

Análisis paleoambiental del pozo Funza II mediante fluorescencia de rayos X (FRX)

Shara Camila Tulcan Delgado

Trabajo de Grado para Optar el Título de Geóloga

Director

Gatsby Emperatriz López Otálvaro

Doctor en Ciencia Geológicas

Codirector

German Eduardo Bonilla Osorio

Magister en Ciencias-Geología

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2026

## Dedicatoria

No es un secreto cuánto extraño verte y conversar contigo, contarte un poco más de cómo ha cambiado la vida desde tu partida. Decirte que te extraño se queda corto; las palabras no alcanzan para expresar lo que siento. Sin embargo, sé que desde donde estás, sonríes feliz al ver que lo hemos logrado, abuela Chave. Con un abrazo de oso y un beso eterno me despido de ti, esperando que nos volvamos a encontrar muy pronto.

Decir que este paso es un logro individual sería una mentira, pues este camino lo recorrí impulsada por el amor de mi familia. Detrás de mí siempre ha estado el amor más grande que tengo: mi madre, quien me ha dado todo cuanto ha podido y ha calmado mi alma con cada una de sus llamadas diarias. Junto a ella estuvo mi padre, quien desde su propio querer siempre buscó la forma de ayudarme con todo lo que tenía. Ellos son mis pilares, pero mi verdadera razón para vivir y cumplir mis sueños son dos personitas que amo intensamente: mis hermanos Valery y Josué, quienes con cada una de sus locuras alegraban mi alma y muchas veces, me sanaban sin saberlo. A mi abuela Viví, quien con sus oraciones diarias me sostuvo, ayudando que Dios me permitiera cumplir cada una de las cosas que con tanto anhelo guardaba en mi corazón.

Finalmente, este viaje no habría sido el mismo sin el refugio que encontré fuera de casa, especialmente en la selección de rugby de la UIS, donde me enseñaron que forjar el carácter va mucho más allá del deporte. En la cancha no solo encontré a Valentina, mi mejor centro y amiga, sino también a Yhonatan, en quien me apoyé durante la mayor parte de esta montaña rusa de emociones. A todos ellos, que sostuvieron mi mano de una forma u otra, les dedico este logro.

### **Agradecimientos**

La autora agradece al Servicio Geológico Colombiano (SGC) por la financiación de la investigación y al grupo de Paleoclima y Paleoambiente (código 1001662) en su línea de investigación en Sistemas Lacustres (2025) por el acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto. Extendemos nuestro agradecimiento a MSc. María Fernanda Almanza, MSc. William Avellaneda y MSc. Lidy Osorio Carreño por su gestión en el establecimiento de los contactos institucionales necesarios para el desarrollo de esta investigación.

Asimismo, se expresa el agradecimiento al Proyecto 4381 del Semillero de Paleoceanografía y Paleoclimatología de la Vicerrectoría de Investigación y Extensión de la Universidad Industrial de Santander (UIS) por el acompañamiento durante la ejecución de este trabajo de grado.

## Tabla de Contenido

	<b>Pág.</b>
Introducción .....	11
1. Objetivos .....	14
1.1 Objetivo General .....	14
1.2 Objetivos Específicos .....	14
2. Marco Referencial .....	14
2.1 Marco geológico y estratigráfico .....	14
2.2 Modelo de edad .....	18
2.3 Fluorescencia de rayos X (FRX) .....	19
3. Materiales y métodos .....	19
3.1 Materiales .....	20
3.1.1 Muestreo de sedimentos de Funza II .....	20
3.2 Método .....	21
3.2.1 Mediciones de fluorescencia de rayos X (FRX) .....	21
3.2.2 Preprocesamiento de los datos y análisis estadístico .....	22
3.2.3 Interpretación de indicadores geoquímicos .....	23
4. Resultados .....	26
4.1 Caracterización geoquímica del registro Funza II .....	26
4.1.1 Intervalo 1 (3.8 a 2.78 Ma, 585.5 a 450 m): .....	28
4.1.2 Intervalo 2 (2.78 a 1.97 Ma, 450 a 325 m): .....	28
4.1.3. Intervalo 3 (1.97 a 1.19 Ma, 325 a 204 m): .....	28

4.1.1 Intervalo 4 (1.19 a 0.03 Ma, 204 a 1.8 m): .....	29
4.2 Análisis multivariante .....	29
4.3 Comportamiento de las relaciones elementales .....	33
4.3.1 Intervalo 1 (3.8 a 2.78 Ma, 585.5 a 450 m): .....	33
4.3.2 Intervalo 2 (2.78 a 1.97 Ma, 450 a 325 m): .....	35
4.3.3 Intervalo 3 (1.97 a 1.19 Ma, 325 a 204 m): .....	35
4.3.4 Intervalo 4 (1.19 a 0.03 Ma, 204 a 1,8 m): .....	36
5. Discusión.....	36
5.1 Fluctuaciones energéticas en un sistema fluvial meandriforme de ríos con llanuras de inundación (585.5 m a 427 m): .....	39
5.2 Fluctuaciones energéticas abruptas en un sistema fluvial de llanura pantanosa y humedales (440 m a 325 m).....	41
5.3 Estabilización del lago profundo (325 m a 204 m).....	42
5.4 Somerización del lago: Transición hacia ambientes de pantano y sistemas fluviales (204 a 1.8 m).....	44
6. Conclusiones .....	47
Referencias Bibliográficas .....	50
Apéndices.....	59

**Lista de Tablas****Pág.**

Tabla 1. <i>Elementos geoquímicos utilizados como indicadores paleoambientales, su interpretación y soporte bibliográfico.</i> .....	24
--	----

## Lista de Figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. <i>Mapa de localización del sitio de extracción del testigo Funza II.</i> .....	11
Figura 2. <i>Geología de la Plancha 227 La Mesa.</i> .....	15
Figura 3. <i>Litoestratigrafía, bioestratigrafía y cronoestratigrafía generalizada de la sucesión de sedimentos no consolidados en la cuenca de Bogotá.</i> .....	16
Figura 4. <i>Montaje experimental para el análisis geoquímico por fluorescencia de rayos X portátil.</i> .....	21
Figura 5. <i>Evolución geoquímica del registro sedimentario Funza II respecto a edad y profundidad.</i> .....	27
Figura 6. <i>Porcentaje de varianza explicada por los componentes principales.</i> .....	29
Figura 7. <i>Cargas factoriales de los elementos químicos en los cinco primeros componentes principales.</i> .....	30
Figura 8. <i>Dendrograma del análisis de grupos jerárquico de los elementos medidos por FRX.</i>	31
Figura 9. <i>Relaciones elementales seleccionadas para el análisis paleoambiental.</i> .....	34
Figura 10. <i>Integración multi-indicadores del registro Funza II basado en geoquímica elemental e integrado con indicadores palinológicos y sedimentarios.</i> .....	37
Figura 11. <i>Bloques diagramas de la evolución de la cuenca.</i> .....	38

**Lista de Apéndices**

	<b>Pág.</b>
Apéndice A. <i>Evaluación comparativa del error analítico y porcentaje de mediciones bajo LOD para la selección de elementos.</i> .....	59
Apéndice B. <i>Rangos de concentración mínima y máxima de elementos traza en los intervalos analizados.</i> .....	62
Apéndice C. <i>Rangos de concentración de elementos mayores (wt. %) en los intervalos analizados.</i> .....	63
Apéndice D. <i>Biplot de análisis de componentes principales mostrando la distribución de las muestras y la contribución de las variables geoquímicas en los componentes principales 1, 2 y 3.</i> .....	64
Apéndice E. <i>Biplot de análisis de componentes principales mostrando la distribución de las muestras y la contribución de las variables geoquímicas en los componentes principales 1, 4 y 5.</i> .....	65
Apéndice F. <i>Matriz de cargas factoriales de los componentes principales con varianza individual superior al 5%.</i> .....	66

## Resumen

**Título:** Análisis paleoambiental del pozo Funza II mediante fluorescencia de rayos X (FRX)\*

**Autor:** Shara Camila Tulcan Delgado \*\*

**Palabras Clave:** Funza II, Sabana de Bogotá, geoquímica de sedimentos, fluorescencia de rayos X (FRX), indicadores paleoambientales, análisis multivariado.

### Descripción:

El registro sedimentario del pozo Funza II representa una de las sucesiones sedimentarias más extensas de la región intertropical para el estudio del Plio-Cuaternario. Este trabajo analiza la composición elemental mediante fluorescencia de rayos X (FRX) para caracterizar las variaciones ambientales del registro. Los datos de 16 elementos fueron procesados mediante transformación logarítmica centrada y análisis estadísticos multivariados (Componentes Principales y Análisis de Grupos Jerárquicos). Bajo criterios de carga factorial ( $\geq 0.32$ ) y afinidad geoquímica, se seleccionaron 6 elementos que fueron normalizados respecto al *Ti* (*Zr/Ti*, *Cr/Ti*, *Ca/Ti*, *Fe/Ti*, *Y/Ti*, *Ba/Ti*). Los resultados diferencian cuatro fases evolutivas: la primera sección (3.8 a 2.78 Ma) evidencia un sistema fluvial meandriforme con variaciones marcadas en la competencia hidrodinámica. El tramo medio (2.68 y 1.97 Ma) documenta una transición hacia llanuras pantanosas con variabilidad abrupta, seguida por la consolidación de un lago profundo (1.97 y 1.17 Ma) definido por la estabilidad energética y alto contenido de capas volcánicas identificadas por la sincronía entre *Y/Ti* (*vidrio*) y *Ca/Ti* (*plagioclasas*). Finalmente, entre 1.19 y 0.03 se registró una fase de somerización y colmatación de bajas energías interrumpidas por pulsos de mayor energía. El llenado sedimentario culminó a los 5 metros del registro con el aumento de *Y/Ti*, asociado a la instauración de los sistemas fluviales de mayor energía de la Formación Chía, que erosionaron y cubrieron los depósitos lacustres. Se concluye que la caracterización geoquímica documenta la respuesta fisicoquímica directa del sistema ante las dinámicas ambientales de la Sabana de Bogotá.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Fisicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Gatsby Emperatriz López Otálvaro, Doctor en Ciencia Geológicas. Codirector: Germán Eduardo Bonilla Osorio, Magister en Ciencias-Geología.

### Abstract

**Title:** Paleoenvironmental analysis of the Funza II core using X-ray fluorescence (XRF)

**Author:** Shara Camila Tulcan Delgado \*\*

**Key Words:** Funza II, Sabana de Bogotá, sediment geochemistry, X- ray fluorescence (XRF), paleoenvironmental indicators, multivariate analysis.

#### Description:

The sedimentary record of the Funza II core represents one of the most extensive sedimentary successions in the intertropical region for the study of the Plio-Quaternary. This study analyzes the elemental composition through X-ray fluorescence (XRF) to characterize the environmental variations of the record. Data from 16 elements were processed using Centered Log-Ratio transformation (CLR) and multivariate statistical analyses (Principal Component Analysis and Hierarchical Cluster Analysis). Under factor loading ( $\geq 0.32$ ) and geochemical affinity, six titanium-normalized elemental ratios ( $Zr/Ti$ ,  $Cr/Ti$ ,  $Ca/Ti$ ,  $Fe/Ti$ ,  $Y/Ti$ ,  $Ba/Ti$ ) were selected. The results identify four evolutionary phases: the first (3.8 to 2.78 Ma) reveals a meandering fluvial system with marked variations in hydrodynamic competence. The middle section (2.68 to 1.97 Ma) documents a swampy plain with abrupt variability, followed by the consolidation of a deep lake (1.97 to 1.17 Ma) characterized by energy stability and a high content of volcanic layers identified by the synchrony between  $Y/Ti$  (*glass*) and  $Ca/Ti$  (*plagioclase*). Finally, between 1.19 and 0.03 Ma, a continuous shallowing and infilling phase under low energy was recorded, interrupted by higher-energy pulses. Sediment infilling culminated at 5 meters of the record with an increase in  $Y/Ti$ , associated with the onset of higher-energy fluvial systems from the Formacion Chía, which eroded and covered the lacustrine deposits. It is concluded that the geochemical characterization documents the direct physicochemical response of the system to the environmental dynamics of the Sabana de Bogotá.

---

\* Undergraduate Thesis

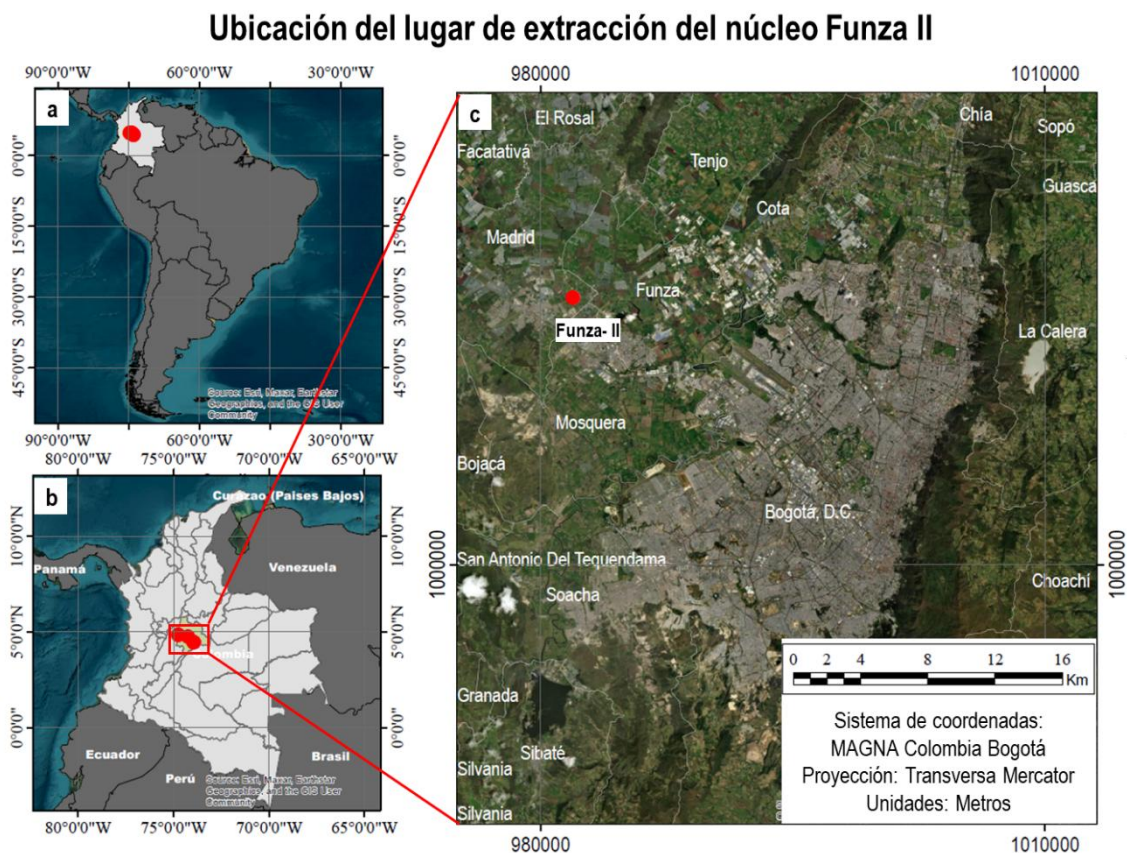
\*\* Physicochemical Engineering College. Geology Department. Advisor: Gatsby Emperatriz López Otálvaro, Doctor of Philosophy in Geological Sciences. Co-Advisor: Germán Eduardo Bonilla Osorio, Master of Science in Geology.

## Introducción

El uso de la fluorescencia de rayos X (FRX) en núcleos sedimentarios proporciona registros elementales que permiten identificar cambios ambientales de forma no destructiva (Gebregiorgis *et al.*, 2020). En la Sabana de Bogotá, la aplicación de esta técnica representa una oportunidad para profundizar en el estudio de registros que, debido a su ubicación tropical, son altamente sensibles a variaciones ambientales que modifican la dinámica de los ecosistemas de alta montaña (Van't Veer y Hooghiemstra, 2000; Pérez-Angel *et al.*, 2026). En este contexto, sobre la cuenca intramontana de Bogotá se recuperó el núcleo Funza II (Torres *et al.*, 2005; Figura 1), que constituye uno de los archivos sedimentarios más extensos de los Andes del Norte, dada su continuidad estratigráfica y una profundidad de 586 m que abarca cerca de 4 Ma (Pérez-Angel *et al.*, 2026).

### Figura 1.

*Mapa de localización del sitio de extracción del testigo Funza II.*



*Nota.* a) Localización de Colombia en Suramérica. b) Mapa de Colombia con detalle de la zona del área de estudio. c) Imagen satelital de la Sabana de Bogotá indicando el lugar de extracción del núcleo a 4°50'N, 74°12'W.

