

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS BAJO PRODUCCIÓN DE CACAO EN LA REGIÓN NORTE DE GUATEMALA

Rolando Cifuentes Velásquez
rcifuen@uvg.edu.gt,

Isabel Alonzo Flores
ialonzo@uvg.edu.gt

Centro de Estudios Agrícolas y Alimentarios - CEEA

RESUMEN

El cacao es un cultivo ancestral de importancia económica y social para Guatemala. El desarrollo tecnológico del proceso productivo es deficiente y necesita mejorarse. El objetivo de este estudio fue conocer las propiedades físicas y químicas de los suelos cacaoteros de la región norte del país, a fin de generar las bases para el diseño de programas de nutrición vegetal. Se realizó un levantamiento de información sobre el sistema de producción y se recolectaron 233 muestras de suelo. Las muestras se agruparon según la subregión y el sistema agroforestal (cacao bajo sombra, CBS y cacao al sol, CS). Se determinó que los parámetros físicos y químicos del suelo varían principalmente entre subregiones. El efecto del sistema agroforestal fue muy bajo. Los sitios son de textura fina, predominando los suelos arcillosos (67%) y franco arcillosos (20%). En promedio, el valor de los parámetros físicos determinados fue CC $33.9 \pm 9.1\%$, PMP $24.2 \pm 8.9\%$, HA $9.8 \pm 2.6\%$, P $60.6 \pm 1.1\%$ y Da 1.0 ± 0.0 g / cc. El valor medio de los parámetros químicos fue pH 5.87 ± 0.69 , CE 0.08 ± 0.07 dS/m, MO $5.79 \pm 1.81\%$, CICE 19.7 ± 13.7 Cmolc/kg, Sat. Al^{3+} $5.54 \pm 10.55\%$, P 10 ± 21.0 mg/kg, K 0.45 ± 0.40 Cmol/kg, Ca 14.4 ± 10.9 Cmol/kg, Mg 4.44 ± 3.71 Cmol/kg, S 5.93 ± 13.67 mg/kg, Cu 3.47 ± 1.4 mg/kg, Fe 151.4 ± 60.5 mg/kg, Mn 87.0 ± 82.5 mg/kg, Zn 4.77 ± 6.51 mg/kg, B 0.27 ± 0.22 m/kg, Ca/K 36.69 ± 31.92 , Mg/K 10.63 ± 7.77 , Ca/Mg 4.06 ± 2.99 y (Ca + Mg)/K 47.33 ± 36.64 . La capacidad de los suelos para fijar P fue $54.9 \pm 12.0\%$ y la de K $57.3 \pm 11.4\%$. Los parámetros limitantes del suelo en la mayoría de las subregiones son N, P, K, S, B y en algunos casos los valores de pH del suelo. Se detectó una saturación de Al^{3+} superior al 20% en el 10% de los sitios debido al bajo valor de pH del suelo (pH < 5.0). Se sugiere diseñar programas de nutrición vegetal a nivel de sub-región. Los resultados de este estudio pueden ser útiles para el manejo nutricional del cultivo en la región norte y así contribuir a incrementar la productividad del cultivo y la calidad del producto a exportar.

PALABRAS CLAVE: Cacao, fertilidad de suelos, propiedades físicas y químicas, nutrición de las plantas, sistema agroforestal.

ABSTRACT

PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF THE SOILS CROPPED WITH COCOA IN THE NORTHERN REGION OF GUATEMALA

Cocoa is an ancestral crop of economic and social importance for Guatemala. The technological development of the production process is deficient and needs to be improved. The objective of this study was to know the physical and chemical properties of the cocoa-producing soils of the northern region of the country, to generate the bases for the design of plant nutrition programs. A survey on the production system was carried out and 233 soil samples were collected. The samples were

grouped according to the sub-region and the agroforestry system (cocoa under shade, CBS and cocoa under full sun, CS). It was determined that the physical and chemical parameters of the soil vary mainly amongst sub-regions. The effect of the agroforestry system was very low. The sites are fine textured, prevailing the clayey (67%) and clay loam (20%) soils. On the average, the value of the physical parameters determined was FC $33.9 \pm 9.1\%$, PWP $24.2 \pm 8.9\%$, AW $9.8 \pm 2.6\%$, P $60.6 \pm 1.1\%$ and Db 1.0 ± 0.0 g / cc. The mean value of the soil chemical parameters was pH 5.87 ± 0.69 , EC 0.08 ± 0.07 dS/m, OM $5.79 \pm 1.81\%$, CECe 19.7 ± 13.7 Cmolc/kg, Sat. Al^{3+} $5.54 \pm 10.55\%$, P 10 ± 21.0 mg/kg, K 0.45 ± 0.40 Cmol/kg, Ca 14.4 ± 10.9 Cmol/kg, Mg 4.44 ± 3.71 Cmol/kg, S 5.93 ± 13.67 mg/kg, Cu 3.47 ± 1.4 mg/kg, Fe 151.4 ± 60.5 mg/kg, Mn 87.0 ± 82.5 mg/kg, Zn 4.77 ± 6.51 mg/kg, B 0.27 ± 0.22 mg/kg, Ca/K 36.69 ± 31.92 , Mg/K 10.63 ± 7.77 , Ca/Mg 4.06 ± 2.99 and (Ca + Mg)/K 47.33 ± 36.64 . The capacity of the soils to fix P was $54.9 \pm 12.0\%$ and that of K $57.3 \pm 11.4\%$. The limiting soil parameters in most sub-regions are N, P, K, S and B and in some cases the soil pH values. A saturation of Al^{3+} over 20% was detected in 10% of the sites due to the low soil pH value (pH <5.0). To develop plant nutrition programs at the sub-region level is suggested. The results of this study may be useful for the nutritional management of the crop in the northern region and thus contribute to increase crop productivity and the quality of the product to be exported.

KEY WORDS: Cocoa, soil fertility, physical and chemical properties, plant nutrition, agroforestry.

INTRODUCCIÓN

La producción de cacao en Guatemala la realizan en su mayoría pequeños y medianos agricultores de la zona norte y de la costa sur del país, quienes lo cultivan como una actividad complementaria al cultivo de granos básicos.

Los departamentos con mayor producción de cacao (MAGA, 2016) son Alta Verapaz (31%), Suchitepéquez (31%) y San Marcos (25%), que en conjunto representan el 87% de la producción nacional. De acuerdo con el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación (MAGA), en el país se cultivan alrededor de 4,340 hectáreas (MAGA, 2016).

La producción total de Guatemala se estima en aproximadamente 11,600 toneladas de cacao fresco (unas 2,000 toneladas en base seca por año) (MAGA, 2016), de las cuales más del 95% se consumen a nivel local (De León, 2017; Bay, 2011) y se exporta una pequeña cantidad.

La balanza comercial del país es negativa ya que se importa (aproximadamente 1,600 TM en 2016) más cacao del que se exporta (73 TM en 2016) (MINECO, 2015). Los principales proveedores de cacao a Guatemala son Nicaragua y Honduras. La importación de cacao es debido al crecimiento de la industria chocolatera y a la poca oferta nacional. Esto constituye un reto a fin de ampliar las zonas de producción y de esa forma contribuir al desarrollo rural (MAGA, 2014).

El cacao genera alrededor de 280 mil jornales/año (equivalente a 990 empleos permanentes al año), un 30%

de los cuales son mujeres (MINECO, 2015). Tomando en cuenta que Guatemala no es capaz de cubrir su propia demanda, ya que importa más de 1 mil toneladas de cacao al año, el MAGA (2014) sugiere ampliar las zonas de producción y de esa forma contribuir al desarrollo rural.

Debido a la ausencia de una organización dedicada al desarrollo tecnológico del sistema cacao (producción y procesamiento) a nivel nacional, el sistema no ha evolucionado significativamente a pesar de ser un cultivo ancestral y que el producto es de importancia mundial. Esto a pesar de que Guatemala participa en el mercado internacional por calidad y no por cantidad.

Se reporta que la productividad en las plantaciones de cacao en Alta Verapaz varía de 250 a 300 kg de cacao seco/ha/año (Cerdea *et al.*, 2014; MINECO, 2015) mientras que la media nacional es de aproximadamente 450 kg (0.45 t) de grano seco/ha. Esos valores son superados en un 65% por los reportes de Nicaragua (Cerdea *et al.*, 2014). Sin embargo, hay reportes en otros países en donde la productividad está entre 1,500 a 3,000 kg de grano seco/ha. Esto es un desafío para nuestro medio porque una manera de apoyar a los miles de familias de los pequeños y medianos productores que participan en la cadena de valor del cacao es mediante el incremento de la productividad y calidad.

En la región norte participan unas 3 mil familias productoras (MINECO, 2015) que conviven en una región habitada por

más de 3.5 millones de personas. Con excepción de Izabal, el resto de los departamentos de la zona norte presentan altos niveles de pobreza (INE-BM/LAC, s.f.), desnutrición crónica (PMA-SESAN, 2012), inseguridad alimentaria nutricional (MAGA-SESAN, 2011) y analfabetismo (INE, s.f.). Para esta región, el cacao representa una alternativa económica de gran valor.

Las unidades productivas tienen un área de 0.25 a 0.74 hectáreas. Se estiman unas 2,700 unidades productivas (familias) y un área de 1,940 hectáreas (MINECO, 2015). Las principales áreas de producción incluyen las regiones de Lachuá, Polochic, Lanquín y Cahabón en Alta Verapaz, así como Quiché, Izabal y una parte de Petén.

En general, se considera que el cacao requiere suelos muy ricos en materia orgánica, profundos, de textura media (suelos francos) y de buen drenaje. En Latinoamérica se le cultiva en ambientes que varían en altitud (0-1400 msnm), clima (temperatura media anual 20 a 30°C; 1,500 a 3,500 mm de lluvia al año; humedad relativa de 50 a 85%) y tipo de suelo (prevalecen suelos francos con pH 4 a 8) (Arvelo *et al.*, 2017).

Moreno (1965), según lo indicado por los autores originales, reporta que el cacao prefiere suelos con pH ligeramente ácido (6.4 a 6.6) y que no debe cultivarse en suelos con pH inferior a 5.5 o arriba de 7. Además, indica que Harvey y Simmons, citados por Moreno (1965), estimaron que una producción de 1 t de cacao extrae 45-8-64 kg de N-P₂O₅-K₂O por hectárea, respectivamente. En su estudio, Moreno (1965) reporta un incremento en la productividad de cacao con la aplicación de nitrógeno y poca o no respuesta a la aplicación de P y K. Utilizó una dosis de 60, 112 y 165 kg de N, P₂O₅ y K₂O, respectivamente.

