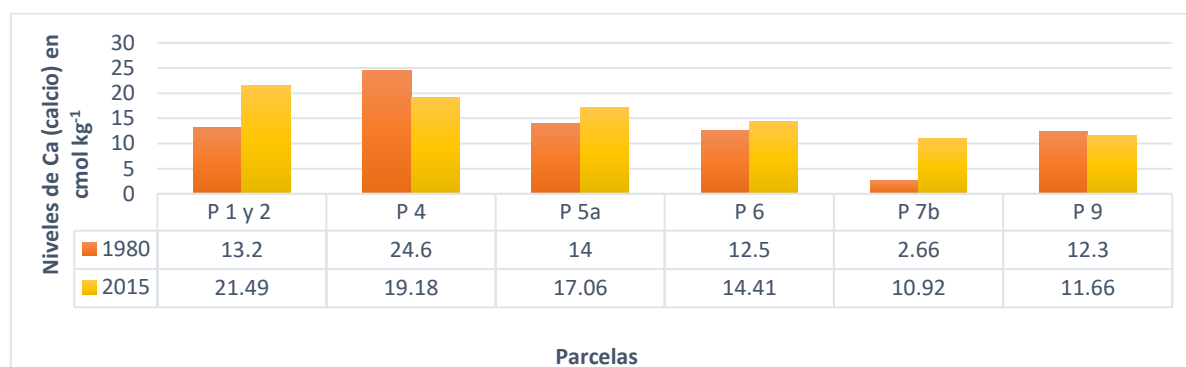
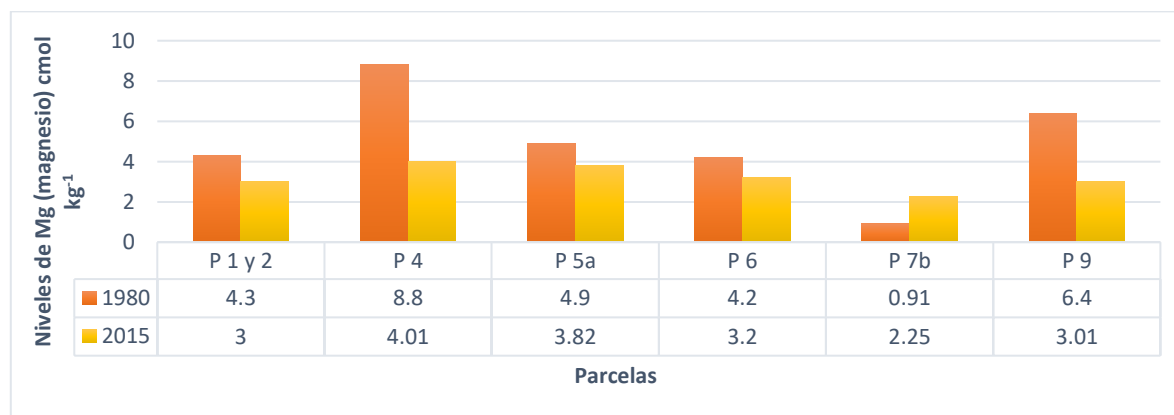
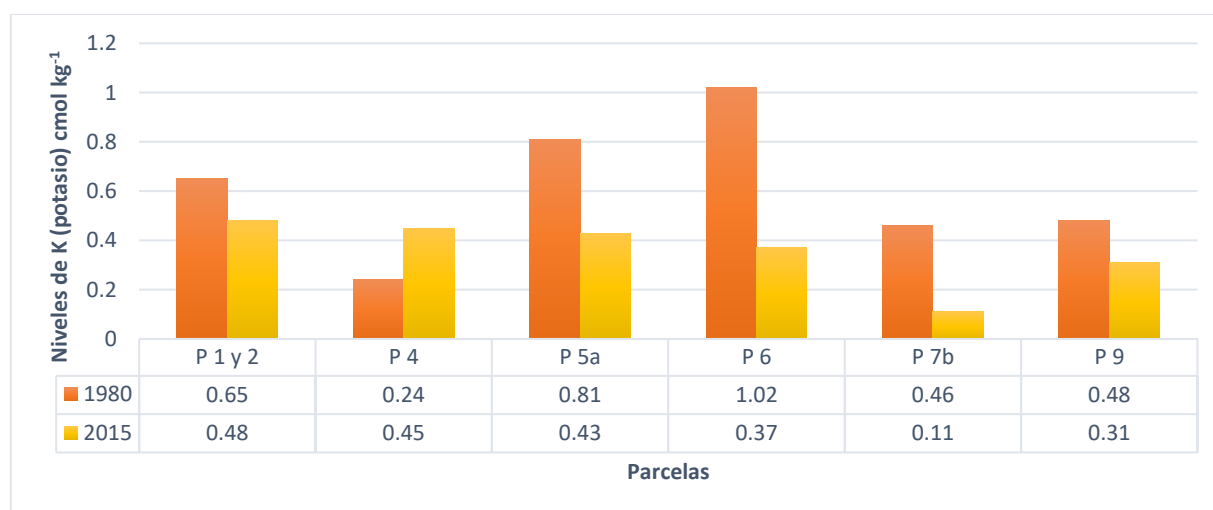


FIGURA 7. GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE LOS NIVELES DE MAGNESIO ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 2015



Por otro lado, en la figura siete los contenidos de magnesio en 1980 eran altos en cinco de las seis parcelas evaluadas. En el 2015 los niveles no variaron ya que se ubican en contenidos altos ($> 1.50 \text{ cmol kg}^{-1}$). La parcela 7b presentaba en 1980 los contenidos más bajos de magnesio con rangos clasificados como medios ($0.61 - 1.50 \text{ cmol kg}^{-1}$), en el 2015 estos valores aumentaron su contenido en el suelo.

FIGURA 8. GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE NIVELES DE POTASIO ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 2015



El contenido de potasio en la figura ocho, muestra las parcelas cinco a, seis y siete b con variaciones en los últimos 34 años hacia niveles medios a bajos. Para 1980 la parcela seis contaba con el contenido más alto de potasio con niveles de $1.02 \text{ cmol kg}^{-1}$ de K; actualmente esta área no supera los $0.37 \text{ cmol kg}^{-1}$ (medio). Las parcelas siete b en el 2015 presenta los niveles más bajos de potasio en el suelo con $0.11 \text{ cmol kg}^{-1}$.

Respecto al microelemento hierro, la figura nueve, muestra que para 1980 las concentraciones eran de 47.0 – 66.0 mg L⁻¹ en las parcelas evaluadas. En el 2015 su contenido se duplico evidenciando rangos mayores a los 100 mg L⁻¹.

FIGURA 9. GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE NIVELES DE HIERRO ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 2015

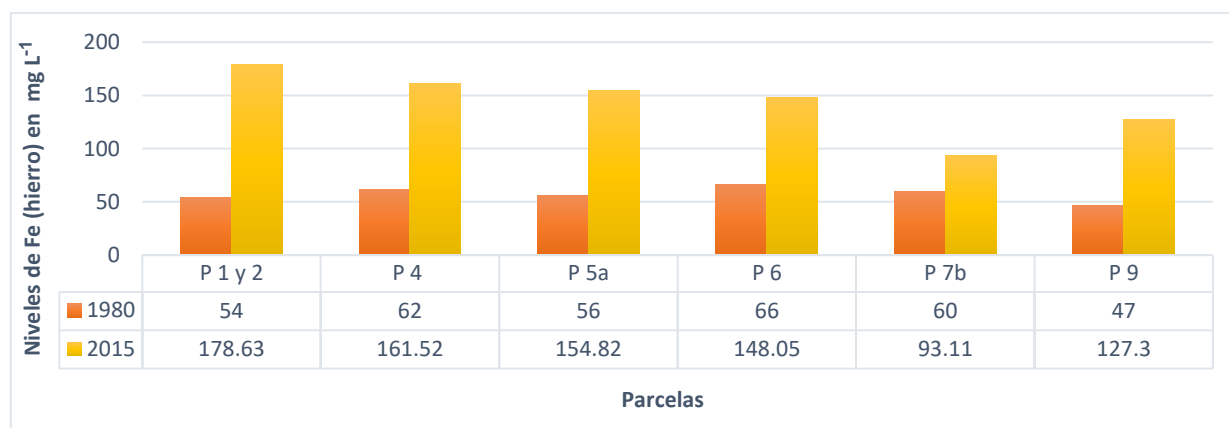
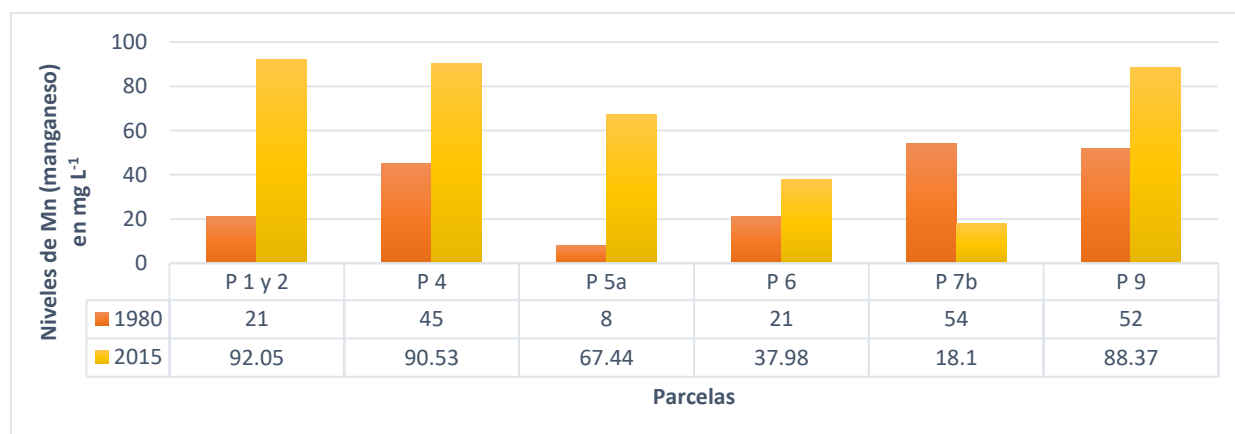


FIGURA 10. GRÁFICA DE LA COMPARACIÓN DE NIVELES DE MANGANESO ENTRE LOS AÑOS 1980 Y 2015



El manganeso en la figura diez, por otra parte, con niveles entre 8.0 - 50.0 mg L⁻¹ elevó sus contenidos 60-90 mg L⁻¹ para el 2015, a excepción de la parcela 7b que redujo sus contenidos a niveles medios a bajos. Ambos elementos (hierro y manganeso) duplicaron su contenido en el suelo.

4.4 Clasificación de fertilidad de las parcelas estudiadas

CUADRO VII. CLASIFICACIÓN DE FERTILIDAD

PARCELAS	pH	M.O %	P mg L ⁻¹	Ca cmol kg ⁻¹	Mg cmol kg ⁻¹	K cmol kg ⁻¹	Clasificación de Fertilidad
P 1	4.8	2.5	3.5	22.92	0.71	0.40	Mod. Fert.
P 2	4.9	2.1	2.6	21.1	3.8	0.50	Mod. Fert.
P 3	5.4	2.1	1.4	18.41	3.7	0.54	Mod. Fert.
P 4	5.4	2.5	0.7	19.25	4.01	0.50	Mod. Fert.
P 5a	5.2	2.9	0.9	16.05	3.8	0.34	Mod. Fert.
P 5b	5.2	2.6	1.7	19.12	4.02	0.40	Mod. Fert.
P 6	5.2	2.8	0.96	14.41	3.2	0.37	Mod. Fert.
P 7b	5.5	1.9	0.9	13.85	3.3	0.11	Baja Fert.
P 9	4.9	2.1	0.98	26.86	3.01	0.92	Mod. Fert.