Tradicionalmente, la reconstrucción paleoambiental de esta sucesión ha dependido de la palinología (Hooghiemstra y Ran, 1994; Torres *et al.*, 2005, 2013). Este enfoque permite entender la dinámica de la vegetación y su relación frente a cambios ambientales. Sin embargo, al representar una señal biótica, no refleja directamente la respuesta fisicoquímica del cuerpo de agua. El problema central de investigación radica en la ausencia de una caracterización geoquímica de mayor resolución espacial a estudios previos que permita documentar la respuesta fisicoquímica directa del sistema ante las dinámicas ambientales (Davison, 1993; Peterson y Haug, 2006).

En este sentido, la fluorescencia de rayos X (FRX) constituye una herramienta que permite obtener registros geoquímicos de alta resolución y con rapidez de análisis, lo que facilita identificar variaciones elementales asociadas con productividad biológica, condiciones redox del lecho y energía hidrodinámica del medio sedimentario (Davison, 1993; Brown, 2011; Lauterbach *et al.*, 2011; Corella *et al.*, 2012; Foerster *et al.*, 2012; Kämpf *et al.*, 2012). A partir de ello, esta investigación se orienta a responder la siguiente pregunta: ¿de qué manera la variabilidad ambiental de la Sabana de Bogotá se manifiesta en el registro geoquímico elemental obtenido mediante FRX en el núcleo Funza II? Para ello, se analiza el núcleo mediante un muestreo sistemático cada 50 cm, analizado a través de FRX y herramientas de estadística multivariada. Este enfoque permite aportar una interpretación abiótica de la dinámica ambiental registrada, fortaleciendo el conocimiento paleoambiental regional mediante un registro con resolución de 1.8 muestras por metro a lo largo de la sucesión. Esta aproximación permite realizar también reconstrucciones paleoambientales de la cuenca, aportando un registro que complementa y

fortalece la historia paleoambiental ya documentada en la región (Andriessen *et al.*, 1993; Hooghiemstra y Ran, 1994; Van't Veer y Hooghiemstra, 2000; Torres *et al.*, 2005, 2013; Pérez-Angel *et al.*, 2026).

## 1. Objetivos

### 1.1 Objetivo General

Analizar el registro paleoambiental del pozo Funza II mediante la caracterización de la composición elemental de sus sedimentos mediante fluorescencia de rayos X (FRX).

### 1.2 Objetivos Específicos

Cuantificar la composición elemental de los sedimentos del testigo Funza II mediante fluorescencia de rayos X (FRX).

Interpretar las fluctuaciones paleoambientales a partir de patrones geoquímicos como variaciones de elementos mayores y traza y sus relaciones geoquímicas.

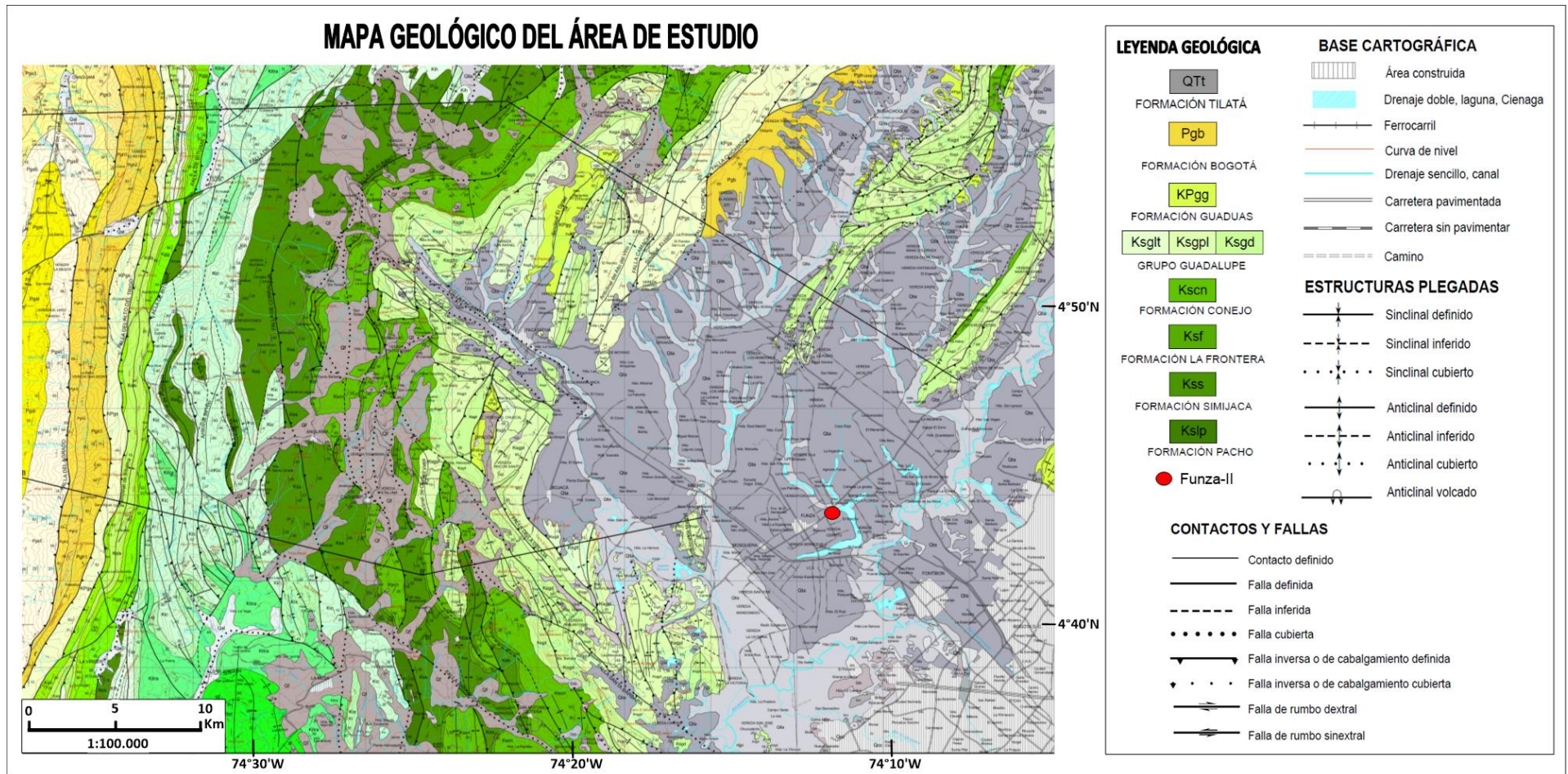
## 2. Marco Referencial

### 2.1 Marco geológico y estratigráfico

La Sabana de Bogotá constituye una cuenca intramontana consolidada tras el último levantamiento de los Andes del Norte (Wijninga, 1996). En ella se depositó una extensa sucesión sedimentaria que registra la evolución geológica desde el Cretácico (Chicangana *et al.*, 2015; Figura 2 y Figura 3), reflejando cambios en los ambientes de sedimentación controlados por la evolución tectónica de la Cordillera Oriental (Van der Hammen *et al.*, 1973; Helmens, 1990; Wijninga, 1996). La configuración estratigráfica generalizada para el Neógeno de esta cuenca se detalla en la Figura 3.

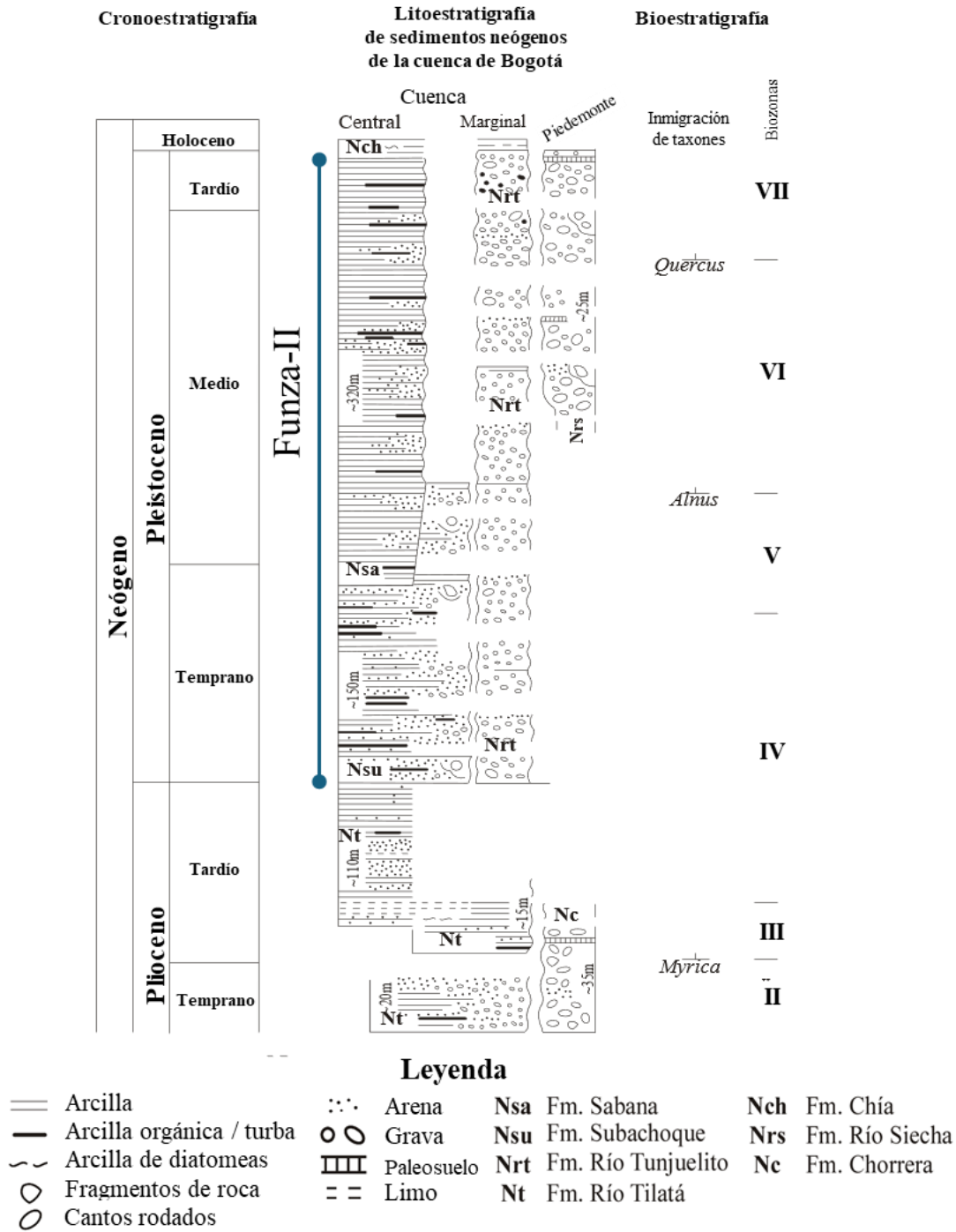
Figura 2.

Geología de la Plancha 227 La Mesa.

Nota. Tomado de Ulloa *et al.* (1998).

**Figura 3.**

*Litoestratigrafía, bioestratigrafía y cronoestratigrafía generalizada de la sucesión de sedimentos no consolidados en la cuenca de Bogotá.*



*Nota.* Adaptado de Torres *et al.* (2005). Basado originalmente en Helmens (1990).

El basamento de la cuenca está conformado por rocas sedimentarias de edad cretácica y paleógena (Sarmiento, 1991), correspondientes a las formaciones Simijaca, La Frontera, Chipaque, Conejo, Lidita Superior, Guadalupe, Guaduas, Cacho y Bogotá. Estas unidades afloran en las montañas circundantes y constituyen las principales áreas fuente de los sedimentos que rellenan la cuenca (Torres *et al.*, 2005).

Durante el Eoceno y el Oligoceno Temprano predominaron ambientes continentales fluviales, reflejados en unidades como la Formación Regadera, los Conglomerados de Guandoque y la Formación Usme. A partir del Neógeno se desarrollaron ambientes lacustres y palustres representados por la Formación Tilatá (Mioceno Tardío–Plioceno Temprano). Posteriormente, estos ambientes continuaron su evolución a través de las formaciones Subachoque, Río Tunjuelito y Sabana.

A pesar de la extensa historia geológica regional, la sucesión litoestratigráfica de 586 m de profundidad recuperada en el núcleo Funza II abarca una sección continua que no alcanza el basamento rocoso (Figura 3). Está constituida únicamente por las formaciones Subachoque (Pleistoceno Temprano, Helmens y Van der Hammen, 1995), Sabana (Pleistoceno Medio y Tardío, Helmens y Van der Hammen, 1995) y Chía (Pleistoceno Tardío-Holoceno, Helmens, 1990). Estas unidades son fundamentales, porque registran las fases de mayor estabilidad del sistema lacustre y su transición final hacia condiciones fluviales.

La Formación Subachoque (Van der Hammen *et al.*, 1973) está compuesta por alternancias de arcillas arenosas, arcillas orgánicas y horizontes de turba que alternan con arenas arcillosas o con mezclas de arena arcillosa y grava (Torres *et al.*, 2005). Sobre esta unidad, se deposita la Formación Sabana (Hubach, 1957), integrada por arcillas plásticas y arcillas orgánicas de colores grises a verdes, con presencia de estratos delgados de turba y niveles esporádicos de arenas

arcillosas (Helmens, 1990; Torres *et al.*, 2005). La Formación Chia (Helmens y Van der Hammen, 1995) constituye el tope de la sucesión sedimentaria y está integrada por sedimentos fluviales de grano fino asociados a la depositación por el río Bogotá y sus afluentes.

Sobre esta base litoestratigráfica se han desarrollado diversos enfoques investigativos multidisciplinarios que buscan reconstruir la evolución paleoambiental de la región integrando bioestratigrafía (Hooghiemstra y Sarmiento, 1991; Hooghiemstra y Ran, 1993; Torres *et al.*, 2013), modelos de edad (Andriessen *et al.*, 1993; Hooghiemstra y Ran, 1993; Torres *et al.*, 2005, 2013; Pérez-Angel *et al.*, 2026) y sedimentología (Torres *et al.*, 2005; Sarmiento, 2024).

## 2.2 Modelo de edad

El modelo de edad inicial para el pozo Funza-II fue establecido por Andriessen *et al.* (1993), quienes realizaron 8 dataciones de cenizas volcánicas mediante huellas de trazas de fisión en circones, obteniendo una edad de  $2.74 \pm 0.63$  Ma a 506 m de profundidad. Este modelo permitió que Hooghiemstra y Ran (1994) realizaran interpretaciones bioestratigráficas que correlacionan la palinología del intervalo 2-158 m con el testigo Funza I, para identificar ciclos climáticos del Pleistoceno Medio y Tardío. Esto, a partir de la variación porcentual del polen de cuatro cinturones de vegetación altitudinal: bosque subandino, bosque andino, vegetación de subpáramo y vegetación de páramo.

Más adelante, la investigación se centró en la respuesta del ecosistema ante los ciclos glaciares-interglaciares. Van't Veer y Hooghiemstra (2000) y Boom *et al.* (2001) demostraron que los desplazamientos de la zona de transición entre el bosque altoandino y el subpáramo, denominada línea superior del bosque (LSP), y la distribución de gramíneas C<sub>4</sub> actúan como indicadores sensibles de la variabilidad térmica y estructural de la vegetación en los Andes del norte. Estas aproximaciones fueron refinadas por Torres *et al.* (2005, 2013), quienes desarrollaron

una reconstrucción paleoambiental de alta resolución espacial basada en la palinología y la sedimentología del registro, además de un modelo de edad astronómico ajustado mediante correlación de la temperatura de *Alnus* con el registro  $\delta^{18}\text{O}$  de los foraminíferos bentónicos de los sitios de aguas profundas 846 y 849 del Ocean Drilling Program (ODP), determinando que la edad basal del núcleo esta entre 1,8 a 2,2 Ma según ciclos de precesión y oblicuidad.

Posteriormente, Pérez-Angel *et al.* (2026) realizaron 5 dataciones de U-Pb con CA-TIMS en zircones, las cuales establecen que la edad basal del testigo es de ~3,8 Ma. Este modelo les permitió realizar paleotermometría cuantitativa basada en biomarcadores bacterianos (brGDGTs) desde el Plio-Cuaternario.

### **2.3 Fluorescencia de rayos X (FRX)**

Para profundizar en la reconstrucción paleoambiental y capturar las señales fisicoquímicas que complementan los datos litoestratigráficos y bióticos ya descritos, se requiere de técnicas que permitan el análisis del material a partir de otros enfoques. En ese sentido, la fluorescencia de rayos X (FRX) es una técnica analítica no destructiva (Peti *et al.*, 2020) empleada para determinar la composición química elemental de diversos materiales (Beckhoff *et al.*, 2006), mediante la emisión de rayos X secundarios tras la excitación de la muestra por una fuente primaria (Pérez Díaz, *et al.*, 2023). En el escaneo de núcleos, esta técnica reporta intensidades de señal de elementos más pesados que el magnesio (Gebregiorgis *et al.*, 2020; Pérez Díaz *et al.*, 2023).

