

# Análisis de las propiedades físico-químicas de los suelos bajo árboles elite de Cacao del tipo regional en Tumaco, Nariño

## Analysis of the physicochemical properties of soils under elite regional-type cacao trees in Tumaco, Nariño

Jose Ives Perez-Zuñiga<sup>1</sup>, Manfred R. Palacio<sup>2\*</sup>, Carlos Enrique Castilla Campos<sup>2</sup>, Jaydy Segura Estupiñán<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Centro de Investigación Palmira – Sede Popayán, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), Popayán, Cauca (Colombia).

<sup>2</sup> Centro de Investigación El Mira, Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria (Agrosavia), Tumaco, Nariño (Colombia).

### Resumen

Solo el 12% del cacao mundial es reconocido como fino de sabor y aroma y en el departamento de Nariño el cacao regional de Tumaco presenta un perfil sensorial diferencial merecedor de premios nacionales e internacionales. Con este ensayo se buscó evaluar si las características de los suelos donde se seleccionaron 25 árboles elite tipo regional de más de 800 evaluados provenientes de paisajes de planicie aluvial, lomerío, y montaña ubicados en los municipios de Tumaco y Los Andes departamento de Nariño tienen propiedades diferenciales que promueven su alta productividad y adaptabilidad. De las limitaciones reportadas el P disponible es la principal limitante en cultivos que se ubican en zona de bosque húmedo tropical, para mejorar la disponibilidad de nutrientes se recomienda la opción de integrar estrategias agroecológicas como bacterias solubilizadoras de P o micorrizas. Por otra parte, a pesar de asociar la disponibilidad nutricional de los suelos estudiados a tres paisajes contrastantes, no se evidenciaron restricciones físicas ni químicas, concluyendo que las características nutricionales no aportan a la calidad sensorial de los materiales seleccionados. Sin embargo, en la zona de estudio, prácticas locales de cosecha y postcosecha, favorecen tanto la integridad del grano como la expresión de características sensoriales propias del territorio, desconociendo aún el peso de cada uno de estos componentes de manejo en el perfil sensorial resultante.

**Palabras clave:** *Theobroma cacao*, suelo agrícola, contenido nutrientes suelo, producción sostenible.

### Abstract

Only 12% of the world's cacao is recognized as having fine flavor and aroma. In the department of Nariño, the regional Tumaco cacao exhibits a distinctive sensory profile that has earned national and international awards. This study aimed to evaluate whether the characteristics of the soils where 25 elite regional-type trees were selected – out of more than 800 evaluated from alluvial plain, hillside, and mountain landscapes in the municipalities of Tumaco and Los Andes (Nariño) – possess distinct properties that promote their high productivity and adaptability. Among the reported constraints, available phosphorus (P) is the primary limiting factor for crops located in tropical rainforest zones. To improve nutrient availability, integrating agroecological strategies, such as P-solubilizing bacteria or mycorrhizae, is recommended. Furthermore, although the nutritional availability of the studied soils was associated with three contrasting landscapes, no physical or chemical restrictions were observed, leading to the conclusion that soil nutritional characteristics do not contribute to the sensory quality of the selected materials. Nevertheless, local harvest and post-harvest practices in the study area favor both bean integrity and the expression of the territory's unique sensory characteristics, although the individual impact of each management component on the final sensory profile remains unknown.

**Key words:** *Theobroma cacao*, family farming, innovation

Para citar este artículo: Pérez Zúñiga, J.I., Palacio, M., Castilla Campos C. E., & Segura Estupiñán, J. (2022). Análisis de las propiedades físico-químicas de los suelos bajo árboles elite de Cacao del tipo regional en Tumaco, Nariño. *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 23(2), eXXXX. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol23\\_num2\\_art:XXXX](https://doi.org/10.21930/rcta.vol23_num2_art:XXXX)

## Introducción

Solo un 12% de cacao mundial esta designado con la distinción de ser “fino de sabor y aroma”, con América latina aportando el 90% de las exportaciones. De este tipo de cacao, designado por el anexo C del International cocoa agreement (Artículo 2.2. y Anexo C del International Cocoa Agreement 2010 (Ammended). 2011), Ecuador, República Dominicana y Perú son los mayores exportadores por volumen mientras que Colombia, Brasil y México también lo usan para su mercado doméstico. La nueva definición del cacao fino se caracteriza por tener un perfil sensorial complejo, con atributos balaceados de aromas y sabores resultado de la interacción entre (a) el genotipo, (b) condiciones favorables para el desarrollo o el ambiente territorial, (c) el manejo de lote, (d) las prácticas de cosecha y postcosecha y (e) la integridad del grano con una composición física y química estable. El 80% de los cacaos que se producen en Colombia tienen la calificación de finos y de sabor y aroma (ICCO, 2024).

Los cacaos cultivados en Tumaco, principalmente por las comunidades afrodescendientes en territorios colectivos, encajan en esta definición: de su composición genética se conoce que son probablemente el producto de múltiples introducciones individuales, mantenidos y multiplicados a través del tiempo por los agricultores locales que comparten sus mejores semillas. De la clasificación de diez clústeres genéticos propuesta por Motamayor et al (2008) y sin procesos estrictos de selección genética en Tumaco, estos árboles exhiben una descendencia híbrida principalmente asociada a los grupos filogenéticos de Iquitos, Criollo, Nacional, Amelonado, y Contamana donde el ancestro del grupo criollo llama la atención, ya que fue el principal tipo de cacao cultivado en Colombia hasta 1885 (Delgadillo-Duran et al, 2024). Además, se han desarrollado en un ambiente único en el planeta, el bioma de bosque húmedo tropical del Chocó o Pacífico biogeográfico, que se caracteriza por no tener una estación seca definida comparado con el resto de Colombia. Con esta combinación de particularidades regionales anteriormente descrita, con esta designación de finos de sabor y aroma se pretende tener un impacto positivo no solo en la sostenibilidad del sector cacaotero, sino que le reconozcan mejores precios al agricultor, que cada vez más se orienta al consumidor que demanda productos del tipo orgánico.

