

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DE LOS SUELOS BAJO PRODUCCIÓN DE CARDAMOMO 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**

RESUMEN

A pesar de que el cardamomo fue introducido a Guatemala hace más de 100 años, y que el país es el principal exportador a nivel mundial, el desarrollo tecnológico del proceso de producción es deficiente y necesita mejorarse. Con este estudio se buscó conocer las propiedades físicas y químicas de los suelos productores de cardamomo de la región norte del país, con la finalidad de generar las bases para elaborar programas de nutrición vegetal del cardamomo en 12 sub-regiones, las cuales incluyen los municipios más productores. Se realizó un levantamiento de información sobre el sistema de producción y se colectaron más de 400 muestras de suelo. Las muestras fueron agrupadas en función de la sub-región, del estrato altitudinal (<600, 600 - 1200 y > 1,200 msnm) y del sistema agroforestal (CL, CP y CS). Los análisis físicos realizados incluyeron la textura del suelo, CC, PMP, HA, P y Da. Como parte de los parámetros químicos se incluyeron el pH, CE, MO, CICE, Al³⁺, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn y B. Se determinó que los parámetros físicos y químicos del suelo varían principalmente en función de la sub-región y del estrato altitudinal. El efecto del sistema agroforestal fue muy bajo. En general, los sitios son de textura fina, prevaleciendo los suelos arcillosos en el 88% de los casos. Los suelos tienen una CC 57.68 ± 14.19 %, PMP 43.84 ± 10.02 %, HA 13.75 ± 6.30 %, P 63.25 ± 4.35 % y Da 0.96 ± 0.11 g/cc. El valor medio de los parámetros químicos del suelo fue: pH 5.60 ± 0.58 , CE 0.09 ± 0.11 dS/m, M.O 8.90 ± 2.96 %, CICE 16.04 ± 12.15 Cmolc/kg, Sat. Al³⁺ 8.65 ± 14.96 %, P 4.11 ± 8.63 mg/kg, K 0.38 ± 0.38 Cmol/kg, Ca 11.17 ± 8.26 Cmol/kg, Mg 3.28 ± 3.33 Cmol/kg, S 7.70 ± 8.70 mg/kg, Cu 2.77 ± 1.66 mg/kg, Fe 108.29 ± 54.71 mg/kg, Mn 90.78 ± 88.22 mg/kg, Zn 4.03 ± 6.66 mg/kg y B 0.38 ± 0.26 mg/kg; relación Ca/K 33.99 ± 21.96 , Mg/K 9.45 ± 8.14 , Ca/Mg 4.93 ± 8.30 y (Ca+Mg)/K 43.42 ± 27.02 . Los suelos presentaron una alta capacidad de fijación de P (70 a 87%) y mediana capacidad de fijación de K (47 - 59%). Los parámetros limitantes del suelo en la mayor parte de sub-regiones son N, P, K, S y B. En el 15% de los sitios se detectó una saturación de Al³⁺ >20% debido al bajo pH del suelo (<5.5), por lo que se deben tomar acciones para reducir la acumulación de Al³⁺ en el complejo de intercambio. Se sugiere diseñar programas de nutrición vegetal a nivel de sub-región y continuar generando datos en función del estrato altitudinal a fin de afinar los diferentes programas de nutrición en el futuro. Se espera que los resultados encontrados sean de utilidad para el manejo nutricional del cultivo en la región norte y de esa forma contribuir al incremento de la productividad y la calidad del producto a exportar.

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

ABSTRACT

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

Despite the fact that cardamom was introduced to Guatemala more than 100 years ago, and that the country is the main exporter worldwide, the technological level of the cardamom production process is deficient and needs to be improved. The purpose of this study was to know the physical and chemical properties of cardamom-producing soils in the northern region of the country, to generate the bases for the design of plant nutrition programs. The study was implemented in 12 sub-regions,

which included the most producing municipalities. A survey was carried out and more than 400 soil samples were collected. The samples were grouped according to the sub-region, the altitude (<600, 600 - 1200 and > 1,200 masl) and the agroforestry system (CL, CP and CS). The physical analyzes of the samples included soil texture, FC, PWP, AW, P and Db. As part of the chemical parameters, soil pH, EC, OM, CECe, Al³⁺, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Mn, Zn and B were determined. The physical and chemical properties of the soil varied mainly as a function of the sub-region and the altitudinal stratum. The effect of the agroforestry system was very low. In general, the sites are fine textured, with clay soils prevailing in 88% of the cases. Soils have FC 57.68 ± 14.19%, PWP 43.84 ± 10.02%, AW 13.75 ± 6.30%, P 63.25 ± 4.35% and Db 0.96 ± 0.11 g/cc. The mean value of the soil chemical parameters were: pH 5.60 ± 0.58, EC 0.09 ± 0.11 dS/m, OM 8.90 ± 2.96%, CECe 16.04 ± 12.15 Cmolc/kg, Al³⁺ saturation 8.65 ± 14.96%, P 4.11 ± 8.63 mg/kg, K 0.38 ± 0.38 Cmol/kg, Ca 11.17 ± 8.26 Cmol/kg, Mg 3.28 ± 3.33 Cmol/kg, S 7.70 ± 8.70 mg/kg, Cu 2.77 ± 1.66 mg/kg, Fe 108.29 ± 54.71 mg/kg, Mn 90.78 ± 88.22 mg/kg, Zn 4.03 ± 6.66 mg/kg and B 0.38 ± 0.26 mg/kg; Ca/K ratio 33.99 ± 21.96, Mg/K 9.45 ± 8.14, Ca/Mg 4.93 ± 8.30 and (Ca + Mg) / K 43.42 ± 27.02. The soils presented a high P-fixing capacity (70 to 87%) and a medium K-fixing capacity (47-59%). The limiting parameters of the soil in most sub-regions are N, P, K, S and B. In 15% of the sites Al³⁺ saturation was >20% due to the low pH values (<5.5); therefore, actions must be taken to correct soil acidity. To design plant nutrition programs at the sub-region level and to continue generating data based on the altitudinal stratum for improving the nutrition programs in the future is suggested. It is expected that 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: Cardamom, soil fertility, physical and chemical properties, plant nutrition, agroforestry system.

INTRODUCCIÓN

Los dos grandes productores de cardamomo a nivel mundial son India y Guatemala. India consume la mayor parte de su producción, en tanto que la producción guatemalteca es destinada principalmente para la exportación.

Con el incremento poblacional en la India y en los países importadores, se espera que Guatemala continúe suministrando la mayor parte del cardamomo al mercado mundial. La exportación del cardamomo genera al país aproximadamente 242 millones de dólares americanos (MAGA, 2015).

La producción del cardamomo en Guatemala la realizan en su mayoría pequeños y medianos agricultores de la zona norte del país, quienes lo cultivan como una actividad complementaria al cultivo de granos básicos y/o café. Se estima que en el proceso de producción participan unos 350,000 productores (Villatoro, 2014) que conviven en una región habitada por más de 3.5 millones de personas. Con excepción de Izabal, la región presenta 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.). El cardamomo representa para la región una alternativa económica de gran valor.

En los últimos 5 años, los reportes del MAGA (2015) indican que en el país se ha alcanzado una productividad de 360 a 530 kg pergamino/ha. Sin embargo, hay reportes en la India en donde la productividad está arriba de 2,000 kg/ha en plantaciones manejadas adecuadamente (Ravindran y Rajeev, 2002). Esto es un desafío para nuestro medio ya

que una manera de apoyar a las 350 mil familias que participan en el sistema cardamomo es mediante el incremento de la productividad y calidad del cardamomo, y de esa forma mejorar los ingresos económicos de los miles de familias de pequeños y medianos productores.

A pesar de que el cardamomo y su tecnología fueron introducidos hace más de 100 años, el nivel tecnológico del mismo en Guatemala se considera bajo. Esto es producto de la ausencia de esfuerzos y recursos económicos para desarrollar procesos de investigación y desarrollo tecnológico del cultivo en el largo plazo. Ante la falta de oportunidades de trabajo en el área rural, este sector se considera estratégico ya que de acuerdo con el MAGA (2015) genera alrededor de 25,000 empleos permanentes.

La mayor parte de los suelos de la región productora de cardamomo de la región norte del país están enmarcados dentro de la región fisiográfica de las tierras altas sedimentarias (González, 2013). Esta región limita con México en el oeste y con Belice e Izabal en el este. El material parental está conformado por rocas sedimentarias carbonatadas, rocas clásticas y dolomías del período Cretácico.

En Guatemala no se cuenta con una clasificación taxonómica de los suelos de todas las regiones del país. El único estudio realizado a nivel nacional es el estudio de suelos de Simmons *et al* (1959), el cual está basado en una clasificación genética de los suelos y el sistema es de uso local. Las unidades (series de suelo) son identificadas con nombres locales que no tienen nada que ver con otros países.

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).

En la India se le ha dado mucha importancia a la investigación y desarrollo tecnológico del cardamomo. Es importante resaltar que en ese país existe un centro de investigación especializado para el estudio del cardamomo.

De acuerdo con Krishnakumar y Potty (2002) el cardamomo se desarrolla bien en suelos relativamente profundos, con buen drenaje, suelos francos (lateríticos rojos) con abundantes capas de residuos orgánicos. Los autores indican que, de acuerdo con varios estudios realizados en la India, el pH del suelo del cardamomo va de 4.7 a 7, aunque la mayoría está entre 4.7 a 6. La mayor parte de los suelos tiene un contenido bajo de P, alto contenido de óxidos de Fe y Al los cuales pueden fijar altas cantidades de P. A nivel de laboratorio se reporta una fijación de P entre 43 - 90%. Los estudios reportan suelos con alto contenido de K, 50% de los suelos con bajo contenido de S, 68% bajo en Zn, 49% bajo en B, 28% bajo en Mo y 9% bajo en Mn. En esos suelos los niveles de Fe y Cu son adecuados.

Algunos reportes en Guatemala indican la importancia de la aplicación de cal agrícola a fin de corregir la acidez de los suelos. En la región norte se maneja el criterio de la aplicación de 1 libra de cal dolomítica por mata de cardamomo. Sin embargo, es importante definir los criterios para su aplicación. De acuerdo a Sánchez (1981), los problemas de acidez del suelo están asociados a la presencia de aluminio intercambiable (Al^{3+}), lo cual ocurre a valores de pH < 5.5. No se puede encalar indiscriminadamente los suelos de la región ya que posiblemente no todos presenten problemas con Al^{3+} . También se desconoce la tolerancia del cardamomo a la acidez del suelo. Hay plantas como el café que toleran hasta cierto punto los problemas con Al^{3+} . 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 (meq Al^{3+} /100 ml de suelo), utilizando un factor de corrección de 1.5 a 2 (Kamprath, 1984).