## **3. Materiales y métodos**

Esta sección detalló los procedimientos técnicos aplicados para la obtención y el procesamiento de los datos geoquímicos del núcleo Funza II. Se describen los protocolos de

preparación de muestras, los parámetros de medición del espectrómetro y las herramientas estadísticas empleadas para la interpretación de los resultados.

### **3.1 Materiales**

#### ***3.1.1 Muestreo de sedimentos de Funza II.***

El núcleo Funza II (4°50'N, 74°12'W, 2550 m.s.n.m) se extrajo en 1988 en el municipio de Funza (Figura 1), en una zona central de la cuenca de Bogotá donde se esperaba que la acumulación de sedimentos fuera máxima (Torres *et al.*, 2005), recuperando uno de los registros sedimentarios más extensos del Cuaternario en los Andes tropicales (Andriessen *et al.*, 1993; Pérez-Angel, 2022) con 586 m de profundidad (Sarmiento, 1990). A causa de complicaciones técnicas durante la perforación, el registro presentó una recuperación discontinua, particularmente entre los 158 y 204 m de profundidad, donde la presencia de agua subterránea impidió la recolección de material (Torres *et al.*, 2013; Hooghiemstra y Flantua, 2019).

Debido a que los permisos necesarios para la perforación de núcleos profundos limitaban la elección de emplazamientos, Funza II se perforó en el patio trasero de una escuela ubicada a aproximadamente 1 km de Funza I y a unos 50 m de un afluente del río Bogotá.

Para este estudio, el registro se efectuó cada 50 cm, obteniéndose un total de 1072 puntos de registro. La preparación de los puntos consistió en el pulido de las superficies del núcleo para garantizar un área plana y paralela al plano estratigráfico, reduciendo así la dispersión de la radiación asociada a la rugosidad superficial (Jansen *et al.*, 1998). Posteriormente, las muestras se recubrieron con una película de *Mylar* de 6  $\mu\text{m}$  para proteger la ventana del detector de posibles contaminantes, asegurando una transmitancia adecuada para los elementos de interés (Hall *et al.*, 2012; Peti *et al.*, 2020).

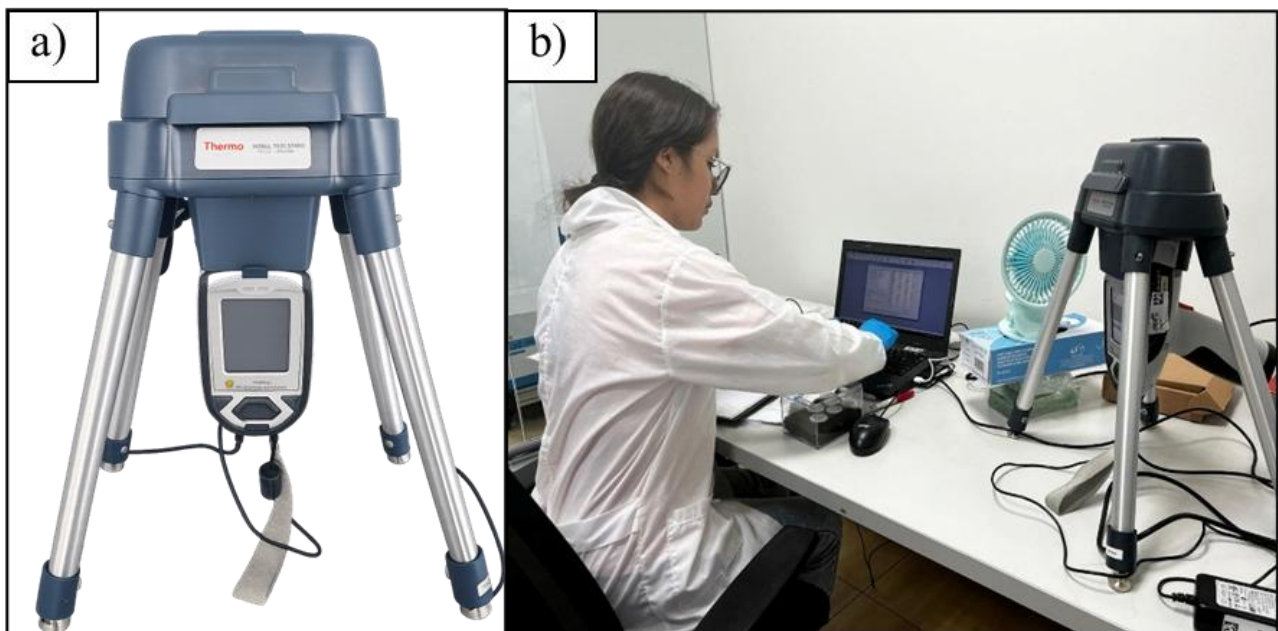
## 3.2 Método

### 3.2.1 Mediciones de fluorescencia de rayos X (FRX).

Las mediciones se realizaron en las salas de consulta de la Litoteca Nacional del Servicio Geológico Colombiano (SGC) usando un espectrómetro portátil Niton XL3 serie 7000 perteneciente a la entidad. Para asegurar la estabilidad analítica durante la captura de datos, el equipo se dispuso sobre un trípode (Thermo Fisher Scientific, 2010; Figura 4). El dispositivo operó en modo *Test All Geo*, el cual combinó las calibraciones de Normalización de Compton y Parámetros Fundamentales (FP) para determinar automáticamente la matriz más adecuada sin necesidad de preseleccionar los modos de suelo o minería (Thermo Fisher Scientific, 2013).

#### Figura 4.

*Montaje experimental para el análisis geoquímico por fluorescencia de rayos X portátil.*



*Nota.* a) Analizador montado sobre el trípode. b) Vista general del procedimiento de análisis en laboratorio, mostrando el sistema de adquisición de datos de FRX.

Esta configuración técnica permitió convertir automáticamente las intensidades de la señal directamente en concentraciones (ppm), compensando los efectos de matriz y la influencia de elementos ligeros mediante los algoritmos mencionados (Thermo Fisher Scientific, 2010). Bajo este protocolo, se efectuaron lecturas en duplicado con un tiempo de adquisición de 120 s por medición, repitiendo la toma de datos ante cualquier inconsistencia detectada. Así, se determinaron las abundancias en términos de ppm de elementos mayores, menores, traza y el balance composicional (BAL), que representó analíticamente la fracción de elementos ligeros ( $Z < 12$ ) no detectados directamente por el equipo. Los elementos con concentraciones superiores a 1500 ppm se reportaron en porcentaje en peso (wt. %) al aplicar la ecuación:

$$wt. \% = \frac{ppm}{10000}$$

Finalmente, el control de calidad del equipo se verificó al inicio de cada sesión mediante materiales de referencia certificados (NIST 2709a, USGS 180-673 y SiO<sub>2</sub>), a partir de los cuales se estimó el error analítico.

### ***3.2.2 Preprocesamiento de los datos y análisis estadístico.***

Los datos geoquímicos obtenidos se descargaron mediante el programa NDT<sub>r</sub> de Thermo Scientific y se sometieron a un preprocesamiento para reducir el ruido instrumental y asegurar la confiabilidad de los resultados. De los 48 elementos medidos inicialmente por el equipo, se seleccionaron 16 que cumplieron con los criterios de calidad: un error analítico inferior al 30% y menos del 5% de sus valores por debajo del límite de detección (Templ *et al.*, 2008). Posteriormente, se calculó un valor promedio de las medidas duplicadas para asignar una concentración elemental única a cada profundidad determinada.

Los datos composicionales presentaron el efecto de cierre, originado por la restricción de suma constante entre variables e induce dependencias que dificultan la interpretación estadística

de las relaciones reales variables (Mateu-Figueras *et al.*, 2003). Por ello, se aplicó una transformación logarítmica centrada (CLR) con el fin de eliminar sesgos asociados a la naturaleza relativa de las concentraciones geoquímicas (Aitchison, 1982; Filzmoser *et al.*, 2010). El análisis estadístico se realizó utilizando el software PAST (Paleontological Statistics), versión 4.03 (Hammer *et al.*, 2001). Se ejecutó un Análisis de Componentes Principales (ACP) mediante una matriz de varianza-covarianza con el fin de reconocer las asociaciones geoquímicas dominantes (Gebregiorgis *et al.*, 2020). De esa manera, se consideraron significativos únicamente aquellos componentes que explicaron más del 5% de la varianza individual (Mudge, 2007).

A partir de este análisis, el software generó las puntuaciones de los componentes (CP scores) para cada punto de registro permitiendo observar la evolución de los procesos identificados en función de la profundidad, además de las cargas factoriales por componente. Se identificaron 11 elementos estadísticamente significativos al presentar una carga factorial  $\geq 0.32$  (Grimm y Yarnold, 2000).

Para evitar la redundancia estadística entre estos 11 elementos, se realizó un Análisis de Grupos Jerárquicos (ACJ), que permitió clasificar las muestras en grupos geoquímicamente homogéneos (Rock, 1988). Se evaluó la afinidad geoquímica dentro de cada asociación y se priorizaron aquellos elementos con firmas que reflejaron mayor contraste en la escala horizontal (Croudace y Rothwell, 2015). Este proceso de refinamiento permitió consolidar un grupo final de 6 elementos representativos: Ca, Cr, Zr, Y, Fe y Ba.

### ***3.2.3 Interpretación de indicadores geoquímicos.***

Tras la obtención de las concentraciones elementales individuales, se determinó que el uso de relaciones elementales resultaba óptimo para la interpretación paleoambiental, ya que las concentraciones elementales son susceptibles a factores físicos intrínsecos del sedimento (Weltje

y Tjallingii, 2008; Gebregiorgis *et al.*, 2020). Por tal motivo, todos los elementos que cumplieron con el umbral de carga factorial ( $\geq 0.32$ ) se normalizaron respecto al Ti, dada su alta resistencia durante el transporte y la meteorización, además de que no está implicado en ciclos biológicos (Cohen, 2003; Kylander *et al.*, 2011).

**Tabla 1.**

*Elementos geoquímicos utilizados como indicadores paleoambientales, su interpretación y soporte bibliográfico.*

Elemento	Indicativo	Soporte Bibliográfico
Ti	Trazador inmóvil derivado de la erosión de rocas y suelos fuera del lago (escorrentía por lluvias o ríos). Al ser altamente estable químicamente y no verse afectado por procesos biológicos, su abundancia aísla el aporte natural detrítico y sirve para normalizar elementos frente a cambios en la tasa de sedimentación.	Cohen (2003); Calvert y Pedersen (2007); Metcalfe <i>et al.</i> (2010); Stansell <i>et al.</i> (2013); Rothwell y Croudace (2015); Craigie (2018).
Zr	Indica fases de alta escorrentía superficial y lavado detrítico en la cuenca. Físicamente se concentra en minerales densos (como el circón), propios de las fracciones de arena fina y limo grueso.	Boës <i>et al.</i> (2011); Kylander <i>et al.</i> (2011); Kämpf <i>et al.</i> (2012); Davies <i>et al.</i> (2015); Craigie (2018).
Cr	Puede estar vinculado al predominio de lodos y arcillas finas en suspensión. Funciona también como indicador de procedencia litológica (roca madre) y condiciones redox bentónicas, ya que bajo anoxia el Cr se adsorbe en los minerales arcillosos y permanece inmóvil.	Millot (1970); Brown (2011); Foerster <i>et al.</i> (2012); Craigie (2018); Bertrand <i>et al.</i> (2024).
Fe	Elemento móvil con múltiples estados de oxidación. En fondos anóxicos ricos en materia orgánica, interactúa con el Azufre (S) para formar sulfuros de hierro.	Davison (1993); Boyle (2001); Corella <i>et al.</i> (2012); Aufgebauer <i>et al.</i> (2012); Kämpf <i>et al.</i> (2012); Bertrand <i>et al.</i> (2024).
Ba	Su acumulación puede verse influenciada secundariamente por la adsorción sobre superficies de óxidos de Fe-Mn en fases de reoxigenación.	Davison (1993)
Ca	Infiere el aporte de tefras ricas en feldespatos (plagioclasas).	Mueller <i>et al.</i> (2009); Lauterbach <i>et al.</i> (2011); Elbert <i>et al.</i> (2013); Peti <i>et al.</i> (2020).
Y	Elemento traza insoluble atrapado de forma primaria en la matriz del vidrio volcánico, cenizas y lapilli, o concentrado en minerales pesados accesorios (xenotima, monacita, apatito). En el contexto andino (Colombia), proporciones bajas (<18 ppm) marcan una firma adaquítica.	Rollinson (1993); Mendoza, Castellanos y Orejuela (2020); Bertrand <i>et al.</i> (2024).

*Nota.* Se presenta una síntesis de los principales elementos geoquímicos empleados como indicadores paleoambientales en sedimentos lacustres, incluyendo su interpretación ambiental y referencias bibliográficas asociadas.

A partir de los proxies estadísticos preseleccionados, se llevó a cabo una compilación bibliográfica detallada con el fin de establecer la correspondencia teórica de cada elemento dentro de contextos lacustres (Tabla 1). De ese modo, la dinámica detrítica y la esorrentía se evalúan mediante indicadores como el Zr y Cr. El Zr se asoció a incrementos en la energía hidrodinámica y el transporte de fracciones gruesas durante eventos de mayor esorrentía debido a que su concentración es mayor en fracciones granulométricas mayores (Kämpf *et al.*, 2012; Craigie, 2018). En contraste, el Cr se vinculó con procesos de decantación y el predominio de lodos finos en ambientes de baja energía (Brown, 2011; Foerster *et al.*, 2012). Por su parte, la estabilidad de la columna de agua y la productividad del sistema se infirieron a través de indicadores ambientales sensibles a condiciones redox y la química del agua como Ba/Ti y Fe/Ti. El Ba permitió reconstruir la dinámica del fondo lacustre dada su mayor movilidad frente al Fe en condiciones anóxicas (Davison, 1993; Corella *et al.*, 2012). Simultáneamente, el Ca/Ti utilizó para identificar picos de productividad primaria o cambios en la alcalinidad, mientras que el Y/Ti, en conjunto con el Ca, se estableció como una herramienta diagnóstica para detectar aportes de ceniza volcánica o criptotefras (Peti *et al.*, 2020).

Debido a las discrepancias entre los modelos de edad por trazas de fisión (Andriessen *et al.*, 1993), arreglos astronómicos (Torres *et al.*, 2013) y datación radiométrica (Pérez-Angel *et al.*, 2026), esta investigación adoptó un enfoque metodológico dual. El análisis se enmarcó bajo el modelo de datación radiométrica absoluta (Pérez-Angel *et al.*, 2026), debido a su bajo error analítico en comparación con los demás modelos disponibles. Simultáneamente, los datos se

presentaron respecto a la profundidad en metros, considerando que mientras los modelos de edad están sujetos a futuras calibraciones y actualizaciones metodológicas, el dato de profundidad constituye un registro físico inalterable. De este modo, se garantiza la reproducibilidad de los perfiles elementales presentados, sin comprometer su utilidad ante eventuales reajustes en la escala de tiempo de la cuenca.

De esa manera, las relaciones elementales finales como Cr/Ti, Zr/Ti, Ca/Ti, Ba/Ti, Fe/Ti e Y/Ti, junto con el puntaje del CP1, se representaron en función de la profundidad y la edad reportada por Pérez-Angel *et al.* (2026). Finalmente, estos perfiles geoquímicos se integraron con la litoestratigrafía y los registros de palinología de estudios previos (Torres *et al.*, 2005, 2013) respecto a la profundidad, permitiendo evaluar la concordancia entre la evolución del medio abiótico y la dinámica de la vegetación en los alrededores de la cuenca respecto a las edades de Pérez-Angel *et al.* (2026).

