



This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.

Manuscrito recibido: Mayo 6, 2024

Revisión recibida: Mayo 17, 2024



Aceptado: Junio 25, 2024

Publicado en línea: Junio 30, 2024

Research article

## Indicadores de la paleo precipitación interanual preservada en los sedimentos del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia

Indicators of interannual paleo-precipitation preserved in the sediments of the Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia

María Teresa Flórez-Molina<sup>1</sup>, Luis Norberto Parra-Sánchez<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia

<sup>2</sup>Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, Colombia

### RESUMEN

En el “Pantano La Bramadora”, los indicadores son elementos que permiten conocer, a escala interanual, algunos eventos de precipitación y/o sequía, la rapidez o lentitud de su ocurrencia, y entender la historia y evolución del pantano ocurridos durante el último milenio. De ellos se resalta el porcentaje estimado de granos gruesos como determinante para evaluar eventos de precipitación, escorrentía y/o torrencialidad; los microcomponentes, las pérdidas por ignición (LOI), la geoquímica, y la tasa de sedimentación promedio de 1 cm/año, que precisa la duración de esos eventos. La ocurrencia de fragmentos carbonizados sugiere la presencia de incendios en periodos extremadamente secos, mientras que la piritita framboidal, asociada con la materia orgánica y al azufre, periodos de máxima humedad. El estado de alteración de los microcomponentes refleja la rigurosidad geoquímica del ambiente y el tamaño de grano está directamente relacionado con eventos climáticos; tamaños finos indican climas secos, los de tamaños medios y gruesos climas lluviosos. En los sedimentos del N14, se observa ciclicidad, reflejada en las arcillas, en los paleosuelos intercalados en ellas y en los eventos de precipitación y sequía. Los paleosuelos de la base, que se desarrollaron bajo condiciones de aridez, indican cambios climáticos extremos mientras que el suelo actual, los paleosuelos y las turbas del techo evidencian un mejoramiento climático. El objetivo del artículo es evidenciar la paleo precipitación interanual del último milenio guardada como un archivo en los sedimentos del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia. Para ello se obtuvo un núcleo de sedimentos de 9.5 m (N14) que guarda información detallada sobre la litología, estratigrafía, sedimentología, geoquímica, mineralogía y granulometría microscópica.

**Palabras clave:** Microcomponentes, granulometría, alteración, tejidos carbonizados, anhidrita, piritita framboidal.

### ABSTRACT

In the “Pantano La Bramadora”, the indicators are elements that allow us to know, on an interannual scale, some precipitation and/or drought events, the speed or slowness of their occurrence, and to understand the history and evolution of the swamp that occurred during the last millennium. Of them, the estimated percentage of coarse grains stands out as a determinant to evaluate precipitation, runoff and/or torrential events; the microcomponents, the losses on ignition (LOI), the geo-chemistry, and the average sedimentation rate of 1 cm/year, which specifies the duration of these events. The idea of charred fragments suggests the presence of fires in extremely dry periods, while the framboidal pyrite, associated with organic matter and sulfur, indicates periods of maximum humidity. The state of alteration of the microcomponents reflects the geochemical rigor of the environment and the grain size is directly related to climatic events, fine sizes indicate dry climates, medium and coarse sizes indicate rainy climates. In the sediments of N14, cyclicality is observed, reflected in the clays, in the paleosols interbedded in them, and in precipitation and drought events. The paleosols at the base developed under arid conditions indicate extreme climatic changes while the current soil, paleosols and peats at the roof show climatic improvement.

The objective of the article was to demonstrate the interannual paleo precipitation of the last millennium stored as an archive in the sediments of the Pantano la Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia. For this, a 9.5 m sediment core (N14) which stores detailed information on lithology, stratigraphy, sedimentology, geochemistry, mineralogy and microscopic granulometry. .

**Keywords:** Microcomponents, organic, inorganic, neoformation, sensors, climate change.

**Citación:** Flórez Molina, M.T., Parra Sánchez, L.N. (2024). Indicadores de la paleo precipitación interanual preservada en los sedimentos del pantano La Bramadora, Sopetrán, Colombia. Boletín Geológico, 51(1). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.51.1.2024.726>

## 1. INTRODUCCIÓN

El pantano se encuentra en la parte baja de la microcuenca fluvial de La Bramadora, la cual se halla desarrollada sobre rocas sedimentarias de la Formación Amaga, Miembro Superior, en el flanco oeste del Sinclinal de Ahuyamal, donde dominan, areniscas y arcillolitas de colores pardo a pardo rojizo, y espesos bancos de conglomerados con cantos redondeados heterométricos y heterogéneos soportados por una matriz areno limosa de color pardo rojizo. Existen zonas con regolitos de alteración de pocos metros de espesor desarrollados a partir de esas rocas sedimentarias (Flórez y Parra, 2023), Figura 1.

Flórez et al. (2023), señalan a La Bramadora como una microcuenca cerrada, que discurre sobre una llanura aluvial de régimen torrencial, solo recibe aportes de sus tributarios, que interceptan la llanura en forma de pequeños abanicos. Tres paleosuelos en la base con condición de aridez (presencia de anhidrita) fueron sepultados por el inicio del pantano hacia el año 1015 AD, a partir de un abanico torrencial que ocasionó el represamiento del agua; sendos estratos de arcilla bandeada y/o laminada, que están intercaladas por paleosuelos de escaso espesor, así lo demuestran. Las arcillas indicativas de climas cálidos húmedos y ambientes de pantano herbal (630 cm de espesor). Las de color gris y gris verdoso revelan la persistencia de la lámina de agua durante todo el año, y las de color chocolate expondrían un nivel freático rasante, agua oscilante.