De las cuatro regiones identificadas como idóneas para Colombia para este cultivo, Tumaco es la única en la de la zona suroccidental (CE González-Orozco et al. 2023) con una amplia capacidad productiva distinguida por sus buenos suelos en el Pacífico biogeográfico (Flórez, A. et al, 2018; León et al, 2019). Y han sido reconocidos además por su perfil sensorial diferencial, es decir, son finos y de sabor de aroma con un perfil sensorial distintivo de otros en Colombia. La cacaocultura de Tumaco ya es reconocida y premiada, a nivel nacional con la distinción del cacao de plata 2023 en el X Concurso Nacional de Cacao Fino y de Aroma, conocido como “Cacao de Oro de Colombia” (Pagina 10. 2023) y anteriormente en el 2015 fue merecedora por primera vez por su alta calidad con la distinción de “Mejor muestra de Suramérica” durante el Concurso “Cocoa of Excellence” del Salón de Chocolate de París, la feria mundial más importante del sector.

(<https://www.colombiaproductiva.com/ptp-comunica/noticias/cacao-de-tumaco-gana-premio-mundial-a-la-excelencia>).

Sobre el perfil diferencial, algunos investigadores proponen una relación entre el suelo, el clima y las características del cacao producido (Loureiro, et al., 2016) pero no está claramente documentada. Con este ensayo se pretende evaluar si las características de los suelos donde su encontraron arboles de cacao sobresalientes o elite, del tipo regional, identificados en el marco del proyecto “Estudio para el mejoramiento de la productividad y calidad sensorial (aroma y sabor) del cacao (*Theobroma cacao* l.) regional del departamento de Nariño” tienen propiedades diferenciales que promueva este perfil. Dado el auge de la cacaocultura regional como promotor de paz y reemplazo de cultivos ilícitos, los cacaos regionales son los preferidos por las comunidades locales y en contra de materiales introducidos del tipo universal que, una vez introducidos, generalmente tienen muy baja productividad debido a la susceptibilidad al complejo de enfermedades presentes. Con esta selección de árboles elite se espera resaltar las características diferenciales de los cacaos locales y promoverlos dada la preferencia por la demanda nacional e internacional.

### **Materiales y métodos**

El muestreo se llevó a cabo en el departamento de Nariño en los dos municipios cacaoteros de mayor producción: Tumaco y Los Andes. Según el protocolo experimental del proyecto “Estudio para el mejoramiento de la productividad y calidad sensorial (aroma y sabor) del cacao (*Theobroma cacao* l.) regional del departamento de Nariño”. De más de 800 árboles con características sobresalientes y después de un año de seguimiento, se seleccionaron 25 árboles elite. Bajo el dosel de estos árboles se tomaron las 25 muestras de suelo a un metro de distancia desde el tronco. Todas provenientes del municipio de Tumaco y los Andes Sotomayor en el departamento de Nariño (Tabla 1) que incluye la georeferenciación y una descripción cualitativa del relieve y contorno del lote, y se ubican entre los 0° 21' y 2° 40' de latitud norte y los 76° 50' y 79° 02' de longitud oeste (IGAC, 2004).

Las muestras fueron enviadas para análisis en el laboratorio de suelos de la Universidad de Nariño donde se determinó pH, textura del suelo (al tacto), capacidad de intercambio catiónico, acidez intercambiable, carbono orgánico, Materia orgánica del suelo (MOS), bases intercambiables (Ca, Mg y K), y concentración de micronutrientes (Fe, Mn, Cu y Zn).

**Tabla 1.** Ubicación y descripción del paisaje donde están localizados los árboles elite seleccionados.

| <b>Muestra</b> | <b>Latitud</b> | <b>Longitud</b> | <b>Topografía</b> |
|----------------|----------------|-----------------|-------------------|
| 1              | 01°49'08,8"    | 78°27'40,7"     | Pendiente         |
| 2              | 01°48'40,9"    | 78°27'59,4"     | Ondulada          |
| 3              | 01°48'59,5"    | 78°28'09,4"     | Ondulada          |
| 4              | 01°24'47,5"    | 78°40'45,8"     | Plana             |
| 5              | 01°29'53,1"    | 78°41'41,8"     | Plana             |

|    |             |             |           |
|----|-------------|-------------|-----------|
| 6  | 01°29'36,0" | 78°41'47,4" | Plana     |
| 7  | 01°30'13,0" | 78°41'21,8" | Plana     |
| 8  | 01°49'10,2" | 78°30'11,5" | Plana     |
| 9  | 01°46'16,9" | 78°28'40,3" | Plana     |
| 10 | 01°35'20,7" | 78°43'40,8" | Plana     |
| 11 | 01°40'43,6" | 78°42'40,9" | Plana     |
| 12 | 01°34'11,2" | 78°40'19,8" | Plana     |
| 13 | 01°34'04,0" | 78°40'16,5" | Plana     |
| 14 | 01°34'06,7" | 78°40'25,6" | Plana     |
| 15 | 01°39'33,1" | 78°38'08,3" | Plana     |
| 16 | 01°39'59,6" | 78°38'26,7" | Plana     |
| 17 | 01°39'50,3" | 78°38'26,4" | Plana     |
| 18 | 01°42'26'4" | 78°30'17,3" | Ondulada  |
| 19 | 01°42'24,3" | 78°30'16,2" | Ondulada  |
| 20 | 01°42'47,5" | 78°30'22,7" | Ondulada  |
| 21 | 01°42'40,6" | 78°30'10,8" | Plana     |
| 22 | 01°49'07,8" | 78°27'58,6" | Pendiente |
| 23 | 01°40'22,0" | 78°38'37,1" | Plana     |
| 24 | 01°39'22,3" | 77°30'51,4" | Pendiente |
| 25 | 01°35'32,2" | 77°30'04,4" | Pendiente |

Fuente: Elaboración propia

En total se evaluaron 20 variables del suelo, incluidas 6 variables calculadas a partir de los datos obtenidos. A la base de datos se aplicó análisis de componentes principales (ACP) con el objetivo de evaluar la variabilidad de los elementos y determinar posibles correlaciones entre ellos, incluyendo variables indirectas calculadas, que han sido tradicionalmente usadas para el análisis de suelos. Los análisis estadísticos se realizaron en R versión 3.6.3 (R Core Team, 2020) y se usó el paquete de análisis estadístico FactorMineR versión 2.11 (Lê S, Josse J et al, 2008). Los tenores individuales de cada elemento o su saturación fueron comparados por los parámetros de requisitos mínimos de suelos sugeridos para la evaluación de suelos con potencial cacaotero en Colombia y obtener una producción sostenible por los pequeños agricultores (Leon et al, 2021).