La clasificación de fertilidad se realizó analizando las condiciones de contenido bajo, medio y alto de acidez, materia orgánica y los macro elementos fósforo, calcio, magnesio y potasio en las parcelas de producción agrícola 1, 2, 3, 4, 5a, 5b, 6, 7b y 9. El 87.35 por ciento (245.99 has) de la superficie evaluada es clasificada como moderadamente fértil y un 12.65 por ciento (35.65 has) con baja fertilidad. De acuerdo

con López y Zamora 2016, la fertilidad se relaciona con la capacidad que posee el suelo para suministrar elementos nutrimentales necesarios a las plantas (cultivos).

La condición de textura arcillosa y franco favorece la absorción de cationes disponibles en el suelo, sin embargo, el nivel bajo de materia orgánica en todas las parcelas evaluadas desfavorece hasta cierto punto esta condición al no permitir el enriquecimiento del suelo con nuevos nutrimentos.

El nivel de pH actual ácidos a ligeramente ácidos permite la absorción de macro y micro elementos. La concentración de bases intercambiable destaca la abundancia en el contenido de calcio que puede interferir en la absorción de magnesio y potasio en el suelo. En la parcela 1 y 9 el contenido de calcio es de 22.92 – 26.86 Cmol kg⁻¹ mostrando ser los más elevados en la superficie evaluada.

5. CONCLUSIONES

- El análisis de los mapas determinó que en los suelos de las parcelas 1, 2, 3, 4, 5a, 5b, 7b y 9 existe tendencia a la acidificación. Generando la reducción en las actividades de los organismos descomponedores de los residuos vegetales. Los niveles actuales de aluminio están en rangos bajos indicativo de no ser un factor causante de las valoraciones existentes de pH ácidos.
- Se evidenció que las prácticas agrícolas de monocultivo (arroz) por más de 20 años en todas las parcelas evaluadas; es un factor limitante en la incorporación de Materia orgánica, fósforo, boro y azufre en el suelo.
- Las concentraciones de las bases calcio y magnesio en todas las parcelas evaluadas es alta. Al analizar la relación de base un factor limitante es el alto contenido de calcio con respecto a potasio generando una relación >25 (fuera de rango) y solo un 8 por ciento (26.37 has) con rango adecuado.
- En general la relación Ca/ Mg es 82. 78 por ciento (272.8 has.) adecuada y la relación Mg/ K un 69.30 por ciento (226.37 has.). Debido principalmente a que los niveles de calcio y magnesio son altos al igual que los de magnesio con potasio.
- El proyecto de arroz de secano para el periodo 2015- 2016 tuvo un costo total de 158, 985. 68 balboas, el 37.51 por ciento (59, 636.38 balboas) son invertidos

en los insumos de fertilización (urea 3015, urea más azufre, urea 46 por ciento N, abono 16-30-15 y otros) y costo de hora para abonar.

- Con las comparaciones de disponibilidad de elementos entre 1980 y 2015, el contenido de materia orgánica y fósforo se redujo. Los niveles de hierro y manganeso como elementos menores duplicaron su concentración en el suelo.

- La recopilación de la información proveniente de los análisis efectuados constituyó una herramienta útil para identificar los niveles limitantes de fertilidad de los suelos.

- El 87.35 por ciento (245.99 has) de la superficie evaluada es clasificada como moderadamente fértil y un 12.65 por ciento (35.65 has) baja fertilidad.

6. RECOMENDACIONES

- Hacer uso de los mapas generados para realizar interpretaciones de las condiciones nutrimentales existentes; mejorando la eficiencia en la fertilización antes y después de la siembra de arroz.
- Aplicar técnicas de rotación de cultivo para generar un equilibrio bioquímico del suelo, aprovechando los elementos nutritivos existentes en exceso.
- Estimular la actividad microbiana para incrementar el contenido de materia orgánica y por consiguiente el de fósforo, boro y azufre.
- Implementar técnicas de fertilización orgánicas y enmiendas orgánicas que mejoren las propiedades químicas y biológicas del suelo.
- Monitorear las condiciones de las parcelas evaluadas realizando análisis de suelos periódicos para aportar nuevos resultados a la base de datos e identificar niveles críticos en el contenido de elementos nutrimentales en el suelo.
- El resultado de esta propuesta de cartografía debe utilizarse como información temática y educativa relacionada con el sector agropecuario; para aportar a futuras investigaciones la importancia de evaluar las condiciones nutrimentales de los suelos sometidos a actividades agrícolas.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aguilar, O; Casierra, F. 2007. Estrés por aluminio en plantas: reacciones en el suelo, síntomas en vegetales y posibilidades de corrección. Revista Colombiana de Ciencias Hortícolas. Vol.1, No. 2. (en línea). Consultado el 4 de ago. 2017. Disponible en <http://www.soccolhort.com/revista/pdf/magazin/Vol1/vol.1no.2/Vol.1.No.2.Art.11.pdf>

Andrade, M; Martínez, E. 2014. Fertilidad de suelos y parámetros que la definen. 3 ed. (en línea). Consultado el 3 de ago. 2017. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/descarga/libro/267902.pdf>

Bertsch, F. 1998. La fertilidad de los suelos y su manejo. San José, Costa Rica. ACCS. 157 p.

Bertsch, F. 1986. Manual para interpretar la fertilidad de suelos de Costa Rica. (en línea). Consultado el 3 de ago. 2017. Disponible en https://books.google.com.pa/books/about/Manual_Para_Interpretar_la_Fertilidad_de_.html?id=tJz0G2oLs5gC&redir_esc=y

Bertsch, F. 2001. Memoria de Fertilidad de suelos y Manejo de la Nutrición de cultivos en Costa Rica. (en línea). Meléndez, G; Molina E. (eds.). San José, Costa Rica. Consultado el 2 mar. 2017. Disponible https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwj-14KCIPrSAhUFw1QKHe5PBegQFggZMAA&url=http://por ciento 3Apor ciento 2Fpor ciento 2Fwww.cia.ucr.ac.crpor ciento 2Fpdfpor ciento 2FMemoriaspor ciento 2FMemoriapor ciento 2520Cursopor ciento 2520Fertilidadpor ciento 2520depor ciento 2520Suelos.pdf&usq=AFQjCNEjHibocylFs_WFrBmmu7CGkGycLA

Berthelsen, S; Kordorfer, G. 2008. Methods for silicon analysis in soil, plant and fertilizers.

Blandón, J. 2013. Importancia del Zinc (Zn) en la fertilización del cultivo de arroz. (en línea). Consultado el 19 de jul. 2017. Disponible en <http://temasagronicos.blogspot.com/2013/04/importancia-del-zinc-zn-en-la.html>

Caballero, LY. 2015. Actualización de la Capacidad de Uso de la Tierras en las parcelas 1,2,3,4,5,6,7,8,9,10,11B,14,15,16-3 y 19 de la Facultad de Ciencias Agropecuarias provincia de Chiriquí. Tesis Ing. Ciudad de David, Panamá. UP. 122 p.

Cakmak, I. 2015. Sinergismos y Antagonismos entre Nutrientes Minerales Durante la Absorción y Transporte en las Plantas. Curso Internacional sobre Nutrición de Cultivos.

Intagri. (en línea). Consultado el 3 de ago. 2017. Disponible en <https://www.intagri.com/articulos/nutricion-vegetal/sinergismos-y-antagonismos-entre-nutrientes#>

Cakmak, I; Yazici, A. 2010. Magnesio: el elemento olvidado en la producción de cultivos. (en línea). Estambul, Turquía. Consultado el 17 de jul. Consultado en [https://www.ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/\\$webindex/901DD92BAE8EF8F60525777D0074FDAA/\\$file/2.+Magnesio.+El+elemento+olvidado.pdf](https://www.ipni.net/ppiweb/iaecu.nsf/$webindex/901DD92BAE8EF8F60525777D0074FDAA/$file/2.+Magnesio.+El+elemento+olvidado.pdf)

Calderón, A; Lara, D; Cabrera, A. 2012. Confección de mapas temáticos para evaluar la fertilidad del suelo en las áreas agrícolas del instituto nacional de ciencias agrícolas. Vol.33, No. 1. La Habana, Cuba. (en línea). Consultado el 31 de ago. 2017. Disponible en http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0258-59362012000100002

Casanova, E. 2005. Introducción a la ciencia del suelo. (en línea). Caracas, Venezuela. Torino. 453 p. Consultado el 5 mar. 2017. Disponible en https://books.google.com/sv/books?id=k4FXuHW1ozQC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false

Cepeda, J. 2010. Fertilidad de suelos. (en línea). UASD. Consultado el 20 jul. 2017. Disponible en http://academic.uprm.edu/dsotomayor/agro6505/Cepeda_CAPITULOS_1-7_511.pdf

CITRA) Centro de Investigación y Transferencia en Riego y Agro climatología. 2009. Alcance de la agricultura de precisión en Chile: estado del arte, ámbito de aplicación y perspectivas. (en línea). Consultado el 31 de ago. 2017. Disponible en <https://es.scribd.com/document/341844910/1369748824Estudio-Agricultura-de-Precision>

FAO. 2003. Guía para identificar las limitaciones de campo en la producción de arroz. Consultado el 31 de ago. 2017. Disponible en <enftp://ftp.fao.org/docrep/fao/006/Y2778S/Y2778S00.PDF>

García, E; Flego, F. s.f. Tecnología agropecuaria: Agricultura de precisión. (en línea). Consultado el 30 de ago. 2017. Disponible en <http://www.palermo.edu/ingenieria/downloads/pdfwebc&T8/8CyT12.pdf>

García, A; Quinke, A. 2012. El potasio (K) en la producción de cultivos de invierno. (en línea). La Estanzuela, Uruguay. Consultado el 24 de jun. 2017. Disponible en <http://www.ainfo.inia.uy/digital/bitstream/item/649/1/112761020512124905.pdf>

Graetz, M. 2008. Suelos y fertilización: Nutrientes del suelo. 3ª ed. Ciudad de México, México. Trillas.103 p.

Ginés, Mariscal, I. 2002. Incidencia de los fertilizantes sobre el pH del suelo. (en línea). Consultado el 5 de ago. 2017. Disponible en http://oa.upm.es/3176/2/MARISCAL_MONO_2002_01.pdf

Hernández, J; Barbazán, M; Perdomo, C. 2010. Potasio. (en línea). Consultado el 15 de jul. 2017. Disponible en <http://www.fagro.edu.uy/fertilidad/curso/docs/Potasio.pdf>

IDIAP (Instituto de Investigaciones Agropecuaria de Panamá). 2006. Zonificación de suelos de Panamá por niveles de Nutrientes. Ciudad de Panamá, Panamá (en línea). Consultado el 4 de mar. 2017. Disponible en <https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEWjZpO6CkfrSAhUJxIQKHQ2DALMQFggfMAE&url=httppor ciento 3Apor ciento 2Fpor ciento 2Fbdigital.binal.ac.papor ciento 2Fbdppor ciento 2Fdescarga.phppor ciento 3Ffpor ciento 3Didiap1.pdf&usg=AFQjCNFpDN4TIH1s7AvcKtHQzhF5dvC6qA&bvm=bv.150729734,bs.1,d.eWE>

IEC (Instituto de Estudios Catalanes). 2008. Protección de suelo de Cataluña: Finalidad de los mapas de suelo. (en línea). Barcelona, España. Consultado el 9 abr. 2017. Disponible en <http://www.iec.cat/mapasols/Cas/Finalitat.asp?Grup=B&Opcio=7>

Infoagro. 2002. Problemas y limitaciones de la producción de arroz. (en línea). Consultado el 30 de ago. 2017. Disponible en <http://www.fao.org/docrep/006/y2778s/y2778s04.htm#TopOfPage>

INPI (Instituto Internacional de Nutrición de Plantas). 2015.(en línea). Consultado el 25 abr. 2017. Disponible en [http://www.ipni.net/ppiweb/iamex.nsf/\\$webindex/5F5044E7DA7EEABE06256ABF0059F50E/\\$file/Conozca+la+deficiencia+de+cobre.pdf](http://www.ipni.net/ppiweb/iamex.nsf/$webindex/5F5044E7DA7EEABE06256ABF0059F50E/$file/Conozca+la+deficiencia+de+cobre.pdf)

Jaramillo, D. 2002. Introducción a la ciencia del suelo. (en línea). Medellín, Colombia. Consultado el 11 jul. 2017. Disponible en <http://www.bdigital.unal.edu>

Juárez, M; Cerdán, M; Sánchez. A. 2007. Hierro en el sistema suelo-planta. (en línea). Consultando el 15 de jul. 2017. Disponible en <http://exa.unne.edu.ar/biologia/fisiologia.vegetal/HIERRO.pdf>

Kass, D.1998. Fertilidad de suelos. San José, Costa Rica. EUNED. 272 p.