Este artículo se plantea como objetivo, evidenciar la paleoprecipitación interanual del último milenio guardada como un archivo en los sedimentos del Pantano la Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia. Para lograrlo se tomó como base lo ya publicado como resultado parcial de la investigación sobre los sedimentos del pantano, expresado en tres artículos Flórez, Parra y Calderón (2023), Flórez et al. (2023), Flórez y Parra (2023).

### Localización del área

El Pantano La Bramadora se ubica en las coordenadas 1.141.824,99 este y 1.207.536,7 norte, de la Vereda La Puerta, Municipio de Sopetrán, Antioquia, a 535 msnm, Figura 1. La Zona de Vida del sitio es Bosque Seco Tropical (Bs-T), de acuerdo con Espinal (1992), caracterizándose por contar con promedios de temperatura superiores a 24°C, precipitación total anual entre 800 y 1266 mm y relaciones de evapotranspiración potencial entre 0,8 y 2,0 (Consultoría Colombiana S.A., 2017).

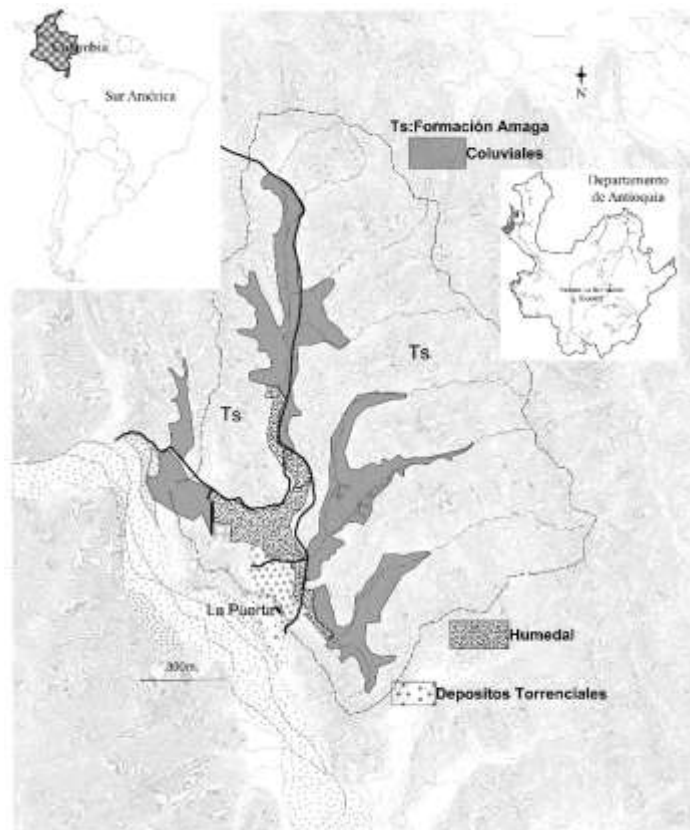


Fig. 1. Localización del Pantano La Bramadora, Vereda La Puerta, Municipio de Sopetrán, Departamento de Antioquia, Colombia. Modificado de Flórez y Parra (2023).

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Eventos de precipitación/sequía registrados en Colombia en el último milenio

Entre 1200-1450, se presenta el “Calentamiento Medieval”, el cual se le atribuye el colapso de la cultura Zenú en Colombia (Plazas et al., 1993).

Las culturas precolombinas tenían un conocimiento detallado de su medio, en particular de los fenómenos del tiempo atmosférico y del que incluía la estacionalidad de las lluvias y la distinción de fenómenos que ocurrían en sus regiones. Las primeras crónicas escritas por los españoles se realizaron en los años 1524, 1542, 1560, en las que se relataban los fuertes eventos de precipitación en el mar Pacífico y en los ríos ubicados hacia el centro de Colombia, lo cual, hacía imposible la navegación o el recorrido a pie. A finales del siglo XVIII y comienzos del XIX se dio un impulso al conocimiento sobre el clima nacional, Pabón (2006).

Un evento de sequía severa se registró entre 1783-1809, en el altiplano cundiboyacense, que ocasionó pérdida total de cosechas en tierras de resguardos. Hubo mortandad de ganados, ca-

restía y escasez en los mercados. La sequía coincidió con una epidemia de viruela que afectó a la región, indicado por Mora (2019), este autor continúa su relato diciendo que luego, sobrevinieron varios eventos de precipitación abundante e inundaciones que dañaron la infraestructura en toda la región. Los precios de los alimentos se elevaron exageradamente, condición que aplicaba tanto a aquellos que se producían en el sitio como a los que llegaban a Santafé por comercio. Lluvias atípicas seguidas por una larga sequía, era la constante.

Con la Expedición Botánica, se avanzó en la descripción de los procesos y fenómenos meteorológicos y del clima en general de una manera sistemática y relativamente organizada. A comienzos del siglo XIX se trajeron a la Nueva Granada los primeros instrumentos meteorológicos y se llevaron a cabo observaciones y mediciones realizadas por Francisco José de Caldas en 1807. Con base en los registros conocidos del siglo XIX y XX fue posible analizar la variabilidad climática de la Sabana de Bogotá y del Valle del Cauca a través de los registros de precipitación.