## Resultados y discusión

Tumaco, en el departamento de Nariño, concentra la mayor parte de la producción cacaotera departamental, sumada a las mas de 100 mil hectáreas con disponibilidad de tierras con aptitud alta y media y (Flórez, A. et al, 2018). Las 25 muestras de suelos provenientes de igual número de árboles elite del tipo regional, se concentraron en el municipio de Tumaco, donde la descripción topográfica inicialmente descrita se reclasificó por una de las cuatro unidades del paisaje sugerido para Nariño y que son contrastantes por sus propiedades de suelo y clima: planicie aluvial, lomerío, piedemonte y montaña nariñense (Tabla 2) (IGAC, 2004, Poveda et al, 2004). No se encontraron arboles elite en el paisaje de piedemonte, y solamente dos (2) muestras se tomaron en el paisaje de montaña. La mayoría de los árboles elite (16) se ubicaron en el paisaje de planicie aluvial (planicie) y siete (7) en

el pie del paisaje de lomerío. Esta reclasificación facilitó la agrupación e interpretación de las características generales de los suelos, como se muestran para las variables de pH y MOS con las dos descripciones (Figura 1). Según el mapa de uso de suelo de Nariño, las mejores propiedades agrícolas se encuentran en la planicie aluvial y la de menor condición en el lomerío, como se muestra en la comparación de la descripción de paisaje.

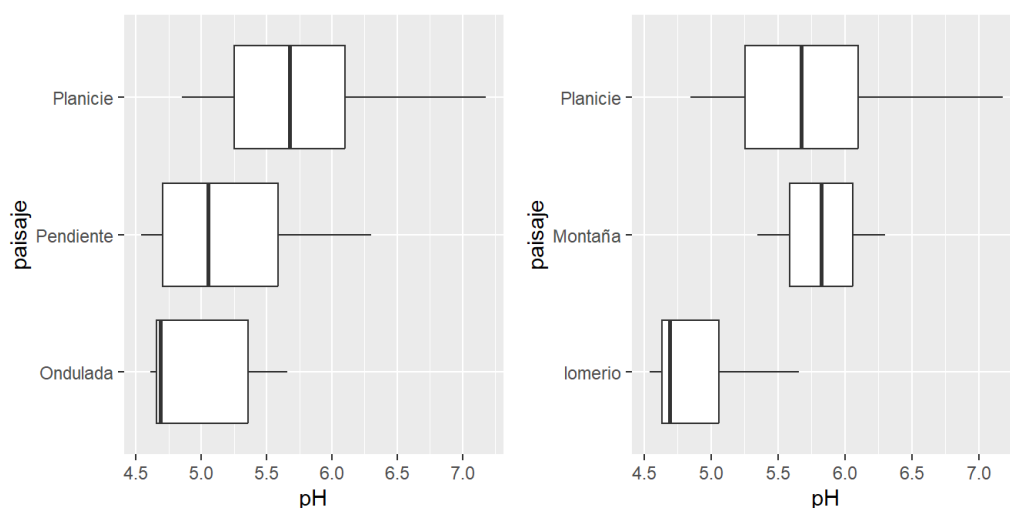
**Tabla 2.** Reclasificación del relieve usado inicialmente en la ubicación de los árboles elite por la unidad del paisaje sugerido por el IGAC (IGAC 2004)

| Muestra | Latitud     | Longitud     | Descripción del relieve |           | Textura |
|---------|-------------|--------------|-------------------------|-----------|---------|
|         |             |              | Topografía*             | Paisaje** |         |
| 25      | 01°35'32,2" | 077°30'04,4" | Pendiente               | Montaña   | Ar-A    |
| 24      | 01°39'22,3" | 077°30'51,4" | Pendiente               | Montaña   | Ar      |
| 19      | 01°42'24,3" | 078°30'16,2" | Ondulada                | lomerío   | Ar-A    |
| 18      | 01°42'26,4" | 078°30'17,3" | Ondulada                | lomerío   | Ar      |
| 20      | 01°42'47,5" | 078°30'22,7" | Ondulada                | lomerío   | Ar      |
| 2       | 01°48'40,9" | 078°27'59,4" | Ondulada                | lomerío   | Ar-L    |
| 3       | 01°48'59,5" | 078°28'09,4" | Ondulada                | lomerío   | Ar      |
| 22      | 01°49'07,8" | 078°27'58,6" | Pendiente               | lomerío   | Ar-A    |
| 1       | 01°49'08,8" | 078°27'40,7" | Pendiente               | lomerío   | Ar-A    |
| 4       | 01°24'47,5" | 078°40'45,8" | Plana                   | planicie  | F-Ar-A  |
| 6       | 01°29'36,0" | 078°41'47,4" | Plana                   | planicie  | Ar-A    |
| 5       | 01°29'53,1" | 078°41'41,8" | Plana                   | planicie  | Ar-L    |
| 7       | 01°30'13,0" | 078°41'21,8" | Plana                   | planicie  | Ar-A    |
| 13      | 01°34'04,0" | 078°40'16,5" | Plana                   | planicie  | Ar      |
| 14      | 01°34'06,7" | 078°40'25,6" | Plana                   | planicie  | Ar-A    |
| 12      | 01°34'11,2" | 078°40'19,8" | Plana                   | planicie  | Ar-L    |
| 10      | 01°35'20,7" | 078°43'40,8" | Plana                   | planicie  | Ar      |
| 15      | 01°39'33,1" | 078°38'08,3" | Plana                   | planicie  | Ar      |
| 17      | 01°39'50,3" | 078°38'26,4" | Plana                   | planicie  | Ar-L    |
| 16      | 01°39'59,6" | 078°38'26,7" | Plana                   | planicie  | Ar-A    |
| 23      | 01°40'22,0" | 078°38'37,1" | Plana                   | planicie  | Ar-A    |
| 11      | 01°40'43,6" | 078°42'40,9" | Plana                   | planicie  | F-Ar-A  |
| 21      | 01°42'40,6" | 078°30'10,8" | Plana                   | planicie  | Ar      |
| 9       | 01°46'16,9" | 078°28'40,3" | Plana                   | planicie  | Ar-L    |
| 8       | 01°49'10,2" | 078°30'11,5" | Plana                   | planicie  | Ar-L    |

\*Descripción del relieve del área

\*\*Unidad de paisaje del IGAC

Fuente: Elaboración propia



**Figura 1.** Evaluación de pH, como ejemplo de los parámetros de suelo, cuando se reclasifica por el paisaje donde se seleccionaron los árboles elite.