De acuerdo con información citada por Uribe *et al.* (1998), de experiencias de Brasil y África, la mayor respuesta a la fertilización se obtiene en cacao sembrado a pleno sol. La respuesta a la fertilización en cacao bajo sombra es menor. Sin embargo, si la sombra se suprime la productividad de la plantación se reduce. En general consideran que la respuesta a la fertilización es a largo plazo. De acuerdo con Bertsch (2003), para producir una tonelada de grano seco con la cosecha se necesitan 36-5-39 kg de NPK. Esto es equivalente a 36-11.4-47 kg de N-P₂O₅-K₂O.

Fontes *et al.* (2014) estudiaron las reservas de nutrientes en la hojarasca de plantas de sombra y plantas de cacao en Brasil. Indican que la hojarasca acumulada y las cáscaras de cacao pueden ser fuentes importantes de nutrientes a tomar en cuenta para el desarrollo de recomendaciones de fertilización encaminadas a incrementar la eficiencia del uso de fertilizantes y mantener la fertilidad de los sistemas agroforestales de cacao.

Snoeck *et al.* (2016) publicaron un artículo de revisión sobre la fertilización del cacao. Revisaron experiencias de diferentes países productores de cacao. Abordaron el tema de la sombra, abonos orgánicos, análisis de suelo, análisis foliar, enfoques de los programas de fertilización entre otros. En general concluyen que la fertilización es un factor importante en la producción sostenible de cacao, particularmente en procesos de producción intensiva. Indican además que varios de los informes revisados reportan bajos niveles de productividad de cacao bajo sombra en comparación con cacao al sol debido al incremento en la tasa de fotosíntesis que presenta el cacao a pleno sol. Si el cacao a pleno sol no se fertiliza, la productividad se reduce significativamente.

Los programas de fertilización química, orgánica o de la combinación de ambas no pueden ser generales para todas las regiones ya que el suelo y las condiciones de clima son diferentes. Una vez las deficiencias de nutrientes sean corregidas, se debe regresar al suelo lo extraído con la cosecha de los frutos a fin de mantener un sistema de producción sostenible.

Arvelo *et al.* (2017) recomiendan el uso de prácticas de manejo que minimizan la pérdida de nutrientes, pero que tiendan a mejorar el equilibrio de nutrientes en el suelo. Sugieren aplicar fertilizantes, orgánicos o inorgánicos, apropiados con el fin de maximizar beneficios y minimizar pérdidas. En algunos casos se recomienda el encalado, que resulta crítico para la buena absorción de nutrientes en suelos muy ácidos.

En Guatemala, las plantaciones de cacao están localizadas en condiciones de suelo altamente variables. Incluye suelos de textura pesada (arcillosos), áreas erosionadas y arenas volcánicas recién formadas, con valores de pH que van de 4 a 7 (ANACAFE, s.f.). El clima (precipitación, temperatura y humedad relativa), altitud y topografía también varían grandemente. Esto es válido tanto para la costa sur como para la región norte. Los estudios sobre fertilización del cacao en el país son prácticamente inexistentes. El país no cuenta con un centro de investigación para cacao ya sea con fondos públicos o privados.

A nivel de la región norte, la productividad reportada es de aproximadamente 250 kg de grano seco por hectárea. Se reporta que en el área de Ixcán (Quiché), las plantaciones están principalmente a pleno sol y son plantaciones jóvenes. En el caso de Alta Verapaz, la mayor parte de las plantaciones están bajo sombra. Utilizan sombra de leguminosas y bosque natural. Mantienen 75% de sombra en plantaciones jóvenes y en plantas adultas mantienen 25%. Sin embargo, el manejo de la sombra, cultivar, edad de las plantaciones y su manejo es altamente variable.

Los últimos estudios de suelos a nivel de región es la clasificación de suelos reportada por Simmons *et al.* (1959)

hace más de 50 años. Utilizando los criterios de la taxonomía de suelos en la clasificación de Simmons, el MAGA desarrolló una versión preliminar, sujeta a verificación de campo, de taxonomía de suelos a nivel de país a escala 1:2,000,000. Los principales órdenes taxonómicos identificados para la parte norte incluyen Entisoles, Inceptisoles, Molisoles y Ultisoles (MAGA, 2005).

Los Entisoles son suelos minerales recientes y poco desarrollados que no tienen horizontes subsuperficiales distintivos; Inceptisoles, son suelos medianamente desarrollados, con uno o más horizontes; Molisoles, son suelos minerales que tienen un epipedón mólico bastante oscuro que se desarrolla en ambientes bajo pastizales o regiones con cobertura forestal de hoja ancha y una saturación de bases de por lo menos 50% determinada a pH 7; Ultisoles,

son suelos fuertemente ácidos y bajo contenido de bases, suelos tropicales y sub-tropicales bastante intemperizados, pueden presentar un horizonte E (zona de lavado) y acumulación de arcilla en el horizonte B (Boul *et al.*, 1983).

La investigación sobre el tema de nutrición en cacao en la región norte es prioritaria. En principio se debe conocer el estado de la fertilidad de los suelos en donde llevan a cabo la producción de cacao los pequeños y medianos productores de la región. Se asume que los grandes productores llevan a cabo la producción con un buen manejo y nivel tecnológico.

Con este estudio se buscó conocer las propiedades físicas y químicas de los suelos bajo producción de cacao de la región norte, a fin de construir las bases para el diseño de programas de nutrición para un adecuado manejo del cultivo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del estudio

El estudio se llevó a cabo en las sub-regiones de Lachuá, Polochic, Lanquín y Cahabón ubicadas en el departamento de Alta Verapaz. Incluyó los municipios más productores de cacao de la región.

En la región de Lachuá se trabajó juntamente con las asociaciones Katbalpom, Asodirp y Asolsenor. En Cahabón se trabajó con las asociaciones Ademayach y Apidip. En Lanquín se trabajó con un grupo de productores que a la fecha no están legalmente asociados y con la empresa Chocolates Tuhlux. En Polochic se incluyó la asociación Apodip.

Adicional al territorio, también se incluyó como variable el sistema agroforestal, cacao bajo sombra (CBS) y cacao al sol (CS) (Figura 1).

Levantamiento de información de los sitios de producción

Se elaboró un formulario para la colecta de información de cada uno de los sitios tomados en cuenta para el muestreo de suelo. Aparte de la información del productor, se incluyó información relacionada con la ubicación del sitio (coordenadas y altitud), la plantación (cultivar de cardamomo, edad de la plantación y densidad de siembra), manejo (sombra, fertilización y control fitosanitario) y productividad.

La información se recopiló a través de la aplicación Survey123 de ArcGis en teléfonos móviles, lo cual permitió desde la plataforma ver el avance de la información en tiempo real. Previo a iniciar con la colecta de datos, se capacitó a los técnicos para el uso de la aplicación, así como para la colecta de muestras de suelo.

Colecta de muestras de suelo

La colecta de las muestras de suelo fue dirigida hacia plantaciones de las asociaciones que formaron parte del estudio. Los sitios seleccionados fueron indicados por los miembros de la asociación.

El muestreo dentro de cada sitio se realizó siguiendo un patrón en zig - zag, a fin de coleccionar las sub-muestras de diferentes partes del sitio. Las muestras fueron colectadas a la profundidad de 0 a 20 cm. El material se mezcló adecuadamente para formar una muestra compuesta. Se apartaron 5 lbs de suelo para su transporte al laboratorio de la Universidad del Valle de Guatemala.

Los análisis realizados incluyeron parámetros de fertilidad de suelos como pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICE), saturación de bases (K, Ca y Mg) y saturación de Al^{3+} , así

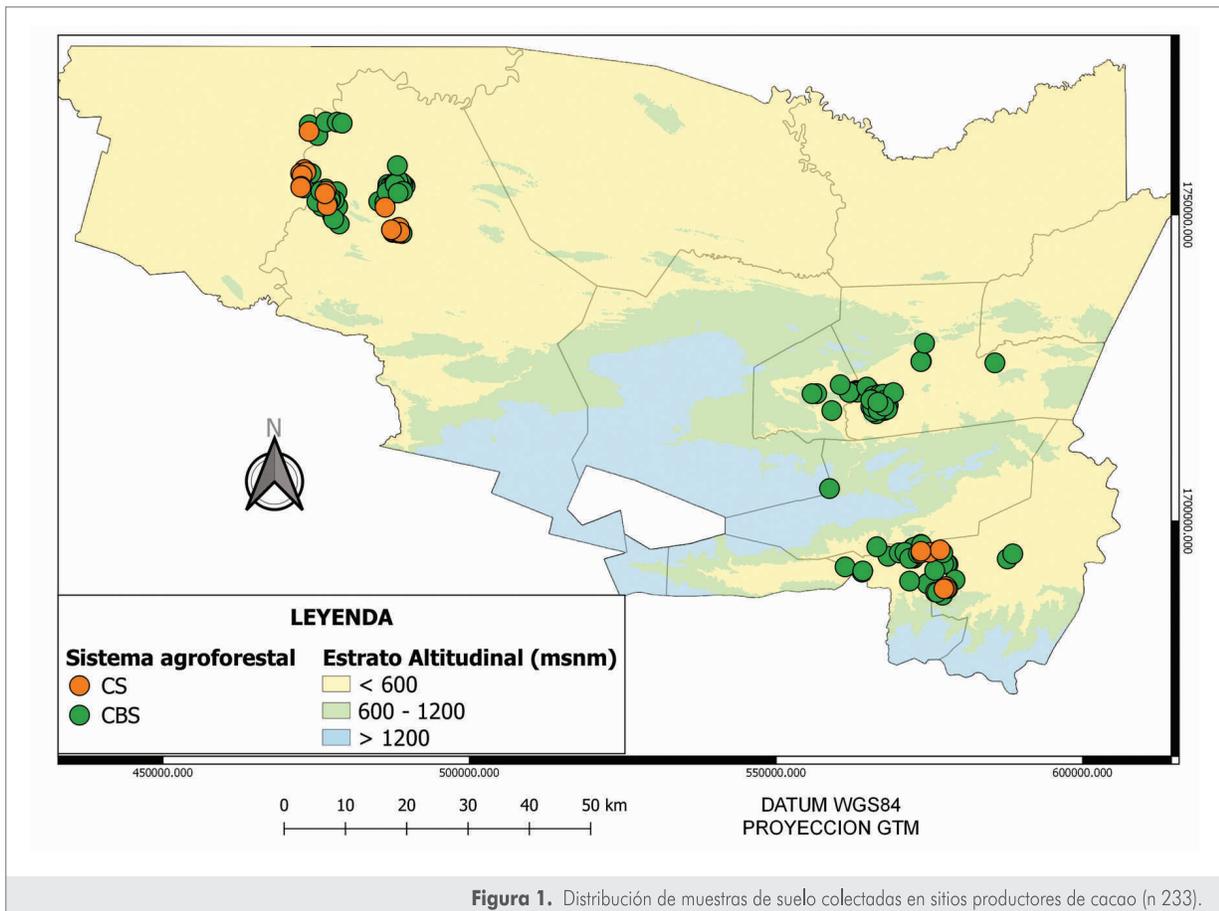


Figura 1. Distribución de muestras de suelo colectadas en sitios productores de cacao (n 233).

como el contenido de P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn y Zn. A un menor número de muestras también se les determinó la capacidad de fijación química de P y K (n 20); la clase textural; el porcentaje de la fracción de arena, limo y arcilla; densidad aparente (Da) y porosidad del suelo (P) (n 177), así como las constantes de humedad, capacidad de campo (CC) y el punto de marchitez permanente (PMP) (n 110).

