Agronomía Mesoamericana

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Artículo científico

Volumen 37: Artículo rgjm6z24, 2026
e-ISSN 2215-3608, https://doi.org/10.15517/rgjm6z24

Restricciones edáficas en suelos cacaoteros de la Amazonía peruana*

Edaphic constraints in cacao soils of the Peruvian Amazon

Perci Peter Coaguila-Rodriguez[1], *Alberto Franco Cerna-Cueva*[2]

* Recepción: 9 dejulio, 2026. Aceptación: 16 de octubre, 2026. Este trabajo se elaboró a partir de registros de monitoreo edáfico asociados a áreas de cultivo de cacao en Puerto Bermúdez y Constitución, Amazonía peruana.

[1] Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables. Tingo María, Huánuco, Perú. peter.coaguila@unas.edu.pe (https://orcid.org/0000-0001-8445-3231).

[2] Universidad Nacional Agraria de la Selva, Facultad de Recursos Naturales Renovables, Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental. Tingo María, Huánuco, Perú. alberto.cerna@unas.edu.pe (autor para correspondencia; https://orcid.org/0000-0001-7448-558X).

Manuscrito aceptado

Resumen

Introducción. Los diagnósticos edáficos a escala distrital pueden ocultar restricciones locales relevantes para el manejo de suelos cacaoteros. **Objetivo.** Caracterizar y priorizar las restricciones edáficas ambientales en suelos cacaoteros de la Amazonía peruana, con énfasis en la acidez, el fósforo disponible, la saturación de aluminio y el cadmio disponible a escala de localidad. **Materiales y métodos.** Se analizaron 1842 muestras superficiales de suelo (0-20 cm), tomadas entre abril y julio de 2021 en 84 localidades de los distritos de Puerto Bermúdez y Constitución. Se evaluaron variables físicas y químicas del suelo mediante estadística descriptiva, comparaciones distritales, síntesis por localidad, análisis de coocurrencia, relaciones bivariadas, análisis de componentes principales y agrupamiento exploratorio. **Resultados.** La mediana de pH fue de 4,65, la de fósforo disponible fue de 5,27 mg kg^{-1} y la de saturación de aluminio fue de 39,21 % (1539 determinaciones válidas). La coocurrencia de pH menor que 5,5, fósforo disponible menor que 7 mg kg^{-1} y saturación de aluminio igual o mayor que 30 % se registró en 757 muestras (41,1 %), lo que evidenció la concurrencia de acidez, bajo fósforo y alta saturación de aluminio. El cadmio disponible presentó una mediana de 0,035 mg kg^{-1}, pero mostró una distribución heterogénea, con señales localizadas en 13 localidades. **Conclusiones.** La escala de localidad permitió diferenciar las restricciones químicas extendidas de las señales localizadas de cadmio disponible y aportó criterios para priorizar el monitoreo edáfico.

Palabras clave: acidez del suelo, fósforo disponible, cadmio disponible, saturación de aluminio, priorización espacial.

Abstract

Introduction. District-level soil assessments may obscure local constraints relevant to cacao soil management. **Objective.** To characterize and prioritize environmental edaphic constraints in cacao soils of the Peruvian Amazon, with emphasis on soil acidity, available phosphorus, aluminum saturation, and available cadmium at the locality scale. **Materials and methods.** A total of 1,842 surface soil samples (0–20 cm), collected between April and July 2021 in

Agronomía Mesoamericana es desarrollada en la Universidad de Costa Rica bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para más información escriba a pccmca@ucr.ac.cr o pccmca@gmail.com

84 localities in the districts of Puerto Bermúdez and Constitución, were analyzed. Physical and chemical soil variables were evaluated using descriptive statistics, district-level comparisons, locality-level summaries, co-occurrence analysis, bivariate relationships, principal component analysis, and exploratory clustering. **Results.** Median soil pH was 4.65, median available phosphorus was 5.27 mg kg^{-1}, and median aluminum saturation was 39.21% (1,539 valid determinations). The co-occurrence of pH below 5.5, available phosphorus below 7 mg kg^{-1}, and aluminum saturation of at least 30% was observed in 757 samples (41.1%), indicating the combined occurrence of acidity, low phosphorus, and high aluminum saturation. Available cadmium had a median of 0.035 mg kg^{-1} but showed a heterogeneous distribution, with localized signals in 13 localities. **Conclusions.** The locality scale distinguished widespread chemical constraints from localized available-cadmium signals and provided criteria for prioritizing soil monitoring.

Keywords: soil acidity, available phosphorus, available cadmium, aluminum saturation, spatial prioritization.

Introducción

El cacao (*Theobroma cacao* L., Malvaceae) es un cultivo estratégico para la agricultura tropical por su valor económico, social y ambiental. En el año cacaotero 2024/2025, la producción mundial de cacao en grano se estimó en 4,723 millones de toneladas y las moliendas en 4,628 millones de toneladas, con un superávit de 48 mil toneladas (International Cocoa Organization, 2026). En el Perú, la producción de cacao en grano llegó a 156 165 toneladas en 2024 y se concentró en San Martín, Junín y Cusco, regiones que aportaron más del 70 % del volumen nacional (Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego, 2025).

La cadena peruana de cacao tuvo una expansión comercial marcada durante 2024. Entre enero y noviembre, el valor de las exportaciones peruanas de cacao y derivados alcanzó USD 1189 millones (Ministerio de Comercio Exterior y Turismo, 2025). La importancia comercial del cultivo refuerza la necesidad de diagnósticos que describan la fertilidad e identifiquen restricciones edáficas ambientales para orientar el monitoreo y el manejo del suelo.

El cadmio en productos derivados del cacao fue un factor crítico para el comercio internacional. El Reglamento de la Unión Europea (UE) 2023/915 estableció límites máximos de cadmio de 0,10, 0,30 y 0,80 mg kg^{-1} para diferentes tipos de chocolate, y de 0,60 mg kg^{-1} para cacao en polvo destinado al consumidor final (European Commission, 2023). Estos valores no correspondieron a límites para el suelo, sino a criterios de inocuidad para alimentos; por ello, su relevancia para este estudio radicó en señalar la necesidad de identificar territorios donde el suelo pudiera actuar como fuente potencial de cadmio y orientar monitoreos posteriores en semillas de cacao (en adelante denominadas almendras).

La problemática del cadmio no se distribuyó de forma homogénea en América Latina. En Ecuador, un estudio nacional que abarcó 560 sitios reportó una media de 0,90 mg kg^{-1} de cadmio en almendras descascaradas y un 45 % de muestras de almendras por encima de 0,60 mg kg^{-1} (Argüello et al., 2019). En Perú, mapas predictivos basados en más de 2000 muestras de suelo y almendra indicaron que las zonas con concentraciones elevadas de cadmio se restringieron a áreas específicas; a escala nacional, se estimó que menos del 20 % de los hogares cacaoteros podría verse afectado por las regulaciones sobre cadmio, pero en Piura esta proporción podría alcanzar el 89 % (Thomas et al., 2023).

La acidez y la baja fertilidad también limitaron la sostenibilidad del cultivo de cacao. En la Amazonía peruana se reportaron suelos de baja fertilidad utilizados para la producción de plántulas de cacao, en los que las mejoras del sustrato aumentaron los contenidos de materia orgánica, fósforo disponible, calcio intercambiable y potasio, así como la capacidad de intercambio catiónico (Tuesta et al., 2024). La nutrición del cacao dependió de la interacción entre las propiedades del suelo, la disponibilidad de nutrientes y el manejo de fuentes orgánicas e inorgánicas (Carmona-Rojas et al., 2022).

Manuscrito aceptado

La evaluación integrada del suelo es necesaria porque la acidez, el bajo fósforo, la saturación de aluminio y el cadmio pueden concurrir en una misma localidad. La transferencia de cadmio hacia el cacao depende de la reacción del suelo, del contenido de carbono orgánico y de la concentración del metal (Scaccabarozzi et al., 2020; Vanderschueren et al., 2021). Estas relaciones justifican el diagnóstico edáfico como herramienta inicial de priorización territorial, pero no permiten inferir la inocuidad de las almendras sin analizar el producto.