Fuente: Elaboración propia

Los rangos y medidas de tendencia central de las propiedades fisicoquímicas del suelo se presentan en la Tabla 3. Cuando se comparan con los parámetros de suelos previamente reportados en Tumaco y los requisitos mínimos sugeridos para Colombia (Leon-Moreno et al, 2021), en general se observa como con algunos parámetros no son correlacionados con el pH, como el Al intercambiable o el P disponible, entre otros, la mejor evaluación de tendencia central no parece ser la media aritmética, ya que tiende a sobreestimar el indicador, y se propone la mediana como el mejor descriptor de la tendencia central. En comparación con los parámetros de referencia (Tabla 3) la mayoría de los suelos evaluados presentaron un mayor contenido elemental y por lo tanto explicaría, en buena parte, las características productivas de estos árboles elite. Llama la atención sin embargo que, a pesar de los bajos niveles de P disponible, estos árboles exhiben una buena productividad.

**Tabla 3.** Descripción de las características de medidas de tendencia central de las propiedades fisicoquímicas del suelo donde se encuentran los árboles elite en Nariño.

|            | DA <sup>1</sup> | pH  | MO <sup>2</sup> | P <sup>4</sup> | CICE <sup>2</sup> | AL <sup>2</sup> | Ca <sup>2</sup> | Mg <sup>2</sup> | K <sup>2</sup> | Al <sup>3</sup> | Ca <sub>3</sub> | Mg <sub>3</sub> | K <sup>3</sup> | Ca+ Mg <sup>3</sup> |
|------------|-----------------|-----|-----------------|----------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------|---------------------|
| Minino     | 0,7             | 4,5 | 2,1             | 1,5            | 4,7               | 0,0             | 3,1             | 1,3             | 0,1            | 0               | 45              | 12              | 2              | 75                  |
| Mediana    | 1,0             | 5,6 | 3,4             | 3,7            | 12,2              | 0,0             | 7,9             | 3,3             | 0,4            | 0               | 67              | 27              | 3              | 96                  |
| Media*     | 0,9             | 5,5 | 4,0             | 6,7            | 13,7              | 0,5             | 9,3             | 3,6             | 0,4            | 3               | 66              | 28              | 4              | 94                  |
| Máximo     | 1,1             | 7,2 | 9,0             | 28,7           | 31,7              | 3,7             | 24,6            | 6,6             | 0,9            | 22              | 86              | 40              | 9              | 99                  |
| Tumaco*    | 1,1             | 6,0 | 3,2             | 5,2            | 7,7               | 0,1             | 5,3             | 2,0             | 0,2            | 0               | 68              | 26              | 3              | 94                  |
| Nacional** |                 | 5,2 | 3,0             | 12,0           | 6,0               | < 1,5           | 4,0             | 1,0             | 0,2            | < 20            | >6 0            | >20             | >5             | >80                 |

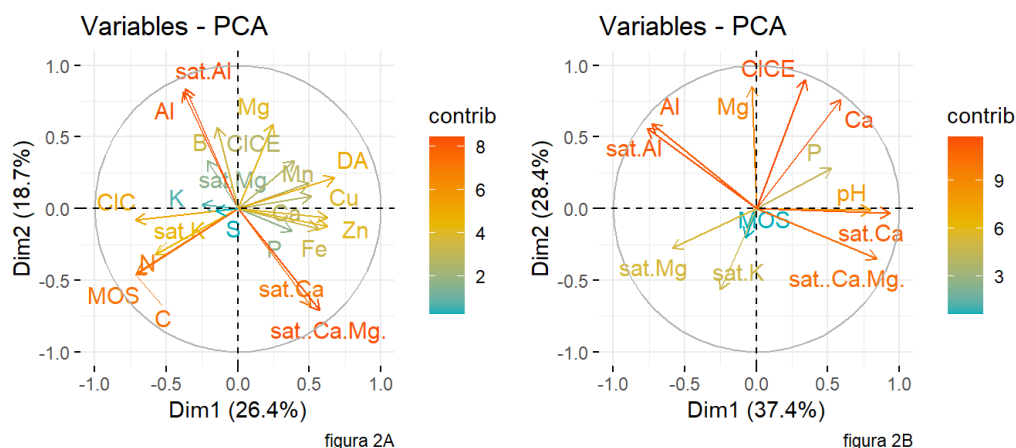
\*Media aritmética \*\*Nivel de referencia

<sup>1</sup>: mg m<sup>-3</sup>, <sup>2</sup>: cmolc kg<sup>-1</sup>, <sup>3</sup>: % , <sup>4</sup>: mg kg<sup>-1</sup>

Fuente: Elaboración propia

Los resultados del análisis de componentes principales (ACP) se presenta en la Tabla 4 y figura 2. En la figura 2A se presentan todos los parámetros evaluados, pero para facilidad de interpretación, en la figura 2B, se presentan solamente los que tienen la mayor contribución relativa a la variabilidad total y una mayor capacidad de correlación. En este caso, un vector con color naranja y de mayor longitud indica una mayor variabilidad, y un vector con color azul y corto sugieren una menor variabilidad. Y a su vez, vectores en el mismo cuadrante o en cuadrantes opuestos sugieren una correlación positiva o negativa respectivamente.