Análisis de laboratorio

La determinación de los parámetros físicos y químicos del suelo se realizó en el laboratorio de Análisis de Suelos, Plantas y Aguas de Anacafé (Analab).

El análisis de la textura del suelo se realizó por el método de Bouyucos, la densidad aparente por el método de la probeta y las constantes de humedad por el método de la olla de presión (CC a 1/3 bar) y la membrana de presión (PMP a 15 bar) (Carter y Gregorich, 2008).

La determinación de pH se realizó a partir de una suspensión de suelo en agua en una relación 1:2.5 (v/v) (ISO 10390); la CE se determinó de la suspensión de suelo en agua (1:2.5

v/v); la MO se determinó por digestión húmeda y determinación por volumetría; la acidez intercambiable ($H+Al^{3+}$) por extracción con KCl 1N y determinación por volumetría; B y S por medio del método de fosfato diácido de calcio (Díaz y Hunter, 1978) y posterior determinación por Espectroscopía de emisión atómica con plasma de acoplamiento inductivo (ICP/OES) (Soil and Plant Analysis Council, 1999). La extracción de los elementos P, K, Ca, Mg, Cu, Fe, Mn y Zn se hizo utilizando la solución de Melich III (Rayment y Lyons, 2011) y determinación por ICP/OES.

La CICE se realizó por sumatoria de cationes ($K+Ca+Mg+Al^{3+}$) y los porcentajes de saturación de cada uno de los elementos en el complejo de intercambio se estimó en relación con la CICE.

La capacidad media de fijación de P y K se realizó siguiendo la metodología propuesta por Hunter (1980).

El porcentaje de humedad aprovechable (HA) fue estimado sustrayendo el valor de PMP del porcentaje de CC ($HA=CC-PMP$). El porcentaje de porosidad del suelo (P) fue estimado de la siguiente manera: $P=(1-(Da/2.65)) \times 100$.

Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó utilizando el software InfoStat, versión 2016e, (www.infostat.com.ar). Los factores evaluados

en los análisis de suelo incluyeron el efecto de la sub-región y el sistema agroforestal. La discriminación entre medias se hizo de acuerdo con la prueba de Tukey con una probabilidad de error de 0.05.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La producción de cacao en los sitios incluidos en este estudio se desarrolla en un rango altitudinal de 20 a 660 msnm, y una altitud media de 281 msnm. La edad de las plantaciones es altamente variable con una edad media de 13 años. Hay regiones en donde las plantaciones tienen más de 30 años.

La producción se desarrolla como parte de un sistema agroforestal (CBS 87% y CS 13%), escasa aplicación de nutrientes para el manejo de la nutrición del cultivo (92% no fertiliza), deficiente control fitosanitario y baja productividad (0.26 t/ha de grano seco en 2017 y 0.31 t/ha en 2018).

Las unidades de producción van de 0.02 a 5.6 ha, con un promedio de 1 ha por sitio.

Propiedades físicas del suelo

La clase textural para cada una de las sub-regiones se presenta en el Cuadro 1. Las principales clases texturales fueron suelos arcillosos (67.2% de los sitios) y franco arcillosos (19.8% de los sitios). Esto significa que el 87% de los sitios presentan una textura fina.

Cuadro 1. Clases texturales presentes en suelos bajo producción de cacao (n 177).

Sub-región	Distribución (%) de las clases texturales determinadas en sitios productores de cacao						
	n	Arcillo Limoso	Franco Arcillo Limoso	Arcilloso	Franco	Franco Arcilloso	Franco Arcillo Arenoso
Cahabón	75	0,56	1,14	24,29	1,13	13,56	1,69
Lachua	66	0,00	0,00	33,90	0,57	2,26	0,56
Polochic	36	0,00	1,69	9,05	3,96	3,95	1,69
	177	0,56	2,83	67,24	5,66	19,77	3,94

En la Figura 2 se presenta la distribución del contenido de arena, limo y arcilla de los diferentes sitios. Alrededor del 70% de los sitios tiene un contenido de arcilla entre 40 a 85%; el 84% de los sitios tiene un contenido de limo entre

5 a 35% y el contenido de arena del 75% de los suelos está entre 5 a 31%. Es evidente que la parte física y química de esos suelos depende del contenido de arcilla.

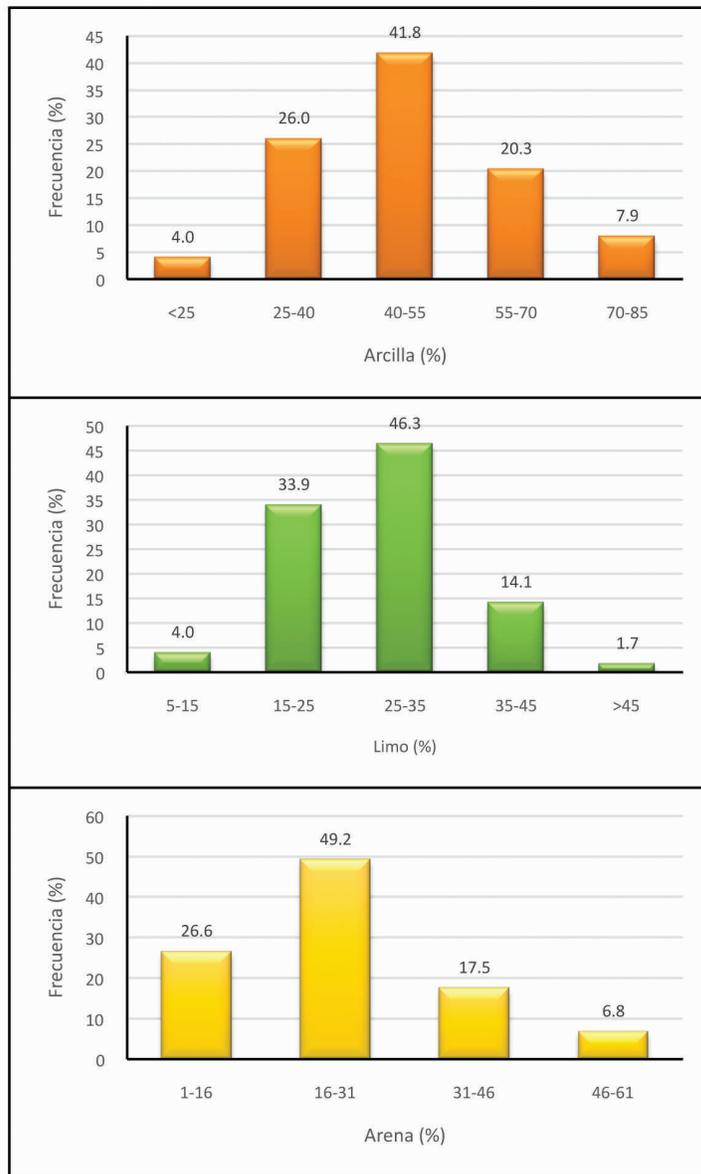


Figura 2. Distribución de la fracción de arena, limo y arcilla en sitios productores de cacao (n 177).

Se encontró diferencia significativa ($p < 0.05$) entre sub-regiones para casi todas las variables físicas analizadas (Cuadro 2). La sub-región de Lachuá presentó el mayor contenido de arcilla y el menor contenido de arena, en tanto que la sub-región del Polochic presentó el menor contenido de arcilla y el mayor contenido de arena. Los valores de HA fueron más altos en las sub-regiones de Lachuá y Polochic en comparación a la sub-región de Cahabón. Los valores de porosidad del suelo fueron estadísticamente iguales en las tres sub-regiones ($p > 0.05$).

No se encontró diferencia estadísticamente significativa entre los sistemas CBS y CS para ninguna de las variables físicas analizadas. Esto sugiere que los parámetros físicos bajo estudio dependieron más de las características del territorio que del sistema agroforestal. Para ver efectos sobre algunos de esos parámetros, como los valores de las constantes de humedad, D_a y P , posiblemente se necesiten períodos de tiempo más prolongados.

Cuadro 2. Distribución de los parámetros¹ físicos del suelo agrupados por sub-región y sistema agroforestal.

Sub-región	Arcilla	Limo	Arena	CC	PMP	HA	P	Da
				%	g/cc			
Lachuá	59.0 a	23.6 c	17.5 b	44.4 a	34.0 a	10.4 a	61.6 a	0.99 b
Cahabón	43.8 b	29.3 b	26.8 a	28.7 a	21.8 b	7.0 b	60.9 a	1.02 a
Polochic	37.5 c	32.3 a	30.2 a	28.7 b	16.7 b	12.0 a	59.4 a	1.03 a
Sistema								
CBS	48.3 a	27.8 a	23.9 a	37.5 a	27.3 a	10.2 a	60.7 a	1.01 a
CS	48.2 a	26.9 a	24.9 a	36.9 a	25.9 a	11.1 a	61.8 a	0.99 a

¹ Valores con la misma letra dentro de cada parámetro (columna) son estadísticamente iguales ($p > 0.05$).

Desde el punto de vista físico, se considera que el cacao prefiere suelos profundos, con textura media y buen drenaje. Sin embargo, la mayor parte de los sitios productores de cacao de la región norte tienen una textura fina (67% son arcillosos y 20% son franco-arcillosos), con un drenaje menos eficiente que el de los suelos francos. Los valores de la región norte contrastan con los resultados de algunos sitios del sur-occidente del país en donde se reporta una textura franco arenosa y con base en la calculadora desarrollada por el USDA (USDA, 2021) se estima una CC de 21% y un valor de PMP de 10% (Sáenz, 2011).

De acuerdo con Arvelo *et al.* (2017), en Latinoamérica el cultivo de cacao prevalece en suelos francos con pH de 4 a 8. Sin embargo, reportes de algunas regiones como Tabasco, México indican que en suelos productores de cacao de esa región prevalece la textura arcillosa (Brito-Vega *et al.*, 2018).