En Puerto Bermúdez y Constitución faltaba establecer cómo se distribuían y concurrían las restricciones de acidez, fósforo y aluminio, y si las señales de cadmio se concentraban en determinadas localidades. Examinar estas diferencias a escala de localidad permitiría orientar el monitoreo sin asumir que cada distrito presenta una condición edáfica uniforme. El objetivo fue caracterizar y priorizar las restricciones edáficas ambientales en suelos cacaoteros de la Amazonía peruana, con énfasis en la acidez, el fósforo disponible, la saturación de aluminio y el cadmio disponible a escala de localidad.

Manuscrito aceptado

Materiales y métodos

Área de estudio

Se analizaron registros de monitoreo de suelos cacaoteros de los distritos de Puerto Bermúdez y Constitución, provincia de Oxapampa, departamento de Pasco, en la Amazonía central peruana. El muestreo se realizó entre abril y julio de 2021 a una profundidad de 0-20 cm. Las muestras se agruparon por localidad y distrito. La cartografía climática nacional reconoce heterogeneidad climática dentro de estos distritos, con sectores cálidos semisecos y otros lluviosos (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, 2021). Como referencia histórica local, la estación de Puerto Bermúdez registró una temperatura media anual de 25,5 °C y una precipitación anual de 3312,9 mm en la serie 1962-1973, con lluvias más intensas entre noviembre y marzo (Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales [ONERN], 1981).

Los antecedentes edafológicos del valle del Pichis distinguen suelos aluviales recientes en terrazas bajas, algunos inundables; suelos aluviales antiguos en terrazas, lomadas y colinas; y suelos residuales predominantemente de textura fina (ONERN, 1981). En ambos distritos se documentó, antes del muestreo, el cultivo familiar de cacao acompañado de asistencia técnica, fertilización orgánica y mineral, podas y manejo integrado de plagas (Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida sin Drogas, 2020).

Las variables climáticas y de manejo no formaron parte del monitoreo; estos antecedentes se emplearon únicamente para caracterizar el contexto territorial. La distribución de las localidades evaluadas se presenta en la Figura 1.

Fuente de información y unidad de análisis

Los registros procedieron del monitoreo edáfico de áreas cacaoteras de Puerto Bermúdez y Constitución, realizado entre abril y julio de 2021. Las muestras fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. El conjunto final incluyó 1842 muestras superficiales de suelo, identificadas mediante códigos de laboratorio, en 84 localidades de dos distritos. La depuración retiró filas vacías y encabezados repetidos, y verificó la identificación y las variables necesarias; no excluyó muestras analíticas. La muestra fue la unidad primaria de análisis y la localidad, la unidad territorial de síntesis.

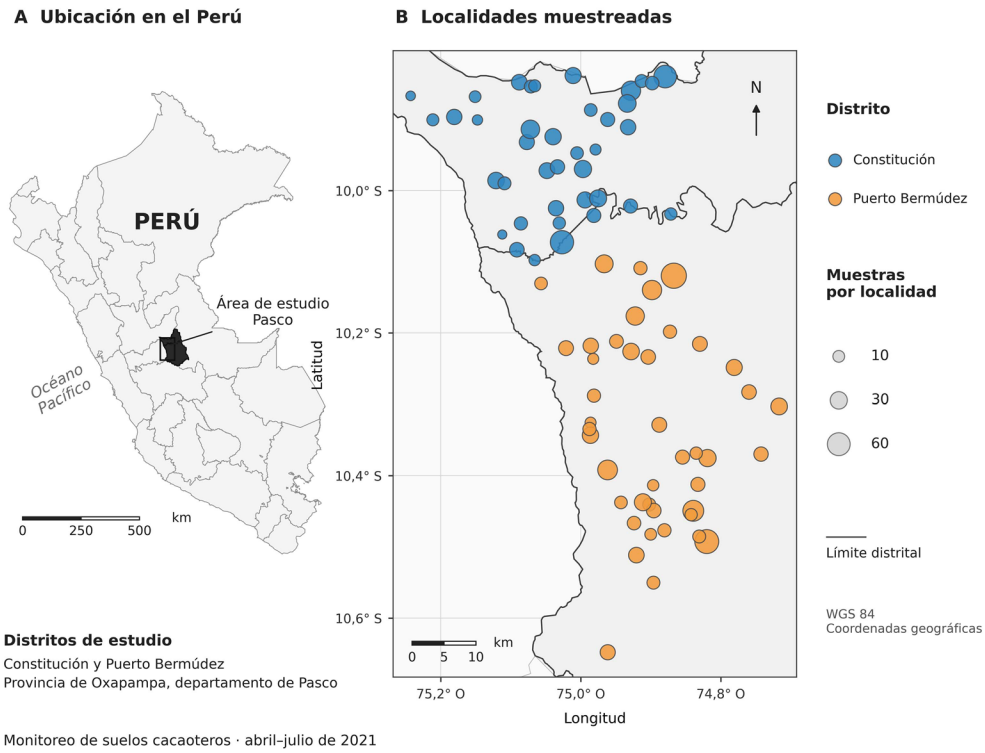


Figura 1. A) Ubicación del área de estudio en el Perú. B) Distribución espacial de las localidades muestreadas en los distritos de Puerto Bermúdez y Constitución, provincia de Oxapampa, departamento de Pasco, Amazonía peruana, abril-julio de 2021.

El tamaño del punto representa el número de muestras por localidad. Límites administrativos referenciales: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), servicio geográfico del Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). Sistema de coordenadas geográficas WGS 84.

Figure 1. A) Location of the study area in Peru. **B)** Spatial distribution of sampled localities in Puerto Bermúdez and Constitución districts, Oxapampa Province, Pasco Department, Peruvian Amazon, April–July 2021.

Point size represents the number of samples per locality. Reference administrative boundaries: Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI), geographic service of the Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre (SERFOR). WGS 84 geographic coordinate system.

Manuscrito

Variables y procedimientos analíticos

Las variables físicas incluyeron la clase textural y los porcentajes de arena, limo y arcilla. Las variables químicas incluyeron pH en relación suelo:agua 1:1, conductividad eléctrica, materia orgánica, nitrógeno, fósforo disponible, potasio disponible, cadmio disponible, calcio y magnesio intercambiables, aluminio e hidrógeno intercambiables, capacidad de intercambio catiónico efectiva, capacidad de intercambio catiónico, saturación de bases, saturación de acidez y saturación de aluminio. Los cationes intercambiables se usaron como contexto de la fertilidad química y para calcular indicadores de intercambio. Las variables no constituyeron una evaluación directa del rendimiento del cultivo.

Los métodos aplicados correspondieron a la ficha analítica del laboratorio para este monitoreo: pH por potenciometría en relación suelo:agua 1:1; conductividad eléctrica en extracto acuoso; materia orgánica por Walkley

y Black; nitrógeno total por micro-Kjeldahl; textura por Bouyoucos; fósforo disponible por Olsen modificado, con bicarbonato de sodio 0,5 M a pH 8,5; y potasio disponible y capacidad de intercambio catiónico por acetato de amonio 1 N a pH 7. Los cationes intercambiables se cuantificaron por absorción atómica. Estos procedimientos también están documentados para el mismo laboratorio por Durand Ordoñez (2022).

El cadmio disponible se extrajo con ácido etilendiaminotetraacético (EDTA) y se cuantificó por espectrofotometría de absorción atómica, conforme a la ficha del monitoreo. El uso de esta extracción en suelos está documentado por Silva Sampe (2018) y Tantalean Pedraza y Huauya Rojas (2017).

En las muestras con pH <5,5 se aplicó extracción con KCl 1 N para evaluar el intercambio efectivo. La capacidad de intercambio catiónico efectiva (CICE) se calculó como Ca + Mg + Al + H, en cmol(+) kg^{-1}. En esas muestras, la saturación de aluminio fue 100 × Al/CICE, la saturación de bases fue 100 × (Ca + Mg)/CICE y la saturación de acidez fue 100 × (Al + H)/CICE.

Los 303 registros con pH ≥5,5 no tenían determinación de aluminio ni CICE. Aunque figuraban con saturación de aluminio igual a cero, no se pudo establecer el origen de esos ceros. Por ello, se trataron como datos faltantes, no como aluminio medido o no detectado. La saturación de aluminio se resumió con 1539 observaciones válidas; la matriz de coocurrencia identificó por separado las muestras sin determinación.