Kirkby, E; Romheld, V. 2008. Micronutrientes en la fisiología de las plantas: funciones, absorción y movilidad. (en línea). Informaciones agronómicas. Consultado el 15 de jul. 2017. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/3FA84D0333FEDEAA852579A0006BF733/\\$FILE/Micronutrientespor ciento 20enpor ciento 20lapor ciento 20Fisiologpor ciento C3por ciento ADapor ciento 20depor ciento 20laspor ciento 20Plantas.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lahp.nsf/0/3FA84D0333FEDEAA852579A0006BF733/$FILE/Micronutrientespor ciento 20enpor ciento 20lapor ciento 20Fisiologpor ciento C3por ciento ADapor ciento 20depor ciento 20laspor ciento 20Plantas.pdf)

K+S KALI. 2017. Manganese. (en línea). Consultado el 22 de jul 2017. Disponible en http://www.kaligmbh.com/eses/fertiliser/advisory_service/nutrients/manganese.html

K+S KALI. 2017. Zinc. (en línea). Consultado el 22 de jul 2017. Disponible en http://www.kali-gmbh.com/eses/fertiliser/advisory_service/nutrients/zink.html

K+S Kali. 2017. Boro. (en línea). Consultado el 22 de jul 2017. Disponible en http://www.kali-gmbh.com/eses/fertiliser/advisory_service/nutrients/boron.html

Ligier, H. 2014. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria: Cartografía de suelos. (en línea). Consultado el 9 abr. 2017. Disponible en <http://inta.gob.ar/documentos/la-cartografia-de-suelos>

López, GM; Zamora, AR. 2016. Diagnóstico de la fertilidad del suelo en el área de investigación, innovación y desarrollo de la Espam- mfl. Tesis Ing. Ciudad de Calceta, Ecuador. ESPAMMFL. 75 p.

Malavolta, E y Ortega, A. 2012. Los más recientes micronutrientes vegetales. (en línea). Consultado el 21 de jul. 2017. Disponible en [http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/232B901BB70122F985257A80005228D7/\\$FILE/16.pdf](http://www.ipni.net/publication/ia-lacs.nsf/0/232B901BB70122F985257A80005228D7/$FILE/16.pdf)

Meléndez, G; Molina, E. 2001. Memoria fertilidad de suelos y manejo de la nutrición de cultivos en Costa Rica. (en línea). Consultado el 31 de ago. 2017. Disponible en <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/Memoriapor ciento 20Cursopor ciento 20Fertilidadpor ciento 20depor ciento 20Suelos.pdf>

Meléndez, G; Soto, G. 2003. Taller de abonos orgánicos. (en línea). Consultado el 31 de ago. 2017. Disponible en <http://www.cia.ucr.ac.cr/pdf/Memorias/Memoriapor ciento 20Tallerpor ciento 20Abonospor ciento 20Orgpor ciento C3por ciento A1nicos.pdf>

Nuevo Diario. 2017. Nicaragua elabora mapas de fertilidad del suelo para potenciar sus usos. (en línea). Consultado el 31 de ago. 2017. Disponible en: <http://www.elnuevodiario.com.ni/economia/418836-nicaragua-elabora-mapas-fertilidad-suelo-potenciar/>

Otiniano, A; Florián, L; Sevillano, R; Amez, S. 2006. La materia orgánica, importancia y experiencias de su uso en la agricultura. Vol. 24. 49 – 61. (en línea). Consultado el 31 de ago. 2017. Disponible en <http://www.scielo.cl/pdf/idesia/v24n1/art09.pdf>

PRESA, S.A. (Proyectos, Estudios y Asesorías). 1998. Estudio Agrologicos: Tierras patrimoniales de la Facultad de Agronomía en la Provincia de Chiriquí. Chiriquí, Panamá.

ProMix. 2016. La función del manganeso en el cultivo de plantas. (en línea). Consultado el 22 jul. 2017. Disponible en <http://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/la-funcion-del-manganeso-en-el-cultivo-de-plantas/>

ProMix.2016. Rol del silicio en el cultivo de plantas. (en línea). Consultado el 22 jul. 2017. Disponible en <http://www.pthorticulture.com/es/centro-de-formacion/rol-del-silicio-en-el-cultivo-de-plantas/>

Reij, B. 1939. Fertilidad de suelos y fertilización. San paulo, Brasil. Agronómica Ceres Ltda. 343 p.

Rivera, Y; Moreno, L; Herrera, M; Romero, H. 2016. La toxicidad por aluminio (Al³⁺) como limitante del crecimiento y la productividad agrícola: el caso de la palma de aceite. Palmas. (en línea). Consultado el 1 de ago. 2017. Disponible en <https://publicaciones.fedepalma.org/index.php/palmas/article/download/.../11687>

Rojas, A. 2016. Efectos nocivos del aluminio en el suelo. (en línea), Consultado el 30 de ago. 2017. Disponible en <http://www.abc.com.py/edicion-impresa/suplementos/abc-rural/efectos-nocivos-del-aluminio-en-el-suelo---prof-dr-arnulfo-encina-rojas--1509421.html>

Rodríguez, H. s.f. Fertilización del cultivo del arroz (*Oriza sativa L.*). (en línea). Consultado el 3 de ago. 2017. Disponible en http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_xi/a50-6907-III_123.pdf

Rodríguez, J. 1999. Fertilización del cultivo del arroz (*Oryza sativa*). (en línea). Consultado el 31 de ago. 2017. Disponible en http://www.mag.go.cr/congreso_agronomico_xi/a50-6907-III_123.pdf

Samudio, A. 1998. Guía para la determinación de fósforo (P).

Tejedor, S.2016. Informe de proyectos terminados y cerrado en el 2016 arroz seco, arroz en semilla y ensilaje de maíz.

UNICA (Universidad en el campo). 2011. Módulo de Edafología I: Propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. (en línea). Caldas, Colombia. Consultado el 9 abr. 2017. Disponible en <https://www.uaeh.edu.mx/investigacion/productos/4776/edafologia.pdf>

Valoragrocultura (El Valor de la Agrocultura). 2015. Fertilidad biológica del suelo: liberación de nutrientes de la materia orgánica. (en línea). Consultado el 9 abr. 2017. Disponible en <https://www.valoragrocultura.com/single-post/2015/03/17/Fertilidad-biolpor ciento C3por ciento B3gica-del-suelo-Liberacipor ciento C3por ciento B3n-de-nutrientes-de-la-materia-orgpor ciento C3por ciento A1nica>

Wolf, B. 1982. Guía de la solución extractora universal mejorada y su uso para diagnosticar la fertilidad del suelo.

Zapata, R. 2006. Química de los procesos pedogenéticos. (en línea). Medellín, Colombia. Consultado en 17 jul. 2017. Disponible en <http://www.unalmed.edu.co/~esgeocien/documentos/Quimicapor ciento 20depor ciento 20lospor ciento 20procesospor ciento 20pedogeneticos.pdf>

ANEXOS

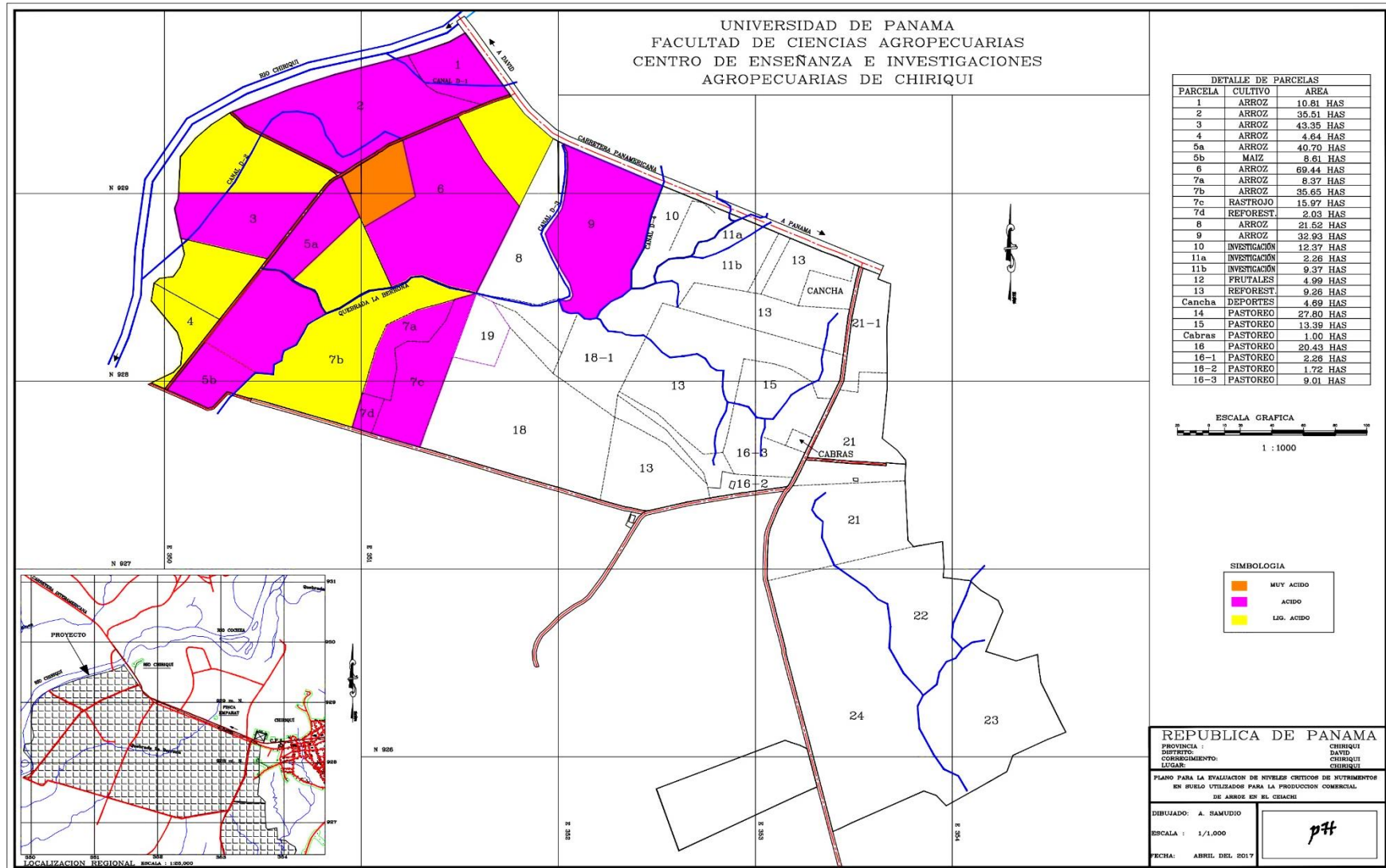
ANEXO A. 1 CONTENIDO DE pH, MATERIA ORGÁNICA, ALUMINIO, CICE, POR CENTAJE SATURACIÓN DE BASES Y MACROELEMENTOS