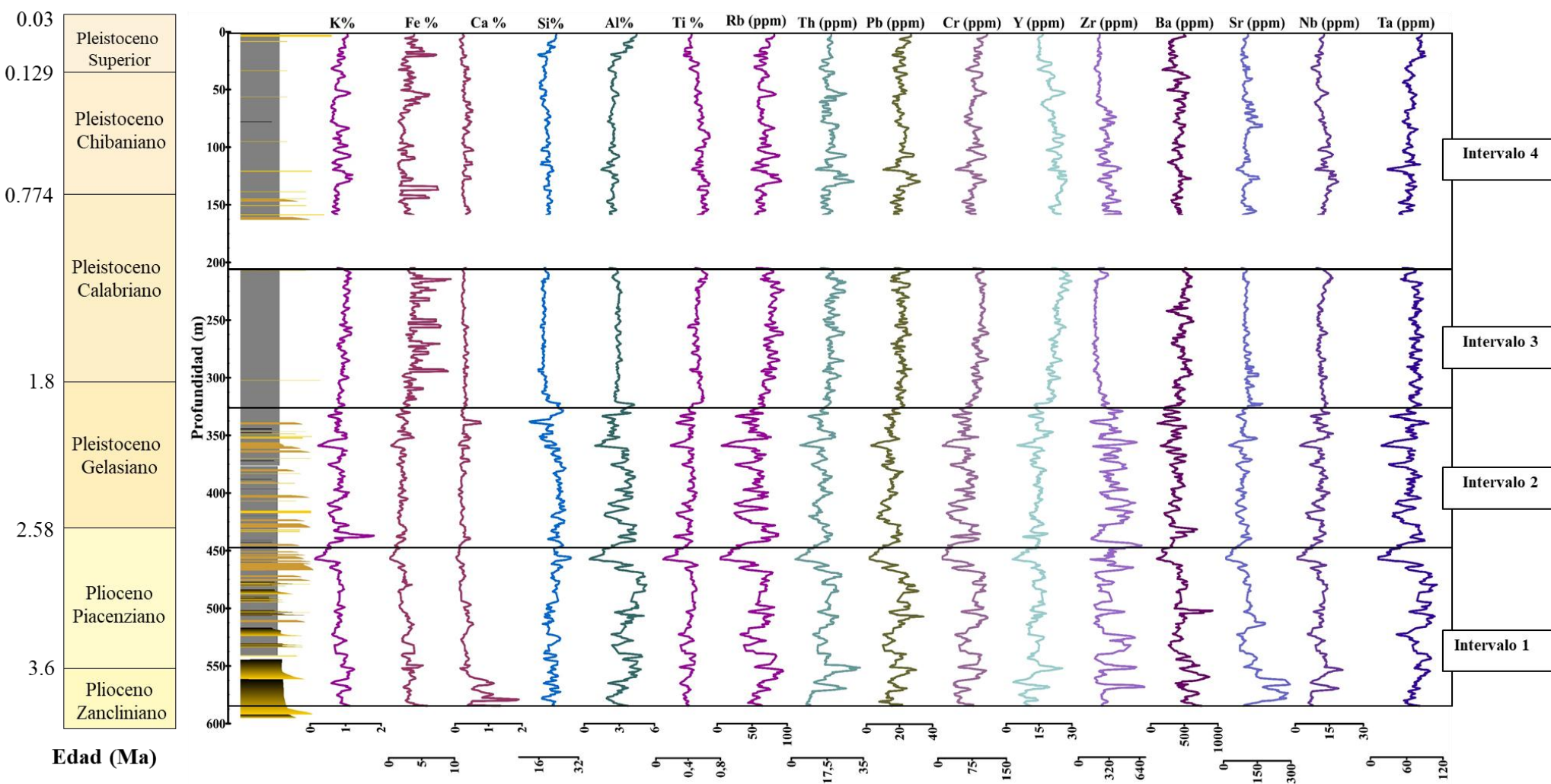
## 4. Resultados

### 4.1 Caracterización geoquímica del registro Funza II

Tras el procesamiento de los datos crudos, se seleccionaron 16 elementos químicos (Zr, Sr, Rb, Th, Pb, Fe, Cr, Ti, Ca, K, Ba, Nb, Y, Ta, Al y Si). El registro fue dividido en cuatro intervalos basados en el comportamiento de los datos a lo largo del registro sedimentario, teniendo en cuenta 2 criterios: los rangos de magnitud de las concentraciones (valores máximos y mínimos) y la continuidad de las variaciones espaciales a lo largo del registro la columna (Figura 5, Apéndice A y Apéndice C).

**Figura 5.**

*Evolución geoquímica del registro sedimentario Funza II respecto a edad y profundidad.*



*Nota.* Las líneas horizontales delimitan los cuatro intervalos geoquímicos. El espacio en blanco en la sucesión (158 a 204 m) corresponde a un intervalo no recuperado durante la perforación. Las unidades de concentración expresados en porcentajes de peso (wt. %) y partes por millón (ppm). La estratigrafía fue tomada de Torres *et al.* (2005) y la de Pérez-Angel *et al.* (2026).

#### **4.1.1 Intervalo 1 (3.8 a 2.78 Ma, 585.5 a 450 m):**

Este tramo basal presenta firmas con tendencias de variación amplias. Se caracterizó por la mayor abundancia de Si (hasta 26 wt. %) y la mayor dispersión de Ca, que inicia con valores de 2 wt. % y desciende hacia el 0.0115 wt. %. Entre los 3.7 y 3.59 Ma (568 y 549.9m), la Figura 5 muestra un incremento de Zr (alcanzando 710 ppm), Rb (103.3 ppm) y Ti (0.57 wt. %), mientras que el Sr cayó por debajo de las 50 ppm. A partir de los 3.42 Ma (515 m), el Fe inicia un descenso desde su tope de 5.2 wt. % hacia valores de 1.5 wt. %. El límite superior del intervalo está definido por la reducción de las concentraciones elementales entre los 2.9 a 2.82 Ma (462 a 455 m).

#### **4.1.2 Intervalo 2 (2.78 a 1.97 Ma, 450 a 325 m):**

En este intervalo el registro mostró una mayor variación espacial de las señales que produce una morfología aserrada en la señal. Se registraron los niveles mínimos de Sr de todo el núcleo (12 ppm), mientras que elementos como el K, el Ti y el Zr mantuvieron rangos de hasta 1.7 wt. %, 0.54 wt. % y 710 ppm, respectivamente. El Fe se mantuvo en un rango entre 0.17 wt. % y 4 wt. %, mientras que el Ca exhibió pulsos discretos que no superaron el 0.7 wt. %.

#### **4.1.3. Intervalo 3 (1.97 a 1.19 Ma, 325 a 204 m):**

Entre los 1.97 a 1.57 Ma (324 y 267 m) las señales son relativamente estables, destacando un pico de Ba de 654 ppm (1.80-1.77 Ma, 300-296 m). Por otro lado, este intervalo exhibió las concentraciones más altas de Fe de todo el núcleo, alcanzando un máximo de 9.8 wt. % entre los 1.51 y 1.35 Ma (259 y 232 m).

#### 4.1.1 Intervalo 4 (1.19 a 0.03 Ma, 204 a 1.8 m):

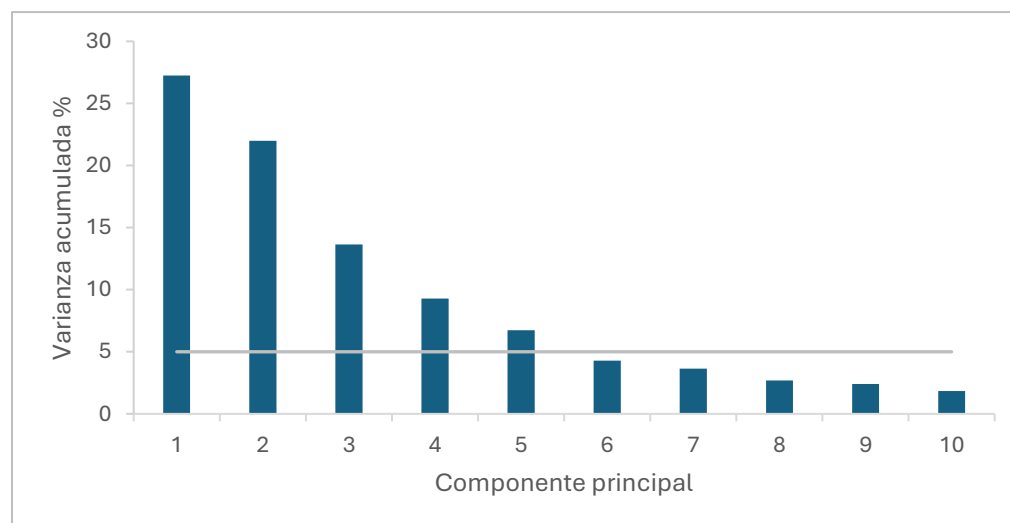
Tras la sección no recuperada (1.35 a 0.94 Ma, 204 a 158 m), elementos como el Cr disminuyen levemente sus rangos hacia 120 ppm. Cerca de los 0.75 Ma (130 m) el Si vuelve a destacar con 25 wt. % junto al Zr (473 ppm). Finalmente, hacia el tope (1.8 m), el Ti y el Ca descendieron a 0.35 wt. % y 0.1 wt. %, en contraste con un nuevo aumento de Ba (654 ppm) en los 0.034 Ma (3.85 m).

#### 4.2 Análisis multivariante

El análisis de componentes principales (ACP), aplicado a la matriz de datos de 1072 registros, permitió identificar los factores dominantes que controlan la variabilidad geoquímica del registro Funza II. De acuerdo con el criterio de corte del 5% de varianza individual (Mudge, 2007) se identificaron cinco componentes principales (CP) que explican el 76% de la varianza total de la matriz de datos (Figura 6).

#### Figura 6.

*Porcentaje de varianza explicada por los componentes principales.*

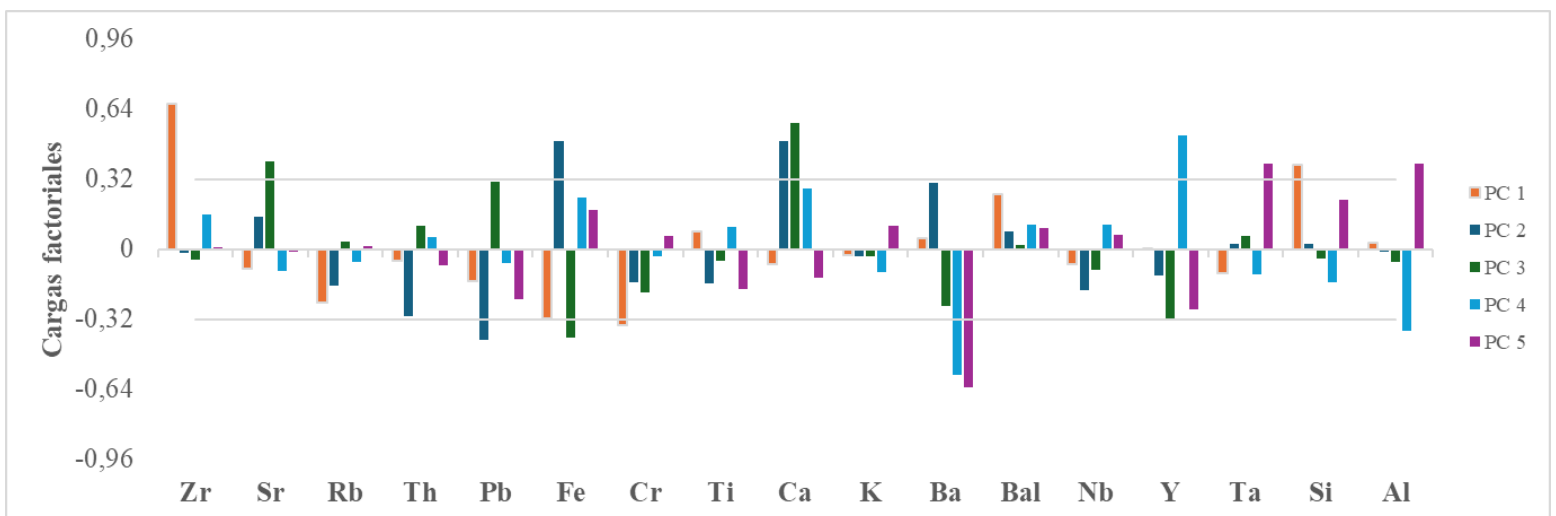


*Nota.* Gráfico de barras que representa la varianza explicada por los primeros 10 componentes principales, solo se consideran significativos aquellos que explican más del 5 % de la varianza.

La estructura de estos componentes está definida por las cargas factoriales de los elementos seleccionados (Figura 7, Apéndice D, Apéndice E y Apéndice F). El primer componente principal (CP1, 27.46% de la varianza) presenta una asociación marcada entre el Zr y Si (cargas positivas) frente al Cr (carga negativa). El CP2 (21.27% de la varianza) se encuentra definido por cargas positivas fuertes de Fe y Ca, en contraste con aportes moderados de Pb. Por su parte, el CP3 (13.2% de la varianza) discrimina específicamente la variabilidad del Ca y Sr (cargas positivas) frente al Fe e Y (carga negativa). El cuarto componente principal (CP4, 9.16% de la varianza) expone cargas negativas fuertes de Ba y Al, frente a la carga positiva de Y. El quinto componente principal (CP5, 6.69% de la varianza) está controlado por cargas negativas fuertes de Ba, mientras que el Al y Ta muestran una carga positiva fuerte. Los CP de orden inferior no se analizan, ya que cada uno representó menos del 5 % de la varianza total del conjunto de datos (Figura 6).

**Figura 7.**

*Cargas factoriales de los elementos químicos en los cinco primeros componentes principales.*

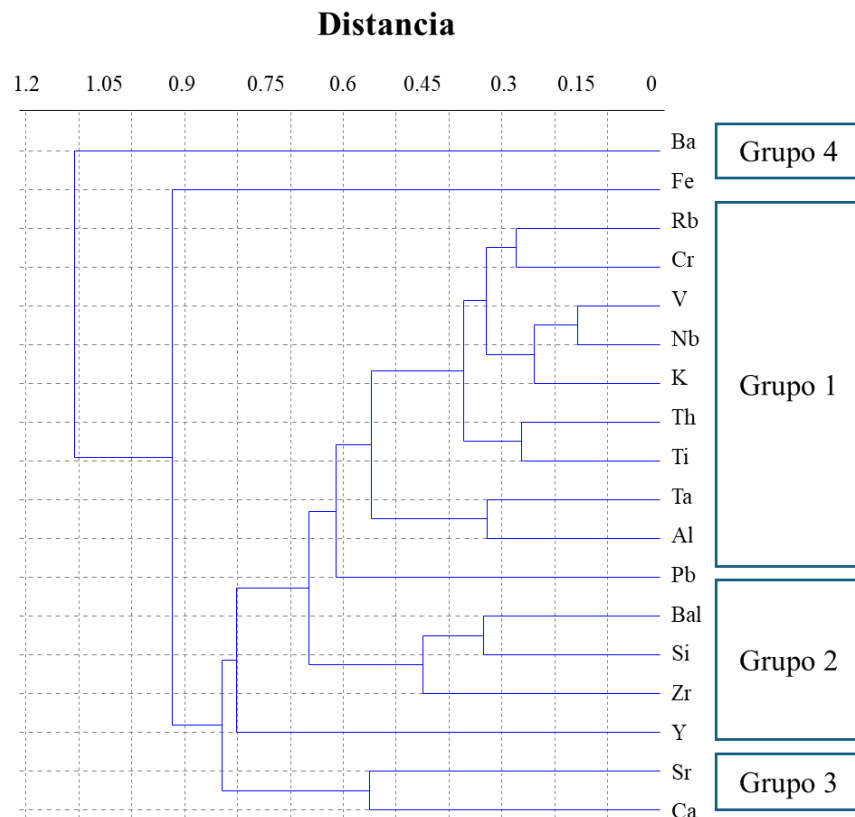


*Nota.* Gráfico de barras que representa las cargas factoriales de cada elemento químico para los primeros cinco componentes principales.

El análisis de grupos jerárquicos aplicado permitió identificar cuatro asociaciones elementales principales haciendo uso del algoritmo UPGMA (grupos pares) y la distancia euclidiana (Figura 8). La correlación entre la matriz de distancias originales y el Dendrograma arrojaron un coeficiente de correlación cofenética de 0.8261. El grupo de mayor representatividad (asociación 1), está integrado por Cr, Nb, V, Al, Ti, K, Rb, Th, Pb, Nb y Ta. Esta asociación se consolida a distancias de enlace reducidas, generalmente inferiores a 0.5, destacando subgrupos como los pares Nb-K y Th-Ti, que se vinculan a distancias menores de 0.15. Este bloque principal representa el aporte de sedimentos finos.

### Figura 8.

*Dendrograma del análisis de grupos jerárquico de los elementos medidos por FRX.*



*Nota.* Dendrograma resultante del análisis de agrupamiento jerárquico para los elementos químicos. El eje vertical representa la distancia de enlace, indicando el nivel de similitud o correlación en el que los elementos o grupos de elementos se unen.

Una segunda asociación conformada por Ba, Si y Zr, se vincula a una distancia aproximada de 0,45. Mientras que el Y se ensambla a este grupo a una distancia de 0.78. La presencia de estos elementos sugiere una relación directa con fracción granulométricas mayores. Por su parte, el tercer grupo compuesto por Sr y Ca, que se unen en el dendrograma a una distancia de enlace de 0.85, indicando que esta asociación está controlada por un indicador independiente al del grupo dominante. Finalmente, la cuarta asociación está integrada por Fe y Ba, uniéndose al ensamble general a la distancia máxima de 1.1. Esta separación sugiere un control geoquímico diferenciado, asociado a las condiciones de oxigenación y dinámica interna de la columna de agua (Figura 8).