Entre 1822-1825, se registra una sequía en Colombia documentada en las Memorias de Boussingault (1849) "...las cosechas se perdían, se hacían procesiones y plegarias para conseguir lluvias [...]. En Bogotá se declararon varias oftalmias debidas a la sequedad de la atmósfera y a la reverberación del piso [...]. La piel del rostro se tornó quebradiza, los labios sangran si no se toman las precauciones para evitar los efectos de la insolación. Al prolongarse inclemente la sequía, reses y ovejas morían por falta de agua, pastos y gran número de campesinos que habitan la Sabana de Bogotá, se veían obligados a abandonar sus aldeas, para llevar sus ganados a las tierras bajas cercanas a los grandes ríos...".

Las fases extremas de variabilidad climática y el cambio climático inciden de diversa manera en la sociedad al generar impactos socioeconómicos y ambientales de gran magnitud, una de ellas, es a través de los efectos en la disponibilidad de agua para abastecer la población, en la salud y en la generación de desastres por eventos extremos asociados al exceso o déficit de agua. Periodos con falta de precipitación generan sequías con los correspondientes impactos en la agricultura, en la ganadería y en el abastecimiento para la población. Los periodos con exceso de precipitación propician la ocurrencia de desbordamientos, deslizamientos e inundaciones con consecuencias catastróficas para la población, sus actividades y propician el desarrollo de enfermedades como la malaria y el dengue. El planeta entero es vulnerable en diverso grado a las fases extremas de variabilidad climática asociadas con los fenómenos de El Niño y La Niña y ante un cambio climático, McMichael (2003).

Un primer reporte meteorológico de la precipitación anual en Colombia entre 1866 y 1914, lo presenta Álvarez (1938), este

sería la base instrumental meteorológica de referencia para el país, evidencia la existencia de observaciones y mediciones meteorológicas en distintos lugares del país desde finales del siglo XIX.

Entre 1881 a 1882, Ernst Röthlisberger, en su recorrido por el bajo Magdalena, recuerda el escaso caudal del río que no permitía el avance de su embarcación, al punto que, los marineros calcularon tres pies de profundidad y decidieron detenerse por completo, consideró, en su momento que quedó preso en una "calurosa cárcel [...]. Cuatro días eternamente largos duró aquel martirio, a una temperatura sugeridora de ideas suicidas, ¡entre los 38°C y 39°C a la sombra".

Benavides y Rocha (2012), realizaron un análisis de la precipitación en Colombia con base en la información a escala global y generan un indicador de precipitación nacional que se obtiene de los acumulados mensuales de las series históricas de las estaciones analizadas, teniendo en cuenta aspectos como: los años y las décadas más lluviosas y secas de los últimos 52 años con base en la información de cerca de 2500 estaciones meteorológicas, representativas para todo el país del Ideam. Según los autores, se observan varias tendencias climáticas importantes:

1) Temperatura: El año más caliente fue 1998 con una temperatura media superficial de 22,85°C. Los años más fríos fueron 1996, 1999, 2000, 2008 y 2010. Se observó un incremento progresivo en la temperatura media desde la década de 1961-1970, siendo la década de 2001-2010 la de mayor valor con 22,36°C.

2) Fenómenos de El Niño y La Niña: Estos fenómenos tuvieron un impacto significativo en las temperaturas medias. La década de 1991-2000 se caracterizó por la ocurrencia de varios fenómenos de El Niño, incluido el más fuerte de los últimos 50 años, que ocurrió entre 1997-1998.

3) Precipitación: Se ha observado un incremento progresivo en la precipitación nacional desde la década de 1961-1970 hasta la de 2001-2010, el año más lluvioso en los últimos 42 años fue 2010, que presentó el valor más alto del indicador con 178,5 mm. igualmente en 2011, 1999, 2008 y 1984. La década entre 1991-2000, estuvo marcada por varios fenómenos de El Niño, mostró una disminución en la precipitación en comparación con la década anterior (1981-1990).

4) Meses menos lluviosos: Desde 1970, los tres meses menos lluviosos en el país han sido enero de 1977 (38,8 mm), febrero de 2007 (40,5 mm), y enero de 2010 (37,2 mm),

Estos datos resaltan la influencia de fenómenos climáticos como El Niño y La Niña en las tendencias de temperatura y precipitación, y subrayan la importancia de seguir monitoreando y estudiando estos patrones para entender mejor el clima cambiante.

Galvis (2022), estudia del fenómeno de la sequía en Colombia realizado a partir de la revisión de los efectos e impactos reportados en documentos históricos de eventos ocurridos en el pasado, principalmente en los siglos XIX y XX. El autor indica que son escasos los eventos que se identificaron, pero que ellos evidencian sequías severas con marcados impactos económicos, sociales y políticos como la de 1877-1878, 1925-1930, y la de los años 40 del siglo XX.