En la figura 2B, las dimensiones (DIM) 1 y 2 explican en conjunto el 51.1% de la variabilidad presente. Se evidencia que las variables de mayor peso son aquellas calculadas o derivadas y asociadas a la CICE, a las saturaciones (Sat) de Al, Ca, Mg y su suma, así como las relaciones inversas entre la saturación de bases y la de Al intercambiable. En el cuadrante inferior izquierdo de la figura 2A se expresa la variable MOS y su estrecha relación con el N y el carbono orgánico, estas últimas calculadas de forma indirecta por la MOS. Aunque también se analizaron elementos menores, su peso en el ACP fue muy bajo y no se presenta una correlación significativa con las variables de mayor contribución a la variabilidad.



**Figura 2.** Peso relativo de las dimensiones 1 y 2 de la base completa de datos (2A) y relevancia de las variables descriptivas de mayor peso y capacidad de correlación (2B). Fuente: Elaboración propia

**Tabla 4.** Resultados del análisis de componentes principales de las características de suelos donde se ubican 25 árboles elite seleccionados en Nariño.

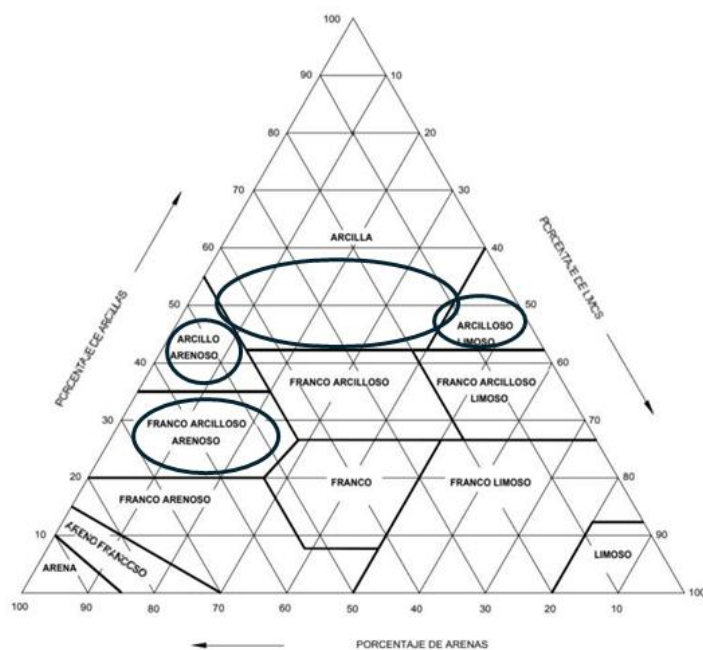
| Variable   | Dim.1 | Dim.2 |
|------------|-------|-------|
| Sat Ca     | 0.87  | 0.00  |
| Sat Ca+Mg. | 0.71  | 0.12  |

|        |      |      |
|--------|------|------|
| pH     | 0.64 | 0.00 |
| Sat Al | 0.58 | 0.31 |
| Al     | 0.54 | 0.35 |
| Sat Mg | 0.35 | 0.08 |
| Ca     | 0.34 | 0.58 |
| P      | 0.28 | 0.08 |
| CICE   | 0.12 | 0.81 |
| Sat K  | 0.06 | 0.32 |
| MOS    | 0.01 | 0.04 |
| Mg     | 0.00 | 0.72 |

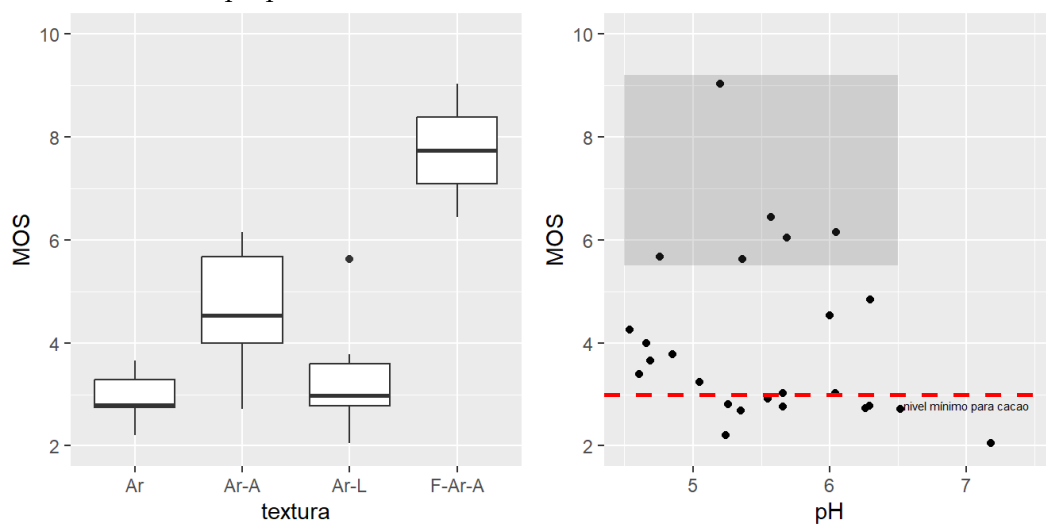
**Fuente:** Elaboración propia

A pesar de la restringida ubicación geográfica del área de muestreo (Tabla 3) se evidenció una dispersión amplia del pH, entre 4.5 y 7. 2, similar al de muestras de suelo previamente evaluadas en el municipio de Tumaco (Leon-Moreno et al, 2019). De las características fisicoquímicas de estos paisajes, la planicie aluvial se destaca por ofrecer las mejores condiciones de suelo en comparación con el paisaje de lomerío (borde o parte baja del paisaje de lomerío). Los dos suelos de montaña (muestras 24 y 25) mostraron contenidos elementales disponibles similares en el rango de los suelos de planicie aluvial.

Las texturas reportadas fueron de tendencia arcillosa, desde franco arcillosa hasta arcillo limosas (Tabla 2 y Figura 3), Los contenidos de MOS variaron desde 2 a 9%, siendo la planicie aluvial la que mostró los menores contenidos y el lomerío los mayores. Basados en los niveles de referencia, suelos minerales con MOS mayores de 5% podrían estar afectados por malas condiciones de drenaje y están asociados a la textura franco arcillo arenosa (Figura 4). El cultivo del cacao generalmente no es tolerante a la inundación permanente (Garcia et al, 2004) y por eso se destaca que algunos de estos materiales elite parecen tolerar condiciones de mal drenaje.