Tomando en consideración la importancia de la fertilidad del suelo para la producción del cardamomo, Subbiah et al (2008) en un artículo de revisión, presentan un análisis sobre la nutrición de la planta de cardamomo. Reconocen la importancia de todos los elementos esenciales, describen el rol de cada elemento dirigido a la planta de cardamomo, la fertilización al suelo, la fertilización foliar, los momentos de aplicación y también presentan una recomendación de fertilización para condiciones de riego. La fertilización recomendada está basada en los estudios de Natarajan y Srinivasan, (1989), la cual consiste en aplicar una dosis de 125-125-250 kg/ha de $N-P_2O_5-K_2O$ en plantaciones a partir del tercer año en adelante.

En Guatemala se han realizado algunos estudios puntuales sobre la nutrición del cardamomo, principalmente por medio de trabajos de graduación de estudiantes de Agronomía o por medio de monografías o manuales de capacitación que recopilan una serie de vivencias sobre el cultivo. Los estudios se han realizado tanto en la región norte como en la región sur.

Con base en la información reportada, se puede apreciar que los estudios han sido aislados y muy puntuales. Esto es de esperarse ya que en el país no existe una organización dedicada a la investigación y desarrollo tecnológico del cardamomo. Los diferentes estudios han priorizado la evaluación de N y P sobre la aplicación de K, y muchas recomendaciones promueven aplicar más nitrógeno que potasio. Sin embargo, los estudios de Ramírez (1981) y Escobar (1986) indican que la concentración y/o acumulación de K en la planta es muy superior a la de N y del resto de elementos analizados.

Los reportes de los estudios de fertilización del cardamomo de la India contrastan grandemente con los reportes de Guatemala. En los reportes de la India sobresalen las aplicaciones de K sobre las de N, tomando como base la acumulación de nutrientes por la planta y la remoción de nutrientes con la cosecha. Se aprecia que la demanda de K es casi dos veces la demanda de N, lo cual se pone en evidencia en las recomendaciones de fertilización. Ese tipo de estudios no se han realizado en Guatemala.

En Guatemala no se cuenta con datos de las propiedades físico-químicas de los suelos productores de cardamomo de la región norte del país. Los únicos datos que se tienen son los generados por Simmons et al (1959). Sin embargo, han pasado más de 50 años desde que el estudio se llevó a cabo e indudablemente muchos parámetros químicos del suelo

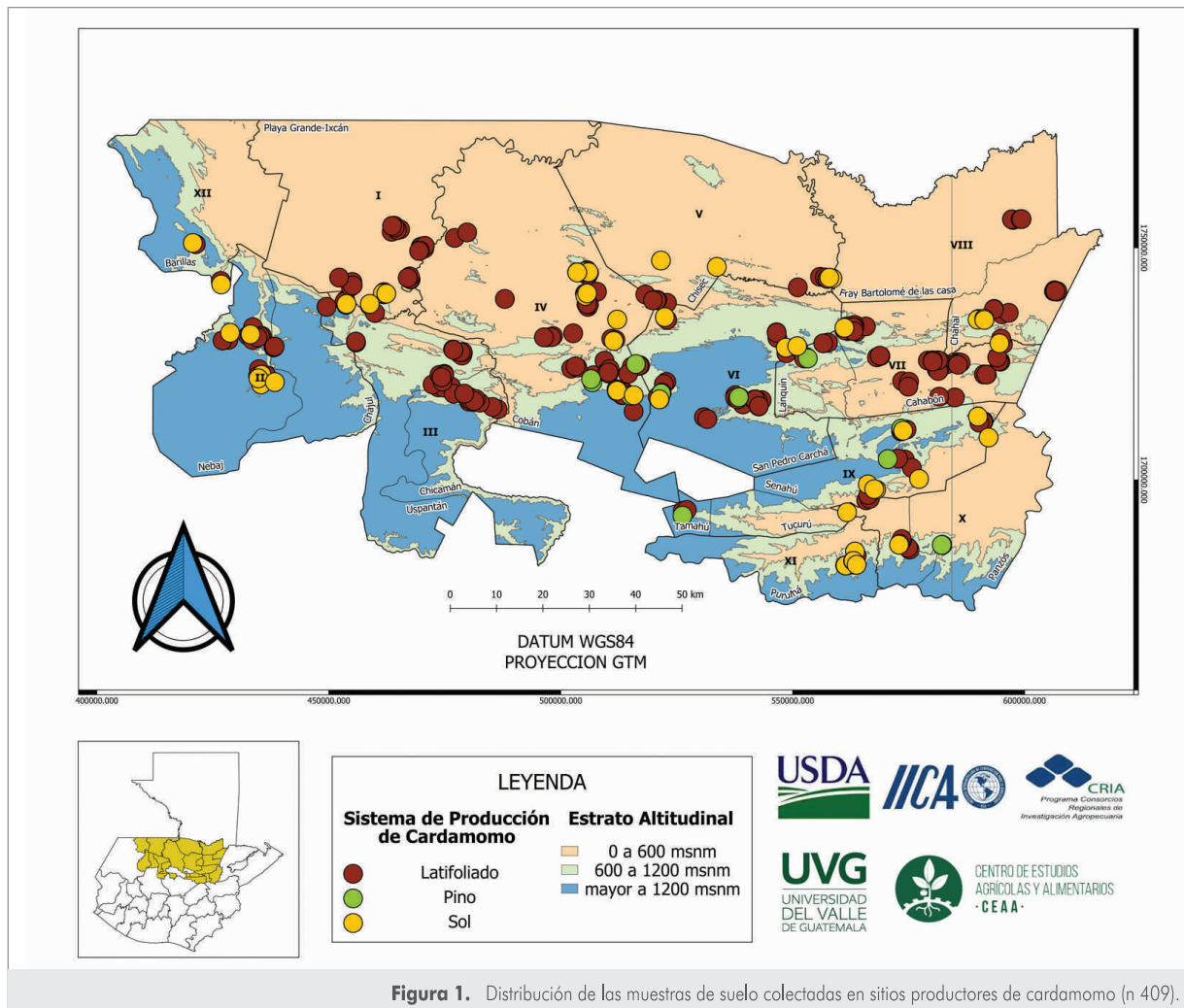


Figura 1. Distribución de las muestras de suelo colectadas en sitios productores de cardamomo (n 409).

han cambiado producto del avance de la frontera agrícola, deforestación, erosión, uso de fertilizantes y la intensificación de la actividad agrícola, entre otros.

Se desconoce el estado de la fertilidad de los suelos de la región y no se cuenta con un programa de nutrición adecuado para el desarrollo del cultivo en la región norte. La mejora de la productividad y la calidad del cardamomo a exportar, por medio del manejo de la nutrición del cultivo, se considera

de importancia para mejorar el ingreso económico de las familias que participan en el proceso de producción.

El objetivo del este estudio fue conocer las propiedades físicas y químicas de los suelos productores de cardamomo de la región norte del país, con la finalidad de generar las bases para el diseño de programas de nutrición vegetal que busquen el incremento de la productividad y calidad del cardamomo de la región.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del estudio

El estudio se llevó a cabo en varios territorios de la región norte del país (Figura 1). Se incluyeron comunidades de los departamentos de Huehuetenango (sub-región XII), Quiché (sub-regiones I, II y IV), Alta Verapaz (sub-regiones III, V, VI, VII, VII, IX y X) y Baja Verapaz (subregión XI), por ser las áreas

tradicionales de producción de cardamomo. Adicional al territorio o sub-región, también se incluyeron como variables el rango altitudinal (< 600, 600-1200 y > 1200 msnm) y el sistema agroforestal (cardamomo al sol, CS; cardamomo bajo sombra de pino, CP; cardamomo bajo sombra de especies latifoliadas, CL).

Cuadro 1. Distribución de las muestras de suelo colectadas en las diferentes sub-regiones según estrato altitudinal y sistema agroforestal.

Subregión	Municipio	<600 msnm			600-1200 msnm			>1200 msnm			Total
		CS	CP	CL	CS	CP	CL	CS	CP	CL	
I	Ixcán	4		32			3				39
II	Chajul - Nebaj				1		16	5		14	36
III	Cobán	6		26	2	5	24			1	64
IV	Uspantán - Chicamán						39				39
IX	Chisec	4		2	6	4	19		1	3	39
V	San Pedro Carchá	8		20							28
VI	Chahal - Fray Bartolomé de las Casas				2	1	30	1	1	7	42
VII	Lanquín - Cahabón	A		13	9						22
VIII	Senahú - Tamahú	1		36	1	1	19				58
X	Panzós - Santa Catalina la Tinta		1	2	2		3			1	9
XI	Purulhá			1	7	1	4				13
XII	Barillas						1	2		1	4
	Total	23	1	132	30	12	158	8	2	27	393
			156			200		37			

Las muestras se colectaron de todos los territorios, durante el período comprendido entre diciembre del 2018 y octubre del 2019. Sin embargo, no todos los territorios presentaron los 3 rangos altitudinales ni los 3 sistemas agroforestales (Cuadro 1).

Levantamiento de información y colecta de muestras de suelo

Para la ejecución de las actividades de campo se trabajó en conjunto con la Asociación de Exportadores de Cardamomo - ADECAR -, de la Asociación Guatemalteca de Exportadores (AGEXPORT). La organización cuenta con un grupo de técnicos en la región del estudio quienes apoyaron con la colecta de muestras y el levantamiento de información en campo.

Se elaboró un formulario para la colecta de información de cada uno de los sitios tomados en cuenta para el muestreo de suelo y planta. 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 (uso de 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 la colecta de datos, se capacitó a los técnicos para el uso de la aplicación, así como para la colecta de muestras de suelos.

En cada uno de los sitios se colectaron aproximadamente 5 libras de suelo de las profundidades 0-10 cm y 10-20 cm.

Preparación de muestras para análisis

Una vez transportadas las muestras al laboratorio del Centro de Estudios Agrícolas y Alimentarios de la Universidad del Valle de Guatemala, se procedió a mezclar el contenido de la bolsa de suelo colectada a cada profundidad. Se tomaron 500 cc de suelo de cada profundidad y se mezclaron en una sola bolsa para formar una muestra de suelo a 0-20 cm de profundidad.

Los análisis de suelo realizados incluyeron parámetros de fertilidad de suelos como pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), capacidad de intercambio catiónica efectiva (CICe), saturación de bases y saturación de Al^{3+} , así como el contenido de P, K, Ca, Mg, S, B, Cu, Fe, Mn y Zn. A un menor número de muestras (n 99) también se les determinó la capacidad de fijación química de P y K; la clase textural y el porcentaje de la fracción de arena, limo y arcilla (n 154) así como las constantes de humedad (capacidad de campo, CC; punto de marchitez permanente, PMP y densidad aparente, Da).

La muestra sobrante se almacenó debido a que el suelo también se utilizó para realizar otro tipo de análisis aparte del análisis de suelo con fines de fertilidad.

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).

La determinación 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-Romeu 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 dichos elementos en el complejo de intercambio se estimó en relación con la CICE.

La capacidad de fijación de P y K se determinó con base a 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). Se realizó análisis de varianza para 1 o más factores. La discriminación entre tratamientos se hizo de acuerdo a la prueba de Tukey con una probabilidad de error de 0.05.