Otros datos de Precipitación Anual en algunos sitios de Colombia entre 1866 y 2022, fueron (ver fuente):

- 1) Periodo entre 1866 y 1914, realizada por Álvarez (1938).
- 2) Periodo entre 1944 y 2014, realizada por el observatorio Epacartagena de Indias (2015), en: <https://observatorio.epacartagena.gov.co/gestion-ambiental/calidad-ambiental/sistema-urbano/precipitacion/>
- 3) Periodo entre 1998 y 2022, realizada por el observatorio Ambientebogotá (2023), en: <https://oab.ambientebogota.gov.co/precipitacion-anual/>
- 4) Para el 2022, se encontraron datos de precipitación anual, entre 1972 y 2022, reportados en la página en línea Plataforma Nacional de Datos abiertos para Colombia (PNDAC). (2022), en: [https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Precipitaciones-Totales-Mensuales/mb4n-6m2g/about\\_data](https://www.datos.gov.co/Ambiente-y-Desarrollo-Sostenible/Precipitaciones-Totales-Mensuales/mb4n-6m2g/about_data), para Colombia, en cuanto a eventos de sequía (Niño), lluvias (Niña) y fenómenos extremos en los siguientes años:
  - a) Niño Débil: 1976, 1977, 1979, 1994, 2004, 2006.
  - b) Niño Moderado: 1986, 1987, 1991, 2009, 2016.
  - c) Niño Fuerte: 1972.
  - d) Niño Muy fuerte 1982, 1997, 2015.
  - e) Niña Débil: 1974, 1983, 1984, 1995, 2000, 2011.
  - f) Niña Moderada: 1998, 2007, 2010.
  - g) Niña Fuerte: 1973, 1975, 1988.
  - h) Sequías y Lluvias Normales: 1978, 1980, 1981, 1985, 1989, 1990, 1993, 1996, 1999, 2001, 2003, 2005, 2008, 2012, 2013.

## 2.2 Indicadores paleo climáticos

La reconstrucción de ambientes del pasado es objeto de la paleoecología, dichas reconstrucciones se originan a partir del uso de indicadores indirectos, que permiten definir los cambios climáticos y la rapidez con la que han ocurrido (Jones et al., 2009). Un indicador indirecto es cualquier material (físico, químico o biológico) preservado en el registro geológico que puede ser analizado y correlacionado con parámetros bióticos o no bióticos como los factores climáticos, ambientales y ecológicos (Lucas, 2007; Ruddimann, 2008; Jones et al., 2009).

Según Castañeda (2021), en las últimas décadas se ha comenzado a utilizar la combinación de varios indicadores para las

reconstrucciones paleo ambientales de una sola región. Una de las fuentes de información para las reconstrucciones paleo ambientales son los sedimentos lacustres, ya que el material depositado en el fondo de estas pequeñas cuencas es continuo y puede ser extraído sistemáticamente (Maher y Thompson (2001), citado por Castañeda (2021)).

Flórez et al. (2023), señalan que los sensores paleoclimáticos - lito, pedo, químico estratigráficos, así como las capas de criptotefras, de fragmentos de matriz y la señal del LOI (Loss on Ignition), observados en los sedimentos del Pantano La Bramadora, dan cuenta de los diversos eventos paleoclimáticos ocurridos en el pantano, al menos durante el último milenio. Indican que todos los sensores paleoclimáticos fueron necesarios para reconstruir y entender la historia del pantano, pero el sensor químico estratigráfico y el LOI, tienen tal importancia, que podrían ser los que mejor expresaran el fenómeno. Estos autores señalan que tales sensores podrían ser utilizados como indicadores.

## 3. MÉTODO

En el Pantano La Bramadora fueron obtenidos con Sonda Rusa dos núcleos de sedimentos de 10 y 9.5 m, nombrados como N13 y N14, el primero se guardó bajo -2°C, como testigo y el segundo se describió la litología, sedimentología, estratigrafía y se seccionó al centímetro. Cada rodaja se guardó en bolsas sello pack previamente marcadas para los análisis posteriores. Se tomaron fotografías de la perforación, de las secciones de 50 cm de cada núcleo (19 secciones por núcleo para un total de 38 secciones). Para la obtención de los datos geoquímicos, cada rodaja (950 en total), fue cuarteada. Una submuestra fue lavada en agua desionizada Tipo I, para separar la fracción más gruesa que 106 micrómetros y la fracción restante (líquido más sólido) fue leído en el Espectrómetro XRF - Epsilon1. El archivo arrojado de cada lectura fue llevado a una base de datos en Excel, previamente construida para tal fin. Se tomaron fotografías de todo el procedimiento.

Para el análisis de microcomponentes microscópicos cada centímetro fue dispersado en una mezcla de isopropanol-amoniaco, posteriormente se lavaron, y se eliminaron los materiales mayores de 106 µm. El residuo fino se preservó en una solución de etanol y luego se montó una alícuota de tres microlitros en una resina, con Bálsamo de Canadá. El conteo de fragmentos tanto orgánicos como minerales, se llevó hasta alcanzar 300 granos en varias transversales al azar, siguiendo el método indicado por Lorente (1986). Se tomaron fotografías de todo el procedimiento.

Se construyó la matriz de datos obteniéndose una matriz de microcomponentes de 24 grupos (columnas) por 950 secciones

centimétricas (filas). Se leyeron y fotografiaron en un microscopio petrográfico Olympus y en el Microscopio de barrido SEM.

El porcentaje estimado de los granos gruesos en todo el N14 y su complemento con el porcentaje estimado de los granos finos se realizó a partir de un conteo típico binomial, para el cual en la placa de microcomponentes previamente fijada en Bálsamo de Canadá se examinaron en el microscopio óptico, con el ocular de 40x, cuatro campos al azar, el tamaño estimado se llevó a porcentajes, lo cual permitió diferenciar los tamaños más gruesos mayores de 12  $\mu\text{m}$  aducirlos a eventos de alta torrencialidad y los de menos de 12  $\mu\text{m}$  a eventos de sequía o de baja precipitación.