**Figura 3.** Ubicación de las texturas reportadas bajo 25 árboles élite de cacao del tipo regional en Nariño. Fuente: Elaboración propia

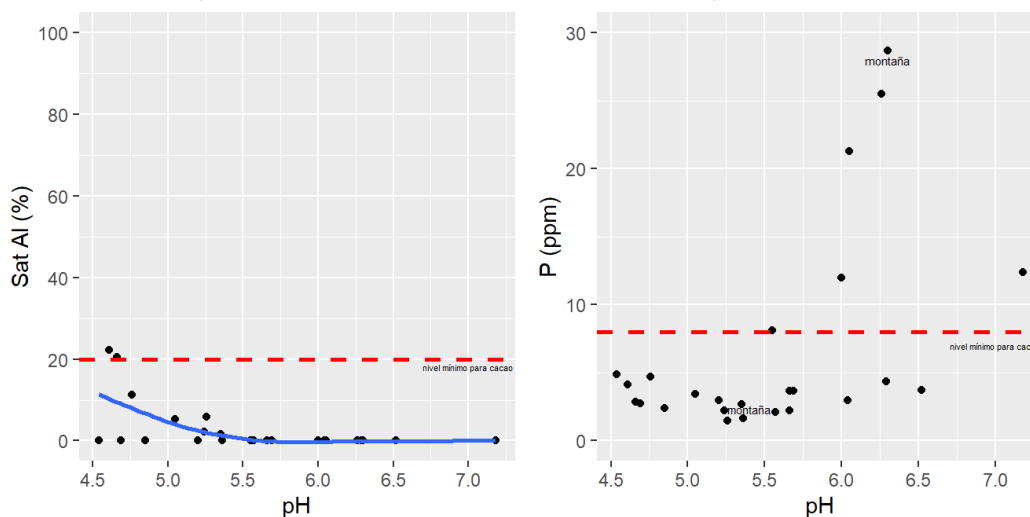


**Figura 4.** Relación entre la MOS y el paisaje con el pH en los suelos bajo los árboles elite de cacao en Nariño. Fuente: Elaboración propia

Los niveles de saturación de Al se muestran en la figura 5. Los niveles de saturación de Al disminuyen con el pH y solamente 2 muestras tienen saturaciones ligeramente superiores al 20%. Dada la condición de árboles elite, con estos niveles no se detectó afectación por toxicidad de Al (Ribeiro et al., 2013).

Por el contrario, los niveles de fósforo disponible en los paisajes de planicie aluvial y lomerío se evalúan como deficientes y solamente en el paisaje de montaña el P

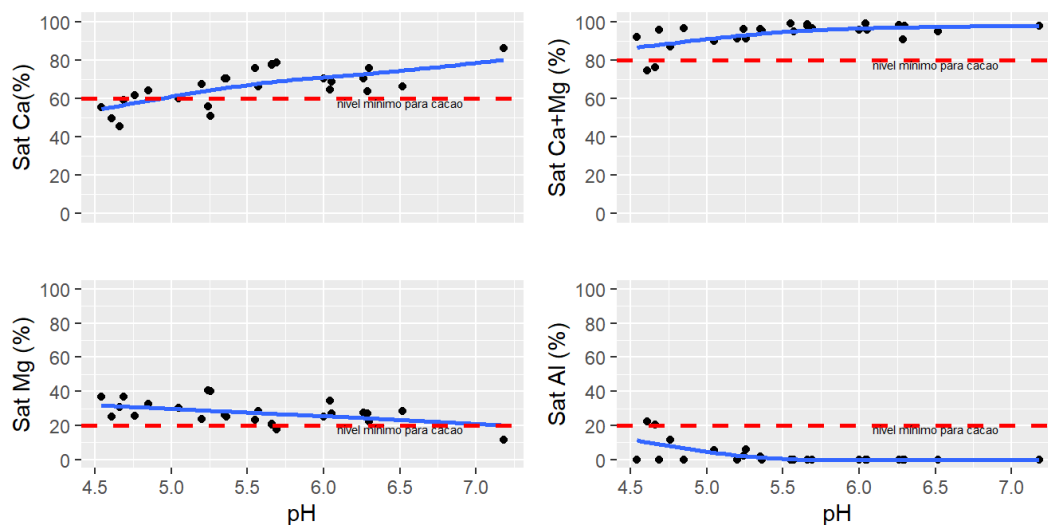
aparece suficiente en una de las dos muestras. Solamente 5 muestras mostraron niveles adecuados para producciones sostenibles (Figura 5). A pesar de que se evidencia una tendencia de mayor disponibilidad con aumento en el pH hasta 6.5 (4 muestras), esta tendencia decrece abruptamente, y no es generalizada para los suelos cacaoteros en Colombia, que solo muestran una tendencia de aumento con P disponible en el rango de pH afectado por el contenido de Al hasta valores de pH no mayores de 5.2-5.5 (Buol, 2005; León-Moreno, et al, 2021).



**Figura 5.** Relación entre la saturación de Al y el contenido de fosforo disponible con relación al pH en suelos bajo arboles elite en Nariño.

Fuente: Elaboración propia

De los contenidos nutricionales reportados en los suelos (tabla 3) y al igual que en los suelos cacaoteros colombianos (León-Moreno, et al, 2021), el Ca disponible y su saturación aumenta con el pH con valores generalmente mayores del 60% de saturación; y para la saturación del Mg, con niveles superiores de 20%, no se detectó una correlación con pH (Figura 6A). La suma de las saturaciones de Ca+Mg sobrepasa los niveles sugeridos de 80% sugerido como ideal. Los niveles nutricionales reportados bajo los árboles elite, no muestran limitantes para su desarrollo por estos elementos o por la toxicidad del aluminio (Figura 6B). Los niveles de K disponible (no se muestran) fueron levemente inferiores a los niveles de referencia (Tabla 3).