PARCELAS	Ph	M.O por ciento	Aluminio Cmol Kg⁻¹	Fósforo mg L⁻¹	Calcio Cmol Kg⁻¹	Magnesio Cmol Kg⁻¹	Potasio Cmol Kg⁻¹	Azufre mg L⁻¹	CICE	por ciento SAT. DE BASES
PARC. 1	4.8	2.5	0	3.5	22.92	0.71	0.40	11.20	24.03	100.00
P ARC .2	4.9	2.1	0.05	2.6	21.1	3.8	0.50	9.30	25.45	99.80
PARC. 3	5.4	2.1	0	1.4	18.41	3.7	0.54	8.90	22.65	100.00
PARC. 4	5.4	2.5	0	0.7	19.25	4.01	0.50	6.50	23.76	100.00
PARC. 5a	5.2	2.9	0	0.9	16.05	3.8	0.34	20.53	20.19	100.00
PARC. 5b	5.2	2.6	0.1	1.7	19.12	4.02	0.40	7.80	23.64	99.58
PARC. 6	5.2	2.8	0.3	0.96	14.41	3.2	0.37	15.35	18.28	98.36
PARC.7b	5.5	1.9	0.3	0.9	13.85	3.3	0.11	11.20	17.56	98.29
PARC. 9	4.9	2.1	0.3	0.98	26.86	3.01	0.92	8.40	31.09	99.03

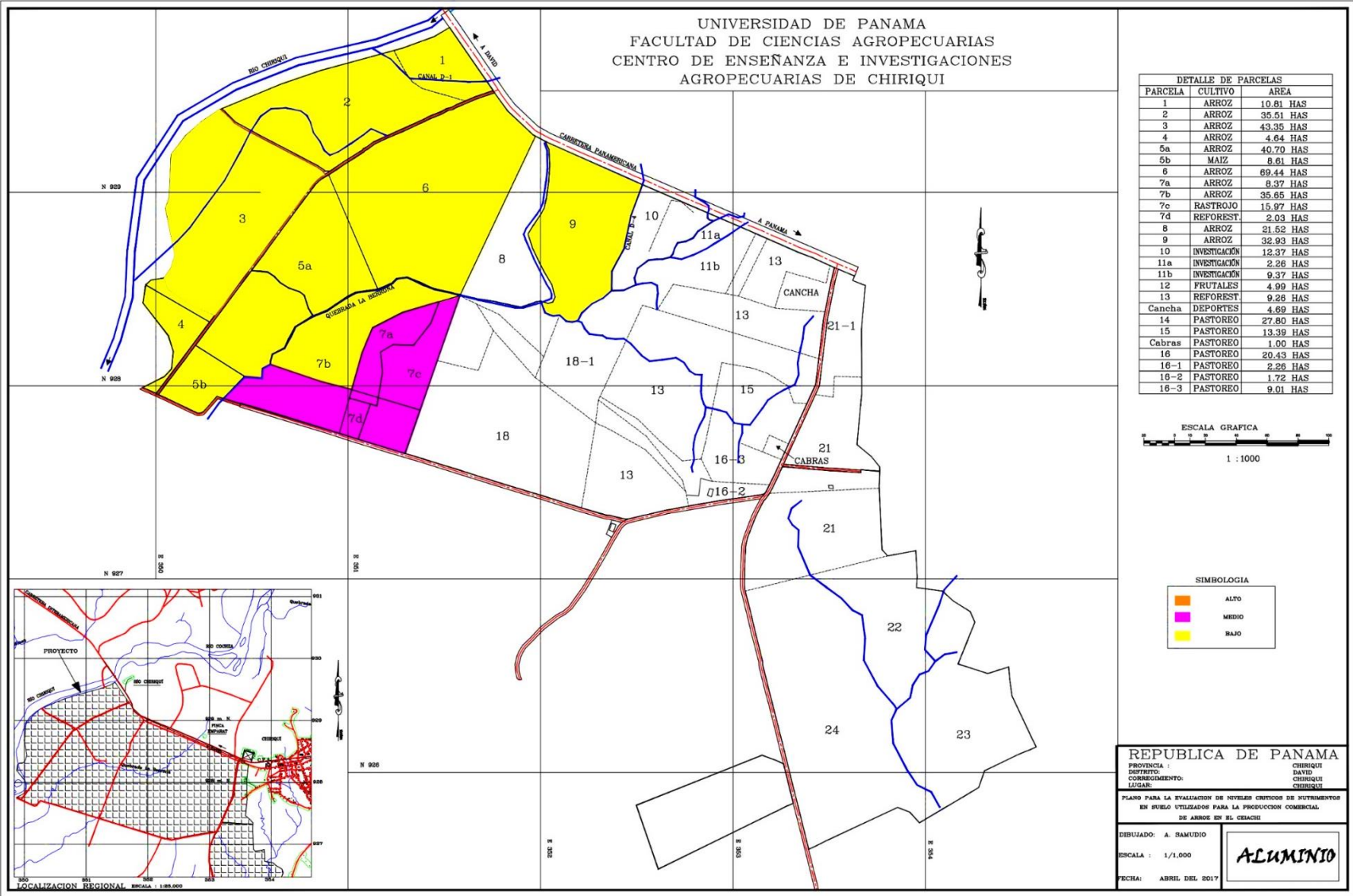
ANEXO A. 2 CONTENIDO DE MICROELEMENTOS

PARCELAS	Hierro mg L⁻¹	Cobre mg L⁻¹	Manganeso mg L⁻¹	Zinc mg L⁻¹	Boro mg L⁻¹	Silicio mg L⁻¹
PARC. 1	177.99	9.66	104.64	4.1	0	20.39
PARC. 2	178.83	8.41	87.86	3.6	0.9	20.7
PARC. 3	153.49	23.1	74.9	4.6	0	21.37
PARC. 4	160.25	9.66	113.41	4.2	0	19.99
PARC. 5^a	155.8	7.4	61.68	4.4	0.83	22.52
PARC. 5b	162.79	10.2	67.66	5	0	20.50
PARC. 6	148.85	5.9	37.98	3.4- 4-9	1.4	18.61
PARC. 7b	146.74	6.9	38.94	3.8	1	20.66
PARC. 9	127.31	5.8	88.37	3.3	1.2	17.15