Tras aplicar el criterio de selección basado en los valores absolutos de carga factorial ( $| \text{carga factorial} | \geq 0.32$ ), se identificaron como los indicadores para la interpretación paleoambiental a los elementos Zr, Si, Cr, Ca, Fe, Pb, Sr, Ba, Y, Al y Ta. Sin embargo, con el fin de evitar la redundancia y optimizar la interpretación, se realizó una síntesis final basada en la arquitectura de los grupos jerárquicos y el comportamiento diferencial de las cargas.

A partir del análisis de los agrupamientos, en la asociación (Zr, Si, Y), se seleccionó al Zr como elemento guía por registrar la carga más elevada en el CP1, mientras que el Y se conservó debido a que su varianza estuvo vinculada mayoritariamente a los CP3 y CP4. Para la asociación (Cr, Pb, Al, Ta), se eligió al Cr por presentar la carga negativa de mayor valor en el CP1, estableciendo un contraste vectorial con el Zr y Si. Otros elementos del grupo, como el Al o el Pb, mostraron comportamientos vinculados a componentes de menor varianza.

En la asociación 3, la similitud estadística entre el Ca y el Sr (ambos con cargas positivas en el CP2 y CP3) derivó en la selección del Ca como representante del grupo, debido a que tiene mayores valores de cargas dentro del ACP. Finalmente, en la asociación 4 se mantuvieron de forma

independiente el Fe y el Ba. A pesar de su asociación en el dendrograma, sus cargas se relacionaron con componentes distintos, donde el Fe estuvo vinculado a los CP2 y CP3, mientras que el Ba dominó los CP4 y CP5. Este procedimiento permitió consolidar el grupo de seis elementos finales para la etapa de interpretación (Cr, Zr, Ca, Ba, Fe e Y).

### **4.3 Comportamiento de las relaciones elementales**

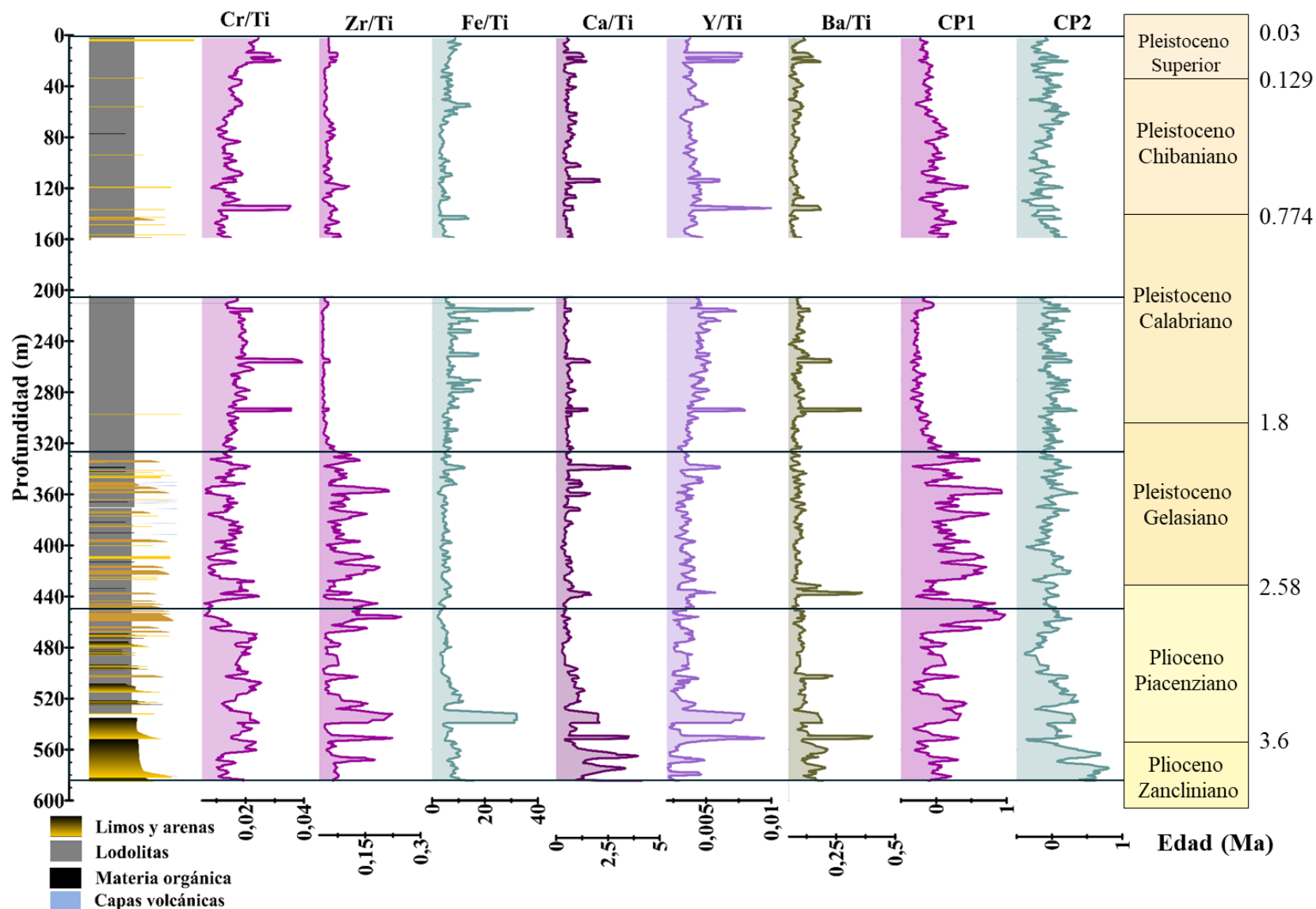
La variabilidad química se analizó mediante relaciones elementales normalizadas respecto al Ti (Cohen, 2003; Tjallingii *et al.*, 2007). Estas razones se consideraron por su capacidad para capturar la varianza de sus respectivos grupos jerárquicos y componentes principales. Bajo este criterio, se usaron seis razones Cr/Ti, Zr/Ti, Ca/Ti, Ba/Ti, Fe/Ti e Y/Ti, las cuales fueron integradas con las puntuaciones de los componentes principales (CP scores) calculadas por PAST. La división se presenta en los mismos intervalos de la sección anterior.

#### **4.3.1 Intervalo 1 (3.8 a 2.78 Ma, 585.5 a 450 m):**

En este tramo, las razones elementales presentan comportamientos heterogéneos. La relación Ca/Ti predomina en la sección basal del registro, entre los 3.8 y 3.39 Ma (585.5 y 510 m) con valores que oscilan entre 0.0001 y 3.75, al igual que sucede con el CP 3 que presenta los valores más altos en la sección del registro (0.8). Por su parte, la relación Zr/Ti constituye la señal más dinámica del intervalo, caracterizada por fluctuaciones entre 0.025 y 0.27, de manera similar ocurre con el CP1 y CP4 cuyos valores oscilan entre -0.3 a 1 y -0.45 a 0.2, respectivamente. El resto de las razones exhiben picos asincrónicos detectados a 3.54 y 3.29 Ma (539 m y 501 m), con los siguientes rangos de magnitud: Ba/Ti (0.05 a 0.375), Fe/Ti (4 a 32), Y/Ti (0.002 a 0.01) y Cr/Ti (0.005 a 0.025).

Figura 9.

Relaciones elementales seleccionadas para el análisis paleoambiental.



*Nota.* Perfiles geoquímicos de las relaciones elementales y puntajes de los CP de mayor varianza. Se indican los intervalos geoquímicos definidos para el núcleo. El espacio en blanco en la sucesión (158 a 294 m) corresponde a un segmento no recuperado durante la perforación. La columna estratigráfica fue tomada de Torres *et al.* (2005) y la temporalidad se integró a partir del modelo de edad de Pérez-Angel *et al.* (2026).

#### **4.3.2 Intervalo 2 (2.78 a 1.97 Ma, 450 a 325 m):**

Este segmento se caracteriza por fluctuaciones marcadas entre picos y valles en las firmas elementales. Este comportamiento se presenta en las relaciones Zr/Ti y Cr/Ti mantienen una elevada variabilidad, con rangos de 0.025 a 0.20 y 0.005 a 0.025, al igual que en el CP1 que varía entre -0.35 a 0.95 con el mismo comportamiento de la relación Zr/Ti. En contraste, las relaciones Ba/Ti (0.005 a 0.125), Fe/Ti (4 a 12) e Y/Ti (0.002 a 0.00625) presentan magnitudes menores en comparación con el intervalo anterior. Se identifica un punto de inflexión a los 2.41 Ma (400 m), donde el CP2 inicia una tendencia al aumento, coincidiendo con pulsos episódicos de Ca/Ti a 2.68, 2.29, 2.24, 2.12 y 2.06 Ma (440 m, 380 m, 370 m, 350 m y 340 m,) alcanzando valores de hasta 3.75.

#### **4.3.3 Intervalo 3 (1.97 a 1.19 Ma, 325 a 204 m):**

Se observa una fase de estabilidad en la mayoría de las firmas hasta los 1.19 Ma (204 m). Sin embargo, se identifican pulsos episódicos sincrónicos en diversos elementos, como ocurre a los 1.77 Ma (295) m. En esta sección, las relaciones Y/Ti (0.003 a 0.008), Cr/Ti (0.015 a 0.04) y Fe/Ti (5 a 38) tienden al aumento. La relación Fe/Ti presenta episodios marcados a 1.66, 1.46 y 1.37 Ma (280 m, 250 m y 235 m), los cuales son sincrónicos a la variabilidad del CP2 (-0.2 a 0.38). Simultáneamente, picos puntuales de Ca/Ti concuerdan con Ba/Ti e Y/Ti a 1.49, 1.40 y 1.27 Ma (255 m, 240 m y 215 m).

#### **4.3.4 Intervalo 4 (1.19 a 0.03 Ma, 204 a 1,8 m):**

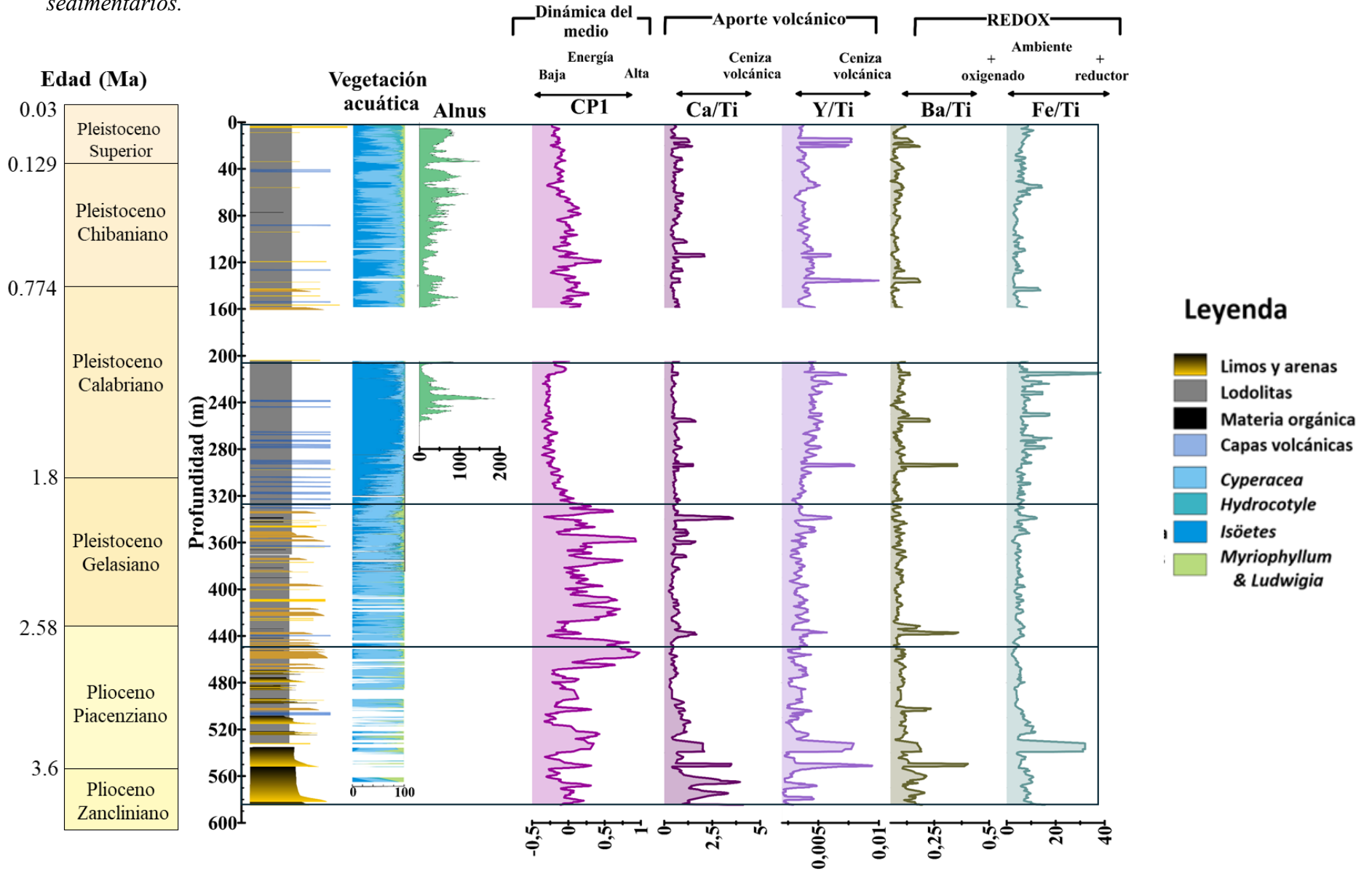
Posterior a este nivel, se observa un aumento en la relación Cr/Ti (0.009 a 0.04) junto con la baja variabilidad de la relación Zr/Ti (0.025 a 0.1), la cual esta sincronizada con el CP1 que alcanza valores de hasta 0.4 pero se estabiliza a los 0.32 Ma (55 m). Las magnitudes generales de este tramo son inferiores a las de los intervalos más profundos: Fe/Ti fluctúa entre 2 y 38, Ba/Ti entre 0.005 y 0.35, Y/Ti entre 0.0035 y 0.01, y Ca/Ti muestra variaciones de 0.41 a 3.75. La relación Fe/Ti muestra una correlación directa con el CP2, el cual presenta una tendencia decreciente hasta los 0.64 Ma (110 m), aumenta hacia los 0.35 Ma (60 m) y finalmente decrece hacia el tope del registro. Hacia los 0,18 Ma (30 m), se identifica un incremento en Fe/Ti y Cr/Ti, a partir de los 50 m.

## **5. Discusión**

La evolución paleoambiental registrada en el núcleo Funza II, es el resultado de la interacción entre la subsidencia tectónica de la Sabana de Bogotá y las fluctuaciones hidrológicas que modularon el llenado de la cuenca (Torres *et al.*, 2005). El sistema se define como una cuenca de alta montaña que experimentó una transición desde un entorno dominado por la dinámica fluvioacustre, hacia un lago de hasta 50 m de profundidad que retorna a dinámicas fluviales hacia el tope del registro (Torres *et al.*, 2005, 2013). En esta investigación, la variabilidad de las relaciones elementales se integra con los registros palinológicos por profundidad, acoplados al modelo de edad de Pérez-Angel *et al.* (2026). De este modo, la evolución del sistema se divide en cuatro intervalos quimioestratigráficos principales, validados y soportados por la litoestratigrafía propuesta por Torres *et al.* (2005).