La mayor parte de parámetros físicos del suelo están relacionados entre sí ($p < 0.05$) (Cuadro 3). Se determinó que la Da está inversamente relacionada con la CC ($p = 1.1E-07$; $r = -0.48$) y con el PMP ($p = 1.8E-09$; -0.53). Esto significa que a mayor Da, menor es el contenido de humedad del suelo a CC y a PMP. El valor de la HA no dependió del valor de la Da.

Cuadro 3. Coeficientes de correlación de Pearson (amarillo) y probabilidad¹ (verde) de la relación entre las variables físicas del suelo.

	CC	PMP	HA	Da	P	%_Arcilla	%_Limo	%_Arena
CC	1,00	0,00	2,1E-05	1,1E-07	4,1E-04	0,00	5,7E-05	0,00
PMP	0,93	1,00	0,67	1,8E-09	2,1E-04	0,00	1,9E-07	0,00
HA	0,39	0,04	1,00	0,74	0,72	0,66	0,08	0,17
Da	-0,48	-0,53	0,03	1,00	0,00	0,00	0,15	0,00
Po	0,33	0,35	0,03	-0,64	1,00	2,8E-07	0,48	2,8E-08
%_Arcilla	0,85	0,90	0,04	-0,51	0,37	1,00	0,00	0,00
%_Limo	-0,37	-0,47	0,17	0,11	-0,05	-0,51	1,00	0,88
%_Arena	-0,78	-0,80	-0,13	0,53	-0,40	-0,86	-0,01	1,00

¹ Valores de p igual o menor a 0.05 representan una relación estadísticamente significativa.

Los parámetros de humedad del suelo también están relacionados con la fracción de arena, limo y arcilla. Los parámetros D_a y los contenidos de arena, limo y arcilla pueden ser utilizados para estimar los valores de CC y PMP en suelos productores de cacao de la región mediante el desarrollo de un modelo de regresión múltiple.

Otros estudios han reportado estimaciones de la CC, el PMP y el HA con base en el valor de la D_a y el % de arena del suelo (Chicas et al., 2014).

El servicio de investigación agrícola del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (ARS-USDA por sus siglas en inglés) ha generado una serie de ecuaciones y una calculadora que permite estimar la D_a , los parámetros de humedad del suelo, la conductividad hidráulica y la clase textural entre otros. Estos valores son estimados a partir del porcentaje de arcilla y el porcentaje de arena del suelo, utilizando como modificadores los contenidos de materia orgánica, salinidad, pedregosidad y compactación del suelo (USDA, 2021).

Aplicando los valores promedio del Cuadro 2 a la calculadora del USDA, los parámetros estimados de CC y PMP para las sub-regiones de Lachuá, Cahabón y Polochic son 44.6 y 34.3%; 39.8 y 26.6%; 37.5 y 23.7%, respectivamente. Los valores estimados corresponden bien con los valores de CC y PMP de la sub-región de Lachuá, pero no a los de las otras dos sub-regiones. Se considera importante que a nivel local se pueda validar el uso de esa calculadora ya que, de existir una buena relación entre los parámetros estimados y los parámetros medidos, habría un ahorro importante en recursos y tiempo.

Distribución de los parámetros químicos del suelo

La distribución de los parámetros químicos de suelo se presenta en las Figuras 3 a 5.

El 84% de los suelos de la región productora de cacao van de ligera (pH 6.5) a fuertemente ácidos (pH < 5.5) (Figura 3a).

Considerando la relevancia del pH en la disponibilidad de nutrientes y acumulación de Al^{3+} en el complejo de intercambio del suelo, es importante indicar que aproximadamente el 31% de los suelos presentaron un valor de pH < 5.5. El 53% de las muestras está dentro del rango adecuado de pH recomendado para la mayoría de cultivos (pH 5.5 - 6.5), el 13% es relativamente neutro (pH 6.5 - 7.3) y el 4% es ligera a moderadamente básico (pH 7.4 a 8.5).

Algunos de los suelos con pH menor a 5.5 seguramente necesitarán medidas de corrección por acidez y Al^{3+} , y aquellos con pH básico posiblemente correspondan a sitios que han sido encalados a lo largo del tiempo.

El valor de la CE (Figura 3b) está por debajo del nivel adecuado en el 98% de las muestras. (rango adecuado 0.2 - 0.8 dS/m medido en una suspensión de suelo: agua en relación 1:2.5 v/v, respectivamente). Si bien es cierto que

estos suelos no tienen problemas de acumulación de sales, el nivel de sales constituido por el conjunto de minerales que están en la solución del suelo debe estar en un rango óptimo para la nutrición de las plantas. Posiblemente la falta de un manejo adecuado de la nutrición del cultivo mediante el uso de fertilizantes orgánicos o químicos puedan estar incidiendo en que el valor de la CE esté por debajo del rango óptimo. Esto unido a la lixiviación de las sales por el régimen de lluvia de la región. En la región norte aproximadamente el 92% de los productores no realiza la práctica de la fertilización.

El contenido de materia orgánica (Figura 3c) va de adecuado a alto para un 95% de los sitios (rango adecuado de MO 3 a 6%). El alto valor de MO en el suelo es deseable por su papel en la sostenibilidad de la fertilidad del suelo.

El 12% de los suelos tiene una CICE adecuada (Figura 3d), 35% presenta baja CICE y 53% tiene alta CICE (rango adecuado de CICE 10 a 15 Cmolc/kg). Usualmente, la CICE está asociada a los contenidos y tipo de arcilla y humus del suelo.

Debido a la acidez de los suelos, se ha iniciado un proceso de saturación de Al^{3+} en el complejo de intercambio. Es decir, que el Al^{3+} se ha empezado a acumular a expensas de las bases del suelo (Ca, Mg, K y Na). Aproximadamente el 10% de los sitios presenta una saturación de Al^{3+} arriba del 20% (rango adecuado a nivel general < 20%), por lo que deben ser corregidos con la aplicación de cal (Figura 3e).

El porcentaje de saturación de Al^{3+} varió de 0.1 a 65%. Los valores de saturación de Al^{3+} mayor al 20% están asociados a suelos con valores de pH menores a 5. El proceso de acidificación de los suelos y la pérdida de sus bases está ampliamente reportado en la literatura (Fassbender y Bornemisza, 1994; Bertsch, 1998).

Con relación a los macronutrientes P, K, Ca, Mg y S, en la Figura 4 se aprecia que el 94% de los sitios son deficientes de P (rango adecuado 30 - 75 mg/kg), el 18% es deficiente en K (rango adecuado 0.18 a 0.38 Cmol/kg), 26% es deficiente en Ca (rango adecuado 5 a 10 Cmol/kg), el 11% es deficiente en Mg (rango adecuado 0.82 a 2.08 Cmol/kg) y el 88% es deficiente en S (rango adecuado 10 - 100 mg/kg suelo).

La relación entre las bases del suelo se presenta en la Figura 5. Se aprecia un exceso de Ca relativo a K (Figura 4a) en un 59% de los sitios (rango adecuado Ca/K de 5 - 25), 43% presenta más Mg relativo a K (rango adecuado Mg/K de 2.5 a 10) (Figura 4b), 14% presenta más Ca relativo a Mg (rango adecuado 2 a 5) (Figura 4c) y 51% de los sitios presenta más Ca + Mg en su relación con K (rango adecuado 10 a 40) (Figura 4d).

De estos elementos, potasio es el elemento limitante por lo que hay que considerar su aplicación independientemente del nivel disponibilidad reportado por el laboratorio.

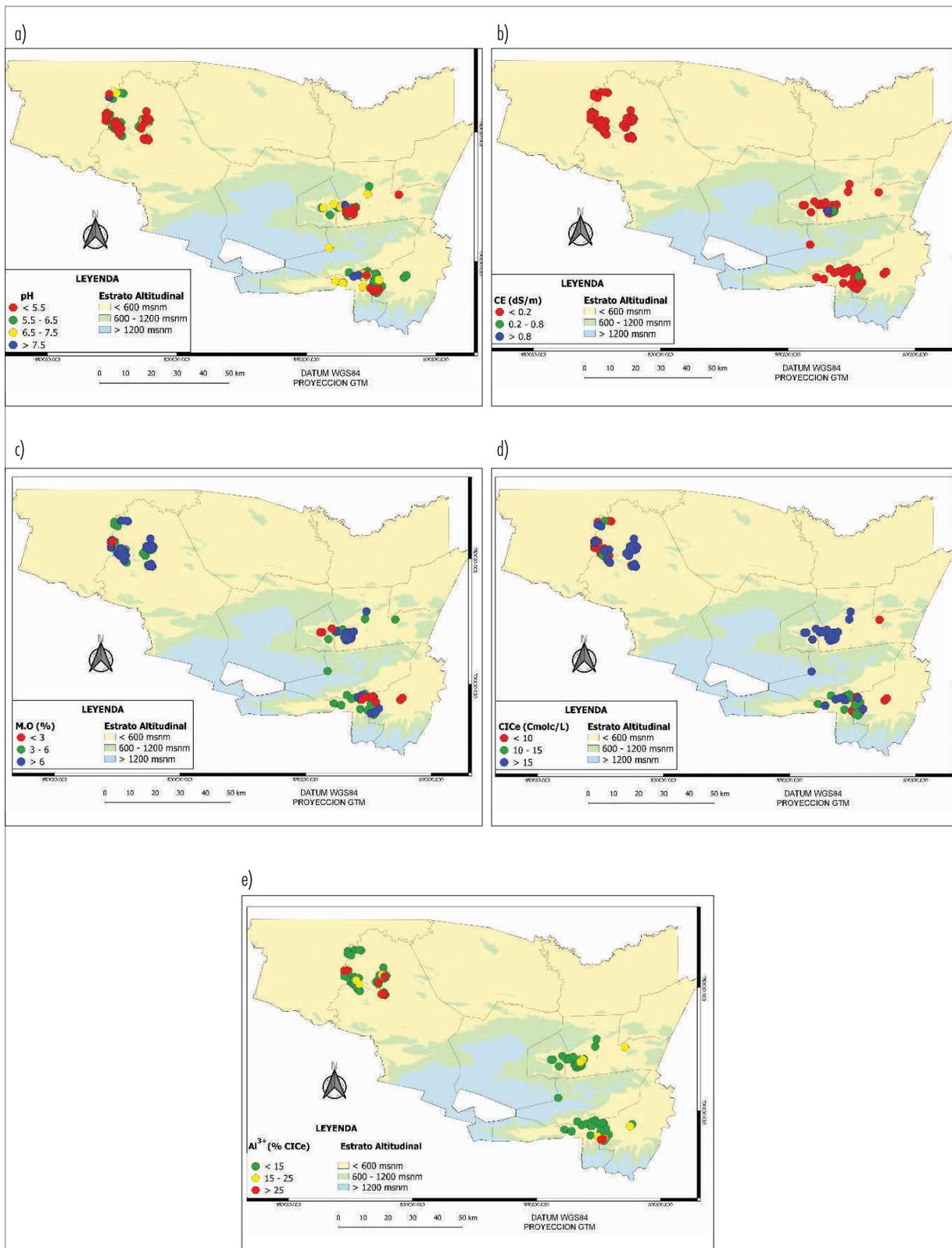


Figura 3. Distribución del pH (a), conductividad eléctrica (b), materia orgánica (c), CICe (d) y saturación de Al³⁺ (e) en sitios productores de cacao (n 233) de la región norte de Guatemala.