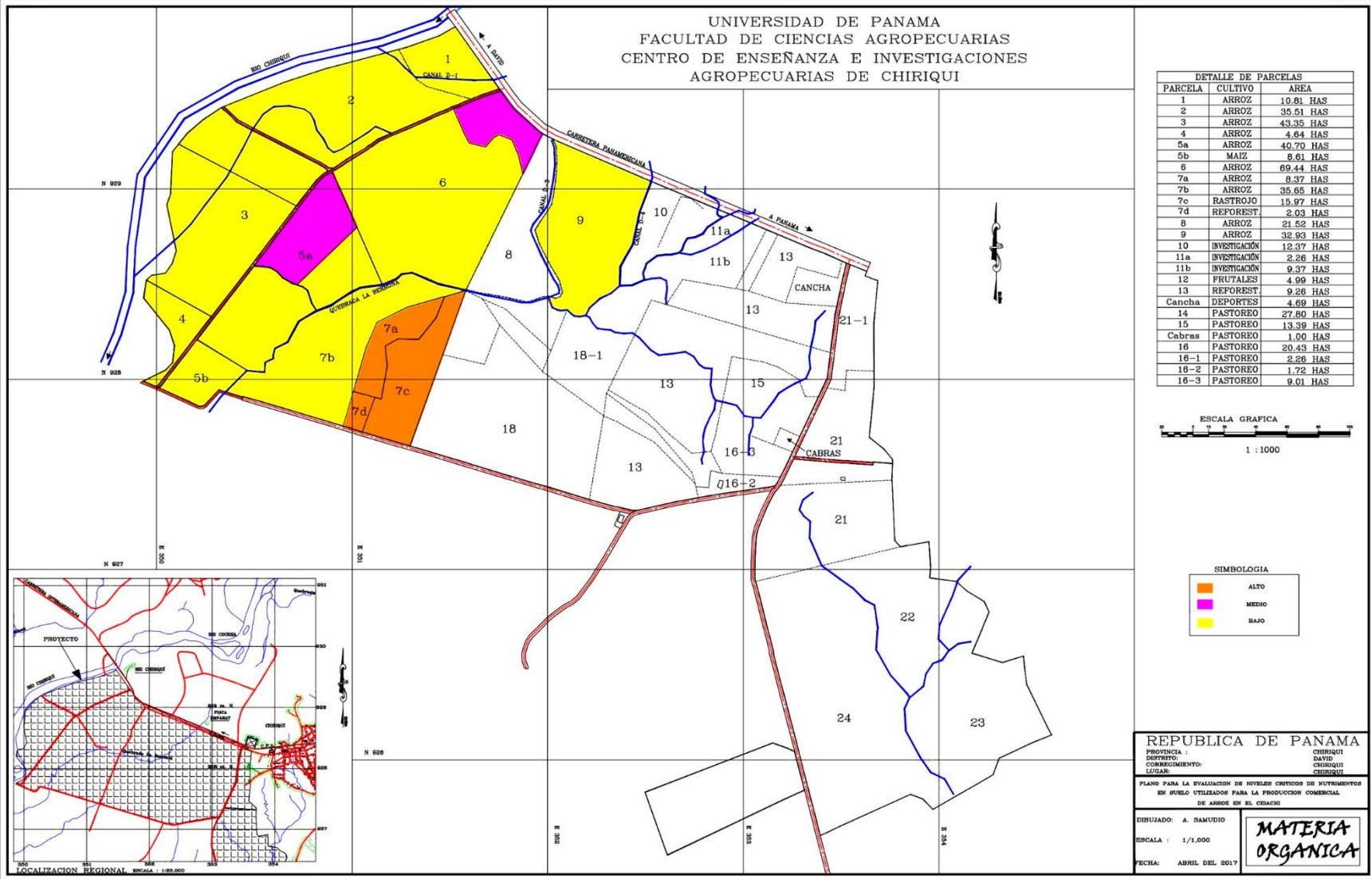
ANEXO A. 3 MAPA SOBRE LA CONDICION DE pH DE LAS PARCELAS



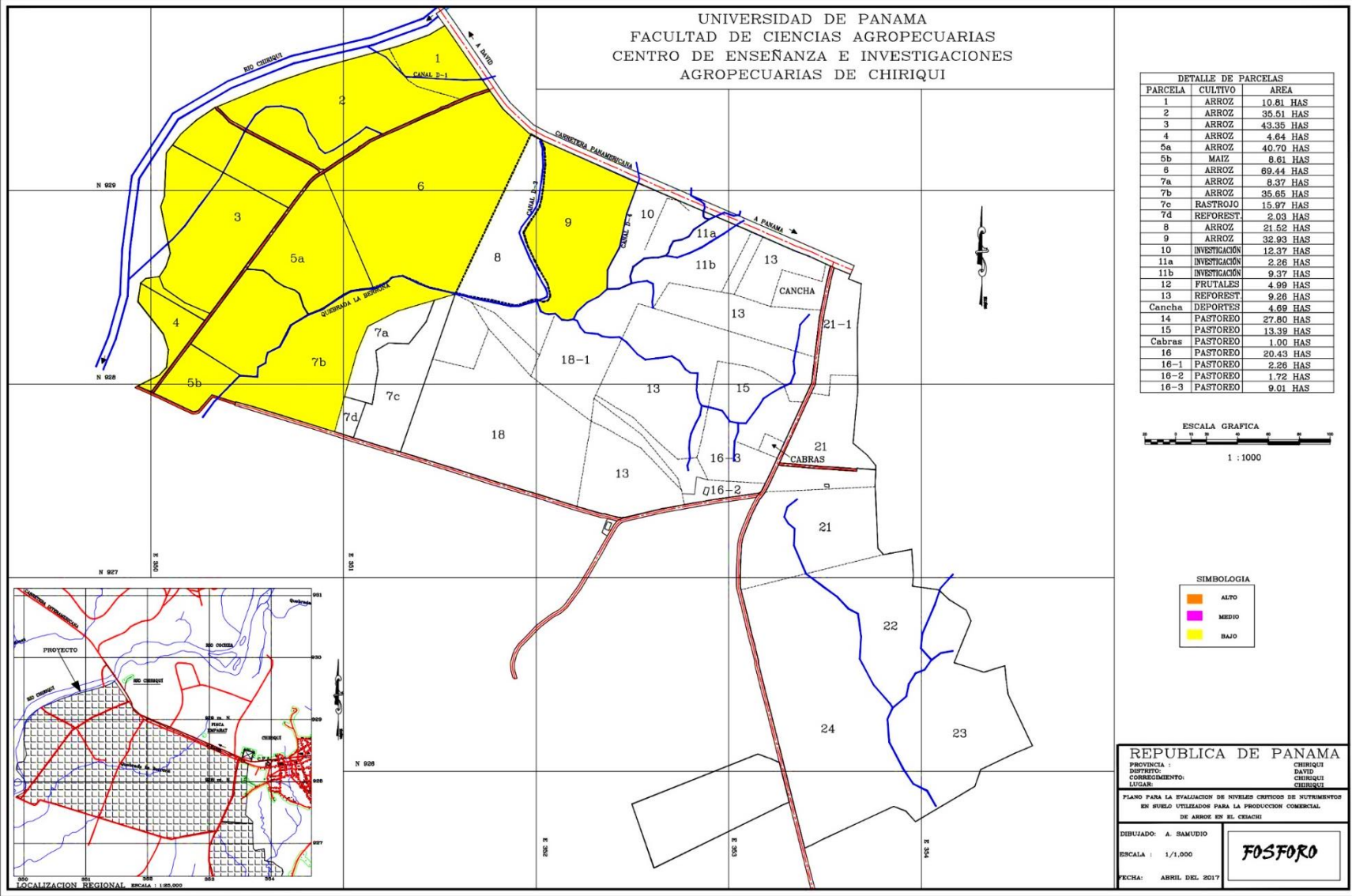
ANEXO A. 4 MAPA DE CONTENIDO DE ALUMINIO (AI)



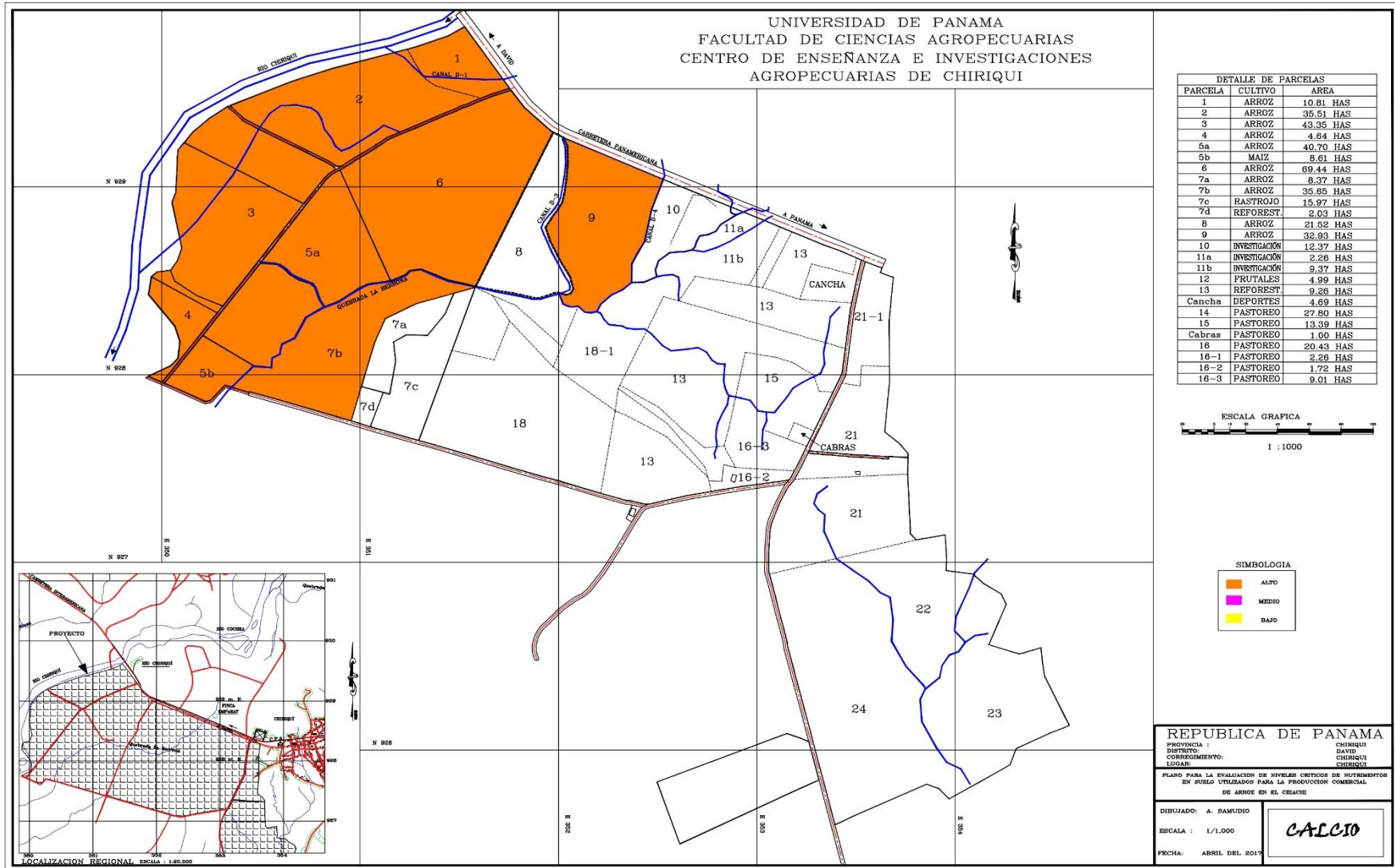
ANEXO A. 5 MAPA DE CONTENIDO DE MATERIA ORGÁNICA (M.O)



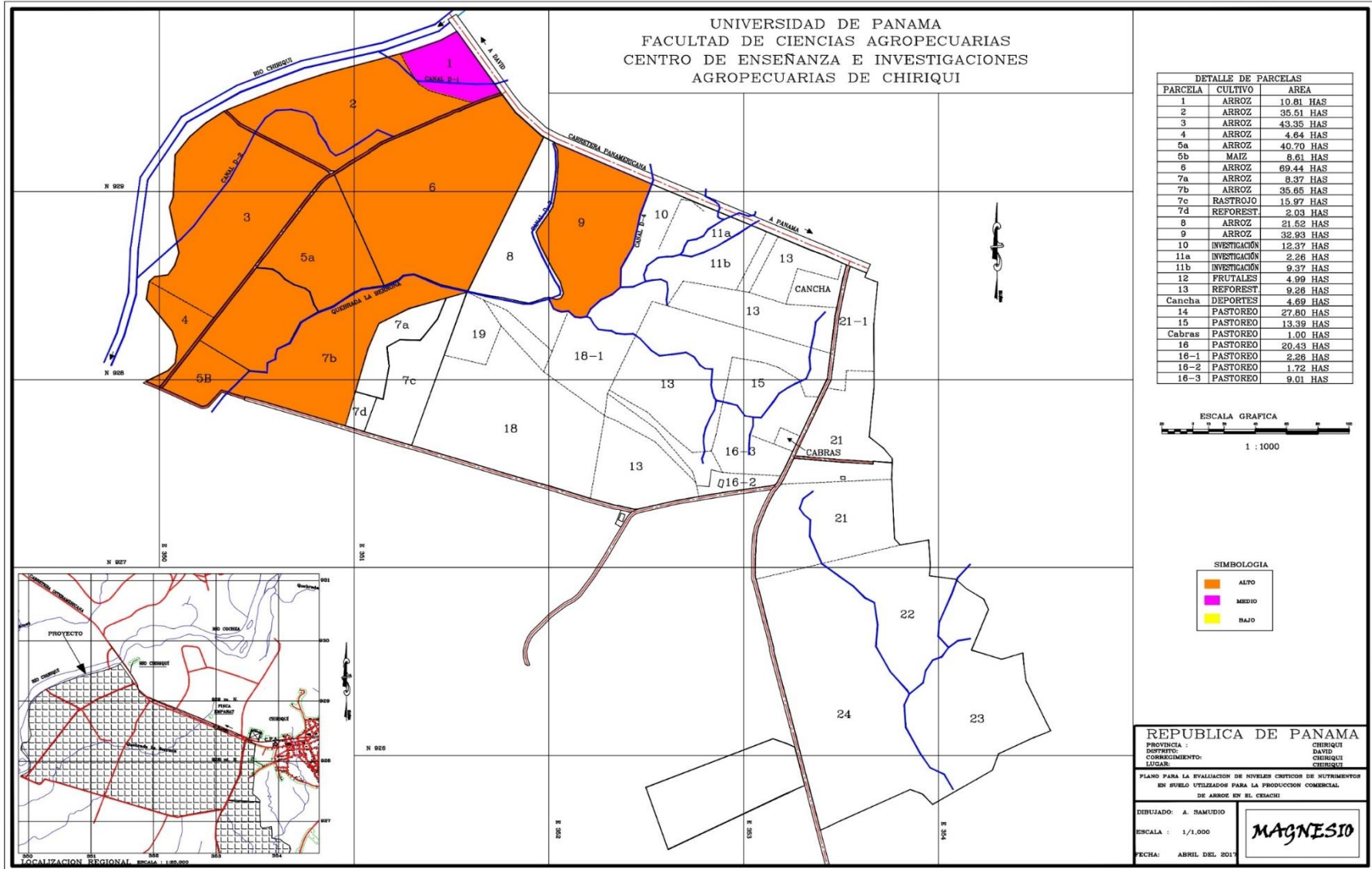
ANEXO A. 6 MAPA DE CONTENIDO DE FÓSFORO (P)