**Figura 6.** Relación entre la saturación de Al, Ca y Mg con relación al pH en suelos bajo árboles elite en Nariño.

Fuente: Elaboración propia

## Discusión

Evidentemente, en 25 sitios dispersos en tres paisajes contrastantes, donde cada uno de los árboles elite, está en un lote rodeado de otros árboles menos productivos y generalmente con poco o ningún manejo, se encontró un amplio rango de condiciones de suelos que varían desde suficiencia nutricional, hasta deficiencias evidente de uno o dos nutrientes, o condiciones de mal drenaje (Tabla 3). Pero a pesar de las diferentes condiciones del suelo, los árboles elite tienen en común el buen comportamiento productivo y fitosanitario que no se puede atribuir a un solo factor genético ya que son posiblemente cacaos del tipo híbrido (Delgadillo-Duran *et al*, 2024). En general, el análisis indica que en el suelo bajo un árbol elite seleccionado predomina una buena condición fisicoquímica: sin compactaciones evidentes, ausencia de elementos tóxicos en niveles críticos y contenidos químicos de elementos conducentes a la buena producción, demostrada por haber sido seleccionados por producción. Esta condición está respaldada por la clasificación de alta y media aptitud por la UPR para los suelos en Tumaco (Flores *et al*, 2018).

Como adicionalmente los árboles elite también están asociados a una buena condición fitosanitaria, se sugiere que poseen unas características de tolerancia al complejo de plagas y enfermedades locales dominadas por la monilia (*Moniliophthora roreri*) (Bacca *et al*, 2023), uno de los parámetros de selección utilizados por el ICA para la ampliación de registro de clones, como el TCS 19 de Agrosavia, con demostrada adaptación para la subregión del Pacífico biogeográfico colombiano (ICA, 2024) resolución ICA No.00006244 del 24/06/2024).

Es reconocido que la estrategia para incrementar sosteniblemente los rendimientos de los cultivos provenientes del bosque húmedo tropical seguramente debe contemplar una estrategia multifactorial (Buol, 2005; Wright *et al*, 2019, Torres *et al*, 2023), pero dada la prevalencia de la deficiencia de fósforo en los suelos de Tumaco (tabla 3), el énfasis en la investigación y el manejo de este elemento debe incluir no solamente la adición del elemento (dosis y fuente) sino también estrategias de manejo de carácter agroecológico, como bacterias solubilizadoras de P y la promoción de las micorrizas entre otras ofertas tecnológicas, para aumentar su disponibilidad. Los cultivos en suelos tropicales bajos, provenientes de bosques tropicales, responden positivamente a las aplicaciones de P y de K, mas no necesariamente al N, pero beneficiando adicionalmente a todo el complejo del sistema agroforestal asociado al cacao (Vitousek *et al*, 2010; Wright *et al*, 2018; Martinez *et al*, 2024).

Con la definición de lo que caracteriza un cacao fino de sabor y aroma, el perfil sensorial complejo resultante del componente genético de los cacaos regionales en el bioma de bosque húmedo tropical se promueve con el manejo de lote (producción) y las prácticas de cosecha y postcosecha para que la integridad del grano sea estable. Aun no se sabe cuál es el peso de cada uno de estos componentes de manejo en el perfil sensorial resultante y se necesita mucha más información para que Tumaco y el departamento de Nariño continúen siendo uno de esos sitios de referencia de la cacaocultura nacional.

### **Conclusiones**

El potencial genético de las variedades de cacao endógenas del territorio promueve y potencializa las características fisicoquímicas y sensoriales, haciéndolo diferencial ante el cacao producido en Colombia y el mundo.

No se evidenciaron restricciones físicas o químicas que permitan concluir una relación entre la condición física o el contenido nutricional de los suelos evaluados con las características sensoriales que hacen diferencial el cacao producido en Tumaco.

Características propias del bosque húmedo tropical junto a las prácticas de cosecha y postcosechas propias del territorio favorecen la integridad del grano y la expresión de características sensoriales en el licor de cacao, sin determinar el peso de cada uno de los componentes en el perfil sensorial resultante.

**Contribución de los autores:** Conceptualización, J.I.P.-Z., M.R.P, C.E.C., J.S.; metodología, J.I.P.-Z., M.R.P, C.E.C., J.S., D.M.; análisis formal, J.I.P.-Z., M.R.P, C.E.C., J.S.; redacción (preparación del borrador original), J.I.P.-Z., M.R.P, C.E.C.,

J.S., D.M.; redacción (revisión y edición), J.I.P.-Z., M.R.P, C.E.C., J.S., D.M.; obtención de financiación, J.I.P.-Z. Todos los autores han leído y aceptado la versión publicada del manuscrito

**Financiación:** Este trabajo fue financiado por el Programa de Regalías del Ministerio de Ciencia y Tecnología e Innovación de Colombia bajo el acuerdo 44, firmado en noviembre de 2015, dentro del proyecto “Estudio para el Mejoramiento de la Productividad y Calidad Sensorial (Aroma y Sabor) del Cacao (*Theobroma cacao* L.)”

**Agradecimientos:** Los autores expresan su agradecimiento a la Gobernación de Nariño y a las comunidades cacaoteras de los municipios de Tumaco y Los Andes en el departamento de Nariño, Colombia y la Corporación Colombiana de Investigación Agropecuaria – Agrosavia.

### **Descargos de responsabilidad**

Todos los autores realizaron aportes significativos al documento y quienes están de acuerdo son su publicación y manifiestan que no existen conflictos de interés en este estudio.

### **Referencias**

Agronet, (2024). Área, Producción y Rendimiento Nacional por Cultivo. <https://www.agronet.gov.co/estadistica/Paginas/home.aspx?cod=1>

Bacca, Pedro Pablo, Karen Andrea Alarcon, Juan Carlos González, Félix Alberto Guzmán, Roberto Antonio Coronado, y Yajaira Romero Barrera. 2023. «Evaluación De Cuatro Genotipos De Cacao En Nariño, Colombia». Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas 14 (7). México, ME: e3331. <https://doi.org/10.29312/remexca.v14i7.3331>.