Manuscrito aceptado

Criterios de clasificación y priorización

Las restricciones se clasificaron mediante criterios operativos de diagnóstico y priorización, no mediante límites normativos ni valores críticos universales para el cacao. El pH se interpretó como reacción del suelo en agua 1:1; el fósforo, con las clases de interpretación del laboratorio para Olsen modificado; la saturación de aluminio, como indicador relativo de acidez intercambiable; y el cadmio extraído con EDTA, como señal para priorizar el monitoreo. Los límites y su alcance se especifican en el Cuadro 1 (Arévalo-Hernández et al., 2022; De Matos et al., 2023; Kochian et al., 2015; Ramtahal et al., 2015; Sanchez, 2019; Soil Science Division Staff, 2017; Wade et al., 2022).

Los rangos aplicados, su interpretación y su alcance metodológico se presentan en el Cuadro 1. Las clases de cadmio disponible no se compararon con los límites de la UE, porque esos límites corresponden a alimentos y no al suelo. Asimismo, los valores de Cd-EDTA no se interpretaron como cadmio total ni como cadmio en almendras (European Commission, 2023; Thomas et al., 2023; Vanderschueren et al., 2021).

Cobertura del monitoreo edáfico

El monitoreo incluyó 1842 muestras superficiales de suelo, distribuidas en 84 localidades de los distritos de Puerto Bermúdez y Constitución. Puerto Bermúdez aportó 1017 muestras en 44 localidades, mientras que Constitución aportó 825 muestras en 40 localidades. La mediana fue de 19 muestras por localidad, con un rango de 3 a 75 muestras. El análisis espacial se realizó como una síntesis por localidad y no como una interpolación continua. La cobertura del monitoreo se resume en el Cuadro 2.

La distribución espacial de las localidades evaluadas complementó la síntesis de cobertura del monitoreo. Debido a que las coordenadas correspondieron a localidades y no a puntos individuales de muestreo, los mapas se interpretaron como una representación territorial del monitoreo. Esta decisión evitó presentar superficies continuas de predicción cuando la información geográfica disponible correspondía a la escala de localidad (Figura 1).

La priorización por localidad se estableció mediante tres indicadores principales: severidad de la acidez, baja disponibilidad de fósforo y señal de cadmio. La saturación de aluminio no se usó como indicador independiente para evitar duplicar la señal de acidez, pero se mantuvo como variable de diagnóstico, coocurrencia y análisis multivariado. El criterio de acidez se cumplió cuando la mediana local de pH fue menor que 4,5 o cuando al menos

Cuadro 1. Criterios operativos utilizados para clasificar restricciones edáficas y priorizar localidades en suelos cacaoteros de Puerto Bermúdez y Constitución, Amazonía peruana, abril-julio de 2021.

Table 1. Operational criteria used to classify edaphic constraints and prioritize localities in cacao soils in Puerto Bermúdez and Constitución, Peruvian Amazon, April–July 2021.

Variable o indicador	Rangos e interpretación operativa	Alcance metodológico y respaldo
pH (suelo:agua 1:1)	pH <4,5: restricción severa por acidez; 4,5 ≤ pH <5,5: moderada-alta; 5,5 ≤ pH ≤6,5: leve; 6,5 < pH ≤7,3: sin restricción operativa por acidez; pH >7,3: reacción alcalina, evaluada por separado.	El pH expresa la reacción activa del suelo. Los rangos se usaron para ordenar la intensidad de la acidez; no constituyen por sí solos un umbral fisiológico universal para el cacao (Kochian et al., 2015; Sanchez, 2019; Soil Science Division Staff, 2017).
Fósforo disponible (Olsen modificado)	P <7 mg kg^{-1}: bajo; 7 ≤ P ≤14 mg kg^{-1}: medio; P >14 mg kg^{-1}: alto.	El fósforo Olsen modificado representa la fracción extraída con bicarbonato de sodio. Las clases bajo, medio y alto corresponden a la interpretación del laboratorio para el monitoreo; el umbral <7 mg kg^{-1} identificó baja disponibilidad operativa. El método está documentado por Durand Ordoñez (2022). Las clases no equivalen a niveles críticos universales de respuesta del cacao (De Matos et al., 2023; Sanchez, 2019).
Saturación de aluminio	Al <15 %: baja; 15 ≤ Al <30 %: moderada; 30 ≤ Al <50 %: alta; Al ≥50 %: muy alta o severa.	La saturación de aluminio expresa la proporción del complejo de intercambio ocupada por aluminio. Su incremento se interpretó como una mayor restricción relativa por acidez intercambiable y una posible limitación radicular, cuya expresión también depende del genotipo (Arévalo-Hernández et al., 2022; Kochian et al., 2015; Sanchez, 2019). En este estudio, el umbral ≥30 % se utilizó como alerta operativa de restricción alta.
Cadmio disponible (Cd-EDTA)	Cd <0,20 mg kg^{-1}: baja prioridad; 0,20 ≤ Cd <0,50 mg kg^{-1}: moderada; 0,50 ≤ Cd <1,00 mg kg^{-1}: alta; Cd ≥1,00 mg kg^{-1}: muy alta.	El Cd-EDTA representa una fracción operacionalmente extraíble de cadmio en el suelo. Se usó para priorizar localidades que requieren confirmación analítica; no equivale al contenido de cadmio total ni al de cadmio en almendras, y sus rangos de clasificación no corresponden a límites regulatorios en alimentos (Ramtahal et al., 2015; Thomas et al., 2023; Vanderschueren et al., 2021; Wade et al., 2022).

P: Fósforo disponible por Olsen modificado. **Al:** Saturación de aluminio. **Cd-EDTA:** Cadmio extraído con EDTA. Los rangos son criterios operativos, no límites legales ni valores críticos universales para el cacao. / **P:** Available phosphorus by modified Olsen extraction. **Al:** Aluminum saturation. **Cd-EDTA:** Cadmium extracted with EDTA. Ranges are operational criteria, not legal limits or universal critical values for cacao.

Manuscrito aceptado

Cuadro 2. Cobertura del monitoreo edáfico en suelos cacaoteros de Puerto Bermúdez y Constitución, Amazonía peruana, abril-julio de 2021.

Table 2. Edaphic monitoring coverage in cacao soils in Puerto Bermúdez and Constitución, Peruvian Amazon, April–July 2021.

Indicador	Total	Constitución	Puerto Bermúdez
Muestras de suelo	1842	825	1017
Localidades	84	40	44
Muestras por localidad, mediana	19	18	20
Muestras por localidad, rango	3-75	3-63	8-75
Muestras con coordenadas completas	1822	825	997
Localidades con coordenadas completas	83	40	43
Periodo de evaluación	abril-julio de 2021	abril-julio de 2021	abril-julio de 2021
Profundidad de muestreo	0-20 cm	0-20 cm	0-20 cm

Las coordenadas correspondieron a la localidad de muestreo, por lo que la representación espacial se realizó como una síntesis por localidad y no como una interpolación continua. Una localidad de Puerto Bermúdez no presentó coordenadas completas. / Coordinates corresponded to the sampling locality, so the spatial representation was produced as a locality-level synthesis rather than a continuous interpolation. One locality in Puerto Bermúdez did not have complete coordinates.

el 50 % de las muestras tuvo pH < 4,5. El criterio de baja disponibilidad de fósforo se cumplió cuando la mediana local de fósforo disponible fue menor que 7 mg kg^{-1} o cuando al menos el 70 % de las muestras estuvo por debajo de ese valor.

El criterio de señal de cadmio se cumplió cuando la mediana local de cadmio disponible fue igual o superior al percentil 90 de las medianas locales, o cuando al menos el 30 % de las muestras de la localidad presentó cadmio disponible ≥ 0,20 mg kg^{-1}. Las localidades con menos de cinco muestras no se incluyeron en la priorización final. Esta restricción se aplicó para reducir el efecto de valores aislados en sitios con baja representación.

Análisis estadístico y cartográfico

El análisis estadístico combinó estadística descriptiva, comparación entre distritos, síntesis por localidad, análisis de coocurrencia, correlaciones, reducción de dimensionalidad y agrupamiento. Este enfoque permitió separar la descripción general, la comparación territorial y la síntesis multivariada. La selección de pruebas se ajustó a la escala de análisis y a la distribución de las variables.