**Figura 10.**

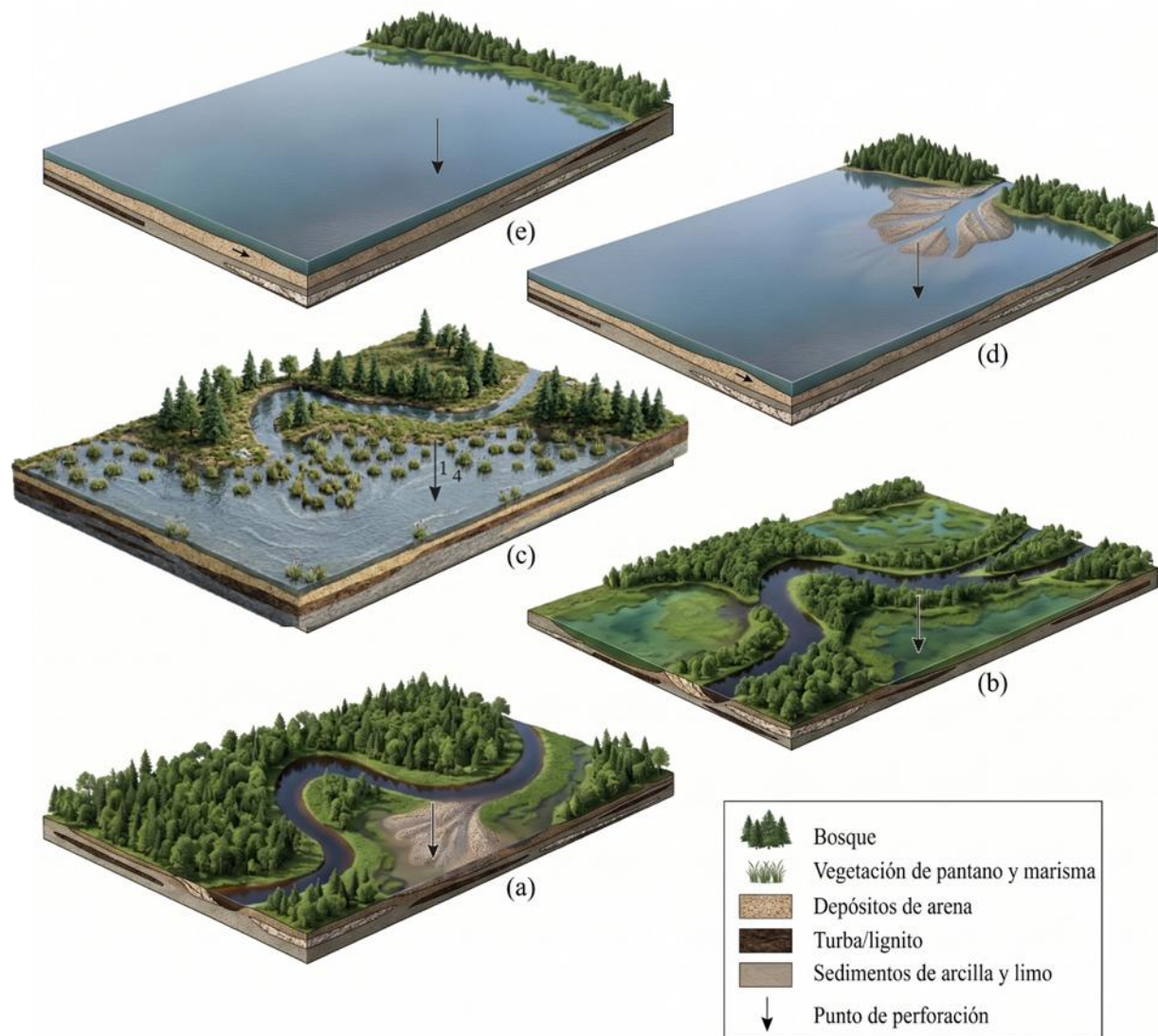
*Integración multi-indicadores del registro Funza II basado en geoquímica elemental e integrado con indicadores palinológicos y sedimentarios.*



*Nota.* Integración de los perfiles de las relaciones elementales y los cuatro intervalos estratigráficos definidos en el presente estudio, correlacionados con información previa del núcleo. La litoestratigrafía y la palinología provienen de Torres *et al.* (2005, 2013), mientras que el modelo cronológico se basa en Pérez-Angel *et al.* (2026).

**Figura 11.**

*Bloques diagramas de la evolución de la cuenca.*



*Nota.* Muestran la configuración de cuatro ambientes deposicionales, (a) depósitos fluviolacustres, (b) depósitos lacustres someros y de pantano durante (c) depósitos de pantano, (d) depósitos

fluviolacustres durante niveles altos de agua, (e) depósitos lacustres profundos. Modificado de Torres *et al.*, 2005).

### **5.1 Fluctuaciones energéticas en un sistema fluvial meandriforme de ríos con llanuras de inundación (585.5 m a 427 m).**

La historia geológica registrada en la sección basal del núcleo Funza II revela un sistema fluvial meandriforme, caracterizado por una dinámica variable y una transición constante de ambientes (Torres *et al.*, 2005; Sarmiento, 2024). Este primer intervalo abarca desde los 3.8 Ma hasta los 2.78 Ma, situándose temporalmente en el Plioceno (Zancliano a Piacenziano). Durante este periodo, la dinámica ambiental estuvo regida por variaciones energéticas continuas, evidenciadas por la fluctuación del CP1, el cual integra la relación inversa entre las relaciones Zr/Ti y Cr/Ti (Figura 9).

Los altos valores Cr/Ti y los bajos valores de Zr/Ti señalaron fases de muy baja energía y estabilidad. Dado que el Ti se asocia frecuentemente a la fracción de aluminosilicatos y minerales arcillosos en medios lacustres y fluviales debido a su baja movilidad geoquímica (Calvert y Pedersen, 2007; Rothwell y Croudace, 2015), su uso como normalizador sugiere los incrementos de Zr/Ti sugieren periodos de mayor energía hidrodinámica asociados a escorrentía y descargas fluviales (Peterson y Haug, 2006), porque el Zr se concentra en minerales densos como el circón, propios de fracciones de arena fina y limo grueso (Kylander *et al.*, 2011). Por otro lado, el aumento de Cr representa periodos de desarrollo en regímenes de baja energía. Esta dinámica está representada por el CP1 (Figura 7 y Figura 9), en donde los puntajes bajos indican valores altos de Cr/Ti, mientras que los picos del CP1 coinciden con incrementos en Zr/Ti, de esa manera este componente se establece como un indicador de la energía del sistema (Figura 10).

Esta alternancia observada en la geoquímica es consistente con la dinámica meandriforme descrita por Sarmiento (2024) y Torres *et al.* (2005), donde el movimiento del meandro genera una intercalación de depósitos: los altos valores del CP1 representan el transporte de arenas en barras de punta (Figura 11a), mientras que las fases de bajos puntajes de CP1 documentan menores energías asociadas a las llanuras de inundación, donde se desarrollaron paleosuelos varicoloreados típicos de áreas tropicales (Figura 11b; Sarmiento, 2024). Al validar esta tendencia con el conteo palinológico realizado por Torres *et al.* (2005), los eventos de mayor energía coincidieron con el dominio de vegetación de orilla como los taxones *Cyperaceae* y *Myriophyllum*, que se asocian a los márgenes o zonas de borde del cuerpo de agua, confirmando una reducción en la profundidad de la columna de agua e incremento en el flujo de material detrítico (Torres *et al.*, 2013; Figura 10).

La geoquímica también revela la evolución química del fondo de la cuenca. La relación Fe/Ti presentó aumentos puntuales que, al correlacionarse de manera inversa con las cargas factoriales del CP1 (Figura 7 y Figura 9), indicaron un control independiente del régimen de energético. Se observó que los picos de Fe/Ti ocurrieron en contacto con capas ricas en materia orgánica reportadas por Torres *et al.* (2005), sugiriendo que los incrementos de la relación marcaron fases de anoxia que favorecieron su preservación. En contraste, la disminución de Fe/Ti coincidió frecuentemente con los picos de CP1, esta relación inversa evidenció que, mientras el aumento de Fe/Ti responde a la influencia directa del canal del meandro, donde la entrada de flujos detríticos provocó episodios de oxigenación temporal en el fondo.

En la dinámica redox de la Sabana de Bogotá se observó un desfase entre las señales de Ba/Ti y Fe/Ti (Figura 10). Aunque el Ba suele asociarse a aditivos de perforación, el uso documentado de bentonita en la perforación de Funza II (Sarmiento, 1990) permitió descartar

dicha contaminación y validar al *Ba* como un indicador de procesos químicos internos. Los picos de Ba/Ti no fueron simultáneos a los de Fe/Ti, debido a la cinética de reacción diferencial descrita por Davison (1993): el Ba es más sensible a los cambios de potencial y responde con mayor agilidad a las fases iniciales de reoxigenación, mientras que el Fe posee una tasa de precipitación más lenta. Así, la sucesión de picos de Ba/Ti seguidos de Fe/Ti permitió identificar la transición entre la recuperación de la oxigenación y la posterior estabilización del fondo lacustre hacia condiciones anóxicas. Estas relaciones se distinguen de los aportes detríticos al estar presentes en una asociación paleoambiental independiente identificada en el CP2 (Figura 7).

## **5.2 Fluctuaciones energéticas abruptas en un sistema fluvial de llanura pantanosa y humedales (440 m a 325 m).**

Este segundo tramo abarca desde los 2.68 Ma hasta los 1.97 Ma, registrando de forma continua la transición del Plioceno Tardío al Pleistoceno Temprano. A partir de este tramo, la cuenca experimentó una transformación drástica en su ritmo deposicional hacia un sistema fluvial de valle intramontano con prolíficas áreas pantanosas en sus llanuras de inundación (Torres *et al.*, 2005; Sarmiento, 2024). El registro geoquímico adoptó un patrón "aserrado" de alta amplitud, donde las fluctuaciones entre Cr/Ti (estabilidad) y Zr/Ti (mayor energía) se volvieron procesos altamente recurrentes, lo cual está representado por la dinámica del CP1.

Al igual que en el intervalo basal, esta dinámica responde a la migración de los canales fluviales, pero con la diferencia de que las áreas de inundación evolucionaron hacia sistemas de humedales y pantanos. Los picos del CP1 reflejan la erosión y el desbordamiento de los canales hacia el interior del sistema asociados a depósitos fluviolacustres intermitentes (Figura 11a), mientras que los intervalos dominados por bajos valores del CP1 (asociados a valores elevados de

Cr/Ti) señalan momentos de inundación somera y estabilidad energética que permitieron la formación de pantanos ( Figura 11b y c).

La historia de este intervalo muestra el desarrollo de caída de cenizas volcánicas, cuya firma geoquímica se asocia a la sincronía entre las señales de Y/Ti y Ca/Ti. La correlación entre estas señales está respaldada por la estructura del CP4. Estos eventos de depositación de cenizas volcánicas, no solo modificaron la litología del núcleo (Torres *et al.*, 2005), sino que actuaron como sellos químicos que alteraron la respiración del fondo.

Las condiciones redox indican que la cuenca demostró fases de reoxigenación temprana detectadas por la alta sensibilidad del Ba. Esta sucesión de eventos revela una cinética diferencial entre los metales, donde el Ba actúa como el primer afectado ante la entrada de oxígeno, en donde, según Davison (1993), precipita junto con óxidos de manganeso, mientras que el Fe requiere periodos más prolongados para su estabilización y precipitación (Davison, 1993).

### **5.3 Estabilización del lago profundo (325 m a 204 m).**

Este tercer intervalo abarca desde los 1.97 Ma hasta los 1.17 Ma, comprendiendo la transición desde el Gelasiano hasta el Calabriano dentro del Pleistoceno Temprano. Esta etapa documenta el periodo de desarrollo del lago de Funza de la Sabana de Bogotá. A diferencia de la inestabilidad energética que caracterizó los tramos basales y medios, esta sección refleja una fase de estabilización hacia regímenes de muy baja energía. El indicador de variación del régimen de energía del medio (CP1) perdió la variabilidad abrupta de las fases previas, sugiriendo que los eventos de descarga hacia la cuenca fueron escasos y puntuales (Figura 9). Esta pérdida de variabilidad indica una fase de estabilización energética donde el nivel freático aumentó debido al incremento en la tasa de subsidencia (Torres *et al.*, 2005), lo cual está representado por la abundancia de *Isoetes*, que es un taxón de vegetación acuática sumergida que responde

directamente a un gradiente de aumento en la profundidad de la columna de agua (Torres *et al.*, 2005), confirmando la existencia de una columna de agua profunda (Van 't Veer y Hooghiemstra, 2000) que se desarrolla en ambientes lacustres (Torres *et al.*, 2005; Figura 11e).

Al aumentar la profundidad, la dinámica interna del lago se transformó. La presencia de picos recurrentes de Fe/Ti evidencia el predominio de ambientes con baja disponibilidad de oxígeno (Figura 9), estas condiciones anóxicas favorecieron la conservación de altos contenidos de materia orgánica en el sedimento, tal como lo reportan Torres *et al.* (2005). Sin embargo, pese a que el CP1 se estabiliza, las relaciones Zr/Ti presenta picos puntuales (Figura 9) a los 1.49 Ma y 1.43 Ma (295 y 225m), los cuales coinciden con picos en Ba/Ti, lo cual sugiere que la entrada de dichos pulsos alteró la dinámica del fondo, dando paso a episodios puntuales de oxigenación sobre un ambiente predominantemente anóxico.

En este fondo anóxico, dichos pulsos puntuales de mayor energía coinciden de manera simultánea con los picos de Y/Ti y Ca/Ti (Figura 9). Dado que el Ca es un elemento altamente soluble su preservación en este contexto se asocia a eventos que no requirieron un transporte por vías hidráulicas, sino más bien aéreas, evitando así su lixiviación acuática (Kylander *et al.*, 2011; Bertrand *et al.*, 2024). Por su parte, el Y es un elemento incompatible caracterizado por ser insoluble e inmóvil en ambientes acuosos (Rollinson, 1993; Lowe, 2011). De esa manera, su preservación simultánea con indicadores de mayor energía confirma que este proceso de aporte se dio por vía eólica, tal como ocurre con la caída de cenizas volcánicas. En estas cenizas, el Ca se vincula a la presencia de plagioclasas (Elbert *et al.*, 2013), mientras que el Y permanece atrapado en la matriz del vidrio volcánico (Rollinson, 1993; Lowe, 2011). La preservación simultánea de ambos trazadores valida un origen volcánico directo que coincide con los horizontes de ceniza reportados litoestratigráficamente por Torres *et al.* (2005). La recurrencia de estos eventos incluye

no solo capas visibles, sino también criptotefras que interrumpieron la sedimentación lacustre, un fenómeno que el análisis estadístico a través del CP4 (Figura 7).

#### **5.4 Somerización del lago: Transición hacia ambientes de pantano y sistemas fluviales (204 a 1.8 m).**

Este cuarto intervalo se extiende cronológicamente desde los 1.19 Ma hasta los 0.03 Ma, abarcando temporalmente los pisos Calabriano y Chibaniano del Pleistoceno. Hacia el tope del registro, el sistema se encamina hacia su colmatación definitiva. La dinámica sedimentaria de esta etapa estuvo marcada por la reactivación puntual de pulsos de mayor energía (evidenciada por valores altos del CP1 e Y/Ti) que sugieren descargas fluviales (Figura 11d), alternados con fases de bajos valores de CP1, los cuales se asocian al predominio de un régimen de muy baja energía (Figura 11c).

Los cambios en el régimen de energía alteraron las condiciones redox del lago. Los episodios puntuales de reoxigenación, marcados por la sincronía entre los picos de CP1 y Ba/Ti, contrastan con la tendencia general de la relación Fe/Ti (Figura 9). A diferencia de las secciones basales, el Fe/Ti muestra aquí un enriquecimiento gradual en lugar de eventos aislados, lo que refleja una disminución sostenida en la disponibilidad de oxígeno. Esta tendencia anóxica se encuentra vinculada al alto contenido de *Isoëtes*, lo cual indica el desarrollo de un cuerpo de agua lacustre que, a pesar de no sobrepasar los 10 m de profundidad (Torres *et al.*, 2005), mantuvo condiciones reductoras estables en el fondo. En estas condiciones anóxicas, la solubilidad del Fe aumentó, permitiendo su movilización y posterior enriquecimiento en el registro (Davison, 1993). Esta dinámica queda validada por la estructura de los componentes principales (CP2 al CP5), donde la disposición de las cargas confirma el control redox y permite diferenciar las fases de anoxia frente a los pulsos de reoxigenación.

Al integrar la geoquímica con los conteos palinológicos, destaca la correlación inversa del CP1 con el polen de *Isoëtes* y su relación directa con el de *Alnus* (aliso) (Figura 10). Este comportamiento respecto a *Isoëtes* sugiere que estas fases de baja energía (CP1 bajos con Cr/Ti altos) no solo responden a un régimen tranquilo, sino que están vinculados a mayores niveles de la columna de agua, condiciones necesarias para el desarrollo de estas plantas acuáticas hacia el centro de la cuenca. Por el contrario, en los tramos donde el CP1 exhibe valores altos asociados a una disminución en la relación Cr/Ti, se observa una notable expansión de *Alnus*. De acuerdo con Torres *et al.* (2013), los altos porcentajes de este género indican fases interglaciares más cálidas, donde este taxón se asocia con la formación de bosques de pantano en áreas húmedas. En este escenario, los altos valores del CP1 y el desarrollo de *Alnus* coincidieron con periodos de mayor escorrentía y aumento en la temperatura a causa de la migración altitudinal de la línea de bosque (LMB) (Peterson y Haug, 2006; Torres *et al.*, 2013). Estos periodos cálidos y húmedos indican la entrada de material granulométrico más grueso a la cuenca bajo regímenes de mayor energía hidrodinámica, explicando así su sincronía con los picos del CP1 (Figura 11d).

Hacia los últimos 0.0037 Ma (últimos 5 metros del registro), se observó un comportamiento ecológico y geoquímico diferente. Mientras que la relación Y/Ti exhibe un leve aumento, los aportes de *Isoëtes* y *Cyperaceae* disminuyen de forma paralela (Figura 10). En su lugar, se registra un incremento significativo de *Hydrocotyle*, un taxón indicador de vegetación de ribera y ambientes pantanosos (Torres *et al.*, 2005). El Y/Ti aumenta en este tramo, lo que demuestra que la depositación aún ocurría bajo un régimen de mayor energía hidrodinámica. No obstante, la caída de *Isoëtes* y el ascenso de *Hydrocotyle* reflejan que el cuerpo de agua se había vuelto somero.