Los factores evaluados en los análisis de suelo incluyeron el efecto de la sub-región, rango altitudinal y sistema agroforestal tomando en cuenta todos los sitios de muestreo. También se analizó el arreglo combinatorio de los factores sub-región (sub-regiones I, III, VII, VIII, IX y X) y estrato altitudinal en los territorios que compartieron los rangos altitudinales de < 600 msnm y 600 - 1200 msnm.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La producción de cardamomo en la región norte de Guatemala se desarrolla principalmente como parte de un sistema agroforestal (84.6%, CL + CP; 15.4% CS), sin aplicación de nutrientes para el manejo de la nutrición del cultivo (94.6%) y un control fitosanitario orientado al control del trips del cardamomo (36%). Esto repercute en una baja productividad (150 a 300 kg pergamino/ha) en unidades de suelo que van de 0.02 a 11.2 ha.

Propiedades físicas del suelo

La clase textural para cada una de las sub-regiones se presenta en el Cuadro 2. Las principales clases texturales fueron suelos arcillosos (88% de los sitios) y franco arcillosos (8.5% de los sitios). Se trata de suelos de textura fina.

En la Figura 2 se presenta la distribución del contenido de arena, limo y arcilla de los diferentes suelos. Alrededor del

89% de los suelos tiene un contenido de arcilla mayor al 40%, el 88% presenta un contenido de limo menor al 35% y el 90% de los suelos tiene una fracción de arena inferior al 31%. Es evidente que la parte física y química de esos suelos depende del alto contenido de arcilla.

Se encontró diferencia significativa ($p<0.05$) entre sub-regiones para todas las variables físicas analizadas. La sub-región V (Chisec) presentó el mayor contenido de arcilla, el menor valor de CC y de HA (Cuadro 3). Los valores más altos de HA se presentan en sub-regiones con menores valores en su contenido de arcilla.

La porosidad del suelo fue mayor en la sub-región X (Panzós y Santa Catalina la Tinta), la cual presenta el menor valor de Da. La sub-región VIII (Lanquín-Cahabón) presentó el mayor valor de Da y el menor valor de P del suelo.

Cuadro 2. Distribución de clases texturales en sitios bajo producción de cardamomo (n 154).

Subregión	Municipios	n	Clase Textural (%)					
			Arcillo Limoso	Franco Arcillo Limoso	Arcilloso	Franco Arcilloso	Arcillo Arenoso	Franco Arcillo Arenoso
I	Ixcán	16	0.0	0.0	9.7	0.7	0.0	0.0
II	Chajul y Nebaj	16	0.7	0.0	5.8	2.6	0.7	0.7
III	Cobán	18	0.0	0.0	11.7	0.0	0.0	0.0
IV	Uspantán y Chicamán	17	0.0	0.0	11.0	0.0	0.0	0.0
V	Chisec	10	0.0	0.0	6.5	0.0	0.0	0.0
VI	San Pedro Carchá	18	0.0	0.0	10.4	1.3	0.0	0.0
VII	Chahal y Fray Bartolomé de las Casas	12	0.0	0.0	7.8	0.0	0.0	0.0
VIII	Lanquín y Cahabón	15	0.0	0.0	9.7	0.0	0.0	0.0
IX	Senahú y Tamahú	22	0.0	0.7	9.1	3.9	0.0	0.7
X	Panzós y Santa Catalina la Tinta	10	0.0	0.0	6.5	0.0	0.0	0.0
		154	0.7	0.7	88.3	8.5	0.7	1.3

Cuadro 3. Distribución de los parámetros físicos¹ del suelo agrupados por subregión, estrato altitudinal y sistema agroforestal.

Subregión	Arcilla	Limo	Arena	CC	PMP	HA	P	Da
	%							
I	55.7 bc	24.8 bc	19.5 abc	53.4 bc	40.3 ab	13.1 a	61.5 abc	1.00 abc
II	42.6 d	29.7 ab	27.7 a	55.1 bc	37.7 b	17.4 a	67.0 ab	0.86 bc
III	63.5 ab	23.3 bc	13.2 cd	63.3 ab	49.2 ab	14.0 a	63.8 ab	0.94 bc
IV	60.5 ab	19.8 c	19.7 abc	64.5 ab	48.8 ab	15.7 a	62.2 abc	0.98 abc
V	71.1 a	19.9 c	8.9 d	50.4 c	40.3 ab	10.1 a	60.9 abc	1.02 abc
VI	56.2 bc	23.7 bc	20.1 abc	66.8 a	49.7 a	17.1 a	62.8 abc	0.97 abc
VII	57.5 bc	26.1 abc	16.4 bcd	51.5 c	41.0 ab	10.5 a	59.8 bc	1.04 ab
VIII	59.4 ab	30.0 bc	16.6 bcd	51.7 c	40.9 ab	10.8 a	55.7 c	1.16 a
IX	45.8 cd	24.1 ab	24.3 ab	54.4 bc	38.5 ab	16.0 a	64.0 ab	0.94 bc
X	52.8 bcd	33.5 a	13.7 cd	65.8 ab	48.1 ab	17.7 a	68.2 a	0.83
Altitud (msnm)								
< 600	61.1 a	23.4 b	15.4 b	51.0 b	40.4 b	10.6 b	59.9 b	1.04 a
600- 1200	55.7 a	25.0 b	19.3 b	60.6 a	44.9 ab	15.7 a	63.3 ab	0.95 b
> 1200	43.8 b	30.5 a	25.7 a	65.4 a	45.9 a	19.5 a	66.1 a	0.88 b
Sistema								
CL	56.6 a	24.7 a	18.7 a	58.4 a	44.2 ab	14.2 a	64.6 b	1.00 a
CP	56.0 a	24.4 a	19.6 a	61.9 a	47.6 a	14.3 a	66.0 a	0.88 b
CS	54.1 a	27.1 a	18.9 a	55.1 a	39.8 b	15.3 a	63.8 b	0.94 ab

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

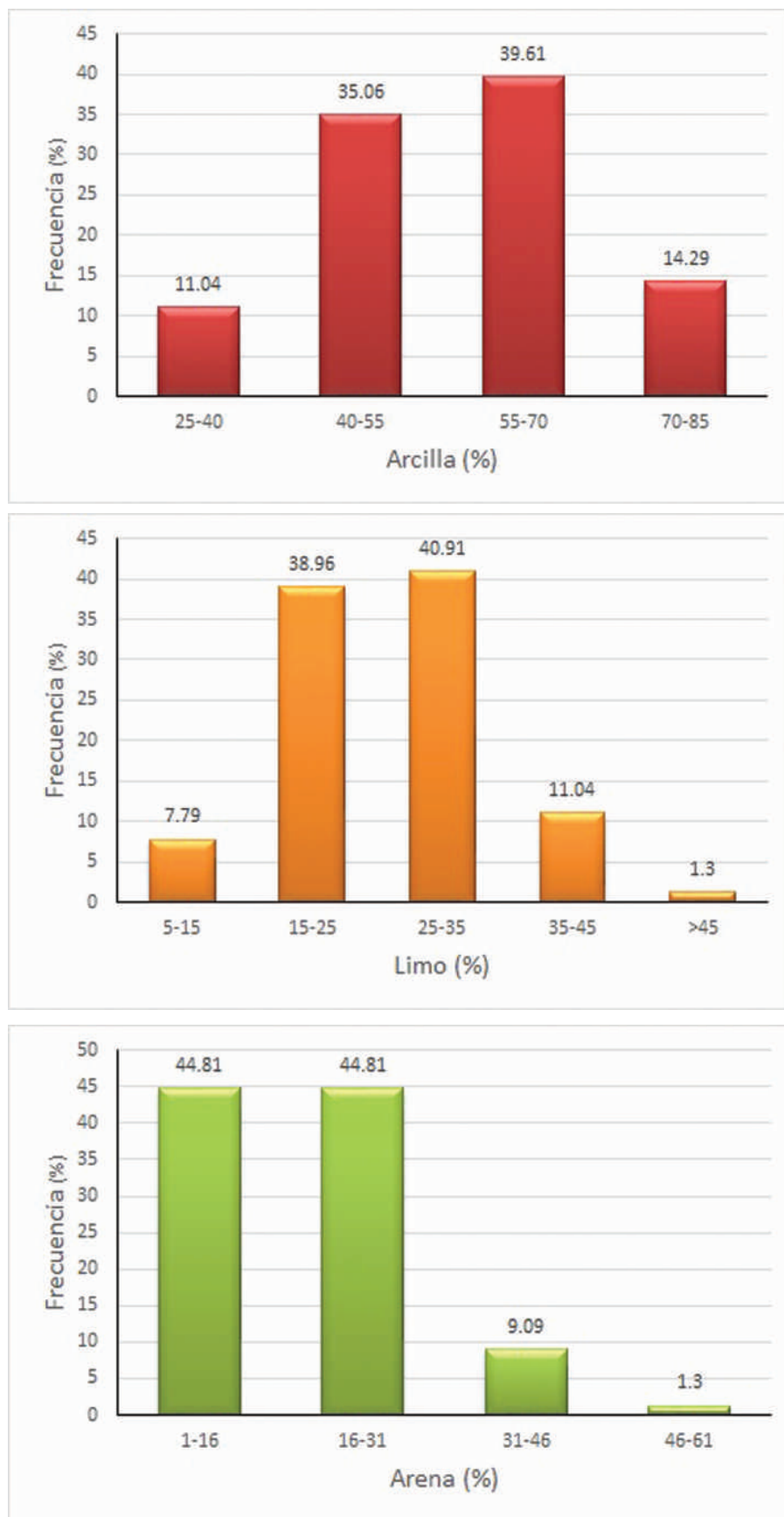


Figura 2. Distribución de la fracción de arena, limo y arcilla en sitios productores de cardamomo (n 154).

Cuadro 4. Coeficientes de correlación (r) de Pearson (verde) y probabilidad¹ (amarillo) de la relación entre las variables físicas del suelo.

	CC	PMP	HA	Da	% Arcilla	% Limo	% Arena
CC	1	0.00	0.00	1.2E-09	0.04	0.68	0.02
PMP	0.92	1	1.40E-10	5.50E-06	4.60E-06	0.15	4.40E-06
HA	0.79	0.5	1	1.90E-10	0.02	0.16	0.06
Da	-0.47	-0.36	-0.49	1	2.80E-03	6.10E-05	0.5
% Arcilla	0.17	0.37	-0.2	0.24	1	0	0
% Limo	-0.03	-0.12	0.12	-0.32	-0.6	1	0.87
% Arena	-0.19	-0.37	0.16	-0.06	-0.79	-0.01	1

1: Valores igual o menor a 0.05 son estadísticamente significativos.

El contenido de arcilla, limo y arena también varió en función de la altitud ($p < 0.05$). El contenido de arcilla fue estadísticamente mayor a menor altitud y los contenidos de limo y arena fueron menores en ese estrato (Cuadro 3). Aunque no fue estadísticamente significativo ($p > 0.05$), esto resultó en menor HA a < 600 msnm en comparación a los otros estratos de mayor altitud.