Se priorizaron la mediana, los cuartiles y los percentiles debido a la distribución asimétrica de varias variables. La coocurrencia se evaluó mediante una matriz conjunta de clases de pH, fósforo y saturación de aluminio; las 303 muestras sin determinación de aluminio se mostraron como una categoría independiente. Las relaciones bivariadas con aluminio usaron solo sus 1539 observaciones válidas. La señal de cadmio se evaluó con porcentajes condicionales respecto a las restricciones principales. Las comparaciones distritales se hicieron con la prueba de rangos de Wilcoxon para dos grupos independientes, significancia de 0,05 y delta de Cliff como tamaño del efecto.

La variación asociada a la localidad se resumió mediante eta cuadrado (η^2), calculado según la Ecuación 1. Cada localidad se identificó junto con su distrito. Este indicador se interpretó de manera descriptiva, no como evidencia de causalidad territorial.

$$\eta^2 = \frac{\sum_{l=1}^{L} n_l \, (\bar{x}_l - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^{N} (x_i - \bar{x})^2} \qquad (1)$$

En la ecuación 1, η^2 es la proporción de variación asociada a la localidad (sin unidades); $\sum$ indica la sumatoria; l y L son el índice y el número total de localidades; n_l es el número de muestras de la localidad l; $\bar{x}_l$ es la media local y $\bar{x}$ es la media de todas las muestras. En el denominador, i y N son el índice y el número total de muestras, y x_i es el valor observado en la muestra i. Las medias y los valores observados tienen las unidades del parámetro evaluado.

La síntesis multivariada incluyó medianas por localidad de pH, fósforo disponible, saturación de aluminio, cadmio disponible y materia orgánica, seleccionadas por su relación con el diagnóstico. No se asumió independencia estadística entre ellas. El aluminio se resumió solo con determinaciones válidas; las 84 localidades tuvieron al menos dos. Las cinco variables se estandarizaron a media cero y desviación estándar uno antes del análisis de componentes principales. El agrupamiento exploratorio se realizó mediante k-medias (k = 3) sobre los dos primeros componentes, con 100 inicializaciones y selección de la solución de menor suma de cuadrados intragrupo. Los grupos se interpretaron como tipologías relativas, no como categorías validadas de aptitud del suelo.

La representación espacial se realizó mediante un mapa de ubicación política del área de estudio en el Perú y un mapa de puntos por localidad, con límites distritales referenciales, para describir la cobertura del monitoreo. El tamaño del punto fue proporcional al número de muestras y el color representó el distrito. Las demás figuras resumieron la coocurrencia de restricciones, las relaciones bivariadas, la clasificación ordenada de localidades con señal de cadmio y la ordenación multivariada. La depuración, el análisis estadístico y la elaboración de figuras se realizaron con Python.

Manuscrito aceptado

Resultados

Diagnóstico edáfico general

El diagnóstico general mostró un predominio de acidez y baja disponibilidad de fósforo. La mediana de pH fue de 4,65 (RIC: 4,32-5,13), con valores de 3,60 a 8,03. La mediana de fósforo disponible fue de 5,27 mg kg^{-1} (RIC: 3,81-7,84), dentro de la clase baja de Olsen modificado. En las 1539 muestras con determinación válida, la saturación de aluminio tuvo una mediana de 39,21 % (RIC: 16,61-55,96), dentro de la clase alta. Los registros restantes no se interpretaron como ausencia de aluminio.

La conductividad eléctrica tuvo una mediana de 0,11 mS cm^{-1}, por lo que no se observó una restricción general por salinidad. La materia orgánica presentó una mediana de 1,66 %. El cadmio disponible tuvo una mediana de 0,035 mg kg^{-1} y una distribución asimétrica, con un máximo de 3,52 mg kg^{-1}. El patrón descriptivo se sintetiza en el Cuadro 3; los apartados siguientes examinan la coocurrencia de restricciones y las señales locales de cadmio.

Cuadro 3. Estadísticos descriptivos de variables edáficas evaluadas en suelos cacaoteros de Puerto Bermúdez y Constitución, Amazonía peruana, abril-julio de 2021.

Table 3. Descriptive statistics of edaphic variables evaluated in cacao soils in Puerto Bermúdez and Constitución, Peruvian Amazon, April–July 2021.

Variable	Unidad	*n*	Mediana	RIC	Mínimo-máximo
pH (suelo:agua 1:1)		1842	4,65	4,32-5,13	3,60-8,03
CE	mS cm^{-1}	1842	0,11	0,06-0,19	0,01-1,02
Materia orgánica	%	1842	1,66	1,43-1,96	0,60-4,68
Fósforo	mg kg^{-1}	1842	5,27	3,81-7,84	0,82-29,91
Potasio	mg kg^{-1}	1842	92,21	74,48-117,60	18,49-423,31
Calcio	cmol(+) kg^{-1}	1842	4,96	3,88-6,64	1,24-21,75
Magnesio	cmol(+) kg^{-1}	1842	1,09	0,85-1,44	0,16-4,25
Cadmio	mg kg^{-1}	1842	0,035	0,010-0,087	0,000-3,520
Aluminio	cmol(+) kg^{-1}	1539	3,71	1,29-6,30	0,04-23,66
Saturación de aluminio	%	1539	39,21	16,61-55,96	0,47-83,30

CE: Conductividad eléctrica. **cmol(+):** Centimoles de carga positiva. ***n*:** Número de observaciones. **RIC:** Rango intercuartílico entre el primer y tercer cuartil. La saturación de aluminio excluyó 303 registros sin determinación; no se imputaron ceros. / **CE:** Electrical conductivity. **cmol(+):** Centimoles of positive charge. ***n*:** Number of observations. **RIC:** Interquartile range between the first and third quartiles. Aluminum saturation excluded 303 records without determination; zeros were not imputed.

Coocurrencia de restricciones edáficas

Las frecuencias individuales mostraron la magnitud de las restricciones: 1539 muestras tuvieron pH <5,5 y 714, pH <4,5. El fósforo disponible fue <7 mg kg^{-1} en 1264 muestras. La saturación de aluminio fue ≥30 % en 966 muestras, equivalentes al 62,8 % de las 1539 determinaciones válidas y al 52,4 % del total monitoreado.

La matriz de distribución conjunta permitió examinar la coocurrencia de estas restricciones. Cada celda correspondió a una combinación de una clase de pH, una clase de fósforo disponible y una clase de saturación de aluminio. La mayor concentración de muestras ocurrió en la combinación de pH menor que 4,5, fósforo menor que 7 mg kg^{-1} y saturación de aluminio igual o mayor que 30 %, con 507 muestras (27,5 %).

Manuscrito aceptado

Al agregar las muestras con 4,5 ≤ pH <5,5 a la combinación de fósforo <7 mg kg^{-1} y saturación de aluminio ≥30 %, la coocurrencia alcanzó 757 muestras (41,1 % del total). Las dos columnas con pH <5,5 sumaron 1539 muestras. Las 303 muestras con pH ≥5,5 se representaron en la categoría sin determinación de aluminio; su posición no demostró ausencia de esa restricción (Figura 2).