Ballesteros-Possú, B.; Navia, J.; Solarte-Guerrero, J-G. (2021). Socio-economic characterization of the traditional cacao agroforestry system (*Theobroma cacao* L.) Revista de Ciencias Agrícolas. 38(2): 17-35. doi: <https://doi.org/10.22267/rcia.213802.156>

Buol S.W. 2005. TROPICAL SOILS | Humid Tropical. pages 187-195. Encyclopedia of Soils in the Environment. Reference Work. ISBN 978-0-12-348530-4

Delgadillo-Duran, P.; Berdugo-Cely, J.A.; Mejía-Salazar, J.; Pérez-Zúñiga, J.I.; Yockteng, R. Exploring the Diversity and Ancestry of Fine-Aroma Cacao from Tumaco, Colombia. Diversity 2024, 16, 754. <https://doi.org/10.3390/d16120754>

Flórez, A.; Muñoz, C.; Sáenz, B.; Rodríguez, N.; Siachoque, R.; Otero, J.; Páramo, G. [...] y Roldán, J. (2018). Cultivo comercial de cacao: identificación de zonas aptas en Colombia, a escala 1:100.000. Bogotá: UPRA. Recuperado de <URL de ubicación del documento>.

Garcia-Lozano, J., M. Romero-Carrascal, and L.A. Ortiz. 2004. Caracterización y zonificación de áreas potenciales para el cultivo del cacao en Colombia: dirección de cadenas productivas cadena de cacao-chocolate. CORPOICA, FEDECACAO, MADR, Bogota.

González-Orozco C.E., Porcel M., Yockteng R., Caro-Quintero, A., Rodriguez-Medina, C., Santander M., Zuluaga M., Soto M., Rodriguez J., Vaillant F., Escobar S. 2023. Integrating new variables into a framework to support cacao denomination of origin: a case study in Southwest Colombia

Core Team, 2021. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

ICA, 2024. "Por la cual se amplía el registro del clon de cacao Corpoica TCS 19 (Theobroma Corpoica La Suiza) de LA CORPORACION COLOMBIANA DE INVESTIGACION AGROPECUARIA AGROSAVIA, en el Registro Nacional de Cultivares Comerciales del ICA, para las subregiones naturales Valles Interandinos (Valle Geográfico del Rio Magdalena - Valle Geográfico del Rio Cauca), Pacifico, Andina < 1.800 msnm (Área Cafetera Marginal 800 msnm - Área Cafetera 1.800 msnm) y Caribe Seco" Resolución. ICA No.00006244 del 24/06/2024.

ICCO, 2024. Revision of Annex "C" of the International Cocoa Agreement (ICA), 2010 (<https://www.icco.org/revision-of-annex-c-of-the-international-cocoa-agreement-ica-2010-3/>).

ICCO, 2023. Fine Flavour Cocoa (<https://www.icco.org/fine-or-flavor-cocoa/>)

IGAC. 2004. Estudio general de suelos y zonificación de tierras. Departamento de Nariño. Escala 1: 100000. Año 2004.

Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. Journal of Statistical Software, 25(1), 1–18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>.

León-Moreno, C. E., Rojas-Molina, J. and Castilla-Campos, C. E. (2019). Physicochemical characteristics of cacao (Theobroma cacao L.) soils in Colombia: Are they adequate to improve productivity? Agronomía Colombiana, 37(1), 28–38. <https://doi.org/10.15446/agron.colomb.v37n1.70545>

Loureiro, G. A. H. A., Araujo, Q. R., Sodré, G. A., Valle, R. R., Souza, J. O., Ramos, E. M. L. S., ... Grierson, P. F. (2016). Cacao quality: Highlighting selected attributes. Food Reviews International, 33(4), 382–405. <https://doi.org/10.1080/87559129.2016.1175011>

Motamayor, J C, P Lachenaud, J Wallace, R Loor, D N Kuhnet al., 2008 Geographic and genetic population differentiation of the Amazonian chocolate tree (Theobroma cacao L.). PLoS One 3: e3311. [10.1371/journal.pone.0003311](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0003311)

Martínez Reina, A. M., Tordecilla Zumaqué, L., Grandett Martinez, L. M., Rodríguez Pinto, M. del V., Díaz Cabadiaz, A., & Ballesteros Leal, H. A. (2024). Eficiencia técnica del cultivo de cacao (*Theobroma cacao* L) en el sur de Córdoba, Colombia. *Ciencia Y Tecnología*, 17(2), 1-8. <https://doi.org/10.18779/cyt.v17i2.712>

Página 10. 2023. Tumaco ocupó el segundo lugar en concurso 'Cacao de Oro' a nivel nacional (<https://pagina10.com/web/tumaco-ocupo-el-segundo-lugar-en-concurso-cacao-de-oro-a-nivel-nacional/>),

Torres-Torres, J. J., Quinto-Mosquera, H., y Medina-Arroyo, H. H. (2023). Diversidad de especies leñosas y su relación con variables ambientales en bosques post-minería del Chocó Biogeográfico. *Bol. Cient. Mus. Hist. Nat. Univ. Caldas*, 27(2), 13-29. <https://doi.org/10.17151/bccm.2023.27.2.1>

Ribeiro, M.A., A.A. de Almeida, M.S. Mielke, F. Gomes, M.V. Pires, and V.C. Baligar. 2013. Aluminum effects on growth, photosynthesis, and mineral nutrition of cacao genotypes. *J. Plant Nutr.* 36(8), 1161-1179 Doi: 10.1080/01904167.2013.766889

Poveda, I. C., Rojas, C., Rudas, A. y Rangel-C., O. (2004). El Chocó biogeográfico: Ambiente Físico. En O Rangel-C. (eds), Colombia Diversidad Biótica IV. El Chocó biogeográfico/ Costa Pacífica. Instituto de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Colombia.

Vitousek, P.M., Porder, S., Houlton, B.Z. and Chadwick, O.A. (2010), Terrestrial phosphorus limitation: mechanisms, implications, and nitrogen-phosphorus interactions. *Ecological Applications*, 20: 5-15. <https://doi.org/10.1890/08-0127.1>

Wright, S. J.: 2019. Plant responses to nutrient addition experiments conducted in tropical forests, *Ecol. Monogr.*, 89, e01382, <https://doi.org/10.1002/ecm.1382>,

Wright, S. J., Turner, B. L., Yavitt, J. B., Harms, K. E., Kaspari, M., Tanner, E. V., Bujan, J., Griffin, E. A., Mayor, J. R., and Pasquini, S. C.: 2018. Plant responses to fertilization experiments in lowland, species-rich, tropical forests, *Ecology*, 99, 1129-1138, <https://doi.org/10.1002/ecy.2193>,