El aumento de plantas de ribera como refleja que el paleolago se estaba volviendo poco profundo como para permitir el establecimiento de comunidades de pantanos de juncos y campos

de hierbas. Este proceso fue causado por una tasa de sedimentación casi continua que relleno gradualmente el espacio de acomodación disponible. El relleno sedimentario alcanzó un punto crítico donde la profundidad del agua fue mínima, permitiendo que la colmatación diera paso, finalmente, a sistemas fluviales que erosionaron o cubrieron los depósitos lacustres previos (Torres *et al.*, 2005). De este modo, los últimos 5 metros del núcleo quedan dominados por un régimen fluvial de mayor energía, caracterizado por el aporte de arenas y gravas asociadas administrativamente a la Formación Chía (Torres *et al.*, 2005).

La evolución paleoambiental del registro de los últimos 3.8 Ma se reconstruyó a partir de la variabilidad de las firmas geoquímicas. Durante el Plioceno y el Pleistoceno Temprano (Piso Gelasiano), el sistema estuvo gobernado por la variación en la dinámica energética. En este periodo, las fluctuaciones continuas y abruptas del CP1 indicaron la alternancia energética de un sistema fluvial activo, donde los puntajes más altos del CP1 señalaron periodos de mayor escorrentía y humedad, típicos de periodos interglaciares, contrastando con fases más secas de baja energía hidrodinámica.

Hacia la transición dentro del Pleistoceno inferior (piso Calabriano), la geoquímica el cuerpo de agua estaba controlado por las condiciones de oxidorreducción. Esta firma quimioestratigrafía (alto Fe/Ti y bajo Ba/Ti) sugiere el establecimiento de condiciones de fondo anóxicas y persistentes debido a la progresiva profundización del lago, en donde se depositaron capas de ceniza volcánica, identificadas a partir de las Y/Ti y Ca/Ti. El Pleistoceno Medio (piso Chibaniano) se caracterizó por el retorno de las variabilidades energéticas controladas por el CP1, coexistiendo con tendencias de aumentos leves sostenidas de Fe/Ti que sugieren la persistencia de condiciones de fondo anóxicas bajo un espacio lacustre que se volvía progresivamente más somero por el llenado sedimentario, transicionando hacia un ambiente de pantano que es interrumpido por

descargas detríticas. Hacia el Pleistoceno Superior, el núcleo finaliza con un incremento en la relación Y/Ti, que coincide con la depositación de la Formación Chía, como indicador el retorno a un régimen detrítico de alta energía impulsado por la red fluvial asociada al Río Bogotá.

## 6. Conclusiones

1. La caracterización geoquímica mediante FRX indicó que la historia sedimentaria del registro de Funza II no fue lineal, sino que respondió a cambios en la competencia hidrodinámica y la energía del medio a lo largo del Plio-Cuaternario. El registro de las relaciones elementales documenta una transición que inicia en el Plioceno (3.8 a 2.78 Ma) con ambientes someros como un sistema fluvial meandriforme de energía variable (585 m a 426 m), seguido en la transición Plio-Pleistoceno (2.68 a 1.97 Ma) por un sistema fluvio-pantanosos de llanuras de inundación y humedales, definido por una dinámica de mayor variabilidad y fluctuaciones recurrentes (426 m a 325 m). El Pleistoceno Temprano (1.97 a 1.17 Ma) se produce la estabilización energética y profundización de la columna de agua (325 a 204m) impulsada por la subsidencia tectónica. El registro finaliza hacia el Pleistoceno Medio- Superior (1.119 a 0.03 Ma) con una fase de somerización y colmatación del lago (204 a 1.8 m) en donde hay variaciones de energía, pero predominan los regímenes de baja energía.

2. La cuantificación elemental mediante fluorescencia de rayos X (FRX) permitió definir la geoquímica de los sedimentos a lo largo de estos 3.8 Ma a través de un set consolidado de seis relaciones elementales (Zr/Ti, Cr/Ti, Ca/Ti, Y/Ti, Fe/Ti y Ba/Ti). Estas señales capturaron la mayor varianza estadística de la cuenca, demostrando ser indicadores de alta sensibilidad para identificar cambios en la competencia hidrodinámica y en las condiciones redox. Asimismo, la

sensibilidad de esta caracterización facilitó la detección de eventos episódicos, como la presencia de cenizas volcánicas y posibles criptotefras.

3. Las relaciones elementales  $Zr/Ti$  y  $Cr/Ti$  son indicadores del régimen de energía del sistema. El contraste entre los picos de  $Zr/Ti$  (indicadores de alta energía y descargas fluviales) y  $Cr/Ti$  (indicador de decantación en medios tranquilos) permitieron diferenciar desde las fases de energía variable asociada a ambientes de ríos meándricos con llanuras de inundación del Pleistoceno Temprano, frente a la calma hidrodinámica del lago profundo desarrollado durante el Pleistoceno Temprano.

4. La dinámica redox del fondo lacustre fue reconstruida a través del comportamiento del  $Fe/Ti$  y el  $Ba/Ti$ . Se determinó que el sistema operó bajo un control redox fluctuante, donde los enriquecimientos de  $Fe/Ti$  confirman estados de anoxia en ambientes de pantano y lago profundo del Pleistoceno Temprano. Por su parte, los pulsos de  $Ba/Ti$  actuaron como indicadores de reoxigenación, a causa de eventos de mezcla vertical que interrumpieron brevemente las condiciones reductoras del fondo.

5. La sincronía de las señales positivas de  $Ca/Ti$  e  $Y/Ti$  permitió identificar una firma volcánica diagnóstica. La preservación de estos eventos, especialmente en el intervalo lacustre estable del Pleistoceno Temprano (325 m a 204 m, 1.97 a 1.17 Ma), indica que la baja energía del medio evitó la movilización del Ca, permitiendo que las cenizas se incorporaran al registro sedimentario como marcadores de perturbaciones episódicas en la cuenca.

6. La transición hacia condiciones someras fue observada por la convergencia de  $Fe/Ti$  (anoxia por estancamiento),  $Cr/Ti$  (baja energía) e  $Y/Ti$  (reactivación fluvial). Estas señales documentan la continua sedimentación que relleno progresivamente el paleolago, reduciendo drásticamente su espacio de acomodación y forzando su somerización. Este proceso de

colmatación continua permitió que, en los últimos 5 metros del registro, ingresaran sistemas fluviales de mayor energía de la Formación Chía que erosionaron y cubrieron los depósitos lacustres previos.

### Referencias Bibliográficas

- Aitchison, J. (1982). The statistical analysis of compositional data. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B (Methodological)*, 44(2), 139-160. <https://doi.org/10.1111/j.2517-6161.1982.tb01195.x>
- Andriessen, P., Helmens, K., Hooghiemstra, H., y Riezebos, P. (1993). Absolute chronology of the Pliocene-Quaternary sediment sequence of the Bogotá area, Colombia. *Quaternary Science Reviews*, 12(7), 483-501. [https://doi.org/10.1016/0277-3791\(93\)90066-U](https://doi.org/10.1016/0277-3791(93)90066-U)
- Aufgebauer, A., Panagiatopoulos, K., Wagner, B., Schaebitz, F., Viehberg, F. A., Vogel, H., Zanchetta, G., Sulpizio, R., Leng, M. J., y Damaschke, M. (2012). Climate and environmental change over the last 17 ka recorded in sediments from Lake Prespa (Albania/F.Y.R. of Macedonia/Greece). *Quaternary International*, 274, 122-135. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.02.015>
- Beckhoff, B. K., Kanngießer, B., Langhoff, N., Wedell, R., & Wolff, H. (Eds.). (2006). *Handbook of practical X-ray fluorescence analysis*. Berlin. Springer Science & Business Media.
- Bertrand, S., Tjallingii, R., Kylander, M. E., Wilhelm, B., Roberts, S. J., Arnaud, F., y Bindler, R. (2024). Inorganic geochemistry of lake sediments: A review of analytical techniques and guidelines for data interpretation. *Earth-Science Reviews*, 249(1), 104639. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104639>
- Boës, X., Rydberg, J., Martinez-Cortizas, A., Bindler, R., y Renberg, I. (2011). Evaluation of conservative lithogenic elements (Ti, Zr, Al, and Rb) to study anthropogenic element enrichments in lake sediments. *Journal of Paleolimnology*, 46(1), 75-87. <https://doi.org/10.1007/s10933-011-9515-z>

- Boom, A., Mora, G., Cleef, A. M., y Hooghiemstra, H. (2001). High altitude C4 grasslands in the northern Andes: Relicts from glacial conditions? *Review of Palaeobotany and Palynology*, 115(3-4), 147-160. [https://doi.org/10.1016/S0034-6667\(01\)00056-2](https://doi.org/10.1016/S0034-6667(01)00056-2)
- Boyle, J. F. (2002). Inorganic geochemical methods in palaeolimnology. *Tracking environmental change using lake sediments: Physical and geochemical methods*, 2(1), 83-141. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Brown, E. (2011). Lake Malawi's response to "megadrought" terminations: Sedimentary records of flooding, weathering and erosion. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 303(1-4), 120-125. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2010.01.038>
- Calvert, S. E., y Pedersen, T. F. (2007). Chapter Fourteen elemental proxies for palaeoclimatic and palaeoceanographic variability in marine sediments: interpretation and application. En C. Hillaire-Marcel y A. de Vernal (Eds.), *Proxies in Late Cenozoic Paleooceanography* (pp. 567-644). Elsevier Science. [https://doi.org/10.1016/S1572-5480\(07\)01019-6](https://doi.org/10.1016/S1572-5480(07)01019-6)
- Chicangana, G., Vargas-Jiménez, C. A., Kammer, A., Caneva, A., Salcedo Hurtado, E., y Gómez Capera, A. (2015). La amenaza sísmica de la Sabana de Bogotá frente a un sismo de magnitud  $M > 7.0$ , cuyo origen esté en el Piedemonte Llanero. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 24(2), 73-91. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v24n2.43865>
- Cohen, A. S. (2003). *Paleolimnology: The history and evolution of lake systems*. Oxford University Press. <https://doi.org/10.1093/oso/9780195133530.001.0001>,
- Corella, J., Brauer, A., Mangili, C., Rull, V., Vegas-Vilarrúbia, T., Morellón, M., y Valero-Garcés, B. (2012). The 1.5-ka varved record of Lake Montcortès (southern Pyrenees, NE Spain). *Quaternary Research*, 78(2), 323-332. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2012.06.002>

- Craigie, N. (2018). *Principles of elemental chemostratigraphy*. Springer.
- Croudace, I. W., y Rothwell, R. G. (Eds.). (2015). *Micro-XRF studies of sediment cores: Applications of a non-destructive tool for the environmental sciences*. Springer.  
<https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5>
- Davies, S. J., Lamb, H. F., y Roberts, S. J. (2015). Micro-XRF core scanning in palaeolimnology: Recent developments. En I. W. Croudace y R. G. Rothwell (Eds.), *Micro-XRF studies of sediment cores* (pp. 189-226). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-017-9849-5_7)
- Davison, W. (1993). Iron and manganese in lakes. *Earth-Science Reviews*, 34(2), 119-163.  
[https://doi.org/10.1016/0012-8252\(93\)90029-7](https://doi.org/10.1016/0012-8252(93)90029-7)
- Elbert, J., Wartenburger, R., von Gunten, L., Urrutia, R., Fischer, D., Fujak, M., y Grosjean, M. (2013). Late Holocene air temperature reconstructed from sediments of Laguna Escondida, Patagonia, Chile (45°S 30°W). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 369, 482-492. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2012.11.013>.
- Filzmoser, P., Hron, K., y Reimann, C. (2010). The bivariate statistical analysis of environmental (compositional) data. *Science of the Total Environment*, 408(19), 4230-4238.  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2010.05.011>
- Foerster, V., Junginger, A., Langkamp, O., Gebru, T., Asrat, A., Umer, M., Lamb, H., Wennrich, V., Rethemeyer, J., Nowaczyk, N., Trauth, M., y Schaebitz, F. (2012). Climatic change recorded in the sediments of the Chew Bahir basin, southern Ethiopia, during the last 45,000 years. *Quaternary International*, 274, 25-37.  
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2012.06.028>
- Gebregiorgis, D., Giosan, L., Hathorne, E. C., Anand, P., Nilsson-Kerr, K., Plass, A., Lückge, A., Clemens, S. C., y Frank, M. (2020). What can we learn from X-ray fluorescence core

- scanning data? A paleomonsoon case study. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 21(2), e2019GC008414. <https://doi.org/10.1029/2019GC008414>
- Grimm, L. G., y Yarnold, P. R. (2000). Introduction to multivariate statistics. *Reading and understanding more multivariate statistics*. American Psychological Association.
- Hall, G. E. M., Buchar, A., y Bonham-Carter, G. (2012). *Quality control assessment of portable XRF analysers: Development of standard operating procedures, performance on variable media and recommended uses; Phase I* (Informe técnico CAMIRO Project 10E01). Association of Applied Geochemists.
- Hammer, Ø., Harper, D. A. T., y Ryan, P. D. (2001). PAST: Paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1), 1-9. [https://palaeo-electronica.org/2001\\_1/past/issue1\\_01.htm](https://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm)
- Helmens, K. (1990). *Neogene-Quaternary geology of the high plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia: Stratigraphy, palaeoenvironments and landscape evolution*. Dissertationes Botanicae, 163.
- Hooghiemstra, H., y Flantua, S. G. A. (2019). Colombia in the Quaternary: An overview of environmental and climatic change. En J. Gómez y A. O. Pinilla-Pachón (Eds.), *The Geology of Colombia*, 4 (1), 43-95. Servicio Geológico Colombiano. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.02>
- Hooghiemstra, H., y Ran, E. T. H. (1994). Late Pliocene-Pleistocene high resolution pollen record of Colombia: An analysis of forest vegetation dynamics. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 81(2-4), 117-163. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(94\)90018-3](https://doi.org/10.1016/0034-6667(94)90018-3)

- Hooghiemstra, H., y Sarmiento, G. (1991). Long continental pollen record from a tropical intermontane basin: Late Pliocene and Pleistocene history from a 540-meter core. *Episodes*, 14(2), 107-115. <https://doi.org/10.18814/epiiugs/1991/v14i2/001>
- Hubach, E. (1957). Estratigrafía de la Sabana de Bogotá y alrededores. *Boletín Geológico*, 5(2), 93-112. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol5.2.1957.286>
- Jansen, J. H. F., Van der Gaast, S. J., Koster, B., y Vaars, A. J. (1998). CORTEX, a shipboard XRF-scanner for element analyses in split sediment cores. *Marine Geology*, 151(1-4), 143-153. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(98\)00074-7](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(98)00074-7)
- Kämpf, L., Brauer, A., Dulski, P., Lami, A., Marchetto, A., Gerli, S., Ambrosetti, W., y Guilizzoni, P. (2012). Detrital layers marking flood events in recent sediments of Lago Maggiore (N. Italy) and their comparison with instrumental data. *Freshwater Biology*, 57(10), 2076-2090. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2012.02796.x>
- Kylander, M., Ampel, L., Wohlfarth, B., y Veres, D. (2011). High-resolution X-ray fluorescence core scanning analysis of Les Echets (France) sedimentary sequence: New insights from chemical proxies. *Journal of Quaternary Science*, 26(1), 109-117. <https://doi.org/10.1002/jqs.1438>
- Lauterbach, S., Brauer, A., Andersen, N., Danielopol, D., Dulski, P., Hüls, M., Milecka, K., Namiotko, T., Obremaska, M., y Grafenstein, U. (2011). Environmental responses to Lateglacial climatic fluctuations recorded in the sediments of pre-alpine Lake Mondsee (northeastern Alps). *Journal of Quaternary Science*, 26(3), 253-267. <https://doi.org/10.1002/jqs.1448>
- Lowe, D. J. (2011). Tephrochronology and its application: A review. *Quaternary International*, 246(1-2), 101-121. <https://doi.org/10.1016/j.quaint.2011.05.007>

- Mateu-Figueras, G., Martín-Fernández, J. A., Pawlowsky-Glahn, V., y Barceló-Vidal, C. (2003, septiembre). *El problema del análisis de datos composicionales* [Comunicación de congreso]. *27 congreso Nacional de Estadística e Investigación Operativa*, Lleida, España.
- Mendoza, O. G., Castellanos, F., y Orejuela, C. J. (2020). Itrio (Y). En *Atlas Geoquímico de Colombia* (versión 2020). Servicio Geológico Colombiano.
- Meneses, J. (2019). *Introducción al análisis multivariante*. FUOC.
- Metcalf, S. E., Jones, M. D., Davies, S. J., Noren, A., y MacKenzie, A. (2010). Climate variability over the last two millennia in the North American Monsoon region, recorded in laminated lake sediments from Laguna de Juanacatlan, Mexico. *The Holocene*, 20(8), 1195-1206.  
<https://doi.org/10.1177/0959683610371994>
- Millot, G. (1970). *Geology of Clays: Weathering, Sedimentology, Geochemistry*. Springer-Verlag.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-41609-9>
- Mudge, S. M. (2007). *Multivariate statistics for environmental sciences: A practical guide*. John Wiley & Sons.
- Mueller, A., Islebe, G., Hillesheim, M., Grzesik, D., Anselmetti, F., Ariztegui, D., y Brown, E. (2009). Climate drying and associated forest decline in the lowlands of northern Guatemala during the Late Holocene. *Quaternary Research*, 71(2), 133-141.  
<https://doi.org/10.1016/j.yqres.2008.10.003>
- Nesbitt, H. W., y Young, G. M. (1982). Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299(5885), 715-717.  
<https://doi.org/10.1038/299715a0>