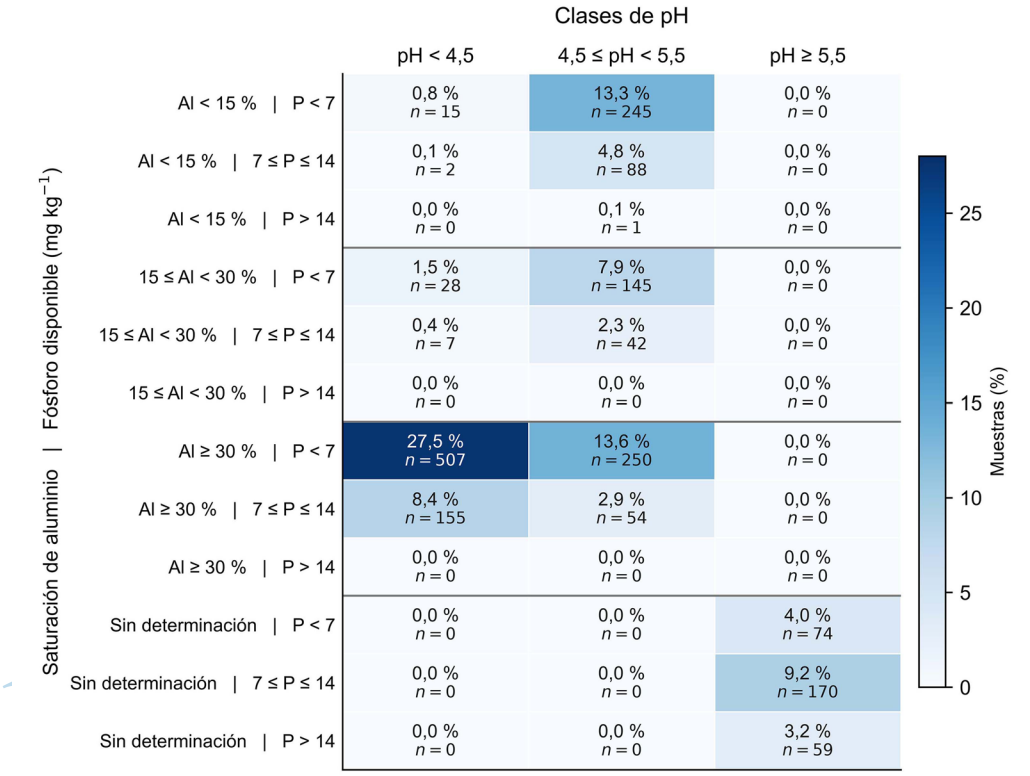


Figura 2. Matriz de distribución conjunta de clases de pH, fósforo disponible y saturación de aluminio en suelos cacaoteros de Puerto Bermúdez y Constitución, Amazonía peruana, abril-julio de 2021.

Cada celda indica el porcentaje respecto de las 1842 muestras y su número (n). **P:** Fósforo disponible por Olsen modificado, en mg kg^{-1}. **Al:** Saturación de aluminio (%). La categoría sin determinación de aluminio comprende 303 muestras y no equivale a saturación cero.

Figure 2. Joint distribution matrix of pH, available phosphorus, and aluminum saturation classes in cacao soils in Puerto Bermúdez and Constitución, Peruvian Amazon, April–July 2021.

Each cell shows the percentage of all 1842 samples and its count (n). **P:** Available phosphorus by modified Olsen extraction, in mg kg^{-1}. **Al:** Aluminum saturation (%). The category without aluminum determination includes 303 samples and does not imply zero saturation.

La saturación de aluminio disminuyó conforme aumentó el pH entre las muestras con determinación válida (Figura 3A). El fósforo disponible tendió a ser mayor en las muestras menos ácidas (Figura 3B). La asociación inversa entre pH y saturación de aluminio describió la distribución observada dentro de los suelos con pH <5,5, sin permitir inferencias para las muestras sin determinación.

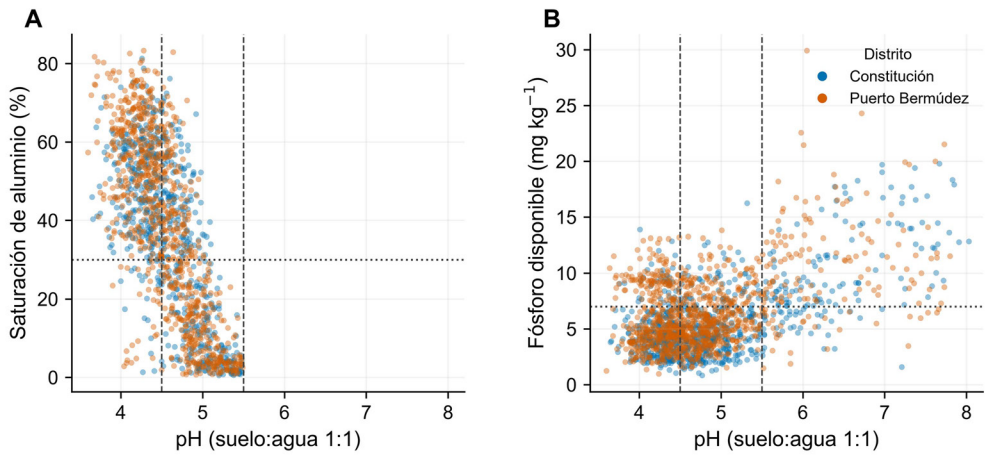


Figura 3. Relaciones entre **A)** pH y saturación de aluminio y **B)** pH y fósforo disponible en suelos cacaoteros de Puerto Bermúdez y Constitución, Amazonía peruana, abril-julio de 2021.

El panel A incluye 1539 muestras con determinación de aluminio; el panel B, las 1842 muestras con fósforo Olsen modificado. Las líneas verticales discontinuas señalan pH de 4,5 y 5,5; las horizontales punteadas, saturación de aluminio de 30 % y fósforo de 7 mg kg^{-1}, respectivamente.

Figure 3. Relationships between **A)** pH and aluminum saturation and **B)** pH and available phosphorus in cacao soils in Puerto Bermúdez and Constitución, Peruvian Amazon, April–July 2021.

Panel A includes 1539 samples with aluminum determination; panel B includes all 1842 samples with modified Olsen phosphorus. Vertical dashed lines indicate pH values of 4.5 and 5.5; horizontal dotted lines indicate aluminum saturation of 30% and phosphorus of 7 mg kg^{-1}, respectively.

Manuscrito aceptado

Señal focal de cadmio disponible

El cadmio disponible no se superpuso plenamente con el complejo de acidez, bajo fósforo y aluminio alto. Una parte de las muestras con cadmio ≥ 0,20 mg kg^{-1} también tuvo pH menor que 5,5 (68,6 %) o fósforo menor que 7 mg kg^{-1} (70,1 %), porque ambas restricciones fueron frecuentes en el monitoreo. Sin embargo, solo el 34,8 % coincidió con una saturación de aluminio ≥ 30 %. En sentido inverso, solo el 7,3 % de las muestras con aluminio alto presentó cadmio ≥ 0,20 mg kg^{-1}. Así, el cadmio se interpretó como una señal focal y no como una extensión directa del complejo principal de acidez.

Variabilidad territorial y priorización por localidad

El contraste por distrito funcionó como una primera aproximación, pero no bastó para priorizar el manejo. Constitución tuvo una mayor mediana de cadmio disponible que Puerto Bermúdez y un mayor porcentaje de muestras con cadmio igual o superior a 0,20 mg kg^{-1}. Esa diferencia distrital no resolvió el problema central, porque dentro de cada distrito persistieron localidades con perfiles edáficos contrastantes.

La variación asociada a la localidad, resumida mediante eta cuadrado, fue de 0,229 para el pH, 0,296 para el fósforo y 0,264 para el cadmio. Estas proporciones respaldaron el análisis por localidad como complemento del resumen distrital, sin atribuir un efecto causal al territorio. La comparación distrital se presenta en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Comparación de restricciones edáficas por distrito en suelos cacaoteros de Puerto Bermúdez y Constitución, Amazonía peruana, abril-julio de 2021.

Table 4. Comparison of edaphic constraints by district in cacao soils in Puerto Bermúdez and Constitución, Peruvian Amazon, April–July 2021.

Distrito	*n*	pH	Fósforo	Cadmio	Cadmio ≥ 0,20 mg kg^{-1} (%)
Constitución	825	4,69	4,78	0,067	19,5
Puerto Bermúdez	1017	4,63	5,68	0,021	4,2

Los valores de pH, fósforo y cadmio son medianas distritales. Fósforo y cadmio se expresan en mg kg^{-1}. ***n*:** Número de muestras. **pH:** Relación suelo:agua 1:1. La última columna indica el porcentaje con cadmio disponible ≥0,20 mg kg^{-1}. / pH, phosphorus and cadmium values are district medians. Phosphorus and cadmium are expressed in mg kg^{-1}. ***n*:** Number of samples. **pH:** Soil:water ratio 1:1. The last column shows the percentage with available cadmium ≥0.20 mg kg^{-1}.