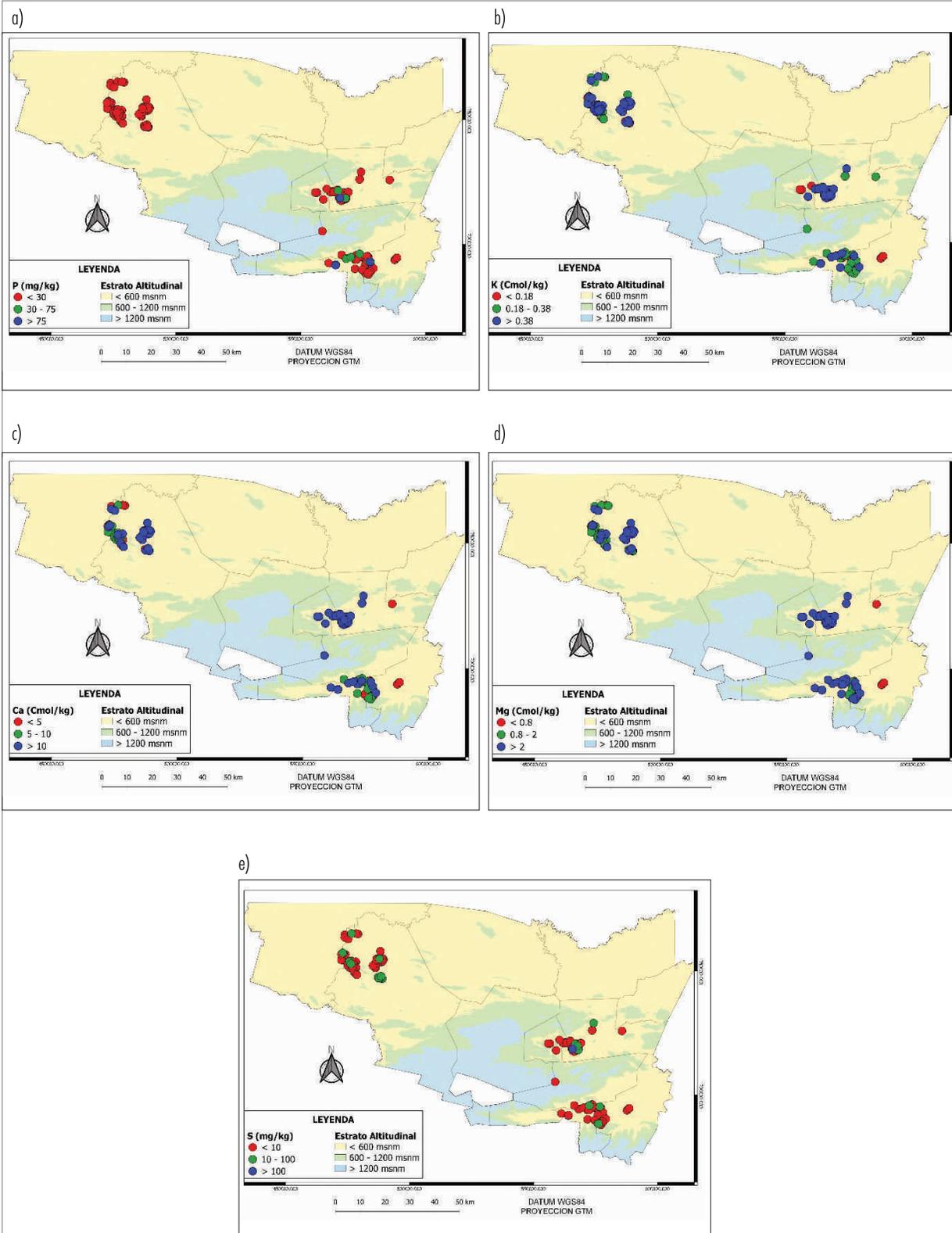


Figura 4. Distribución de P (a), K (b), Ca (c), Mg (d) y S (e) disponible en sitios productores de cacao (n 233) de la región norte de Guatemala.

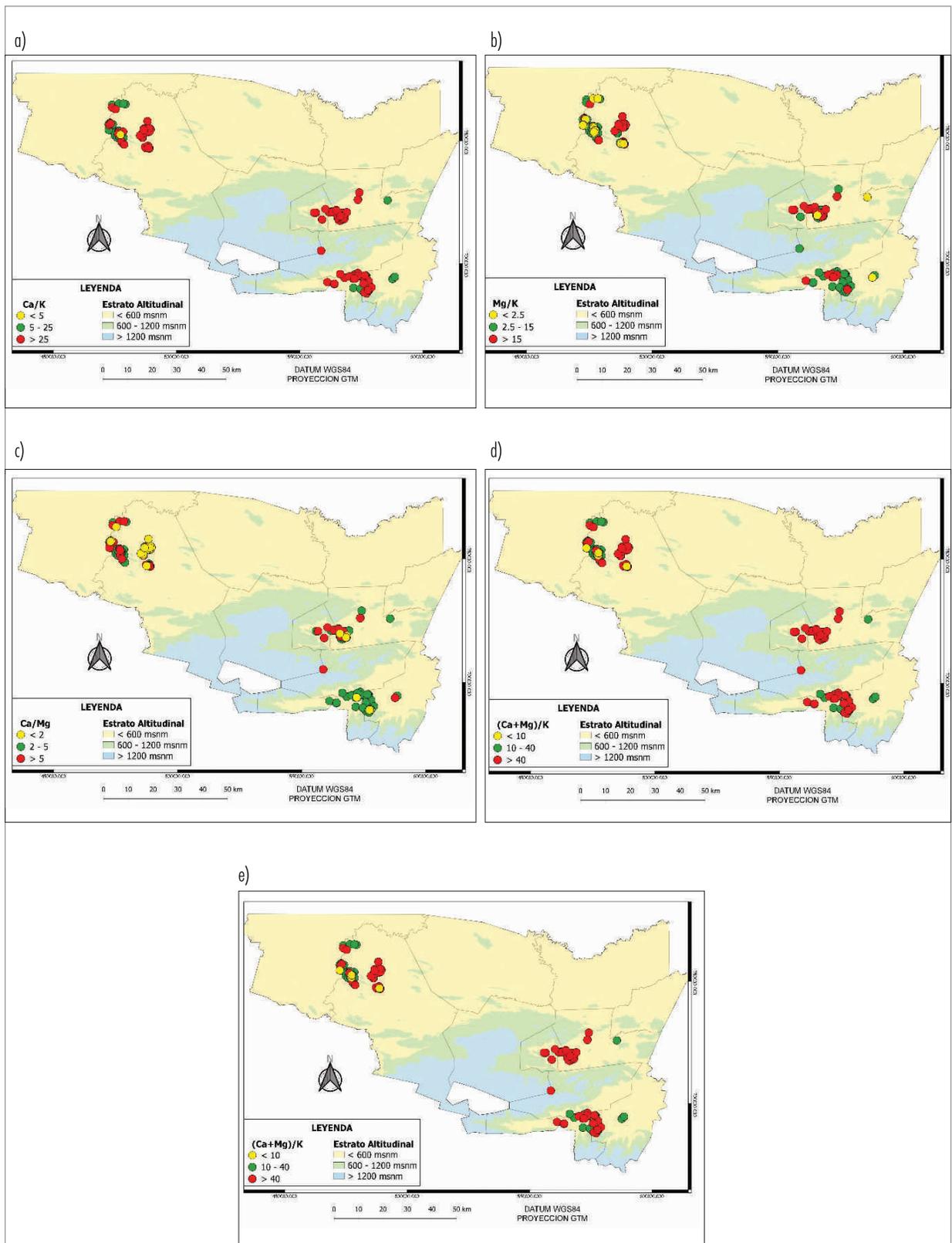


Figura 5. Distribución de las relaciones entre las bases del suelo Ca/K (a), Mg/K (b), Ca/Mg (c) y (Ca+Mg)/K (d) en sitios productores de cacao (n 233) de la región norte de Guatemala.

De los micronutrientes (Figura 6) Cu, Fe, Mn, Zn y B, el 2% de los sitios es deficiente en Cu (rango adecuado 1 a 10 mg/kg), 4% es deficiente en Fe (rango adecuado 40 a 250 mg/kg), 7% es deficiente en Mn (rango adecuado 10 a 250

mg/kg), 32% es deficiente en Zn (rango adecuado 2 a 25 mg/kg) y el 100% es deficiente en B (rango adecuado 1 a 5 mg/kg).