#### 4. RESULTADOS

Para lograr el objetivo planteado, se determinaron los siguientes indicadores que permitieron definir la paleo precipitación a escala subanual ocurrida durante el último milenio (2022-1015 AC) en los sedimentos del pantano. Estos son: 1) Paleo precipitación interanual para el segmento entre 2022 y 1866 AC, 2) Paleo precipitación interanual registrada en el N14 entre 2022 y 1015 AC; 3) Porcentaje estimado de granos gruesos; 4) Microcomponentes: inorgánicos, orgánicos y silicofósiles; 5) Minerales secundarios y presencia de partículas carbonizadas; 6) Estado de alteración de los microcomponentes; 7) Curva del LOI (Loss on Ignition), y 8) Geoquímica por XRF.

##### 4.1 Paleo precipitación interanual para el segmento entre 2022 y 1866 AC.

Con base en la información de los datos de precipitación interanual en varios sitios de Colombia obtenida de Álvarez (1938), del observatorio Epacartagena de Indias (2015), y del observatorio Ambiental de Bogota (2023), se construyó la gráfica de la Figura 2 (Anexo 1), quedando un vacío de información para el período entre 1915 y 1943 (no se pudieron conseguir dichos datos).

Los primeros registros instrumentados sobre meteorología fueron los de Álvarez (1983), reportes anteriores fueron escritos como crónicas del clima, realizadas por diversos personajes propios y ajenos que habitaban o transitaban por diferentes lugares del territorio colombiano y que narraron o escribieron relatos contados por otros sobre acontecimientos tales como inundaciones, sequias o incendios en los que se perdieron vidas humanas, animales, cultivos o infraestructura, sus narrativas no se pueden dimensionar como ahora lo permiten hacer los instrumentos; sin embargo, la percepción del acontecimiento vivido si da una idea de la intensidad del hecho ya sea precipitación/sequia; parte de este reporte se relacionó en párrafos anteriores, en el estado del arte).

Los datos reportados y medidos por instrumentos meteorológicos fueron relacionados con los sedimentos del N14, tomando como referencia la ya calculada tasa de sedimentación promedia de 1 cm/año y dado que los datos de precipitación reportados son anuales, se hizo el cotejo, el cual solo permitió confrontarlo para el rango de profundidad entre HB1 y HB157 cm, entre 2022 y 1866 AC. Se resalta un vacío de información de 28 años entre 1943 y 1915 AC. Con estos datos se construyó una gráfica de precipitación y se relacionó con otras tres gráficas: 1) Estimación del tamaño de grano grueso; 2) Microcomponentes (orgánicos, silicofósiles), grumos, carbón y el LOI, y 3) Datos geoquímicos de los iones presentes en cada cm del N14.

Con estas cuatro graficas se completó la Figura 2, en ella se resaltan cuatro zonas marcadas en números romanos cada una de las cuales evidencia información relevante de la paleo precipitación y/sequía y de la respuesta de estos indicadores a esos eventos paleoclimáticos. En el orden de construcción de la figura se realizará el análisis, integrando las observaciones más relevantes de cada zona.

En la gráfica de la paleo precipitación se resaltan dos grupos de datos:

El primer grupo comprende un registro de 78 años, entre 2022 y 1944 AC. Los valores de precipitación son notablemente variados, con cierta ciclicidad, fluctúan entre 220 y 2731 mm, con una media de 1336 mm. En el registro se pueden resaltar dos eventos extremos de precipitación de 2.731 mm en el año 2000 y de 1700 mm en el año 1970 AC; igualmente, ocho eventos no extremos, pero sí fuertes, que superan los 1000 mm anuales. La precipitación más baja de 220 mm se registró en el año 1990 AC, que coincidió con el fin del Calentamiento Moderno registrado entre 1963 y 1990 AC. La precipitación más alta registrada en el año 2000 AC, coincidió con un Evento Niña muy fuerte. Los datos no son regulares, muestran una cierta ciclicidad marcada por periodos de muy baja precipitación como en 1946, 1953, 1983, y entre 1988 y 1990, años en los cuales el mayor valor de precipitación no superó los 350 mm. A partir de 1990 hasta el 2000, se registra un incremento de la precipitación con un máximo en el 2000, a partir de este año y hasta el 2022, el comportamiento es más regular y muy cercano a los 500 mm, sin registrarse eventos extremos como el del 2000.

El segundo grupo, abarca un registro de 48 años, entre 1914 y 1866 AC. Los valores de precipitación son cíclicos y muy regulares, fluctúan entre 649,9 y 1633.7 mm, siendo la precipitación media de 819,3 mm, casi la mitad de la que se registró en el primer grupo, pero no se puede perder de vista el hecho de que en este grupo el tiempo de registro es casi la mitad del primero, lo cual estaría indicando que durante este periodo la precipitación fue casi el doble de la registrada en el primer grupo. En ella se

observó un evento extremo de precipitación de 1633.7 mm y por lo menos cuatro eventos fuertes de precipitación que superaron los 1300 mm. En este grupo se reconocieron eventos Niña en 1914, 1909, 1906, 1903 AC, y entre 1880 y 1866 AC, coincide con la fase fría y seca que se presentó en todo el globo. Igualmente, también se presentaron varios eventos de sequía o Niño, especialmente en los años 1908, 1900, 1881 AC, y entre 1879 y 1875 AC, periodo que estuvo marcado por sequía, plagas y hambruna, este evento se intensificó en 1860 AC.