La producción de cardamomo bajo los diferentes sistemas agroforestales se lleva a cabo en suelos que presentaron un contenido similar de arcilla, limo y arena ($p > 0.05$) (Cuadro 3). Esto significa que la distribución del particular de suelo dependió principalmente del territorio y de la altitud en la cual se ubican las plantaciones de cardamomo.

De acuerdo a Krishnakumar y Potty (2002), el cardamomo prefiere suelos francos con buen drenaje y alto contenido de material orgánico. Los suelos de la región norte de Guatemala presentan un alto contenido de materia orgánica y los del sistema CL y CP también presentan un alto contenido de material orgánico, sin descomponer o parcialmente descompuesto, sobre la superficie del suelo. Sin embargo, la mayor parte de esos suelos presentan una textura fina, 88% son arcillosos, con un drenaje menos eficiente que el de los suelos francos.

La mayor parte de parámetros físicos del suelo están relacionados entre sí ($p < 0.05$) (Cuadro 4). Se determinó que la Da está inversamente relacionada con la CC (p 1.2E-09; r -0.47), PMP (p 5.5E-06; r -0.36) y HA (p 1.9E-10; r -0.49). Esto significa que a mayor Da, menor es el porcentaje de humedad aprovechable para las plantas.

Los parámetros de humedad del suelo también están relacionados con la fracción de arcilla y arena, pero no están relacionados con la fracción de limo. Los parámetros Da y

contenido de arcilla y arena pueden ser utilizados para estimar los valores de CC y PMP en suelos productores de cardamomo de la región mediante el desarrollo de un modelo de regresión múltiple.

Otros estudios también han proyectado estimaciones de la CC, el PMP y el HA con base en el valor de la Da 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 Da, los parámetros de humedad del suelo, la conductividad hidráulica y la clase textural entre otros atributos del suelo, a partir del porcentaje de arcilla y el porcentaje de arena del suelo. El sistema utiliza como modificadores los contenidos de materia orgánica, salinidad, pedregosidad y compactación del suelo (USDA, 2021).

Distribución de los parámetros químicos del suelo

El pH del suelo varió de 4.1 a 7.9. Aproximadamente el 93% de los suelos 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 45% de los suelos presentaron un valor de pH < 5.5 (2% menor a 4.5; 11% entre 4.5 y 5.0 y 32% entre 5.0 y 5.5). El 49% de las muestras está dentro del rango adecuado de pH recomendado para la mayoría de cultivos (pH 5.5 - 6.5), el 5.8% es relativamente neutro (pH 6.5-7.3) y el 0.7% es ligeramente alcalino (pH 7.3 - 7.9).

Algunos de los suelos con pH menor a 5.5 seguramente necesitarán medidas de corrección por acidez y Al^{3+} , y aquellos con pH ligeramente alcalino 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 97% 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.

El contenido de materia orgánica (Figura 3c) va de adecuado a alto para un 99% de los sitios (rango adecuado de material orgánica 3 a 6%). Esto es sumamente positivo debido al papel que juega la materia orgánica en la sostenibilidad y fertilidad de los suelos. El 20% de los suelos tiene una CICe adecuada, 37% presenta baja CICe y 43% tiene alta CICe (rango adecuado de CICe 10 a 15 Cmolc/kg) (Figura 3d).

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). El porcentaje de saturación de Al^{3+} varió de 0.1 a 87%. Los valores de saturación de Al^{3+} mayor al 50% 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 reportada en la literatura (Fassbender y Bornemisza, 1994; Bertsch, 1998).

Aproximadamente el 15% de los sitios presenta una saturación de Al^{3+} arriba del 20% (Figura 3e), por lo que deben ser corregidos con la aplicación de cal. En estos suelos, la parte química del suelo está controlada por el Al^{3+} . El rango adecuado a nivel general es < 20%.

Con relación a los macronutrientes P, K, Ca, Mg y S (Figura 4a, 4b, 4c, 4d y 4e, respectivamente) se aprecia que el 98.5% de los sitios son deficientes de P (rango adecuado 30 - 75 mg/kg), 20% es deficiente en K (rango adecuado 0.18 a 0.38 Cmol/kg), 27% es deficiente en Ca (rango adecuado 5 a 10 Cmol/kg), el 12% es deficiente en Mg (rango adecuado 0.82 a 2.08 Cmol/kg) y el 77% es deficiente en S (rango adecuado 10 - 100 mg/kg suelo).

La distribución de la relación entre las bases del suelo se presenta en la Figura 5. Se aprecia un exceso de Ca relativo a K en un 57% de los sitios (Figura 5a) (rango adecuado Ca/K de 5 - 25), 30% presenta más Mg relativo a K (Figura 5b) (rango adecuado Mg/K de 2.5 a 10), 24% presenta más Ca relativo a Mg (Figura 5c) (rango adecuado 2 a 5) y 48% de los sitios presentan más Ca + Mg en su relación con K (Figura 5d) (rango adecuado (Ca+Mg) /K 10 a 40). De estos elementos, potasio es el elemento limitante por lo que hay que considerar su aplicación independientemente del nivel disponibilidad extraído en el laboratorio.

De los micronutrientes Cu, Fe, Mn, Zn y B (Figura 6a, 6b, 6c, 6d y 6e, respectivamente), el 5% de los sitios es deficiente en Cu (rango adecuado 1 a 10 mg/kg), 8% es deficiente en Fe (rango adecuado 40 a 250 mg/kg), 15% es deficiente en Mn (rango adecuado 10 a 250 mg/kg), 36% es deficiente en Zn (rango adecuado 2 a 25 mg/kg) y el 99% es deficiente en B (rango adecuado 1 a 5 mg/kg).

Al comparar los valores de varios parámetros de suelo encontrados en este estudio con los valores reportados por Krishnakumar y Potty (2002) en la India, coincide en que la producción de cardamomo se realiza en suelos ácidos, bajo contenido de P y alta capacidad de fijación de P, así como un porcentaje importante de suelos con bajo contenido de S, Zn y B extraíble. A pesar de que en la India se reportan suelos con alto contenido de K, es importante tomar en cuenta la relación de dicho elemento con los niveles de Ca y Mg del suelo. El 20% de nuestros suelos presenta bajo nivel de K y el 80% van de adecuado a alto contenido de K. Sin embargo, cuando se relaciona el nivel de K con Ca y Mg, se observó que el K es limitante y que se debe considerar su aplicación.

Efecto de la sub-región, el sistema agroforestal y el rango altitudinal

Se realizó el análisis de varianza para comparar los parámetros de suelo entre las diferentes subregiones. Se encontró diferencia estadísticamente significativa para casi todos los parámetros evaluados ($p < 0.05$). En el caso de Zn y la relación Ca/Mg, no se encontró diferencia significativa entre subregiones ($p > 0.05$). La comparación múltiple de medias para cada parámetro de las diferentes regiones se presenta en el Cuadro 5.

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

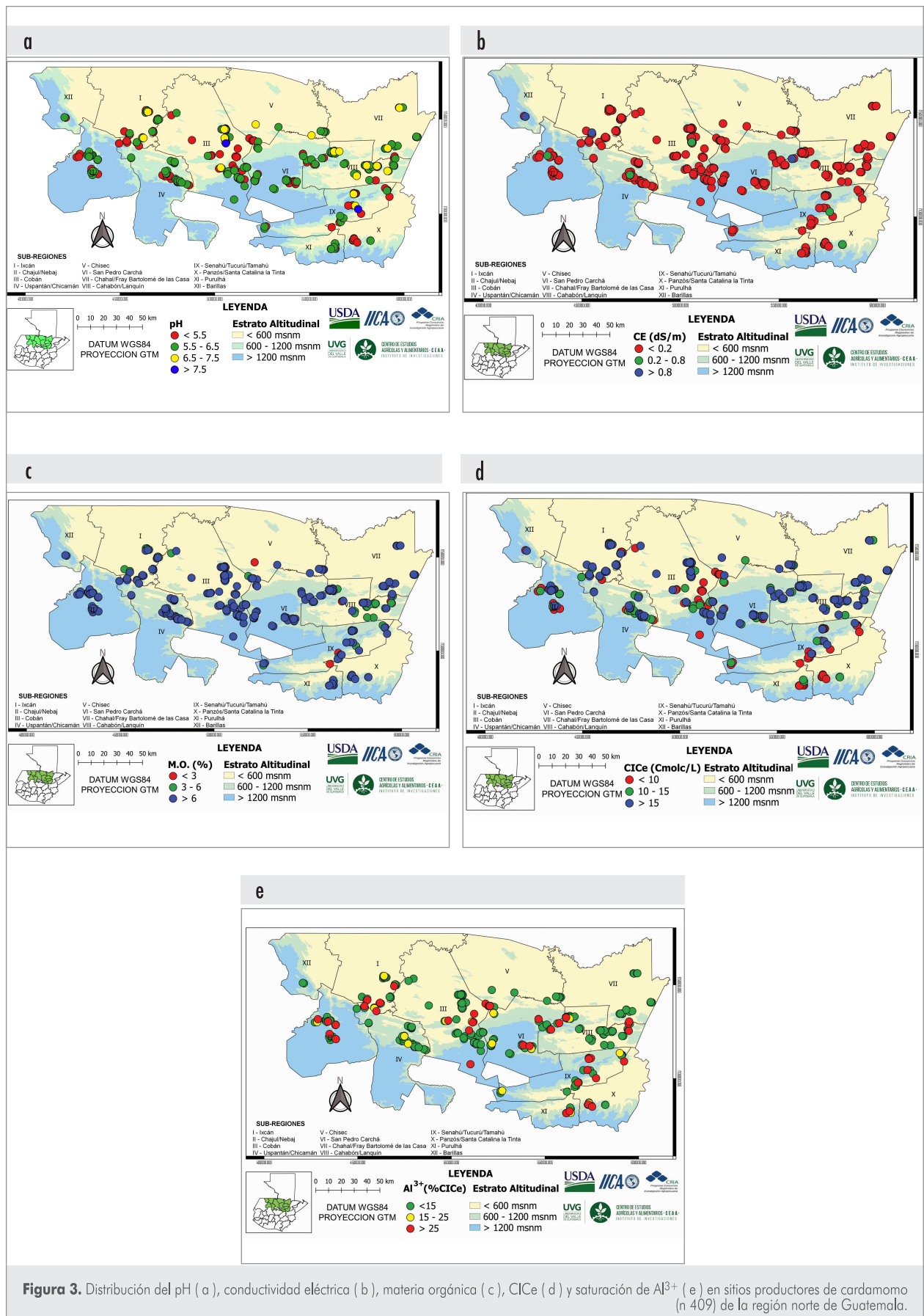


Figura 3. Distribución del pH (a), conductividad eléctrica (b), materia orgánica (c), CICe (d) y saturación de Al³⁺ (e) en sitios productores de cardamomo (n 409) de la región norte de Guatemala.