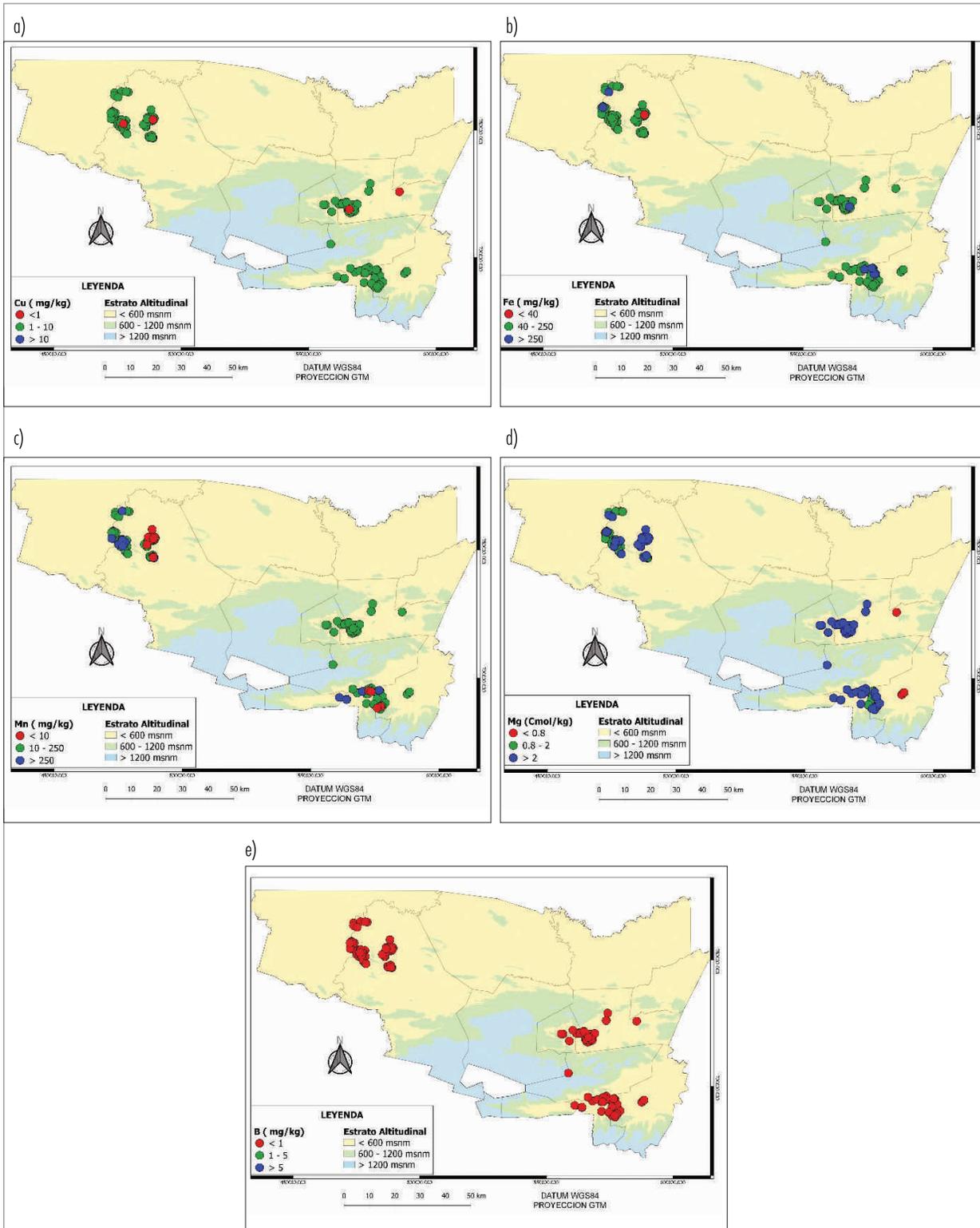


Figura 6. Distribución del contenido de Cu (a), Fe (b), Mn (c), Zn (d) y B (e) en sitios productores de cacao (n 233) de la región norte de Guatemala.

Efecto de la sub-región y del sistema agroforestal

Se encontró diferencia estadísticamente significativa para casi todos los parámetros evaluados ($p < 0.05$) (Cuadro 4) entre las sub-regiones. En el caso de S, Mn y la relación Ca/Mg, no se encontró diferencia significativa ($p > 0.05$).

Lachuá presenta el menor valor de pH, mayor cantidad de aluminio intercambiable, más materia orgánica y menos cobre. En las 4 sub-regiones el K puede ser un elemento limitante, especialmente en Cahabón y Lanquín en donde se

reportan un exceso de Ca y Mg relativo a K (Cuadro 4). En la región de Lachuá se estima mayor necesidad de encalado para neutralizar el aluminio intercambiable en comparación a las otras regiones.

Estos resultados respaldan el criterio que los parámetros de fertilidad de los sitios productores de cacao varían entre sub-regiones, por lo que no es posible tener una sola recomendación para el manejo de la nutrición del cultivo para toda la región.

Cuadro 4. Comparación múltiple de medias¹ para las diferentes variables de suelo según sub-región de producción de cacao.

Sub-región	n	pH	dS/m	% MO	CICe (dS/m)	%Sat _{Al} ³⁺
Cahabón	75	5.94 ± 0.57 ab	0.12 ± 0.04 a	5.7 ± 1.42 a	27.7 ± 11.9 a	1.12 ± 3.53 ab
Lachuá	115	5.69 ± 0.71 b	0.06 ± 0.02 b	6.5 ± 1.71 a	17.2 ± 14.2 bc	9.02 ± 12.79 a
Lanquín	7	6.39 ± 0.36 a	0.05 ± 0.02 b	3.1 ± 1.08 b	26.1 ± 3.6 ab	0.34 ± 0.22 b
Polochic	36	6.17 ± 0.74 ab	0.09 ± 0.05 ab	4.2 ± 1.42 b	10.0 ± 5.0 c	4.65 ± 9.51 ab
	Media	5.87 ± 0.69	0.08 ± 0.07	5.79 ± 1.81	19.7 ± 13.7	5.54 ± 10.55
Sub-región	n	Fósforo mg/L	Potasio Cmol/kg	Calcio Cmol/kg	Magnesio Cmol/kg	Azufre mg/L
Cahabón	75	15.1 ± 30.5 ab	0.62 ± 0.59 a	20.8 ± 10.0 a	6.2 ± 3.2 a	7.71 ± 22.9 a
Lachuá	115	2.7 ± 2.9 b	0.42 ± 0.25 ab	12.1 ± 11.0 b	3.9 ± 4.2 ab	5.91 ± 4.8 a
Lanquín	7	6.3 ± 3.7 b	0.27 ± 0.13 b	21.4 ± 4.5 a	4.4 ± 0.9 ab	1.26 ± 1.2 a
Polochic	36	23.3 ± 22.6 a	0.24 ± 0.14 b	7.1 ± 3.9 b	2.4 ± 1.4 b	3.19 ± 3.5 a
	Media	10 ± 20.97	0.45 ± 0.4	14.4 ± 10.94	4.44 ± 3.71	5.93 ± 13.57
Sub-región	n	Cobre mg/L	Hierro mg/L	Manganeso mg/L	Cinc mg/L	Boro mg/L
Cahabón	75	4.25 ± 1.18 a	184.7 ± 37.8 a	75.0 ± 42.4 a	4.07 ± 4.62 b	0.09 ± 0.17 d
Lachuá	115	2.9 ± 1.32 b	117.6 ± 58.8 b	88.3 ± 89.5 a	2.99 ± 2.62 b	0.30 ± 0.16 c
Lanquín	7	3.35 ± 0.66 ab	140.4 ± 26.2 b	56.4 ± 31.5 a	1.89 ± 0.69 b	0.73 ± 0.05 a
Polochic	36	3.71 ± 1.33 ab	191.8 ± 45.4 a	113.9 ± 117.4 a	12.49 ± 11.81 a	0.45 ± 0.14 b
	Media	3.47 ± 1.4	151.36 ± 60.53	87.04 ± 82.46	4.77 ± 6.51	0.27 ± 0.22
Sub-región	n	Ca/K	Mg/K	Ca/Mg	(Ca+Mg)/K	
Cahabón	75	40.8 ± 21.6 b	12.28 ± 7.1 b	3.77 ± 2.45 a	53.08 ± 26.23 b	
Lachuá	115	32.2 ± 35.9 b	8.93 ± 7.99 b	4.46 ± 3.55 a	41.11 ± 40.21 b	
Lanquín	7	97.5 ± 56.1 a	19.45 ± 9.8 a	5.27 ± 1.99 a	116.98 ± 60.9 a	
Polochic	36	30.7 ± 12.7 b	10.93 ± 6.5 b	3.16 ± 1.02 a	41.65 ± 18.47 b	
	Media	36.69 ± 31.92	10.63 ± 7.77	4.06 ± 2.99	47.33 ± 36.64	

¹ Medias con la misma letra dentro de cada parámetro de suelo son estadísticamente iguales ($p > 0.05$).

En el Cuadro 5 se presentan los resultados agrupados según el sistema agroforestal. Se encontró diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) para los parámetros K, Ca, Mg, Cu, Fe, B y la relación Ca/Mg.

En general, los suelos del sistema CBS presentan mayor valor de nutrientes extraíbles.

De los parámetros de suelo que se encuentran íntimamente relacionados y que son importantes tomar en cuenta para el manejo del suelo están el pH, saturación de Al^{3+} y las bases del suelo K, Ca y Mg.

Como se muestra en la Figura 7, la reducción del pH a partir de 5.5 resulta en un incremento en la saturación

de Al^{3+} en el complejo de intercambio catiónico del suelo (r^2 0.70) y en una reducción significativa de las bases del suelo K, Ca y Mg (r^2 0.43). Como consecuencia de ello, la reducción de las bases del suelo es ocupada por la acumulación de Al^{3+} (r^2 0.68). Esto significa que el manejo de los programas de nutrición debe tomar en cuenta no solo la corrección del pH sino también la relación de K, Ca y Mg con el pH, la saturación de Al^{3+} (R^2 0.68). Esto significa que el manejo de los programas de nutrición debe tomar en cuenta no solo la corrección del pH sino también la relación de K, Ca y Mg con el pH y la saturación de Al^{3+} .

Cuadro 5. Comparación múltiple de medias¹ de los parámetros de suelo agrupados según sistema agroforestal.

Sistema	n	pH	dS/m	% MO	CIce (Cmolc/kg)	%Sat_ Al^{3+}
CS	28	5.83 ± 0.96 a	0.07 ± 0.03 a	5.59 ± 2.13 a	11.70 ± 11.18 b	8.39 ± 11.63 a
CBS	196	5.87 ± 0.65 a	0.08 ± 0.07 a	5.82 ± 1.79 a	20.73 ± 13.64 a	5.29 ± 10.54 a
	Media	5.87 ± 0.69	0.08 ± 0.07	5.79 ± 1.81	19.70 ± 13.72	5.54 ± 10.55
Sistema	n	Fósforo mg/L	Potasio Cmol/kg	Calcio Cmol/kg	Magnesio Cmol/kg	Azufre mg/L
CS	28	5.77 ± 7.26 a	0.31 ± 0.23 b	8.95 ± 10.47 b	1.99 ± 1.94 b	5.87 ± 5.93 a
CBS	196	10.54 ± 22.3 a	0.48 ± 0.42 a	15.08 ± 10.77 a	4.76 ± 3.76 a	5.94 ± 14.59 a
	Media	10.00 ± 20.97	0.45 ± 0.40	14.40 ± 10.94	4.44 ± 3.71	5.93 ± 13.57
Sistema	n	Cobre mg/L	Hierro mg/L	Manganeso mg/L	Cinc mg/L	Boro mg/L
CS	28	2.98 ± 1.19 b	127.52 ± 64.15 b	108.70 ± 98.28 a	5.68 ± 5.83 a	0.38 ± 0.14 a
CBS	196	3.53 ± 1.38 a	153.88 ± 57.67 a	83.53 ± 79.68 a	4.73 ± 6.71 a	0.26 ± 0.23 b
	Media	3.47 ± 1.40	151.36 ± 60.53	87.04 ± 82.46	4.77 ± 6.51	0.27 ± 0.22
Sistema	n	Ca/K	Mg/K	Ca/Mg	(Ca+Mg)/K	
CS	28	41.19 ± 58.59 a	8.61 ± 8.31 a	5.67 ± 5.84 a	49.80 ± 62.26 a	
CBS	196	35.85 ± 26.66 a	10.83 ± 7.58 a	3.85 ± 2.24 b	46.68 ± 31.93 a	
	Media	36.69 ± 31.92	10.63 ± 7.77	4.06 ± 2.94	47.33 ± 36.64	

¹ Medias con la misma letra dentro de cada parámetro de suelo son estadísticamente iguales ($p > 0.05$).