Entre estos dos grupos existe un vacío de datos y no es porque no existan como tal, sino que no se tuvo acceso a las fuentes probables, este es un periodo de 28 años, entre 1943 y 1915 AC.

La segunda gráfica hace referencia al porcentaje estimado de granos gruesos, indicativos de escorrentía en la cuenca o eventos de precipitación moderada a extrema (eventos Niña). Entre HB1 y HB157 cm, se observan tres comportamientos de la curva de porcentaje estimado de granos gruesos, así: el primero definido entre HB1 y HB52, donde predomina la presencia de granos finos sobre los gruesos, lo cual podría indicar predominio de eventos Niño, mediados por pequeñas precipitaciones; entre HB53 y HB130 cm, se observa un ligero cambio en el tamaño,

siendo más notorio la presencia de granos gruesos en forma alterada sin ser predominantes, lo cual podría estar indicando para este rango lluvias más frecuentes, en algunos casos eventos moderados y muy pocos eventos extremos. El tercer tramo, entre HB131 y HB157 cm, el aumento en el tamaño es más notorio el cual se hace mucho más fuerte al final del tramo, lo que estaría mostrando para este rango la presencia de más lluvias y eventos extremos de precipitación hacia la base donde es posible que coincida con eventos Niña, uno entre 1882-1873 AC, con valores de hasta 81% y otro entre 1882-1866 AC, con valores de hasta 61% de granos gruesos. Estos dos eventos se reflejan muy bien en la curva de precipitación de Álvarez (1938).

Lo más importante de esta gráfica es que aporta elementos que permiten completar la gráfica anterior en la que falta un registro de precipitación de 28 años entre HB79 y HB107 cm, el comportamiento de la curva, implicaría mejoramiento climático, con lluvias presentes en todo este periodo y con algunos eventos de precipitación ligeramente más fuertes como el que se resalta en HB96 (1927 AC).

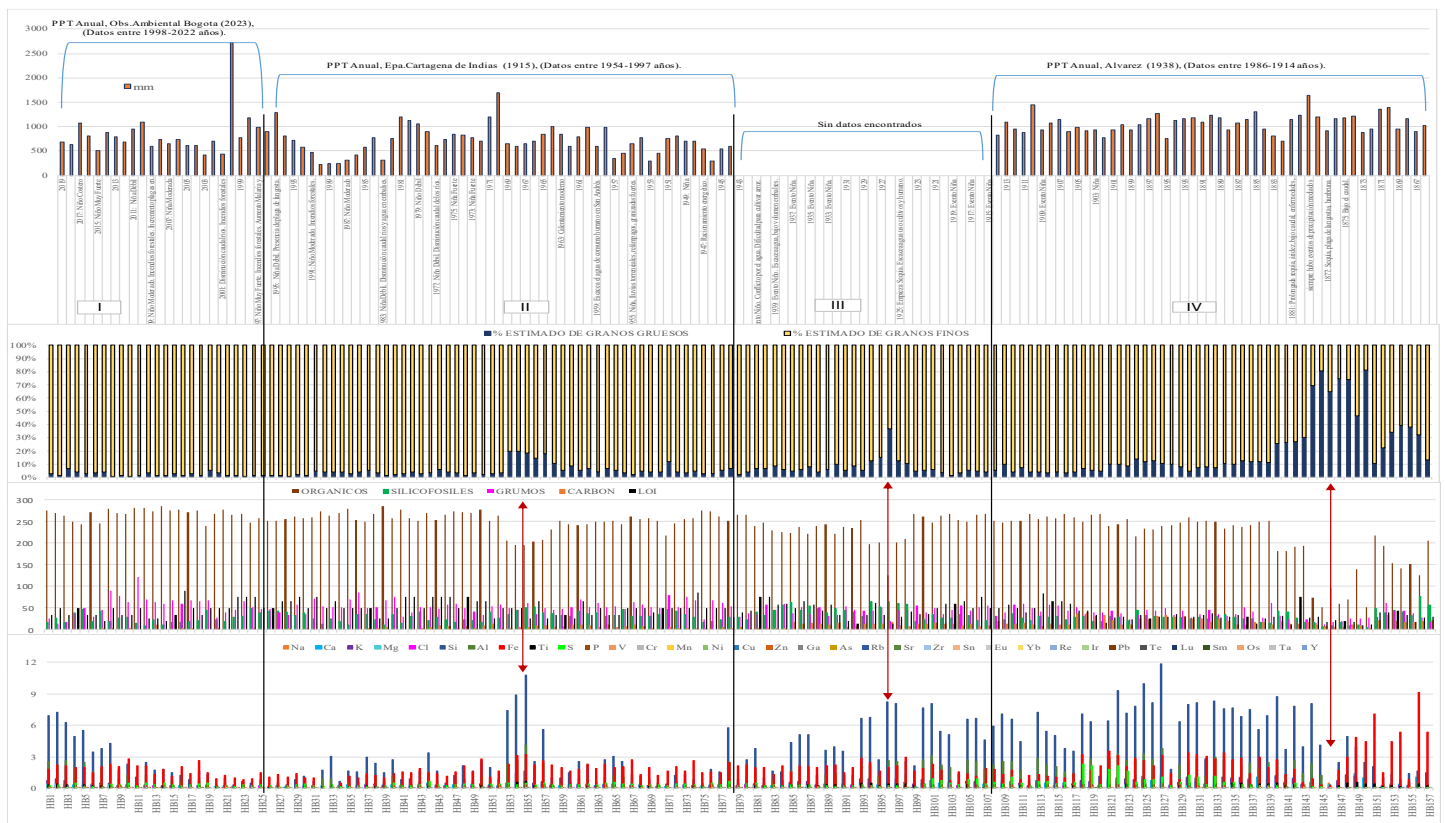


Fig. 2. Precipitación interanual en varios sitios de Colombia entre 1866 y 2022, obtenida por instrumentación meteorológica aportada por Álvarez (1938), el observatorio Epacartagena de Indias (2015), y el observatorio Ambientebogota (2023). Se resalta el vacío de información para el periodo entre 1915 y 1943.