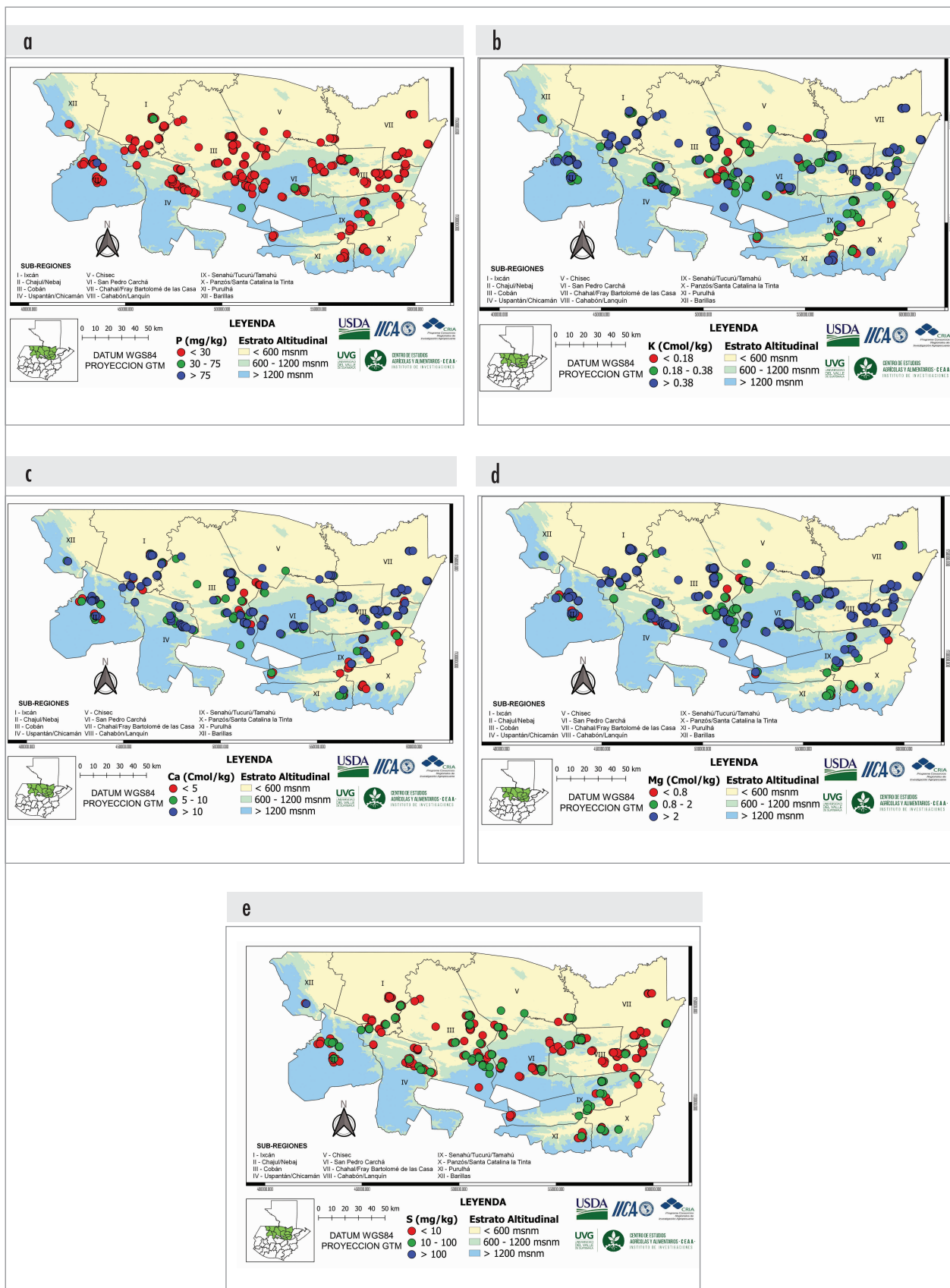


Figura 4. Distribución de P (a), K (b), Ca (c), Mg (d) y S (e) disponible en sitios productores de cardamomo (n 409) de la región norte de Guatemala.

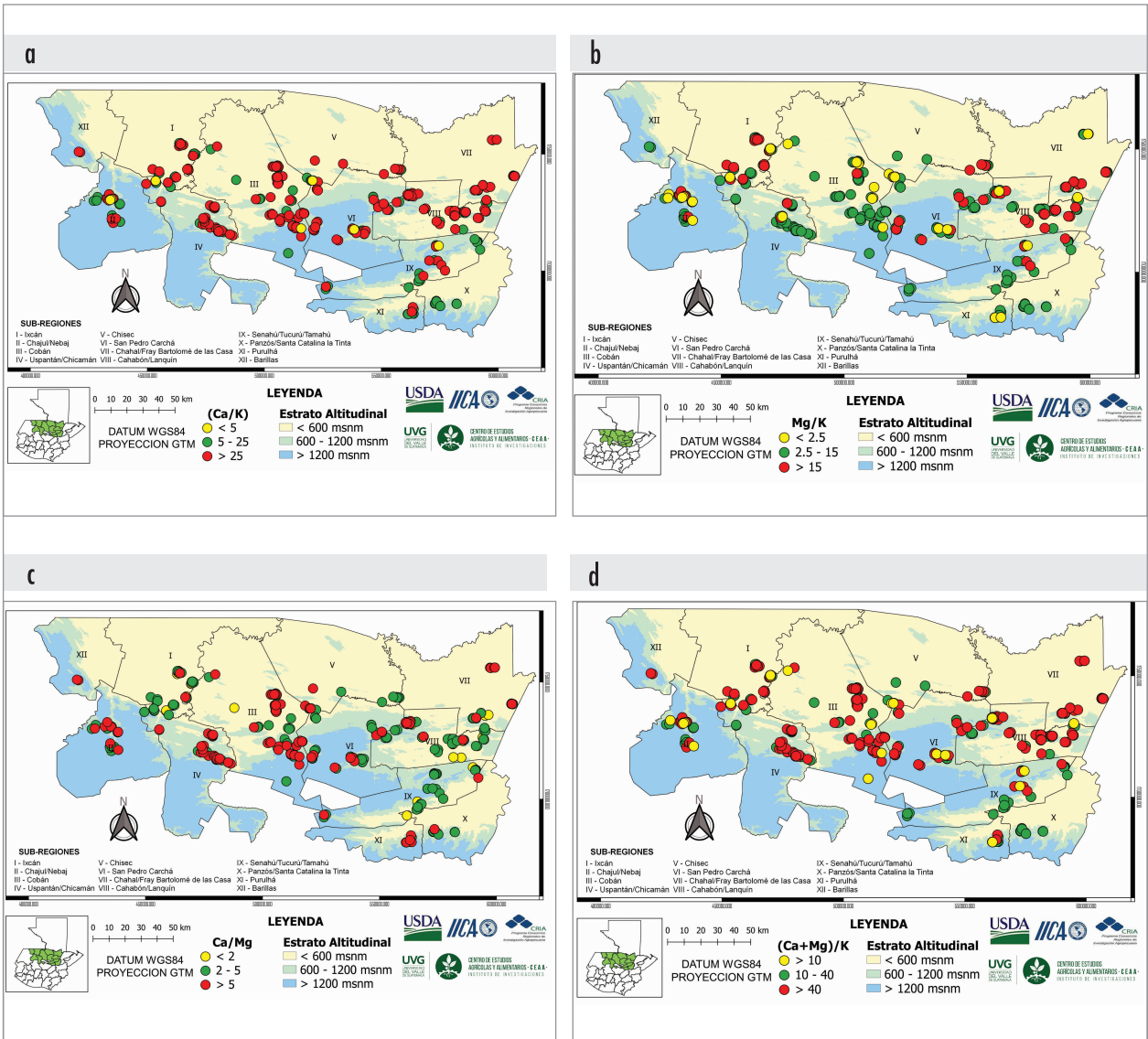


Figura 5. Distribución de las relaciones entre las bases del suelo Ca/K (a), Mg/K (b), Ca/Mg (c) y (Ca+Mg)/K (d) en sitios productores de cardamomo (n 409) de la región norte de Guatemala.

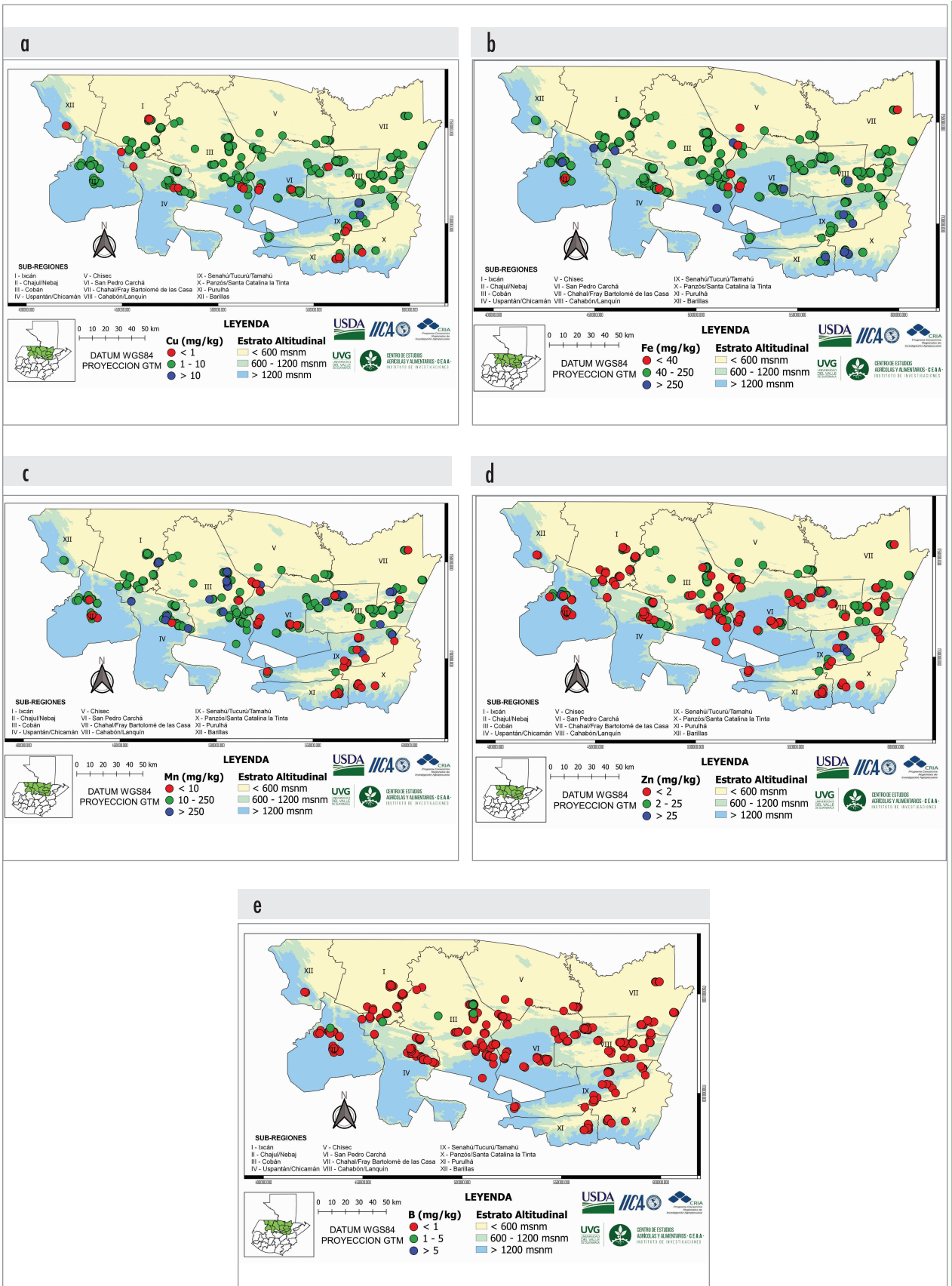


Figura 6. Distribución del contenido de Cu (a), Fe (b), Mn (c), Zn (d) y B (e) en sitios productores de cardamomo (n 409) de la región norte de Guatemala.