Se consideró que una localidad presentó señal de cadmio cuando su mediana fue igual o superior al percentil 90 de las medianas por localidad, cuyo valor fue de 0,142 mg kg^{-1}, o cuando al menos el 30 % de sus muestras presentó cadmio disponible igual o mayor que 0,20 mg kg^{-1}. Con estos criterios, 13 localidades con cinco o más muestras presentaron señal de cadmio. Las seis localidades con mayor mediana de cadmio se presentan en el Cuadro 5, mientras que la clasificación completa de localidades con señal de cadmio y sus restricciones asociadas se presenta en la Figura 4.

Manuscrito aceptado

Cuadro 5. Seis localidades con mayor mediana de cadmio disponible entre las localidades con señal de cadmio en suelos de Puerto Bermúdez y Constitución, Amazonía peruana, abril-julio de 2021.

Table 5. Six localities with the highest median available cadmium among localities with a cadmium signal in soils in Puerto Bermúdez and Constitución, Peruvian Amazon, April–July 2021.

Localidad	Distrito	*n*	Mediana de cadmio (mg kg^{-1})	Cadmio ≥ 0,20 mg kg^{-1} (%)	Categoría
Caserío Boca Chimiari	Puerto Bermúdez	19	0,470	94,7	Bajo fósforo + cadmio
C. N. Puerto Libre	Constitución	23	0,270	52,2	Bajo fósforo + cadmio
Caserío Puerto Victoria	Constitución	33	0,250	57,6	Bajo fósforo + cadmio
C. N. San José de Santariani	Constitución	9	0,200	55,6	Acidez + bajo fósforo + cadmio
C. N. Mosquito Playa	Constitución	31	0,195	48,4	Bajo fósforo + cadmio
Caserío Alto Siria	Constitución	20	0,168	40,0	Acidez + bajo fósforo + cadmio

C. N.: Comunidad nativa. ***n*:** Número de muestras. La columna "Cadmio ≥ 0,20 mg kg^{-1} (%)" indica el porcentaje de muestras que cumplen ese criterio. La categoría corresponde a la matriz de priorización por localidad con un tamaño muestral mínimo de cinco muestras. / **C. N.:** Native community. ***n*:** Number of samples. The column "Cadmio ≥ 0,20 mg kg^{-1} (%)" indicates the percentage of samples meeting that criterion. Category corresponds to the locality prioritization matrix with a minimum sample size of five samples.

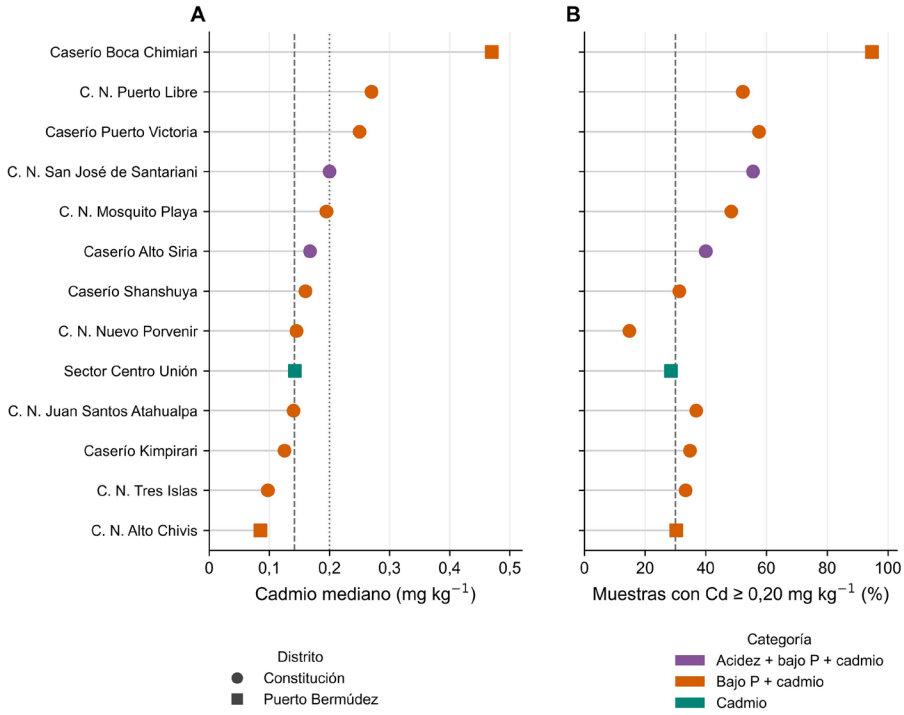


Figura 4. Ordenamiento de localidades con señal de cadmio disponible: **A)** mediana de cadmio disponible por localidad y **B)** porcentaje de muestras por localidad con cadmio disponible igual o mayor que 0,20 mg kg^{-1}, en suelos cacaoteros de Puerto Bermúdez y Constitución, Amazonía peruana, abril-julio de 2021.

En A, la línea discontinua indica el percentil 90 de las medianas locales (0,142 mg kg^{-1}) y la línea punteada indica 0,20 mg kg^{-1}. En B, la línea discontinua indica el criterio operativo del 30 %. **Cd:** Cadmio disponible. **P:** Fósforo disponible. **C. N.:** Comunidad nativa.

Figure 4. Ranking of localities with an available cadmium signal: **A)** median available cadmium by locality and **B)** percentage of samples per locality with available cadmium equal to or greater than 0.20 mg kg^{-1}, in cacao soils in Puerto Bermúdez and Constitución, Peruvian Amazon, April–July 2021.

In A, the dashed line indicates the 90th percentile of local medians (0.142 mg kg^{-1}), and the dotted line indicates 0.20 mg kg^{-1}. In B, the dashed line indicates the operational criterion of 30 %. **Cd:** Available cadmium. **P:** Available phosphorus. **C. N.:** Native community.

Manuscrito aceptado

Tipologías edáficas multivariadas

El análisis de componentes principales se usó como síntesis descriptiva, no como prueba causal. Tras excluir los ceros sin determinación de aluminio, el primer componente explicó el 38,0 % de la variación y contrastó principalmente pH y fósforo con saturación de aluminio y materia orgánica. El segundo explicó el 27,1 % y diferenció localidades con mayor señal relativa de cadmio. Ambos componentes acumularon el 65,1 % de la variación entre localidades.

El agrupamiento exploratorio sobre esos dos ejes separó tres tipologías. El grupo 1 reunió 22 localidades y 528 muestras, con mayor fósforo y menor cadmio relativos. El grupo 2 incluyó 40 localidades y 844 muestras, con mayor acidez, bajo fósforo y alta saturación de aluminio. El grupo 3 reunió 22 localidades y 470 muestras, con mayor cadmio relativo. La ordenación se presenta en la Figura 5 y los perfiles, en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Perfil de grupos de localidades derivados del análisis multivariado con cinco variables edáficas en Puerto Bermúdez y Constitución, Amazonía peruana, abril-julio de 2021.

Table 6. Profile of locality groups derived from multivariate analysis with five edaphic variables in Puerto Bermúdez and Constitución, Peruvian Amazon, April–July 2021.

Grupo	Localidades	Muestras	pH	Fósforo (mg kg^{-1})	Cadmio (mg kg^{-1})	Perfil dominante
1	22	528	4,76	7,94	0,011	Mayor fósforo y menor cadmio relativos
2	40	844	4,45	4,66	0,048	Alta acidez, bajo fósforo y alta saturación de aluminio
3	22	470	4,86	5,05	0,115	Mayor cadmio relativo

Los valores de pH, fósforo y cadmio son medianas de las medianas por localidad, sin ponderación por tamaño muestral. Muestras: Total de registros de monitoreo en cada grupo. Los grupos son tipologías relativas obtenidas con k-medias sobre los dos primeros componentes. / pH, phosphorus and cadmium values are unweighted medians of locality medians. Samples: Total monitored records in each group. Groups are relative typologies obtained by k-means on the first two components.