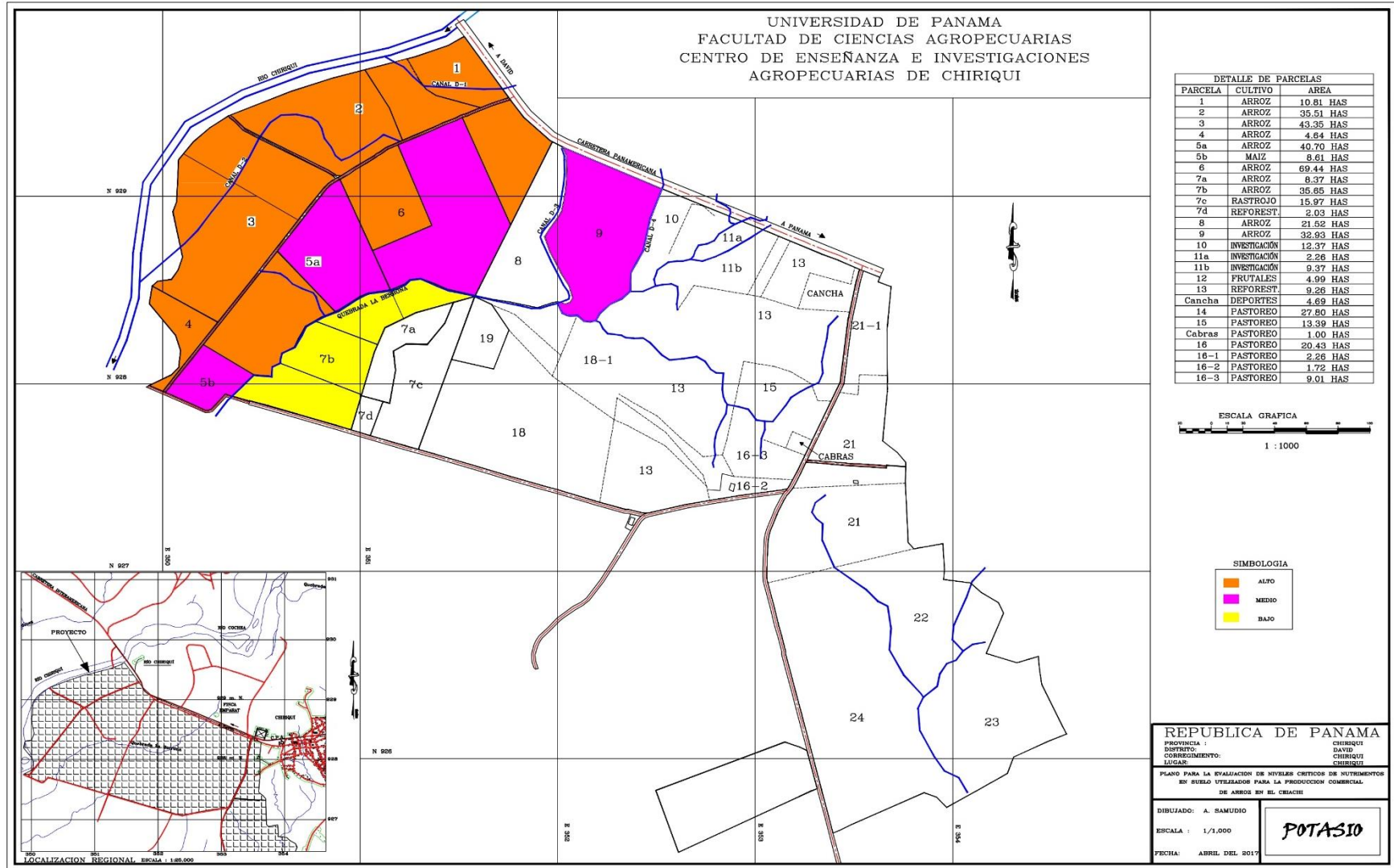
ANEXO A. 7 MAPA DE CONTENIDO DE CALCIO (Ca)



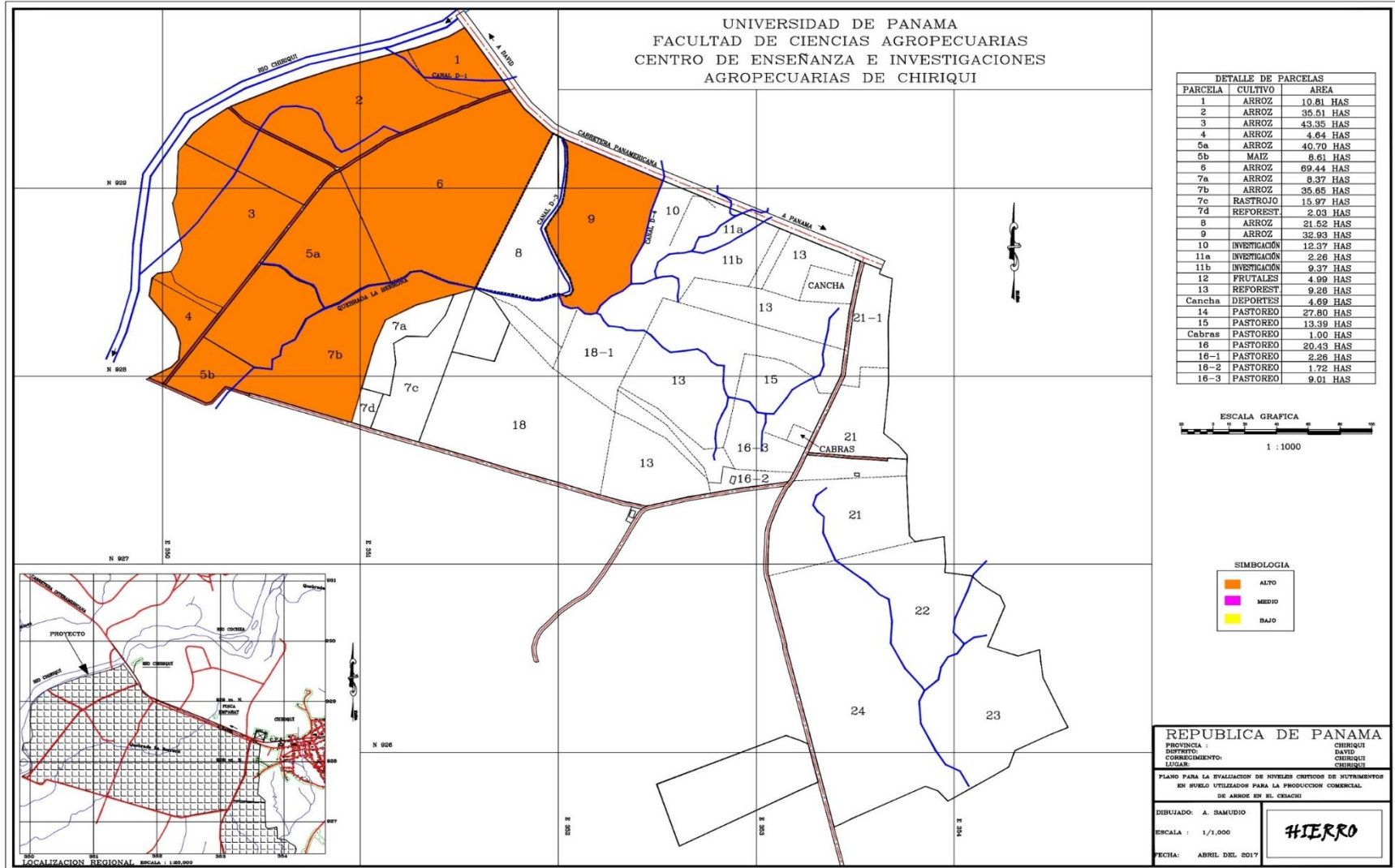
ANEXO A. 8 MAPA DE CONTENIDO DE MAGNESIO (Mg)



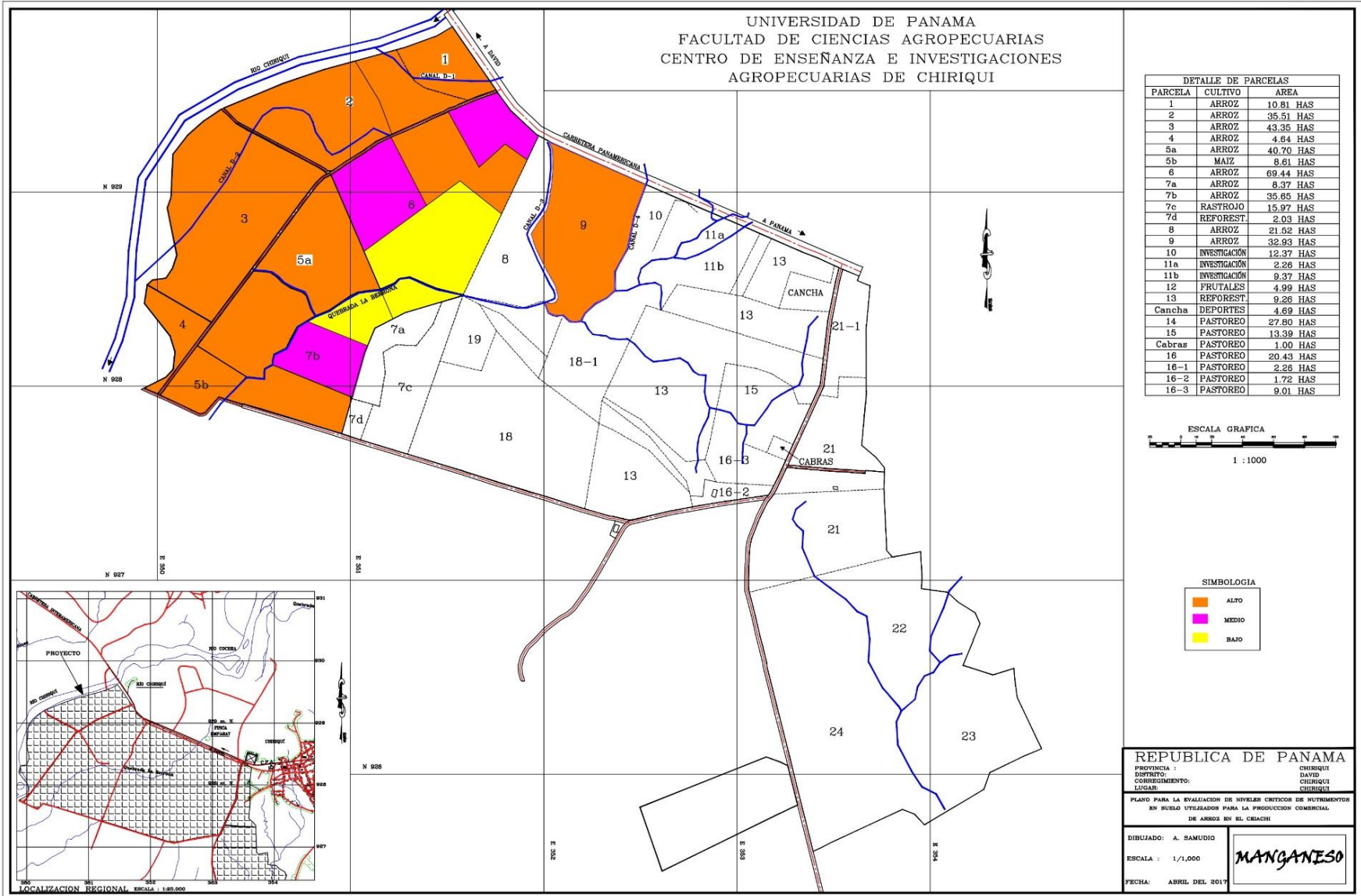
ANEXO A. 9 MAPA DE CONTENIDO DE POTASIO (K)