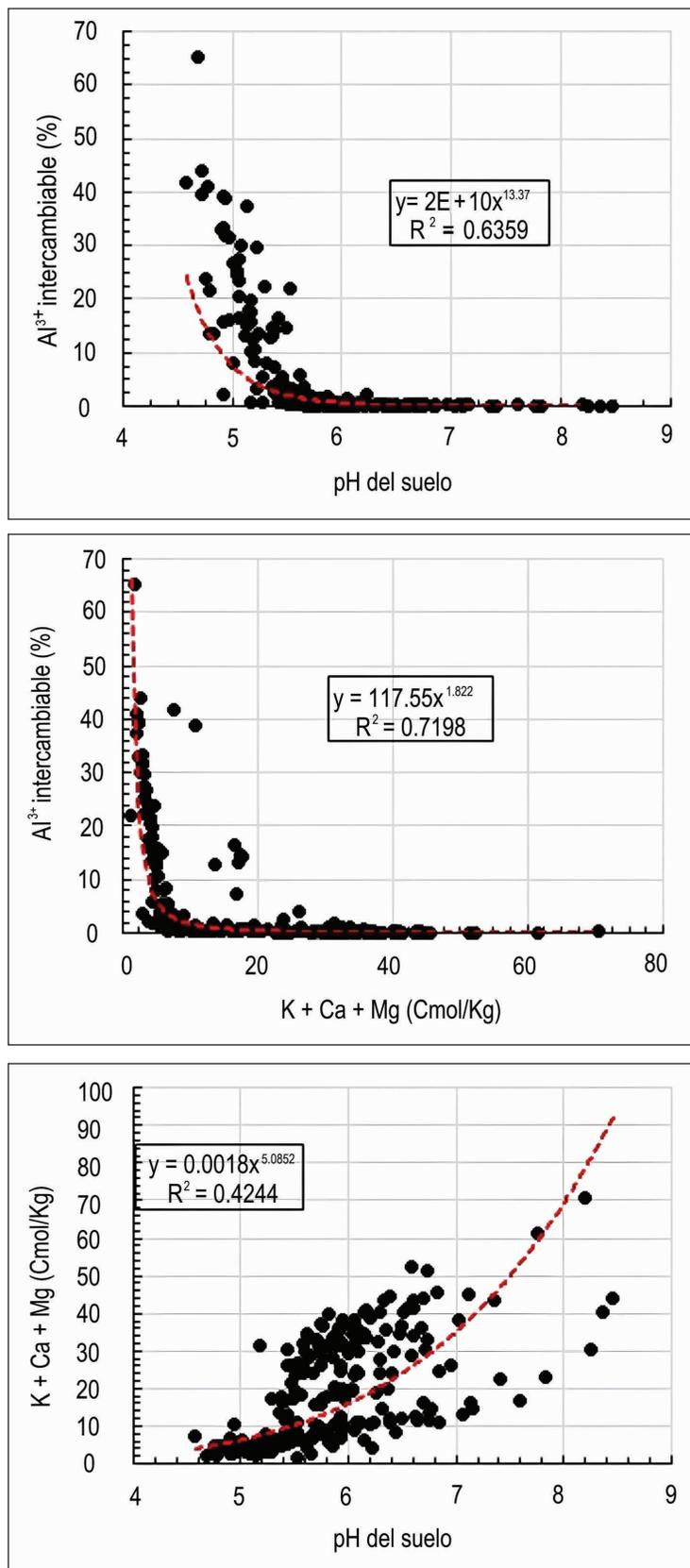


Figura 7. Relación entre el pH, Al³⁺ y las bases del suelo K, Ca y Mg (n 233).

Fijación de P y K

La determinación del porcentaje de fijación de P y K se llevó a cabo utilizando 20 muestras de suelo de la profundidad 0-20 cm. Los valores de fijación de P y K variaron de aproximadamente 22 a 90% para P y de 43 a 73% para K.

De acuerdo con el análisis de varianza para cada factor en forma independiente (Cuadro 6), en promedio no hay diferencia estadística para el % de fijación de P entre sub-regiones ($p > 0.05$) pero sí se encontró diferencia estadística para K ($p < 0.05$). El mayor valor de fijación de P se presentó en la sub-región del Polochic (68.76 ± 27.84), en tanto que el valor más alto de K se presentó en Cahabón (69.86 ± 3.6). El porcentaje de fijación de P y K no dependió del sistema agroforestal ($p > 0.05$).

El alto valor de fijación de P y K implica que para la elaboración de los programas de fertilización de cacao deben tomarse en cuenta el % de fijación de P y K a nivel de sub-región. En el caso de N se ha estimado una eficiencia media del 50% en suelos con pérdidas importantes por lixiviación, volatilización, desnitrificación, fijación como NH_4^+ por arcillas 2:1 del suelo o inmovilización por microorganismos (Bertsch, 1998).

Con base en los resultados de los análisis de suelo, en el Cuadro 7 representa un resumen de los principales elementos a ser tomados en cuenta en cada sub-región para la generación de los programas de nutrición vegetal. Se ilustran los elementos que se encontraron en niveles adecuados en el suelo (verde) y los que deben ser aplicados (rojo) en cada región estudiada. En el caso del K, con base en la cantidad disponible en el suelo se le considera adecuado, sin embargo, cuando se relaciona a las bases Ca y Mg, se encuentra que con base en la proporción de dichos elementos hay regiones en donde se deben realizar aplicaciones de K (amarillo).

Como se indicó inicialmente, la aplicación de nutrientes y el manejo de los programas de nutrición del cacao son clave para el incremento de la productividad y la calidad del cacao.

Estudios realizados sobre la fertilización del cacao reportan resultados positivos a la fertilización. En algunos casos se reporta que la respuesta a la fertilización es clon específico.

Esto sugiere que a nivel local se identifiquen y caractericen los materiales de cacao a fin de generar programas de nutrición específicos para cada sub-región y cultivar de cacao (Ruales *et al.* (2011); Puentes Paramo *et al.* (2014); Puentes Páramo *et al.* (2016).

Adicionalmente, en todas aquellas regiones con valores de pH menor a 5.5 se encontró acumulación de aluminio intercambiable. La distribución espacial de los territorios que requieren una corrección del pH con base en la acumulación de Al^{3+} se presenta en la Figura 3e. A fin de no sobreencalar esos suelos, se sugiere basarse en neutralizar únicamente la acidez intercambiable utilizando un factor de 1.5 o 2 tomando en cuenta la lenta reactividad de la cal y que no todo el aluminio será neutralizado. En suelos tropicales, con carga dependiente del pH del suelo, la recomendación más práctica para el encalado es neutralizar total o parcialmente el aluminio intercambiable del suelo (Kamprath, 1984).

Como resultado de este estudio se sugiere que el enfoque para la generación de los planes de nutrición del cacao debe ser a nivel de sub-región.

Cuadro 6. Comparación múltiple de medias¹ para los parámetros de fijación de P y K.

	Fijación (%)	
	P	K
	Efecto de la sub-región	
Lachúa	48.72 ± 14.89 a	54.26 ± 5.98 b
Cahabón	47.32 ± 8.33 a	69.86 ± 3.65 a
Polochic	68.76 ± 27.84 a	47.71 ± 5.15 b
	Efecto del sistema agroforestal	
CBS	55.26 ± 19.76 a	55.27 ± 8.64 a
CS	46.56 ± 19.42 a	53.74 ± 10.56 a

¹Medias con la misma letra dentro de cada parámetro de suelo son estadísticamente iguales ($p > 0.05$).

Cuadro 7. Resumen general de nutrientes a tomar en cuenta (rojo y amarillo) para su aplicación como parte del programa de fertilización de cacao según sub-región.

Región	pH	N	P	K	Ca	Mg	S	B	Cu	Fe	Mn	Zn	Ca/K	Mg/K	Ca/Mg	(Ca+Mg)/K
Cahabón	5.9 ± 0.6												K			K
Lachua	5.7 ± 0.7												K			K
Polochic	6.2 ± 0.7												K			K
Lanquín	6.4 ± 0.4												K	K		K

En un estudio paralelo, en proceso de publicación, también se determinó la acumulación de nutrientes en el fruto de cacao. Esto con la finalidad de regresar al suelo por lo menos la cantidad de nutrientes que se extrae con la cosecha. Un resumen de la cantidad de nutrientes requeridos para producir 1 tonelada de grano seco por hectárea se presenta

en el Cuadro 8. Las cantidades que se presentan ya incluyen la eficiencia de los elementos con base en la fijación de P y K, así como la pérdida de los elementos mayores por efecto de lixiviación y la forma en que los diferentes elementos son expresados en los sacos de fertilizante a nivel comercial.

Cuadro 8. Cantidad de elementos mayores y menores requeridos para producir 1 tonelada de grano de cacao seco por hectárea, incluyendo los diferentes componentes del fruto.