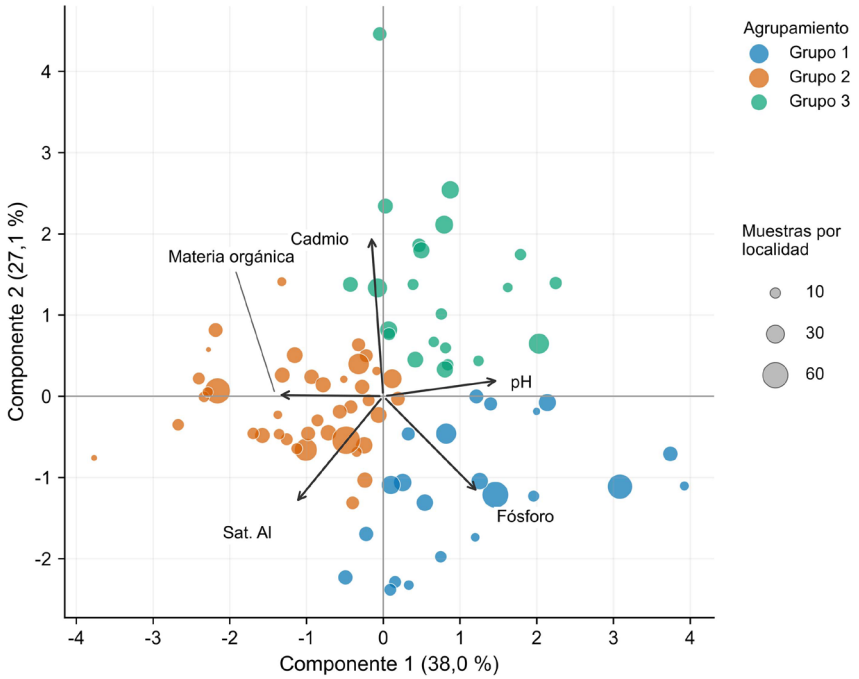


Figura 5. Ordenación de localidades mediante análisis de componentes principales y agrupamiento exploratorio con k-medias a partir de medianas locales de pH, fósforo disponible, saturación de aluminio, cadmio disponible y materia orgánica en suelos cacaoteros de Puerto Bermúdez y Constitución, Amazonía peruana, abril-julio de 2021.

Los colores identifican los grupos de k-medias. El área del punto es proporcional al número de muestras por localidad, con referencias de 10, 30 y 60 muestras. Las flechas indican las cargas de las variables en los dos componentes. Sat. Al: Saturación de aluminio.

Figure 5. Ordination of localities through principal component analysis and exploratory k-means clustering using local medians of pH, available phosphorus, aluminum saturation, available cadmium, and organic matter in cacao soils in Puerto Bermúdez and Constitución, Peruvian Amazon, April–July 2021.

Colors identify the k-means groups. Point area is proportional to the number of samples per locality, with references of 10, 30 and 60 samples. Arrows indicate variable loadings on the two components. Sat. Al: Aluminum saturation.

Discusión

El resultado central fue la concurrencia de acidez, bajo fósforo y alta saturación de aluminio. Este resultado fue consistente con la baja fertilidad descrita para sustratos de cacao en la Amazonía peruana, donde el aumento de materia orgánica y nutrientes mejoró las condiciones para el crecimiento de plántulas (Tuesta et al., 2024). La nutrición del cacao depende de la interacción entre la disponibilidad de nutrientes, las propiedades del suelo y el manejo de fuentes orgánicas e inorgánicas. Por ello, el análisis aislado de una sola variable resulta insuficiente para orientar decisiones (Carmona-Rojas et al., 2022).

La relación negativa entre el pH del suelo y la saturación de aluminio mostró una asociación entre la mayor acidez y la mayor saturación de aluminio. En suelos ácidos, el aluminio intercambiable puede restringir el desarrollo radical y reducir la eficiencia de absorción de nutrientes. En estas condiciones, la disponibilidad de fósforo suele disminuir por fijación y baja actividad de bases intercambiables. Esta relación ayudó a explicar por qué la baja disponibilidad de fósforo fue frecuente en las localidades con mayor acidez (Carmona-Rojas et al., 2022; Tuesta et al., 2024).

El cadmio disponible tuvo un comportamiento distinto al del eje acidez-fósforo-aluminio. La mediana global fue baja, pero varias localidades presentaron señales altas y una fracción considerable de muestras con concentraciones iguales o superiores al umbral operativo. Esta combinación sugirió una señal edáfica localizada, no una condición generalizada del territorio. El patrón coincidió con estudios de Perú y Ecuador, donde el cadmio en cacao mostró heterogeneidad espacial y presencia de focos, más que una distribución uniforme (Argüello et al., 2019; Thomas et al., 2023).

La interpretación del cadmio requirió prudencia por el tipo de dato disponible. El estudio analizó cadmio disponible reportado en suelo, pero no incluyó mediciones de cadmio en almendra, cadmio total por digestión completa ni fraccionamiento geoquímico. La literatura señala que la transferencia desde el suelo hacia el producto depende del pH, del contenido de carbono orgánico, de otras propiedades edáficas y de la concentración del metal en el suelo (Scaccabarozzi et al., 2020; Vanderschueren et al., 2021).

La escala de localidad resultó más útil que la escala distrital para priorizar el manejo. Las medianas distritales no reflejaron las diferencias entre localidades, como la presencia de focos de cadmio en Puerto Bermúdez y restricciones combinadas en Constitución. Esta diferencia de escala fue relevante porque los factores del suelo, del sitio y del manejo pueden influir en la disponibilidad de cadmio y la fertilidad de los suelos cacaoteros. Una recomendación basada solo en la escala distrital puede ser insuficiente para orientar el manejo de las restricciones edáficas y el monitoreo del cadmio (Scaccabarozzi et al., 2020; Thomas et al., 2023).

La matriz de priorización permitió distinguir necesidades de manejo y monitoreo. Las localidades con acidez y bajo fósforo podrían requerir estrategias de mejora química del suelo. Las localidades con señal de cadmio requieren monitoreo complementario en almendras y trazabilidad. Las localidades con restricciones combinadas podrían requerir un enfoque integrado. La tipología multivariada complementó esta lectura al separar localidades con menor restricción relativa, localidades dominadas por acidez y aluminio, y localidades con mayor señal de cadmio. Esta clasificación fue exploratoria y no sustituyó la validación agronómica ni ambiental en cada localidad. Además, no permite inferir las concentraciones de cadmio en las almendras ni sustentar recomendaciones comerciales directas. Las posibles medidas de mitigación deben validarse según las condiciones locales del suelo y del cultivo (Vanderschueren et al., 2021).

Las limitaciones del estudio restringieron el alcance de las inferencias. Las coordenadas correspondieron a localidades y no a puntos individuales de muestreo, por lo que los mapas constituyeron una síntesis territorial y no una interpolación geoestadística. La falta de determinación de aluminio en 303 muestras impidió evaluar esa restricción en suelos con pH ≥5,5; además, algunas medianas locales de aluminio se basaron en solo dos observaciones. El monitoreo no incluyó edad del cultivo, sombra, material genético, fertilización, rendimiento

Manuscrito aceptado

ni cadmio en almendras; por ello, los resultados se interpretaron como un diagnóstico de restricciones edáficas y de la señal relativa de cadmio disponible en el suelo. Este diagnóstico podría servir de base para investigaciones posteriores con muestras pareadas de suelo y almendras de cacao en las localidades priorizadas. Estas investigaciones permitirían evaluar el cadmio en el producto cosechado y su relación con las propiedades del suelo y las prácticas de manejo, para sustentar recomendaciones específicas.

Conclusiones

El estudio indicó que la restricción edáfica principal en los suelos cacaoteros evaluados fue la coocurrencia de acidez, baja disponibilidad de fósforo y alta saturación de aluminio. Esta interpretación se sustentó en los resultados de la estadística descriptiva, las frecuencias de clasificación y las relaciones observadas entre el pH del suelo, la saturación de aluminio y el fósforo disponible. Por tanto, la limitación dominante no correspondió a un indicador aislado, sino a un complejo químico de baja fertilidad asociado con suelos ácidos.

La priorización a escala de localidad aportó información que no fue captada por la comparación distrital. Esta escala permitió distinguir restricciones extendidas de señales localizadas de cadmio disponible. En consecuencia, la localidad fue la unidad más útil para orientar el monitoreo y la planificación de medidas de manejo de la acidez y la fertilidad del suelo.