- Pérez Díaz, L., Saiz, J., y Quezada, H. (2023). Preparación de muestras sólidas para el análisis por fluorescencia de rayos X: Una revisión. *Revista Colombiana de Química*, 52(3), 1-15. <https://doi.org/10.15446/rev.colomb.quim.v52n3.111499>
- Pérez-Angel, L. C. (2022). *A refinement of biomarker-based tools to study the Pliocene-Pleistocene climate evolution of the northern Tropical Andes* [Tesis de doctorado, Universidad de Colorado].
- Pérez-Angel, L. C., Sepúlveda, J., Molnar, P., Mora-Paez, H., Parrado, A., Eaman, K., y Trayler, R. B. (2026). Evolution of Pliocene-Pleistocene tropical terrestrial Andean temperature amplification. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 123(6), e2520191123. <https://doi.org/10.1073/pnas.2520191123>
- Peti, L., Gadd, P. S., Hopkins, J. L., y Augustinus, P. C. (2020). Itrax  $\mu$ -XRF core scanning for rapid tephrostratigraphic analysis: A case study from the Auckland Volcanic Field maar lakes. *Journal of Quaternary Science*, 35(1-2), 54-65. <https://doi.org/10.1002/jqs.3133>
- Peterson, L. C., y Haug, G. H. (2006). Variability in the mean latitude of the Atlantic Intertropical Convergence Zone as recorded by riverine input of sediments to the Cariaco Basin (Venezuela). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1), 97-113. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.10.021>
- Rock, N. M. (1988). *Numerical geology: Lecture notes in earth sciences*. Springer.
- Rodriguez, A., Guo, J., O'Sullivan, K., y Krugh, W. (2024). Geochemical record of Late Quaternary paleodeposition environment from lacustrine sediments of Soda Lake, Carrizo Plain, California. *Minerals*, 14(3), 211. <https://doi.org/10.3390/min14030211>
- Rollinson, H. R. (1993). *Using geochemical data: Evaluation, presentation, interpretation*. Pearson Education.

- Sarmiento Pérez, G. (1990). *Perforación del pozo estratigráfico Funza II: Técnicas, experiencias y sugerencias* [Informe técnico]. INGEOMINAS.
- Sarmiento, G. (1991). Estratigrafía y medios del depósito de la Formación Guaduas. *Boletín Geológico*, 32(1), 1-44. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol32.1-3.1992.193>
- Sarmiento, G. (2024, junio). *Reconstrucción paleogeográfica pozo Funza-2* [Presentación en simposio]. *Simposio de Cambio Climático, Paleoclima y Biodiversidad Thomas van der Hammen*, Servicio Geológico Colombiano, Bogotá, Colombia.
- Stansell, N. D., Rodbell, D. T., Abbott, M. B., y Mark, B. G. (2013). Proglacial lake sediment records of Holocene climate change in the western Cordillera of Peru. *Quaternary Science Reviews*, 70, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2013.03.004>
- Templ, M., Filzmoser, P., y Reimann, C. (2008). Cluster analysis applied to regional geochemical data: Problems and possibilities. *Applied Geochemistry*, 23(8), 2198-2213. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.03.004>
- Thermo Fisher Scientific. (2010). *Niton XL3 Analyzer User's Guide*. Thermo Fisher Scientific.
- Thermo Fisher Scientific. (2013). *Certificate of Analysis: Niton™ XRF Analyzers*. Thermo Fisher Scientific Inc.
- Tjallingii, R., Röhl, U., Kölling, M., y Bickert, T. (2007). Influence of the water content on X-ray fluorescence core-scanning measurements in soft marine sediments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 8(2). <https://doi.org/10.1029/2006GC001393>
- Torres, V., Hooghiemstra, H., Lourens, L., y Tzedakis, C. (2013). Astronomical tuning of long pollen records reveals the dynamic history of montane biomes and lake levels in the tropical high Andes during the Quaternary. *Quaternary Science Reviews*, 63, 59-72. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2012.11.004>

- Torres, V., Vandenberghe, J., y Hooghiemstra, H. (2005). An environmental reconstruction of the sediment infill of the Bogotá Basin (Colombia) during the last 3 million years from abiotic and biotic proxies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 226(1-2), 127-148. <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.05.005>
- Van der Hammen, T., Werner, J. H., y van Dommelen, H. (1973). Palynological record of the upheaval of the Northern Andes: A study of the Pliocene and Lower Quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the early evolution of its High-Andean biota. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 16(1-2), 1-122. [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(73\)90031-6](https://doi.org/10.1016/0034-6667(73)90031-6)
- Van 't Veer, R., y Hooghiemstra, H. (2000). Montane forest evolution during the last 300,000 yr in Colombia: A multivariate approach based on pollen record Funza-1. *Journal of Quaternary Science*, 15(4), 329-346. [https://doi.org/10.1002/1099-1417\(200005\)15:4<329::AID-JQS538>3.0.CO;2-3](https://doi.org/10.1002/1099-1417(200005)15:4<329::AID-JQS538>3.0.CO;2-3)
- Weltje, G. J., y Tjallingii, R. (2008). Calibration of XRF core scanners for quantitative geochemical logging of sediment cores: Theory and application. *Earth and Planetary Science Letters*, 274(3-4), 423-438. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.07.054>
- Wijninga, V. M. (1996). *Paleobotany and palynology of Neogene sediments from the High Plain of Bogotá (Colombia)* [Tesis de doctorado, Universidad de Ámsterdam].

## Apéndices

### Apéndice A.

*Evaluación comparativa del error analítico y porcentaje de mediciones bajo LOD para la selección de elementos.*

Elemento	% error analítico NIST	% error analítico USGS	% error analítico SiO <sub>2</sub>	% de mediciones <LOD	Seleccionado
Mo	23,86	14,71	NA	67,79	No
Zr	3,71	10,09	NA	0,00	Si
Sr	0,72	3,81	NA	0,00	Si
U	74,96	29,38	NA	54,06	No
Rb	1,21	2,91	NA	0,10	Si
Th	0,14	11,53	NA	1,06	Si
Pb	0,04	4,49	NA	3,48	Si
Au	NA	NA	NA	96,32	No
Se	NA	NA	NA	95,65	No
As	1,22	21,59	NA	30,95	No
Hg	NA	NA	NA	95,65	No
Zn	1,40	0,30	NA	32,40	No
W	46,33	32,06	NA	44,87	No
Cu	3,18	3,52	NA	5,51	No

---

Ni	13,90	35,04	NA	42,07	No
Co	18,97	33,14	NA	9,86	No
Fe	0,44	1,96	NA	0,10	Si
Mn	5,01	0,27	NA	6,96	No
Cr	4,12	26,18	NA	3,87	Si
V	1,97	9,38	55,49	0,19	No
Ti	0,12	6,14	12,21	0,68	Si
Sc	27,72	100,00	NA	50,10	No
Ca	0,79	1,05	NA	0,10	Si
K	1,11	8,62	NA	0,10	Si
S	1,50	13,26	NA	38,68	No
Ba	6,69	2,89	6,50	3,77	Si
Cs	21,73	6,37	7,31	23,21	No
Te	35,57	1,97	NA	56,87	No
Sb	5,71	100,00	16,66	75,92	No
Sn	15,29	11,72	NA	77,37	No
Cd	1,22	NA	NA	95,26	No
Ag	4,29	NA	NA	97,20	No
Pd	NA	NA	NA	97,39	No
Nd	3,50	0,42	NA	17,89	No
Pr	37,46	9,46	NA	19,25	No
Ce	NA	5,68	NA	50,29	No
La	1,38	12,89	NA	15,96	No

---

Ba	2,96	0,43	20,53	0,10	Si
Nb	0,22	1,24	NA	1,64	Si
Y	2,68	13,27	NA	0,10	Si
Bi	21,37	100,00	NA	97,49	No
Ta	29,91	0,33	NA	3,00	Si
Hf	NA	NA	NA	97,68	No
Cl	NA	NA	NA	97,58	No
Re	NA	NA	NA	97,49	No
Al	10,06	5,44	NA	0,10	Si
P	NA	NA	NA	31,33	No
Si	6,79	2,75	28,95	0,00	Si
Mg	NA	NA	NA	65,38	No

*Nota.* Los valores de error analítico (%) se calcularon respecto a estándares certificados. Los elementos incluidos cumplen con un error  $< 30\%$  y  $< 5\%$  de valores bajo el límite de detección (LOD). Los valores reportados como NA indican ausencia de registros.

**Apéndice B.**

*Rangos de concentración mínima y máxima de elementos traza en los intervalos analizados.*

Elemento	Intervalo 1		Intervalo 2		Intervalo 3		Intervalo 4	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Rb	27	103,3	3,3	96	55	93	50	90
Cr	40	117,1	10	93	70	123	30	120
Nb	5	22	1	17	10	18	6	20,18
Th	7	34	1	22	15	27	12	31
Ta	40	101,5	13	100	45	88	30	93
Pb	10	35	2	26,18	18	28	10	33,21
Zr	122	710	102	710	138	300	138	473
Y	1,7	29	1,7	22	18	30	13,13	28
Sr	50	292,6	12	165	80	160	56	173,9
Ba	250	1000	64	654	250	654	185	600

*Nota.* Valores obtenidos mediante fluorescencia de rayos X portátil (pXRF). Los valores se presentan en ppm. Los valores corresponden a los rangos mínimo y máximo registrados en cada intervalo estratigráfico.

**Apéndice C.**

*Rangos de concentración de elementos mayores (wt. %) en los intervalos analizados.*

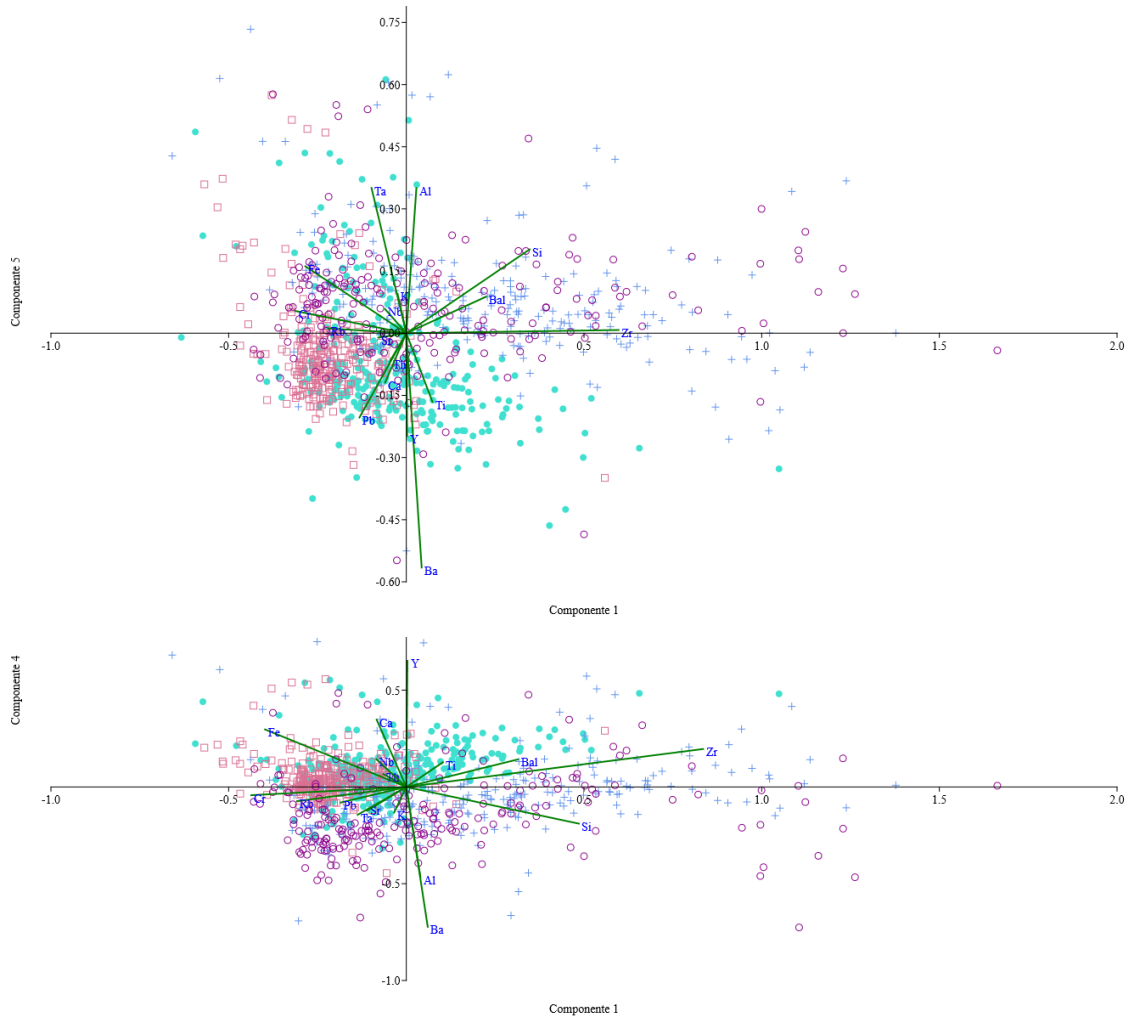
Elemento	Intervalo 1	Intervalo 1	Intervalo 2	Intervalo 2	Intervalo 3	Intervalo 3	Intervalo 4	Intervalo
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	4 Max
K	0,55	1,16	0,12	1,7	0,7	1,2	0,4	1,2
Ti	0,3	0,57	0,07	0,54	0,39	0,63	0,35	0,68
Al	2	5,3	0,3	4,5	2,1	3,8	1,33	4,6
Si	18	26	15,66	28,6	15,53	22	15,53	25
Ca	0,0115	2	0,054	0,7	0,2	0,4	0,1	0,66
Fe	1,5	5,2	0,17	4	3	9,8	1,5	7,5

*Nota.* Valores obtenidos mediante fluorescencia de rayos X portátil (pXRF). Los valores se presentan en porcentaje en peso. Los valores corresponden a los rangos mínimo y máximo registrados en cada intervalo estratigráfico.



**Apéndice E.**

*Biplot de análisis de componentes principales mostrando la distribución de las muestras y la contribución de las variables geoquímicas en los componentes principales 1, 4 y 5.*



*Nota.* Los grupos se representaron mediante diferentes colores y símbolos: Intervalo 1 (círculos color ciruela/plum), intervalo 2 (signo más azul), intervalo 3 (cuadrados rosa intenso/deeppink) e intervalo 4 (puntos aguamarina/aquamarine).

**Apéndice F.**

*Matriz de cargas factoriales de los componentes principales con varianza individual superior al 5%.*

	CP 1	CP 2	CP 3	CP 4	CP 5
Zr	0,6655	-0,0162	-0,0497	0,1562	0,0087
Sr	-0,0881	0,1485	0,4006	-0,0978	-0,0117
Rb	-0,2449	-0,1673	0,0357	-0,0582	0,0130
Th	-0,0515	-0,3042	0,1046	0,0531	-0,0754
Pb	-0,1471	-0,4158	0,3103	-0,0641	-0,2267
Fe	-0,3168	0,4923	-0,4044	0,2368	0,1801
Cr	-0,3478	-0,1528	-0,2000	-0,0340	0,0598
Ti	0,0819	-0,1551	-0,0510	0,1016	-0,1844
Ca	-0,0666	0,4943	0,5776	0,2773	-0,1329
K	-0,0275	-0,0343	-0,0306	-0,1055	0,1061
Ba	0,0480	0,3021	-0,2573	-0,5756	-0,6301
Bal	0,2501	0,0815	0,0187	0,1134	0,0983
Nb	-0,0670	-0,1893	-0,0931	0,1137	0,0651
Y	0,0026	-0,1187	-0,3214	0,5194	-0,2768
Ta	-0,1093	0,0226	0,0626	-0,1146	0,3907
Si	0,3867	0,0234	-0,0433	-0,1510	0,2256
Al	0,0316	-0,0109	-0,0594	-0,3707	0,3906

*Nota.* Matriz de cargas factoriales obtenida mediante el ACP aplicado en PAST. Los valores representan la correlación entre cada elemento y los cinco primeros componentes principales.