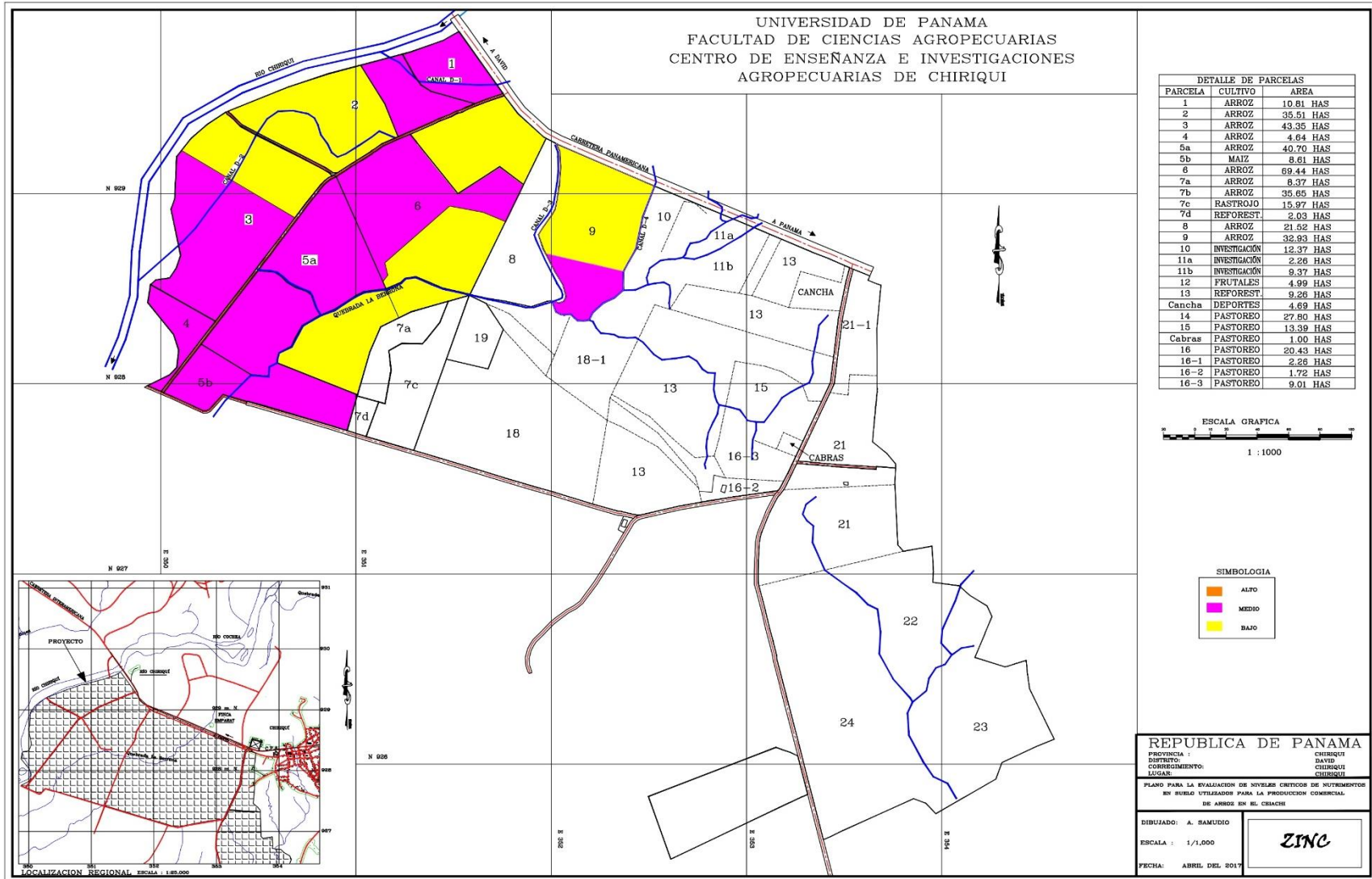
ANEXO A. 11 MAPA DE CONTENIDO DE COBRE (Cu)



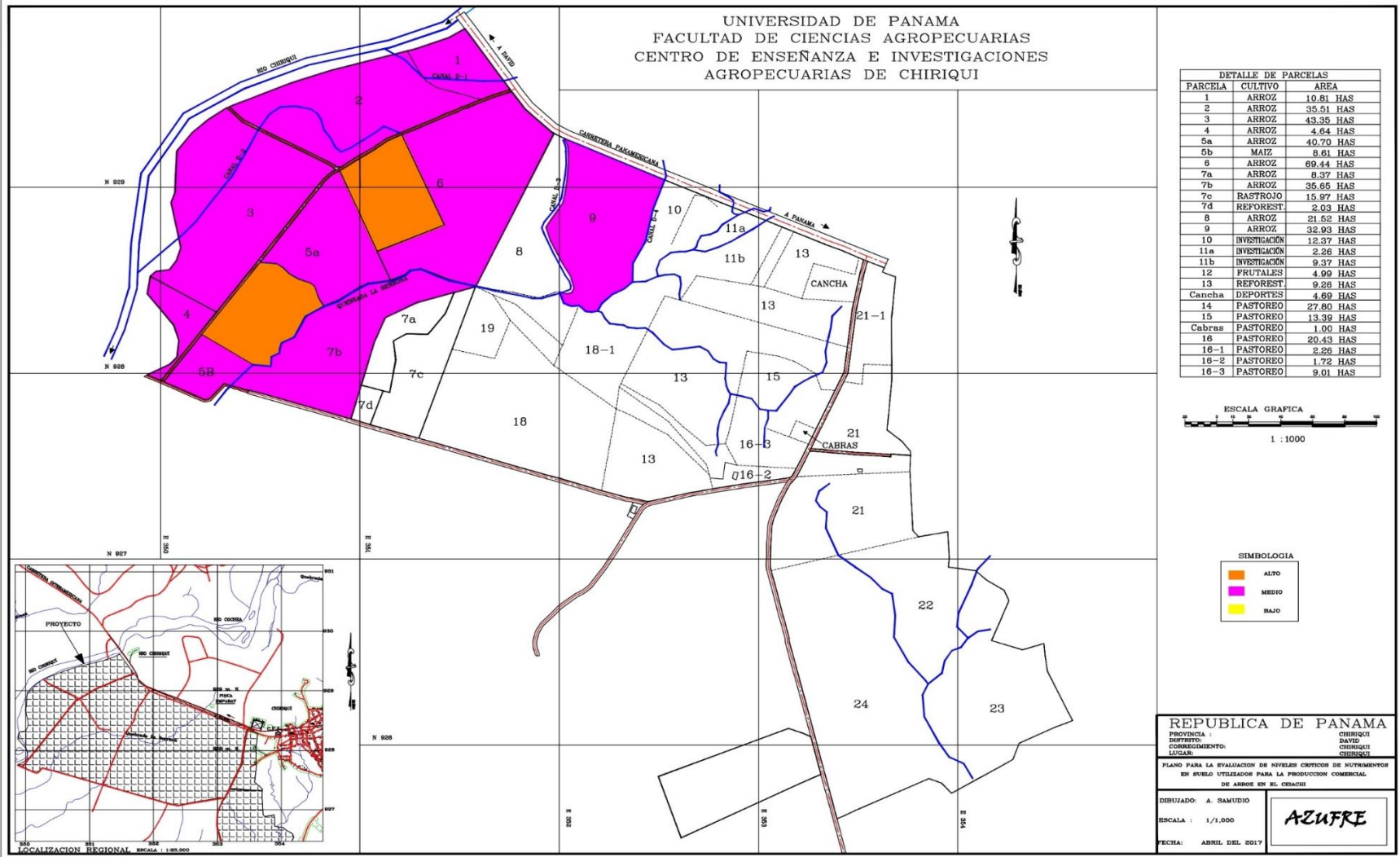
ANEXO A. 12 MAPA DE CONTENIDO DE MANGANESO (Mn)



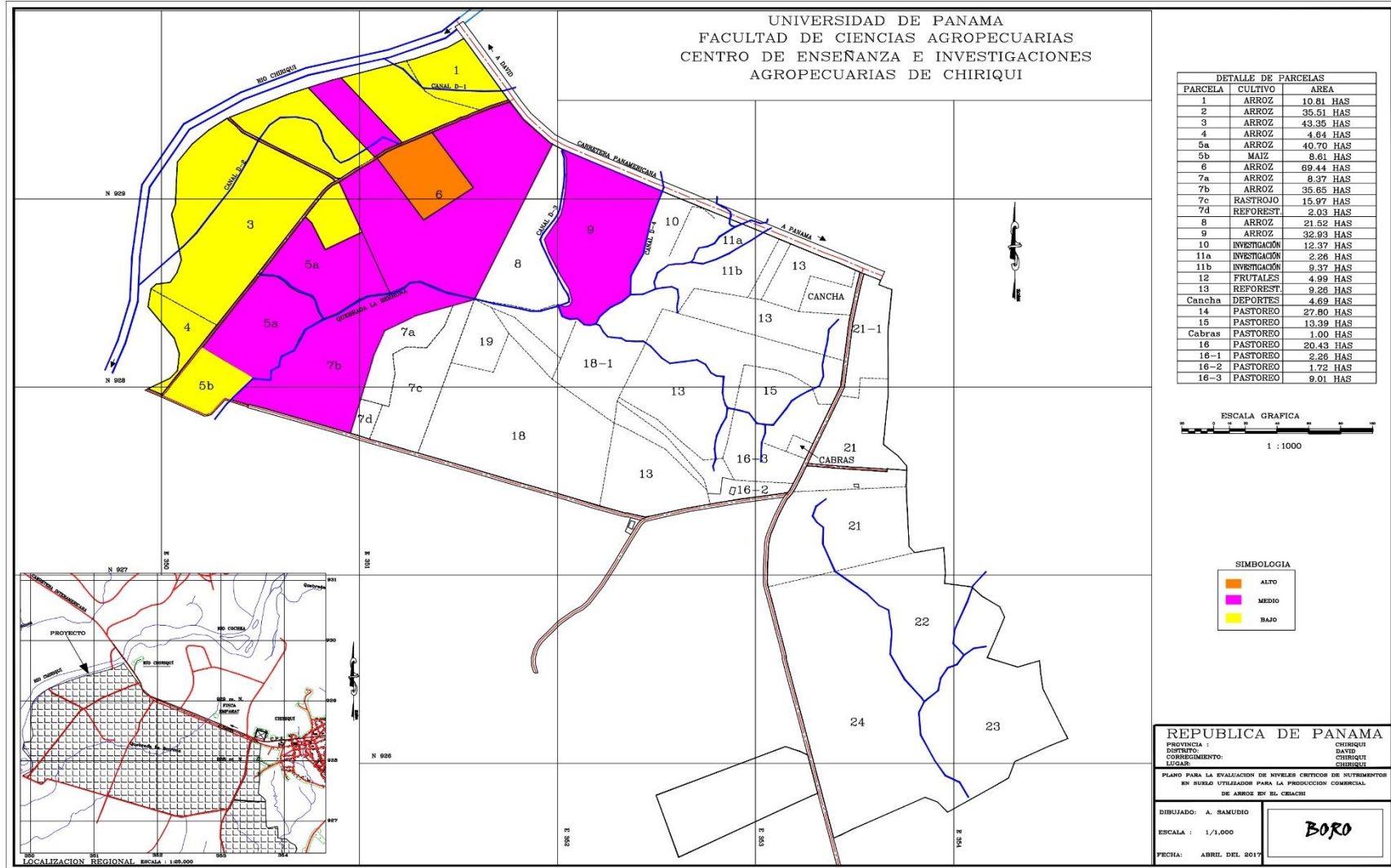
ANEXO A. 13 MAPA DE CONTENIDO DE ZINC (Zn)