Cuadro 5. Comparación múltiple de medias¹ para las diferentes variables de suelo según subregión de producción de cardamomo.

Subregión	Municipio	Parámetro de suelo						
		pH	CE	MO	CiCe	Al ³⁺	P	K
I	Ixcán	5.3 b	0.09 b	6.94 b	17.8 abcd	13.8 ab	4.4 b	0.40 ab
II	Chajul y Nebaj	5.4 b	0.12 b	11.02 a	14.0 bcde	11.8 ab	7.2 ab	0.52 a
III	Cobán	5.5 b	0.08 b	8.87 ab	16.4 bcde	9.7 ab	2.0 b	0.30 bc
IV	Uspantán y Chicamán	5.5 b	0.08 b	9.34 ab	12.5 cde	3.6 b	1.5 b	0.26 bc
V	Chisec	6.3 a	0.10 b	9.45 ab	21.4 abc	0.3 b	4.2 b	0.53 a
VI	San Pedro Carchá	5.5 b	0.08 b	10.93 a	13.0 cde	8.5 ab	4.4 b	0.29 bc
VII	Chahal y Fray Bartolomé de las Casas	6.1 a	0.09 b	9.76 ab	28.9 a	0.6 b	3.8 b	0.57 a
VIII	Cahabón y Lanquín	5.8 ab	0.10 b	7.47 b	24.7 ab	5.4 b	4.6 b	0.54 a
IX	Senahú y Tamahú	5.4 b	0.09 b	7.71 b	8.0 de	13.5 ab	6.6 b	0.23 bc
X	Panzós y Santa Catalina la Tinta	5.3 b	0.08 b	9.74 ab	5.9 e	21.1 a	2.0 b	0.23 bc
XI	Purullhá	5.4 b	0.06 b	9.15 ab	6.2 e	13.0 a	2.5 b	0.24 bc
XII	Barillas	5.5 b	0.52 a	6.99 b	10.3 cde	10.8 b	16.0 a	0.34 bc
Subregión	Municipio	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
I	Ixcán	10.4 bcd	4.96 abc	4.8 c	1.96 bc	130.5 bcd	71.1 bcd	2.33 a
II	Chajul y Nebaj	10.1 bcd	2.58 cd	7.6 bc	2.39 abc	113.0 bcd	64.6 bcd	4.71 a
III	Cobán	10.1 bcd	2.22 cd	8.0 bc	2.56 abc	82.7 d	103.5 abc	3.21 a
IV	Uspantán y Chicamán	10.4 bcd	1.75 d	5.6 bc	2.4 abc	90.9 cd	120.9 ab	3.6 a
V	Chisec	17.5 ab	3.32 bcd	8.7 bc	3.8 a	85.7 d	184.8 a	5.16 a
VI	San Pedro Carchá	9.7 cd	2.21 cd	7.7 bc	2.14 bc	82.9 d	39.2 bcd	2.37 a
VII	Chahal y Fray Bartolomé de las Casas	22.2 a	5.99 ab	5.1 c	3.31 ab	116.9 bcd	122.4 ab	3.98 a
VIII	Cahabón y Lanquín	16.9 abc	6.69 a	6.0 bc	3.98 a	140.5 abc	98.2 bcd	5.47 a
IX	Senahú y Tamahú	4.8 d	2.17 cd	14.0 b	3.52 ab	107.8 cd	84.2 bcd	6.86 a
X	Panzós y Santa Catalina la Tinta	3.7 d	0.86 d	9.8 bc	1.69 c	166.0 ab	13.7 d	2.21 a
XI	Purullhá	4.5 d	0.91 d	5.8 bc	1.48 c	95.6 cd	27.1 cd	3.34 a
XII	Barillas	7.4 d	1.72 d	29.4 a	1.49 c	191.9 a	87.8 bcd	1.59 a
Subregión	Municipio	B	Ca/K	Mg/K	Ca/Mg	(Ca+Mg)/K		
I	Ixcán	0.36 abc	28.6 abc	12.9 ab	2.77 a	41.5 abc		
II	Chajul y Nebaj	0.36 abc	26.2 abc	6.6 bc	4.13 a	32.7abc		
III	Cobán	0.5 abc	37.7 abc	7.7 abc	8.24 a	45.4abc		
IV	Uspantán y Chicamán	0.32 c	42.4 ab	7.4 abc	6.57 a	49.8 ab		
V	Chisec	0.34 bc	42.6 ab	8.1 abc	5.75 a	50.8 ab		
VI	San Pedro Carchá	0.28 c	41.1 ab	9.5 abc	5.12 a	50.6 ab		
VII	Chahal y Fray Bartolomé de las Casas	0.52 abc	44.7 a	12.1 abc	4.36 a	56.8 a		
VIII	Cahabón y Lanquín	0.4 abc	38.8 ab	15.3 a	3.62 a	54.1 a		
IX	Senahú y Tamahú	0.32 c	21.3 bc	9.3 abc	2.63 a	30.5 abc		
X	Panzós y Santa Catalina la Tinta	0.61 a	16.7 c	4.6 c	4.41 a	20.5 c		
XI	Purullhá	0.29 c	21.6 bc	4.0 c	5.67 a	25.7 bc		
XII	Barillas	0.59 ab	25.9 abc	5.5 bc	4.33 a	31.4 abc		

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

Cuadro 6. Comparación múltiple de medias¹ de los parámetros de suelo agrupados según sistema agroforestal

Sistema	n	pH	dS/m	% MO	CICe (dS/m)	%Sat. Al
CL	318	5.6 ± 0.57 a	0.1 ± 0.12 a	8.94 ± 2.95 a	16.57 ± 10.65 a	8.15 ± 14.73 a
CP	15	5.32 ± 0.29 b	0.07 ± 0.04 a	8.31 ± 2.89 a	14.09 ± 23.8 a	11.97 ± 13.62 a
CS	61	5.74 ± 0.62 ab	0.09 ± 0.05 a	8.88 ± 3.22 a	15.72 ± 15.6 a	9.71 ± 17.14 a
Media		5.6 ± 0.58	0.09 ± 0.11	8.9 ± 2.96	16.04 ± 12.15	8.65 ± 14.96

Sistema	n	Fósforo mg/L	Potasio Cmol/kg	Calcio Cmol/kg	Magnesio Cmol/kg	Azufre mg/L
CL	318	4.11 ± 9.1 a	0.4 ± 0.41 a	11.9 ± 8.36 a	3.54 ± 3.53 a	7.55 ± 8.66 a
CP	15	4.81 ± 7.53 a	0.19 ± 0.05 a	5.14 ± 2.55 b	1.55 ± 0.75 b	9.6 ± 13.45 a
CS	61	4.26 ± 6.73 a	0.37 ± 0.25 a	10.28 ± 8.23 ab	2.66 ± 2.27 ab	8.09 ± 8.21 a
Media		4.11 ± 8.63	0.38 ± 0.38	11.17 ± 8.26	3.28 ± 3.33	7.7 ± 8.7

Sistema	n	Cobre mg/L	Hierro mg/L	Manganeso mg/L	Cinc mg/L	Boro mg/L
CL	318	2.82 ± 1.64 a	109.06 ± 53.51 a	94.32 ± 84.63 a	4.11 ± 7.12 a	0.37 ± 0.25 a
CP	15	2.72 ± 2.56 a	92.61 ± 35.37 a	37.93 ± 39.75 b	2.13 ± 2.18 a	0.37 ± 0.25 a
CS	61	2.73 ± 1.64 a	111.58 ± 65.86 a	98.07 ± 110.32 a	4.11 ± 4.14 a	0.43 ± 0.3 a
Media		2.77 ± 1.66	108.29 ± 54.71	90.78 ± 88.22	4.03 ± 6.66	0.38 ± 0.26

Sistema	n	Ca/K	Mg/K	Ca/Mg	(Ca+Mg)/K
CL	318	35.66 ± 22.49 a	10 ± 8.7 a	4.53 ± 2.73 a	45.66 ± 27.93 a
CP	15	29.43 ± 21.15 a	8.3 ± 4.36 a	4.62 ± 4.17 a	37.73 ± 23.71 b
CS	61	29.26 ± 19.87 a	7.44 ± 5.24 a	7.29 ± 20.44 a	36.54 ± 22.68 b
Media		33.99 ± 21.96	9.45 ± 8.14	4.93 ± 8.3	43.42 ± 27.02

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

En el Cuadro 6 se presentan los resultados agrupados según el sistema agroforestal. Se encontró diferencia estadísticamente significativa ($p < 0.05$) únicamente para los parámetros pH, Ca, Mg y Mn.

Los suelos del sistema CP presentan menor valor de pH y menor contenido de las bases del suelo (K, Ca y Mg) que los sistemas CS y CL. La reducción del pH puede ser producto de la pérdida de las bases del suelo K, Ca y Mg en dicho sistema. Esto se refleja en el incremento del porcentaje de saturación de Al^{3+} en el complejo de cambio del suelo del sistema CP. La reducción de pH también corresponde a una reducción de la CICe del sistema. El resto de variables fueron estadísticamente igual entre sistemas agroforestales,

posiblemente porque se requiere de un mayor tiempo para ver diferencias.

En el Cuadro 7 se presentan los resultados agrupados por altitud. Se encontró diferencia estadísticamente significativa entre rangos altitudinales ($p < 0.05$) para la mayor parte de parámetros analizados. Los valores de conductividad eléctrica, % de saturación de Al^{3+} así como el contenido de P y Zn son estadísticamente iguales ($p > 0.05$).

A mayor altitud el suelo tiende a ser un poco más ácido, con mayor materia orgánica, menor CICe, menor contenido de K, Ca y Mg extraíbles, y como consecuencia el % de saturación de Al^{3+} se incrementó. El contenido de los micronutrientes Cu, Fe, Mn y Zn también es menor a mayor altitud.

Cuadro 7. Comparación múltiple de medias¹ para los diferentes parámetros de suelo según rango altitudinal.