En la tercera gráfica, se expresan las sumatorias de los conteos de microcomponentes orgánicos, silicofósiles, grumos, carbón y el LOI, no se colocó en ella la sumatoria de los minerales porque estos están expresados en la gráfica del porcentaje de granos gruesos y finos que son básicamente minerales primarios y secundarios, tipo arcilla, óxidos de Fe y Mn, esencialmente. En esta gráfica es notoria la presencia de orgánicos como los materiales que dominan la gráfica, sin embargo, en ciertas zonas sus valores bajan, mientras que en la gráfica en la que se relaciona el tamaño del grano aumentan en dichas zonas la presencia de granos gruesos (este aspecto está indicado con la flecha bidireccional roja para las gráficas anterior y posterior a esta). En estas zonas también disminuyen el porcentaje del LOI, los silicofósiles, el carbón y los grumos (pirita framboidal).

En la cuarta gráfica, se expresan los iones producto del lavado de los materiales orgánicos y/o inorgánicos presentes en la cuenca La Bramadora y que llegan al pantano por escorrentía, que fueron parte de los saprolitos de las rocas terciarias y de los procesos de alteración que sufrieron estas, así como de los materiales que estaban o están in situ, los que son aportados por la vegetación, los animales, el agua lluvia, y los vientos, todos ellos acumulados en el pantano. Estos iones representan el proceso de precipitación y la capacidad de la cuenca para transportar y llevar al pantano todos estos iones, lo cual se entiende aquí como la capacidad de escorrentía de la cuenca como respuesta a la precipitación normal o extrema y/o a eventos torrenciales.

En la gráfica se puede visualizar la capacidad de unos y otros iones para moverse dentro de la cuenca y el potencial de algunos de ellos como el Na, Ca, K, Mg, Cl, Si, Al, Fe, Ti, y S, principalmente, para definir la geoquímica de cada centímetro del N14 y caracterizar geoquímicamente los procesos dados en los sedimentos del pantano en el último milenio. Este conocimiento permitió separar el tramo entre 2022 y 1866 AC (primeros 157 cm del pantano) en cuatro zonas, nombradas con números romanos como I, II, III y IV, las cuales muestran marcadas diferencias iónicas que concuerdan con eventos ya descritos a partir de las gráficas que la preceden.

La primera zona, muestra hacia el techo un enriquecimiento en iones, en especial el Si, pero a medida que se profundiza ellos disminuyen sustancialmente siendo el más abundante el hierro (Fe). En la zona II, dominan Si y Fe sobre los demás iones también presentes, pero entre 53 y 57 cm, el Si aumenta notablemente coincidiendo, como lo indica la doble flecha roja, con la disminución del componente orgánico y el incremento en el tamaño del grano, lo cual, indica que esos granos gruesos corresponden a minerales de silicatos arrastrados por eventos de escorrentía extrema. La zona III, hace parte del rango donde no hay datos de

precipitación, sin embargo, en ella se reflejan aumentos considerables de Si y Fe y cierta ciclicidad como lo está muestra la gráfica del tamaño de grano, la flecha está resaltando el evento más alto de escorrentía en donde se aumenta el tamaño del grano y disminuye los valores del LOI. El comportamiento observado en la zona IV, es similar al descrito para la zona III, pero aquí se intensifica hasta el rango indicado por la doble flecha roja, antes de la flecha roja dominan iones de Si, después de la flecha lo hacen los de Fe. En 144 cm de profundidad, decaen los iones, los orgánicos, silicofósiles, grumos carbón y hasta el LOI, lo cual podría estar indicando un intenso lavado por precipitación extrema que coincide con la curva de precipitación realizada con los datos de Álvarez (1983) y con la curva del porcentaje estimado de granos gruesos.

#### **4.2 Paleo precipitación interanual registrada en el N14 entre 2022 y 1015 AC**

Para determinar los eventos de precipitación/sequía interanual ocurridos en el último milenio y preservados en los sedimentos del Pantano La Bramadora se utilizaron cinco indicadores: 1) el porcentaje estimado del tamaño de grano grande; 2) la sumatoria individual de los microcomponentes orgánicos, silicofósiles, grumos, carbón y el LOI; 3) la geoquímica iónica de cada centímetro de sedimento; 4) la lito estratigrafía, y 5) el estado de alteración de los minerales primarios y secundarios que dieran indicios de procesos conexos con estos eventos climáticos. Los cuatro primeros, se presentan en la Figura 3 (Anexo 2). El quinto indicador, se describe por aparte, ya que esta es una apreciación del estado de alteración basado en la experticia de los autores del artículo.