El cadmio disponible en suelo se interpretó como un indicador de priorización territorial y no como evidencia directa de incumplimiento de los límites regulatorios establecidos para productos derivados del cacao. El aporte aplicado del trabajo fue identificar localidades donde conviene complementar el diagnóstico con análisis de cadmio en almendras, trazabilidad y seguimiento temporal. La ausencia de mediciones de cadmio en almendras impide establecer conclusiones sobre el cumplimiento normativo del producto y sustentar recomendaciones comerciales directas. Como siguiente etapa, se propone analizar el cadmio en las almendras y su relación con las propiedades del suelo y las prácticas de manejo del cultivo, para sustentar recomendaciones específicas por localidad.

Manuscrito aceptado

Agradecimientos

Los autores agradecen al Laboratorio de Suelos de la Facultad de Agronomía de la Universidad Nacional Agraria de la Selva, Tingo María, Huánuco, Perú, por el apoyo analítico brindado durante el monitoreo edáfico utilizado en este estudio, el cual permitió disponer de los resultados de los análisis de fertilidad y cadmio disponible en suelo para el diagnóstico territorial.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses relacionados con este estudio.

Referencias

Arévalo-Hernández, C. O., Arévalo-Gardini, E., Farfan, A., Amaringo-Gomez, M., Daymond, A., Zhang, D., & Baligar, V. C. (2022). Growth and nutritional responses of juvenile wild and domesticated cacao genotypes to soil acidity. *Agronomy, 12*(12), Artículo 3124. https://doi.org/10.3390/agronomy12123124

Argüello, D., Chavez, E., Lauryssen, F., Vanderschueren, R., Smolders, E., & Montalvo, D. (2019). Soil properties and agronomic factors affecting cadmium concentrations in cacao beans: a nationwide survey in Ecuador. *Science of the Total Environment, 649*, 120-127. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.292

Carmona-Rojas, L. M., Gutiérrez-Rodríguez, E. A., Henao-Ramírez, A. M., & Urrea-Trujillo, A. I. (2022). Nutrition in cacao (*Theobroma cacao* L.) crops: what determining factors should be considered? *Revista de la Facultad de Agronomía, 121*(Esp. 2), Artículo 101. https://doi.org/10.24215/16699513e101

Comisión Nacional para el Desarrollo y Vida sin Drogas. (2020, 16 de octubre). *Pasco: Devida entrega más de mil toneladas de abono a productores para fertilizar 3351 hectáreas de cacao*. https://www.gob.pe/institucion/devida/noticias/307639-pasco-devida-entrega-mas-de-mil-toneladas-de-abono-a-productores-para-fertilizar-3351-hectareas-de-cacao

De Matos, C. H. L., Melo, V. F., Uchôa, S. C. P., Pereira, R. de A., & Nascimento, P. P. R. R. (2023). Phosphorus extractants for soils in the humid tropical region of Brazil. *Revista Ciência Agronômica, 54*, Artículo e20228372. https://doi.org/10.5935/1806-6690.20230042

Durand Ordoñez, V. E. (2022). *Caracterización de suelos de la microcuenca Chinamayo–Mariano Dámaso Beraún–Leoncio Prado, Huánuco* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. https://repositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/2296

European Commission. (2023, 25 de abril). *Commission Regulation (EU) 2023/915 of 25 April 2023 on maximum levels for certain contaminants in food and repealing Regulation (EC) No. 1881/2006*. Official Journal of the European Union. https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2023/915/oj

International Cocoa Organization. (2026, 29 de mayo). *May 2026 quarterly bulletin of cocoa statistics*. https://www.icco.org/may-2026-quarterly-bulletin-of-cocoa-statistics/

Kochian, L. V., Piñeros, M. A., Liu, J., & Magalhaes, J. V. (2015). Plant adaptation to acid soils: the molecular basis for crop aluminum resistance. *Annual Review of Plant Biology, 66*, 571-598. https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-043014-114822

Ministerio de Comercio Exterior y Turismo. (2025, 30 de enero). Exportaciones de cacao registran nuevo récord al superar los US$ 1000 millones entre enero y noviembre del 2024 [Comunicado de prensa]. https://www.gob.pe/institucion/mincetur/noticias/1100316-exportaciones-de-cacao-registran-nuevo-record-al-superar-los-us-1000-millones-entre-enero-y-noviembre-del-2024

Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. (2025). Boletín cacao en grano 2025. https://repositorio.midagri.gob.pe/handle/20.500.13036/2009

Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales. (1981). *Inventario y evaluación semidetallada de los recursos naturales de la zona del río Pichis (Proyecto Pichis-Palcazu)*. https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/957

Ramtahal, G., Chang Yen, I., Ahmad, N., Bekele, I., Bekele, F., Maharaj, K., Wilson, L., & Harrynanan, L. (2015). Prediction of soil cadmium bioavailability to cacao (*Theobroma cacao* L.) using single-step extraction procedures. *Communications in Soil Science and Plant Analysis, 46*(20), 2585-2594. https://doi.org/10.1080/00103624.2015.1089262

Sanchez, P. A. (2019). *Properties and management of soils in the tropics* (2.ª ed.). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/9781316809785

Scaccabarozzi, D., Castillo, L., Aromatisi, A., Milne, L., Búllon Castillo, A., & Muñoz-Rojas, M. (2020). Soil, site, and management factors affecting cadmium concentrations in cacao-growing soils. *Agronomy, 10*(6), Artículo 806. https://doi.org/10.3390/agronomy10060806

Manuscrito aceptado

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2021). *Climas del Perú: mapa de clasificación climática nacional*. https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2185020/Climas%20del%20Per%C3%BA%3A%20Mapa%20de%20Clasificaci%C3%B3n%20Clim%C3%A1tica.pdf

Silva Sampe, C. G. (2018). Remoción de cadmio en suelos mediante lavado vertical con dos extractantes [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Agraria de la Selva]. Repositorio Institucional de la Universidad Nacional Agraria de la Selva. https://repositorio.unas.edu.pe/handle/20.500.14292/1461

Soil Science Division Staff. (2017). *Soil survey manual* (C. Ditzler, K. Scheffe, & H. C. Monger, Eds.; Manual del USDA n.º 18). Government Printing Office. https://www.nrcs.usda.gov/resources/guides-and-instructions/soil-survey-manual

Tantalean Pedraza, E., & Huauya Rojas, M. Á. (2017). Distribución del contenido de cadmio en los diferentes órganos del cacao CCN-51 en suelo aluvial y residual en las localidades de Jacintillo y Ramal de Aspuzana. *Revista de Investigación de Agroproducción Sustentable, 1*(2), 69-78. https://doi.org/10.25127/aps.20172.365

Thomas, E., Atkinson, R., Zavaleta, D., Rodriguez, C., Lastra, S., Yovera, F., Arango, K., Pezo, A., Aguilar, J., Tames, M., Ramos, A., Cruz, W., Cosme, R., Espinoza, E., Chavez, C. R., & Ladd, B. (2023). The distribution of cadmium in soil and cacao beans in Peru. *Science of the Total Environment, 881*, Artículo 163372. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163372

Tuesta, O. A., Tuesta, J. C., Rafael-Rutte, R., Arévalo-Gardini, E., Vela L., J. M., & Arévalo-Hernández, C. O. (2024). Effect of oil palm compost and sandy soil on the growth of cacao (*Theobroma cacao* L.) seedlings. *Agronomía Mesoamericana, 35*, Artículo 57921. https://doi.org/10.15517/am.2024.57921

Vanderschueren, R., Argüello, D., Blommaert, H., Montalvo, D., Barraza, F., Maurice, L., Schreck, E., Schulin, R., Lewis, C., Vazquez, J. L., Umaharan, P., Chavez, E., Sarret, G., & Smolders, E. (2021). Mitigating the level of cadmium in cacao products: reviewing the transfer of cadmium from soil to chocolate bar. *Science of the Total Environment, 781*, Artículo 146779. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146779

Wade, J., Ac-Pangan, M., Favoretto, V. R., Taylor, A. J., Engeseth, N., & Margenot, A. J. (2022). Drivers of cadmium accumulation in *Theobroma cacao* L. beans: a quantitative synthesis of soil-plant relationships across the Cacao Belt. *PLoS ONE, 17*(2), Artículo e0261989. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261989

Manuscrito aceptado