Rango Altitudinal	Parámetro de suelo						
	pH	CE	MO	CICe	Al ³⁺	P	K
< 600	5.9 a	0.09 a	7.7 c	20.7 a	8.4 a	4.8 a	0.47 a
600 - 1200	5.6 ab	0.10 a	9.5 b	13.7 b	7.7 a	4.6 a	0.41 ab
> 1200	5.4 b	0.10 a	11.1 a	11.5 b	13.9 a	3.1 a	0.31 b
	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn
< 600	14.4 a	5.0 a	8.9 a	3.2 a	123.3 a	105.9 a	4.0 a
600 - 1200	9.5 b	2.2 b	6.4 b	2.6 a	100.7 b	92.3 b	4.4 a
> 1200	8.2 b	2.0 b	6.1 b	1.9 b	98.6 b	39.6 b	2.5 a
	B	Ca/K	Mg/K	Ca/Mg	(Ca+Mg)/K		
< 600	0.44 a	33.9 a	11.7 a	3.8 b	45.6 a		
600 - 1200	0.34 b	36.0 a	8.4 b	6.0 a	44.3 ab		
> 1200	0.40 a	27.9 a	6.7 b	4.5 b	34.6 b		

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

Tomando en cuenta que las sub-regiones I, III, VII, VIII, IX y X compartieron las altitudes <600 y 600-1200 msnm, se realizó un análisis para ambos factores y para su interacción.

Se encontró diferencia significativa ($p < 0.05$) para la interacción de los factores en los parámetros MO, P, Mg, Cu, Fe, Mn y B. Esto significa que el valor de esos parámetros no solo depende de la subregión sino también de la altitud dentro de cada subregión. Esto es importante para la generación de recomendaciones de fertilización para los diferentes territorios productores de cardamomo del norte del país.

Los parámetros pH, CICe, saturación de Al³⁺ y S dependieron únicamente de la subregión. Los valores de CE y Zn son estadísticamente iguales y son independientes de la región, altitud y sistema agroforestal.

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 Al³⁺ 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 Al³⁺ en el complejo de intercambio catiónico del suelo (r^2 0.70). La reducción del pH del suelo resulta 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 Al³⁺ (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 Al³⁺ y dentro de ellos mismos.

Fijación de P y K

La determinación del porcentaje de fijación de P y K se llevó a cabo utilizando 99 muestras de suelo de la profundidad 0-20 cm. Los valores de fijación de P y K variaron de 46.7 a 94.6% para P y de 32.6 a 76.7% para K.

De acuerdo con el análisis de varianza para cada factor en forma independiente, hay diferencia altamente significativa para el % de fijación de P entre subregiones (p 0.0001) pero no para el porcentaje de fijación de K ($p > 0.05$). El mayor valor de fijación de P se presentó en la subregión VI (San Pedro Carchá) (Cuadro 8). El porcentaje de fijación de P y K no mostró ninguna relación con el sistema agroforestal, en tanto que solo la fijación de K varió estadísticamente con la altitud.

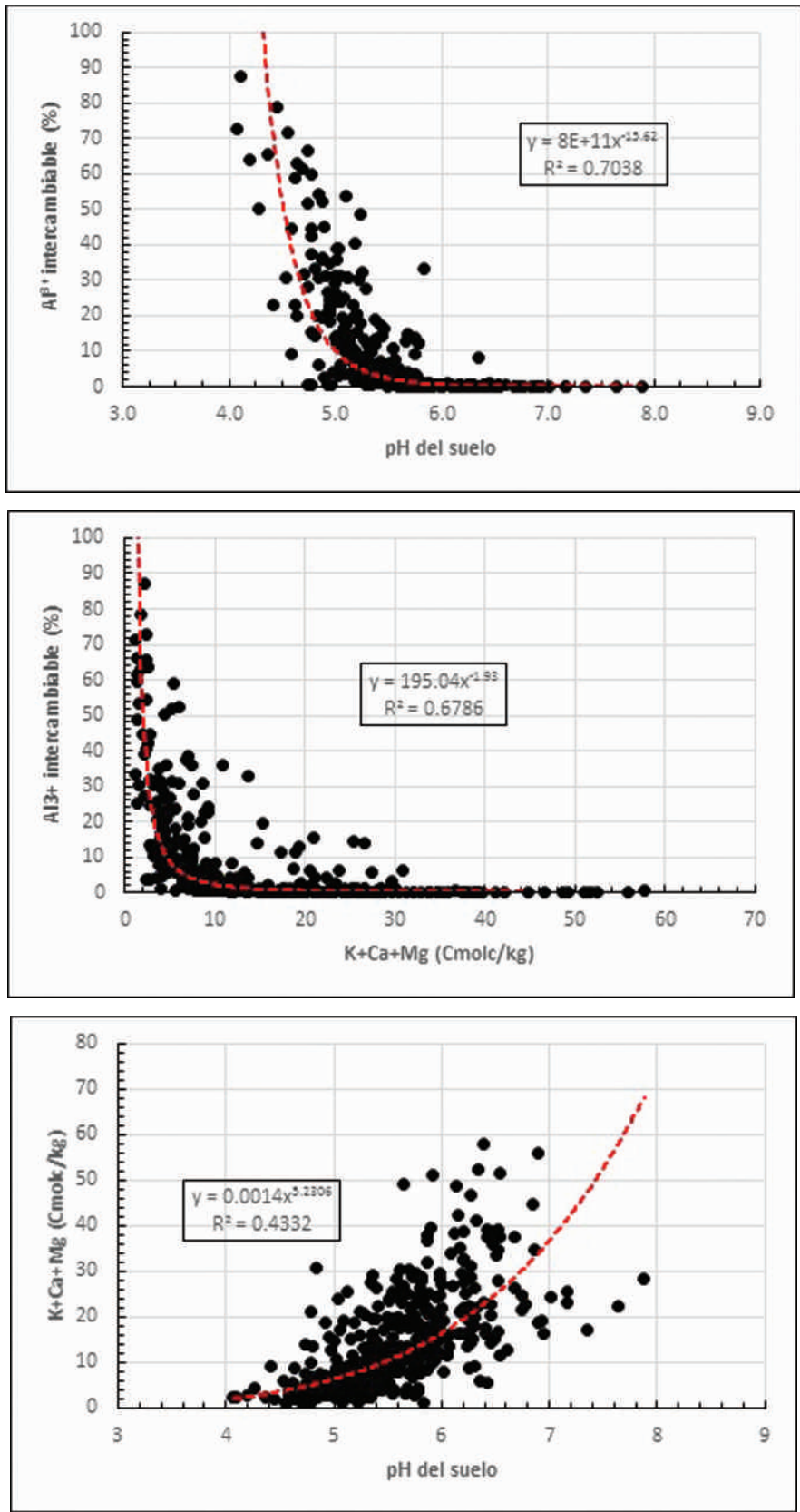


Figura 7. Relación entre el pH, Al³⁺ y las bases del suelo K, Ca y Mg (n 409).

El alto valor de fijación de P y K implica que para la elaboración de los programas de fertilización del cardamomo 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 9 se presenta un resumen de los principales elementos a ser tomados en cuenta en cada subregión 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 subregión 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 cardamomo son clave para el incremento de la productividad y la calidad del cardamomo. Estudios realizados en cardamomo grande (*Amomum subulatum*; Zingiberaceae) en la India indican el

efecto positivo de la fertilización foliar de Borax-0.5% más aplicación de 2.5 kg/ha de Borax al suelo sobre la producción de cápsulas de cardamomo (Gudade et al., 2016). También se reporta que la aplicación de Mg, Zn y Mn al suelo incrementa el crecimiento y contenido nutricional en las hojas de cardamomo grande a la par de mejorar su disponibilidad en el suelo (Gudade et al., 2018).

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 2e. 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.

Como resultado de este estudio se sugiere que el enfoque para la generación de los planes de nutrición del cardamomo debe ser nivel de subregión. El efecto de la altitud, el cual es significativo, debe continuar explorándose dentro de las subregiones que presentan diferentes estratos altitudinales a efecto de incrementar el número de muestras de suelo analizadas y tomar las decisiones correctas en la elaboración de los diferentes programas.

Cuadro 8. Comparación múltiple de medias¹ para el porcentaje de fijación de P y K (n 99).

	Fijación (%)	
	P	K
Efecto de la subregión		
I. Ixcán	79.47 ± 3.91 abc	54.16 ± 7.91 a
II. Chajul - Nebaj	79.72 ± 7.60 abc	52.23 ± 5.90 a
III. Cobán	83.40 ± 7.22 abc	52.63 ± 8.58 a
IV. Uspantán - Chicamán	85.36 ± 2.74 ab	51.78 ± 4.78 a
V. Chisec	81.39 ± 3.29 abc	54.40 ± 3.23 a
VI. San Pedro Carchá	87.90 ± 4.08 a	48.67 ± 9.96 a
VII. Chahal - FBLC	83.68 ± 3.00 abc	52.17 ± 12.44 a
VIII. Lanquín - Cahabón	83.97 ± 7.51 abc	58.36 ± 12.88 a
IX. Senahú - Tamahú	73.71 ± 10.25 bc	47.46 ± 9.78 a
X. Panzós - SCLT	83.26 ± 3.83 abc	59.01 ± 13.54 a
XI. Purulhá	72.98 ± 15.58 bc	51.45 ± 6.79 a
XII. Barillas	70.24 ± 14.82 c	52.89 ± 13.62 a
Efecto de la altitud (msnm)		
< 600	78.91 ± 8.41 a	55.74 ± 9.06 a
600-1200	81.80 ± 8.10 a	50.29 ± 9.40 b
> 1200	80.61 ± 11.87 a	51.25 ± 7.66 b
Efecto del sistema agroforestal		
Latifoliado	81.91 ± 8.42 a	51.64 ± 8.92 a
Pino	79.83 ± 9.98 a	55.01 ± 11.57 a
Sol	79.46 ± 9.18 a	51.17 ± 8.91 a

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

		pH	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Mn	Zn	B	Ca/K	Mg/K	Ca/Mg	(Ca-Mg)/K
I	Ixcán	5.3												K			K
II	Chajul_Nebaj	5.4												K			
III	Cobán	5.5												K			K
IV	Uspantán_Chicaman	5.5												K			K
V	Chisec	6.3												K			K
VI	San Pedro Carchá	5.5												K			K
VII	Chahal_FBC	6.1												K			K
VIII	Cahabón_Lanquín	5.8												K			K
IX	Senahú_Tamahú	5.4															
X	Panzós_SC la Tinta	5.3															
XI	Purulhá	5.4															
XII	Barillas	5.5												K			

Cuadro 9. Resumen general de nutrientes a tomar en cuenta (rojo y amarillo) para su aplicación como parte del programa de fertilización según subregión.

Cuadro 10. Cantidad de elementos mayores y menores requeridos para producir 1 tonelada de cardamomo seco por hectárea.