Sub-región	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	S
	Kg/ha					
Cahabón	77.6	32.2	230.2	19.0	20.8	4.6
Lachuá	74.6	29.6	143.9	11.3	15.3	5.4
Polochic	99.6	61.2	170.7	13.8	20.9	6.2
Lanquín	84.0	40.2	181.6	14.7	19.0	5.4

Sub-región	B ₂ O ₃	Cu	Fe	Mn	Zn
	g/ha				
Cahabón	235.4	62.0	167.7	153.1	187.1
Lachuá	264.4	74.9	99.6	272.7	149.7
Polochic	286.3	99.2	160.5	381.1	221.5
Lanquín	262.0	78.7	142.6	268.9	186.1

CONCLUSIONES

Algunas conclusiones como resultado de este estudio incluyen:

- Los parámetros físicos del suelo variaron principalmente entre sub-regiones. El efecto del sistema agroforestal fue menor.
- La producción de cacao de la región norte se desarrolla sobre suelos pesados. El 67.2% de los sitios analizados presentaron una textura arcillosa, el 19.8% son franco arcillosos y el 12% se distribuyó entre las texturas franco (5.7%), franco arcillo arenoso (3.9%), franco arcillo limoso (2.8%) y arcillo limoso (0.6%).
- Los parámetros % de arcilla, % de arena y Da pueden ser utilizados para construir un modelo predictivo de la CC, PMP y la HA de los suelos bajo producción de cacao de la región.
- El estado de la fertilidad de los suelos de las plantaciones de cacao de la región norte dependió principalmente de la sub-región. El efecto del sistema agroforestal sobre el 58% de los parámetros químicos del suelo no fue estadísticamente significativo.
- Los suelos bajo el sistema CBS presentaron menor contenido de Al³⁺, mayor contenido de P, K, Ca, Mg, Cu, Fe y aunque no fue significativo, también presentaron un mejor balance de las bases K, Ca y Mg que el sistema CS.
- Los parámetros de suelo pH, K, Ca, Mg y saturación de Al³⁺ están significativamente relacionados y deben ser tomados muy en cuenta para la generación de planes de fertilización.
- En los programas de nutrición vegetal se debe tomar en cuenta la acumulación de aluminio intercambiable en algunas regiones con valores de pH inferiores a 5.5, lo cual conlleva a su corrección con cal agrícola.
- Los suelos presentaron una alta capacidad de fijación de P (20 a 90%) y mediana capacidad de fijación de K (43 a 73%). La principal diferencia fue entre sub-regiones para el valor de fijación de K. No se encontró diferencia entre sistemas agroforestales.

- El valor medio de los parámetros químicos de suelo fue: pH 5.87 ± 0.69 , CE 0.08 ± 0.07 dS/m, M.O. 5.79 ± 1.81 %, CICE 19.7 ± 13.7 Cmolc/kg, Sat. Al^{3+} 5.54 ± 10.55 %, P 10 ± 21.0 mg/kg, K 0.45 ± 0.40 Cmol/kg, Ca 14.4 ± 10.9 Cmol/kg, Mg 4.44 ± 3.71 Cmol/kg, S 5.93 ± 13.67 mg/kg, Cu 3.47 ± 1.4 mg/kg, Fe 151.4 ± 60.5 mg/kg, Mn 87.0 ± 82.5 mg/kg, Zn 4.77 ± 6.51 mg/kg y B 0.27 ± 0.22 mg/kg. El valor medio de las relaciones de las bases es: Ca/K 36.69 ± 31.92 , Mg/K 10.63 ± 7.77 , Ca/Mg 4.06 ± 2.99 y (Ca+Mg)/K 47.33 ± 36.64 .
- Los parámetros limitantes del suelo en la mayor parte de sub-regiones son N, P, K, S y B. En el 10% de los sitios se determinó una saturación de $Al^{3+} > 20\%$ debido al bajo pH del suelo (< 5.0), por lo que se deben tomar acciones para reducir la acidez del suelo y reducir acumulación de Al^{3+} en el complejo de intercambio.
- Se sugiere continuar generando datos a fin de orientar los programas de nutrición según el material genético de las diferentes sub-regiones.

AGRADECIMIENTOS

A los productores de cacao y a las asociaciones KATBALPOM, ASODIRP, ASOSELNOR, ADEMAYACH y APODIP que apoyaron el estudio con información sobre el manejo de sus plantaciones y el aporte de muestras de suelo.

A los técnicos de campo y encargados de los centros de acopio que fueron un vínculo importante con líderes y productores que participaron en el estudio, así como parte crucial de la colecta de muestras de suelo.

Al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) por el financiamiento de este estudio

a través del programa Consorcios Regionales de Investigación Agropecuaria (CRIA) (Contrato IICA-CRIA-044-2018), ejecutado a través del Convenio de Cooperación Técnica y Administrativa 11-2015 suscrito entre el Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación -MAGA- y el Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura -IICA-.

Al Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, por todo el apoyo, acompañamiento y seguimiento brindado durante la ejecución de este estudio.

BIBLIOGRAFÍA

- ANACAFE. (S.f). http://www.anacafe.org/glifos/index.php?title=Cultivo_de_cacao.
- Arvelo, M.A., González, D., Maroto, S., Delgado, T., y Montoya, P. (2017). Manual técnico del cultivo de cacao: Prácticas en Latinoamérica. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA. San José, Costa Rica.
- Bay, E. (2011). Producción y comercialización de cacao (*Theobroma cacao*), en el parcelamiento Pueblo Nuevo, Municipio de Ixcán, Departamento de Quiché. Tesis Ing. Agr. FAUSAC. Guatemala. 63p.
- Bertsch, F. (2003). Absorción de nutrientes por los cultivos. 1ª Edición. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, Costa Rica.
- Boul, S.W., F.D. Hole y R.J. McCracken. (1983). Génesis y clasificación de suelos. Editorial Trillas. Primera reimpresión. México.
- Brito, H., Salaya, J.M., Gómez, E., Gómez, A. y Antele, J.B. (2018). Physico-chemical properties of soils and pods (*Theobroma cacao* L.) in cocoa agroforestry systems. J. Agron. 17(1):48-55.
- Carter, M.R. y Gregorich, E.G. (2008). Soil Sampling and Methods of Analysis. 2nd. Ed. Canadian Society of Soil Science.
- Chicas, R.A., Vanegas, E.A. y García, N. (2014). Determinación indirecta de la capacidad de retención de humedad en suelos de la sub-cuenca del río Torjá, Chiquimula, Guatemala. Rev. Ciencias Técnicas Agropecuarias 23(1):41-46.
- Cerda, R., Deheuvels, O., Calvache, D., Niehaus, L., Saenz, Y., Kent, J., Vilchez, S., Villota, A., Martínez, C. y Somarriba, E. (2014). Contribution of cocoa agroforestry systems to family income and domestic consumption: looking toward intensification. Agroforest Syst. 88:957-981.

- De León, J. (2017). Infografía cacao. El Periódico. Guatemala.
- Díaz, R y Hunter, A. (1978). Metodologías de muestreo de suelos, análisis químico de suelos y tejido vegetal y de investigaciones en invernadero. Laboratorio de suelos. Proyecto Centroamericano de Fertilidad de Suelos. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza, CATIE. Costa Rica.
- Fassbender, H.W. y Bornemisza, E. (1994). Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA. C. R.
- Fontes, A.G., Gama, A.C., Gama, E.F., Sales, M.V.S., Costa, M.G. y Machado, R.C.R. (2014). Nutrient stocks in litterfall and litter in coca agroforests in Brazil. *Plant and Soil* 383(1-2):313-335.
- Hunter, A. (1980). Laboratory and Greenhouse Technique for Nutrient Survey Studies to Determine the Soil Amendments Required for Optimum Plant Growth. Agro Services Internacional Inc. USA.
- INE. (sf). Caracterización República de Guatemala. Instituto Nacional de Estadística. Guatemala.
- INE-BM/LAC. (sf). Mapas de pobreza rural en Guatemala 2011. Instituto Nacional de Estadística. Guatemala.
- InfoStat/Estudiantil, versión 2016e (www.infostat.com.ar).
- Kamprath, E.J. (1984). Crop response to lime on soils in the tropics. pp. 349-368 In *Soil Acidity and Liming*. F. Adams (ed). Agronomy No. 12. ASA, Inc., CSSA, Inc and SSSC, Inc. Madison, WI. USA.
- MAGA. (2016). El Agro en Cifras 2016. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación, MAGA. Guatemala.
- MAGA. (2014). Perfil comercial cacao. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. Guatemala.
- MAGA. (2005). Mapa de clasificación taxonómica de suelos: primera aproximación, República de Guatemala. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación-MAGA. Guatemala.
- MINECO. (2015). Análisis de la situación actual y diagnóstico de la cadena de valor de cacao. Ministerio de Economía, MINECO. Guatemala.
- MAGA-SESAN. (2011). Priorización de municipios a través del índice de vulnerabilidad a la seguridad alimentaria y nutricional de la población de Guatemala (IVISAN). Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación - Secretaría de Seguridad Alimentaria y Nutricional. Guatemala.
- Moreno, R. (1965). Algunos aspectos de la fertilización en cacao (*Theobroma cacao*) con observaciones preliminares sobre su respuesta a la aplicación de tres elementos mayores al suelo. *Acta Agronómica* 15:69-104.
- PMA-SESAN. (2012). VAM 2012. Mapeo y análisis de la desnutrición crónica en Guatemala. Programa Mundial de Alimentos-Secretaría de seguridad alimentaria nutricional. Guatemala.
- Puentes, Y., Menjivar, J.C., Gómez, A.G. y Aranzazu, F.A. (2014). Absorción y distribución de nutrientes en clones de cacao y sus efectos en el rendimiento. *Acta Agronómica* 63(2):145-152.
- Puentes, Y.J., Gómez, A. y Menjivar, J.C. (2016). Influencia de las relaciones entre nutrientes sobre el rendimiento en clones de cacao (*Theobroma cacao* L.). *Acta Agron.* 65(2):176-182.
- Ruales, J.L., Burbano, H. y Ballesteros, W. (2011). Efecto de la fertilización con diversas fuentes sobre el rendimiento de cacao (*Theobroma cacao* L.).
- Rayment, G.E. y Lyons, D.J. (2011). *Soil Chemical Methods-Australasia*. CSIRO Publishing. Australia.
- Sáenz Domínguez, L. (2011). Macrofauna y propiedades físico-químicas del suelo en sistemas agroforestales con cacao (*Theobroma cacao* M.) y bosques secundarios en el Sur-occidente de Guatemala. Tesis. FCQF-USAC. Guatemala.
- Sánchez, P.A. (1981). Suelos del trópico: características y manejo. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA. Costa Rica.
- Simmons, Ch.S., Tarano, J. M. y Pinto, J.H. (1959). Clasificación de reconocimiento de los suelos de la república de Guatemala. Instituto Agropecuario Nacional, IAN. Ministerio de Agricultura. Guatemala.
- Schoeck, D., Koko, L., Bastide, P. y Jagoret, P. (2016). Cacao Nutrition and Fertilization. *Sustainable Agriculture Reviews* 19:1-40.
- Soil and Plant Analysis Council, Inc. (1999). *Soil Analysis Handbook of Reference Methods*. CRC Press. Boca Raton, Florida. USA.
- Uribe, A., Méndez, H. y Mantilla, J. (1998). Efecto de niveles de nitrógeno, fósforo y potasio sobre la producción de cacao en suelo del Departamento de Santander. *Revista Suelos Ecuatoriales*, 28:31-36
- USDA. (2021). Agricultural research service. <https://www.ars.usda.gov/research>.