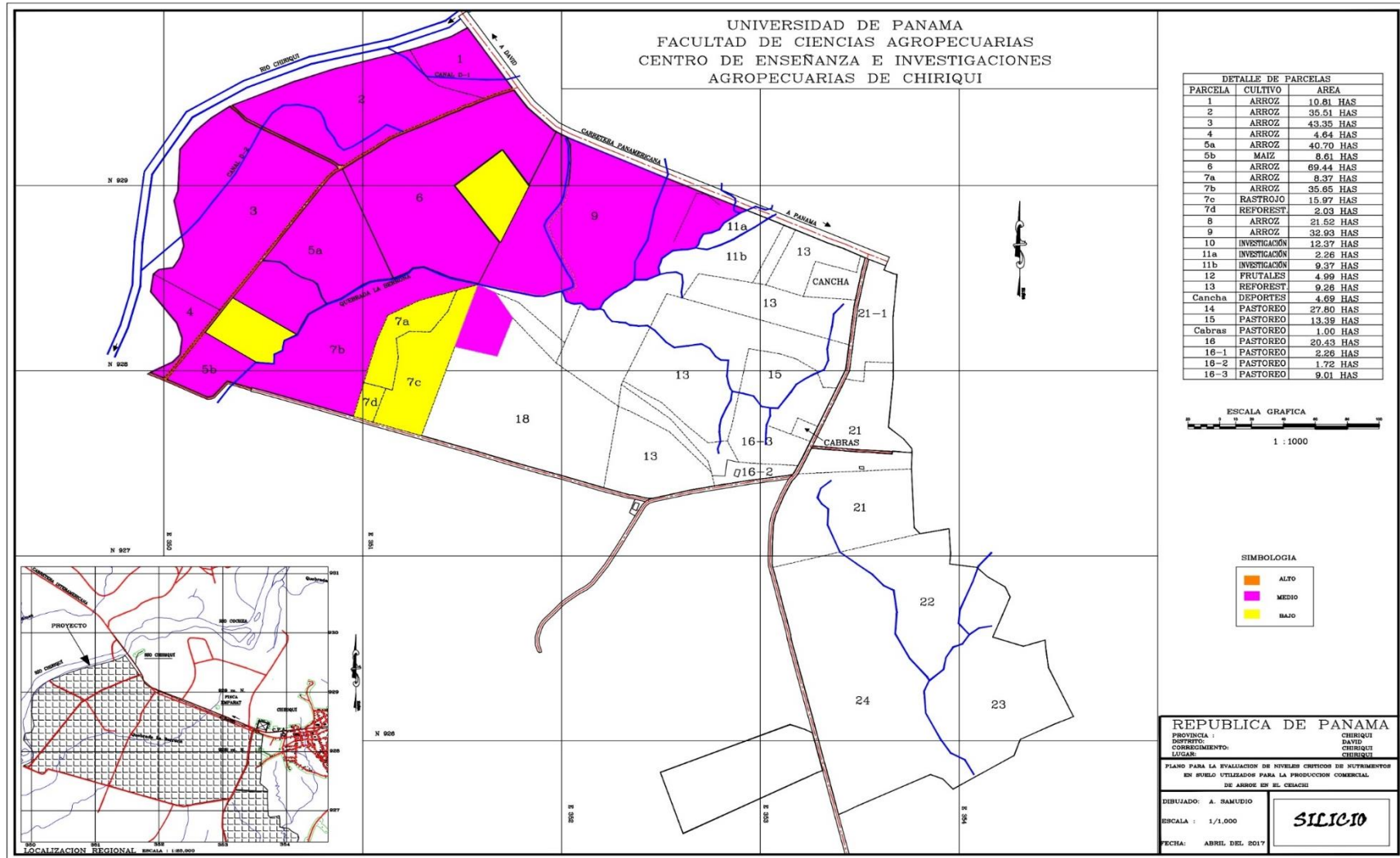
ANEXO A. 14 MAPA DE CONTENIDO DE AZUFRE (S)



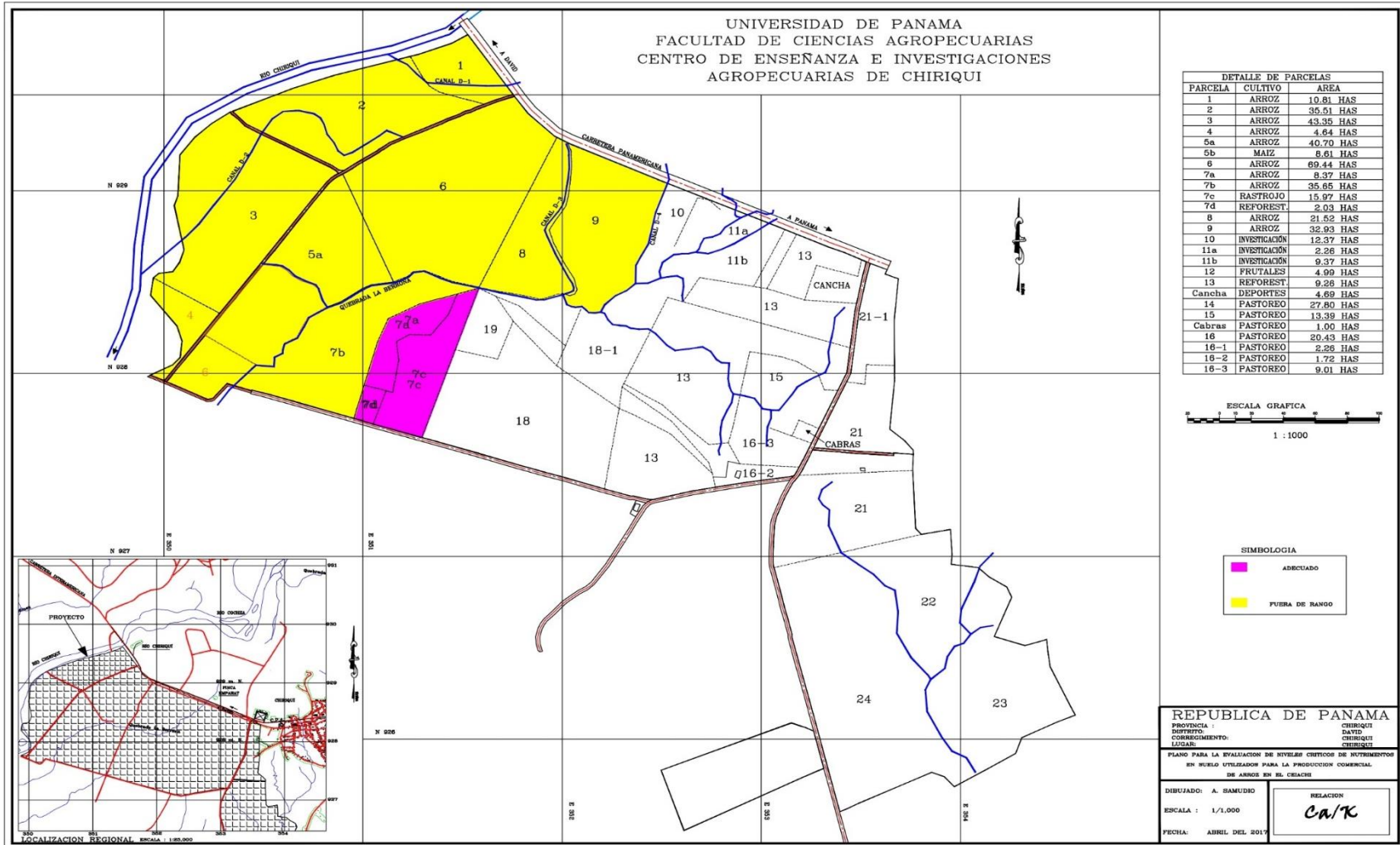
ANEXO A. 15 MAPA DE CONTENIDO DE BORO (B)



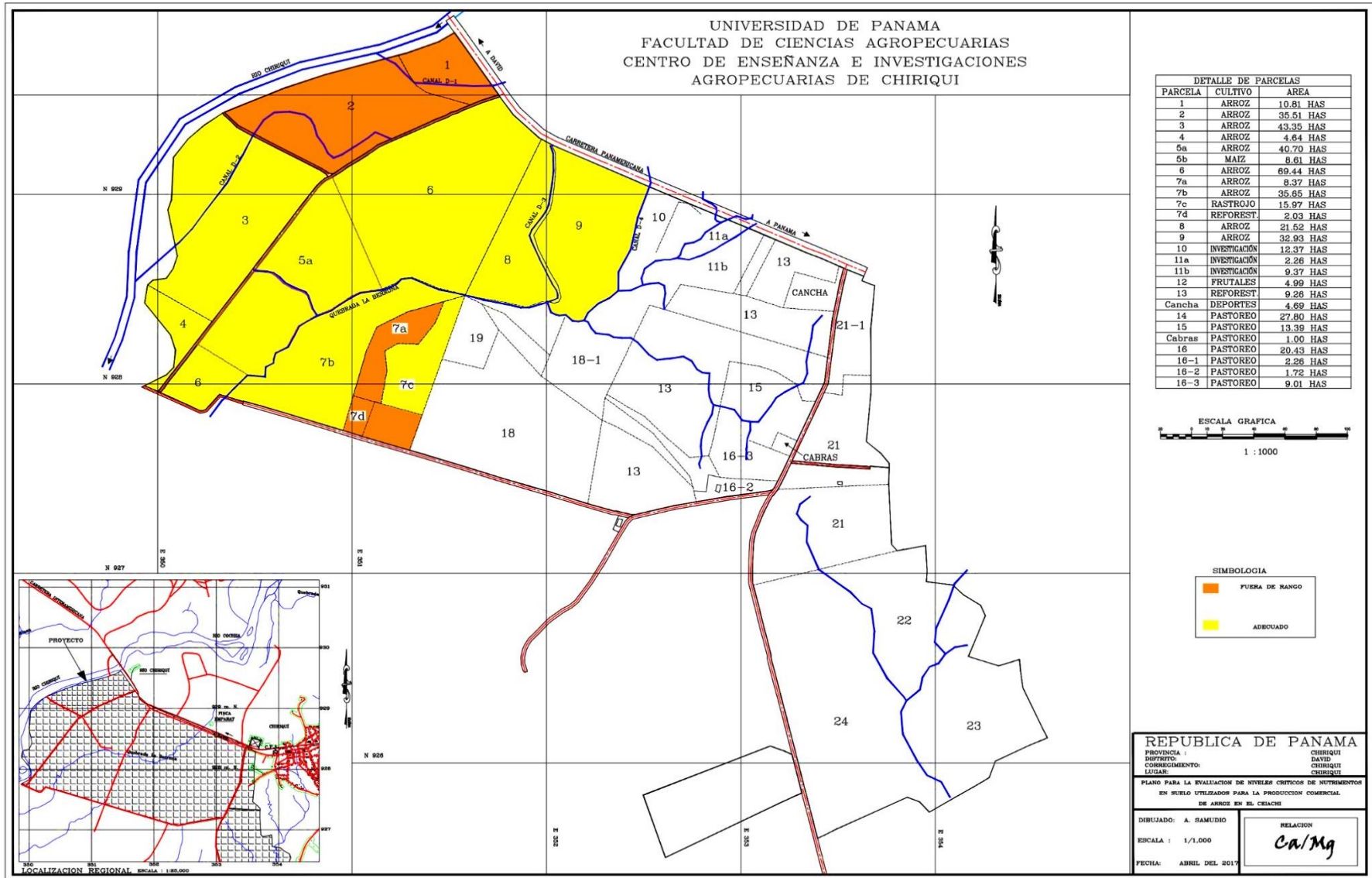
ANEXO A. 16 MAPA DE CONTENIDO DE SILICIO (Si)



ANEXO B. 1 MAPA DE LA RELACIÓN Ca/K



ANEXO B. 2 MAPA DE LA RELACIÓN Ca/Mg



ANEXO B.3 MAPA DE LA RELACIÓN Mg/K