Subregión	Municipios	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	CaO	MgO	S
		kg/ha					
I	Ixcán	30.6	26.9	95.9	10.5	7.7	1.2
II	Chajul - Nebaj	32.6	34.2	77.5	9.0	15.4	1.3
III	Cobán	33.2	42.8	106.7	10.5	14.7	1.5
IV	Uspantán - Chicamàn	33.0	33.2	91.5	10.3	13.6	1.5
V	Chisec	32.4	22.6	82.4	12.9	9.3	1.5
VI	San Pedro Carchá	33.2	76.4	91.1	9.5	15.9	1.3
VII	Chahal - FBC	31.0	33.3	109.9	11.0	10.0	1.5
VIII	Cahabón - Lanquín	33.0	49.8	170.8	10.8	11.6	1.3
IX	Senahú - Tamahú	31.8	31.5	80.8	6.9	18.1	1.2

Subregión	Municipios	B ₂ O ₃	Cu	Fe	Mn	Zn
		g/ha				
I	Ixcán	54.9	9.9	284.1	1165.3	72.3
II	Chajul - Nebaj	68.7	11.6	243.7	911.5	92.1
III	Cobán	47.2	10.8	308.1	904.4	84.8
IV	Uspantán - Chicamàn	78.1	13.1	290.8	948.3	109.3
V	Chisec	78.9	10.4	794.8	414.1	74.1
VI	San Pedro Carchá	66.5	11.7	282.4	648.4	69.5
VII	Chahal - FBC	68.3	12.0	202.3	408.9	73.1
VIII	Cahabón - Lanquín	43.3	11.3	253.6	507.2	74.9
IX	Senahú - Tamahú	54.5	10.3	190.0	645.7	79.3

En un estudio paralelo también se determinó la acumulación de nutrientes en las cápsulas de cardamomo en algunas subregiones. 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 cardamomo pergamino se presenta

en el Cuadro 10. 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.

CONCLUSIONES

- Los parámetros físicos del suelo variaron principalmente entre subregiones y en función del estrato altitudinal. El efecto del sistema agroforestal fue mínimo.
- El 88% de los sitios analizados presentaron una textura arcillosa, el 8.5% son franco arcilloso y el 5% se distribuyó entre las texturas arcillo-limoso (0.65%), franco arcillo limoso (0.65%), arcillo arenoso (0.65%) y franco arcillo arenoso (1.3%).
- Los sitios ubicados a < 600 msnm presentaron mayor contenido de arcilla, menor contenido de arena y limo, > Da y < HA que los sitios ubicados a mayor altitud.
- Los parámetros % de arcilla, % de arena y Da podrían ser utilizados para construir un modelo predictivo de la CC, PMP y la HA de los suelos bajo producción de cardamomo de la región.
- El estado de la fertilidad de los suelos de las plantaciones de cardamomo de la región norte dependió principalmente de la sub-región y del estrato altitudinal. El efecto del sistema agroforestal sobre la mayor parte de parámetros químicos del suelo no fue estadísticamente significativo. Esto indica que un programa generalizado para el manejo nutricional del cultivo no sería funcional.
- A mayor altitud, el suelo tiende a ser un poco más ácido, con mayor contenido de MO, menor CICE, menor contenido de K, Ca, Mg y S extraíbles, mayor saturación de Al^{3+} y menor contenido de Cu, Fe, Mn y Zn.
- Los suelos bajo el sistema CP presentaron menor valor de pH, y menor contenido de las bases del suelo K, Ca y Mg que los sistemas CL y CS.
- Los parámetros de suelo pH, K, Ca, Mg y saturación de Al^{3+} están significativamente relacionados y deben ser tomado 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 subregiones 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 (70 a 87%) y mediana capacidad de fijación de K (47-59%). El porcentaje de fijación de P varió significativamente entre subregiones, pero no entre estratos altitudinales y entre sistemas agroforestales.
- Los sitios ubicados a < 600 msnm presentaron una mayor capacidad de fijación de K (56%) con relación a los sitios de mayor altitud.
- En promedio, físicamente los suelos bajo producción de cardamomo de la región norte de Guatemala son suelos de textura fina, 88% son suelos arcillosos, CC $57.68 \pm 14.19\%$, PMP $43.84 \pm 10.02\%$, HA $13.75 \pm 6.30\%$, P $63.25 \pm 4.35\%$ y Da 0.96 ± 0.11 g/cc.
- El valor medio, de los parámetros químicos de suelo fueron: pH 5.60 ± 0.58 , CE 0.09 ± 0.11 dS/m, M.O 8.90 ± 2.96 %, CICE 16.04 ± 12.15 Cmolc/kg, Sat. Al^{3+} 8.65 ± 14.96 %, P 4.11 ± 8.63 mg/kg, K 0.38 ± 0.38 Cmol/kg, Ca 11.17 ± 8.26 Cmol/kg, Mg 3.28 ± 3.33 Cmol/kg, S 7.70 ± 8.70 mg/kg, Cu 2.77 ± 1.66 mg/kg, Fe 108.29 ± 54.71 mg/kg, Mn 90.78 ± 88.22 mg/kg, Zn 4.03 ± 6.66 mg/kg y B 0.38 ± 0.26 mg/kg. El valor medio de las relaciones de las bases es: Ca/K 33.99 ± 21.96 , Mg/K 9.45 ± 8.14 , Ca/Mg 4.93 ± 8.30 y (Ca+Mg)/K 43.42 ± 27.02 .
- Los parámetros limitantes del suelo en la mayor parte de subregiones son N, P, K, S y B. En el 15% de los sitios se determinó una saturación de Al^{3+} >20% debido al bajo pH del suelo (<5.5), por lo que se deben tomar acciones para reducir la acidez del suelo y reducir la acumulación de Al^{3+} en el complejo de intercambio.
- Se sugiere diseñar programas de nutrición vegetal a nivel de subregión y continuar generando datos en función del estrato altitudinal a fin de tomar las decisiones correctas en la elaboración de los diferentes programas.

AGRADECIMIENTOS

A los productores de cardamomo que apoyaron el estudio con la información sobre el manejo de sus plantaciones, así como el aporte de las muestras de suelo.

A las técnicas y técnicos de la Asociación de Exportadores de Cardamomo (ADECAR) que fueron un vínculo importante con líderes y productores que participaron en el estudio, así como parte crucial de la colecta de las 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-043-2018), 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

- Bertsch, F. (1998). La fertilidad de los suelos y su manejo. Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo. San José, C.R.
- Boul, S.W., F.D. Hole y R.J. McCracken. (1983). Génesis y clasificación de suelos. Editorial Trillas. Primera reimpresión. México.
- Carter, M.R. y E.G. Gregorich. (2008). Soil Sampling and Methods of Analysis. 2nd. Ed. Canadian Society of Soil Science.
- Chicas-Soto, R.A., E.A. Vanegas y N. García. (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.
- Díaz-Romeu, R y A. Hunter. (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.
- Escobar, J. R. (1986). Caracterización del sub-sistema suelo-planta en cardamomo (*Elettaria cardamomum* M.), en la finca San Francisco Miramar, Colomba, Quetzaltenango. Tesis Ing. Agr. Facultad de Agronomía. USAC.
- Fassbender, H.W. y E. Bornemisza. (1994). Química de suelos con énfasis en suelos de América Latina. IICA. Costa Rica.
- González Martínez, W. H. (2013). Aspectos generales sobre la génesis y evolución de los suelos de la república de Guatemala. En Memoria Presentación de resultados de investigación. Zafra 2012-2013. CENGICAÑA. Guatemala. pp. 359-372.
- Gudade, B.A., S. Babú, S.S. Bora, K. Dhanapal y R. Singh. (2016). Effect of boron on growth, nutrition and fertility status of large cardamom in Sikkim Himalaya India. Journal of Applied and Natural Science 8(2):822-825.
- Gudade, B.A., A.B. Aage, S. Babú, A. Gautam, K. Dhanapal, S.S. Bora y A.B. Remashree. (2018). Soil application of Mg, Zn and Mn: Effects of growth, nutrient content and soil fertility status of large cardamom in North East, India. Indian Journal of Hill Farming 31(1):202-206.
- 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. Estados Unidos de América.
- 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.
- ISO 10390:2005. Soil Analysis Determination of pH.
- Kamprath, E.J. (1984). Crop response to lime on soils in the tropics. En: Soil Acidity and Liming. F. Adams (ed). Agronomy No. 12. ASA, Inc., CSSA, Inc and SSSC, Inc. pp. 349-368 Madison, WI. Estados Unidos de América.
- Krishnakumar, V. y S.N. Potty. (2002). Nutrition of cardamom. En: Cardamom: The genus *Elettaria*. Ravindran, P.N. and K.J. Madhusoodanan (Ed.). Taylor & Francis, Inc. pp. 129-142. New York, Estados Unidos de América.
- MAGA. (2016). El agro en cifras. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación de Guatemala, MAGA.
- MAGA. (2005). Mapa de clasificación taxonómica de suelos: primera aproximación, República de Guatemala. Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación-MAGA. 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.
- Natarajan, P. y K. Srinivasan. (1989). Effect of varying levels of N, P and K on yield attributes and yield of cardamom (*Elettaria cardamomum*). South Indian Horticulture 37: 97-100.
- PMA-SESAN. (2012). Mapeo y análisis de la desnutrición crónica en Guatemala. Programa Mundial de Alimentos-Secretaría de seguridad alimentaria nutricional. Guatemala.
- Ramirez, G. (1981). Análisis preliminar de la producción de cardamomo (*Elettaria cardamomum* M.) en base al contenido de nutrientes minerales en la planta y su relación con los parámetros físicos, químicos y biológicos del suelo. Tesis Ing. Agr. Facultad de Agronomía. USAC.
- Ravindran, P.N. y P. Rajeev. (2002). Yield gaps and production constraints in cardamom. En Cardamom: The genus *Elettaria*. Ravindran, P.N. y K.J. Madhusoodanan (Ed.). Taylor & Francis, Inc. pp. 291-298. New York, Estados Unidos de América.
- Rayment, G.E. y D.J. Lyons. (2011). Soil Chemical Methods-Australasia. CSIRO Publishing. Australia.
- Sánchez, P.A. (1981). Suelos del trópico: características y manejo. Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, IICA. Costa Rica.
- Simmons, Ch.S., J. M. Tarano y J.H. Pinto. (1959). Clasificación de reconocimiento de los suelos de la república de Guatemala. Instituto Agropecuario Nacional, IAN. Ministerio de Agricultura. Guatemala.
- Soil and Plant Analysis Council, Inc. (1999). Soil Analysis Handbook of Reference Methods. CRC Press. Boca Raton, Florida. Estados Unidos de América.
- Subbiah, A., M. Murugan, A. Rameshkumar, R. Jagadeesan y M. Prabhu. (2008). A case study: Nutrient management in small cardamom (*Elettaria cardamomum*). The Asian Journal of Horticulture: 3(2): 449-455.
- USDA. (11 de Mayo de 2021). Agricultural reseach service. <https://www.ars.usda.gov/research>.
- Villatoro, C. (2014). Guatemala lucha por su cardamomo. Nota de entrevista realizada a José Adrián Villatoro, Cardegua. Legiscomex.com.
-