En la Figura 3, se resaltan seis zonas marcadas en números romanos (I al VI), cada una de las cuales entrega información relevante y relacionada entre sí, de la paleo precipitación y/sequía, que se complementa con lo que aporta, al respecto, cada uno de los indicadores sobre dichos eventos paleo climáticos. Las zonas definidas son: I) entre 1-157 cm (2022 a 1866 AC), II) entre 157-265 cm (1866 a 1758 AC), III) entre 265-530 cm (1758 a 1493 AC), IV) entre 530-847 cm (1493 a 1176 AC), V) entre 847-925 cm (1176 a 1040 AC), VI) entre 925-950 cm (1040 a 1015 AC). Esta figura, carece de datos meteorológicos instrumentales, no hay registro de ellos para Colombia, se basa en la interpretación que propios y ajenos dieron a un evento de lluvia o sequía que les tocó vivir o se los contaron, algunos de estos eventos quedaron preservados en los sedimentos del pantano que se constituyen como un de excelente archivo paleo climáticos.

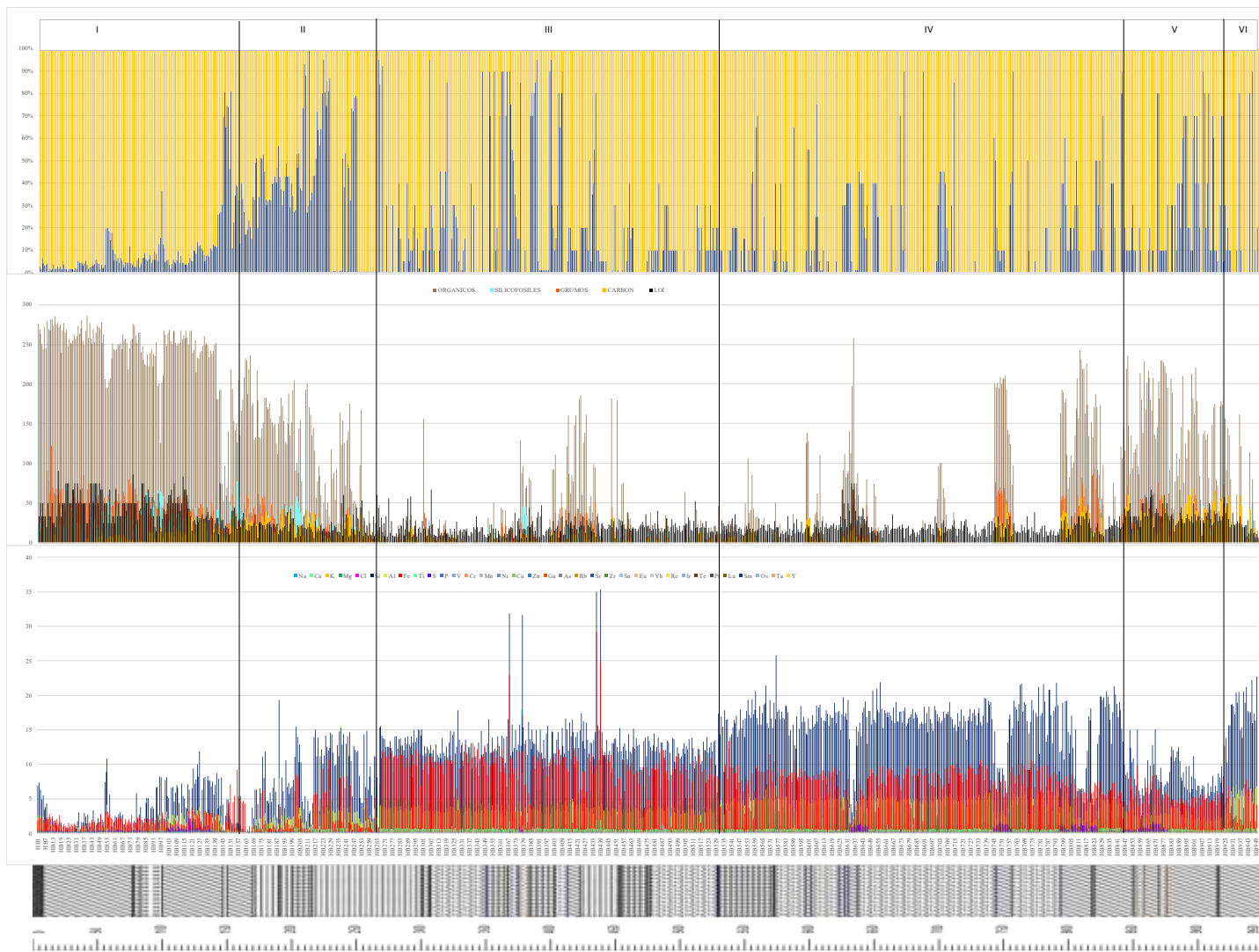


Fig. 3. Porcentaje estimado para granos gruesos (línea azul) y finos (línea roja), en los sedimentos del N14, así mismo, las gráficas subsiguientes expresan los microcomponentes orgánicos, silicofósiles, grumos, carbón y el LOI, luego la composición iónica de cada centímetro de sedimento, y la cuarta gráfica es la columna lito estratigráfica para el Pantano La Bramadora.

En la Figura 3, la primera gráfica muestra el comportamiento del porcentaje estimado de granos gruesos (indicativos de escorrenría, torrencialidad o precipitación extrema), como no hay datos instrumentales sino para el periodo 2022-1866 AC (primeros 157 cm), podría asumirse como la curva de paleo precipitación para el N14 para el periodo 1866-1015 AC. En tal caso se retoma el comportamiento ya descrito para los primeros 157 cm, instrumentados y, a partir de esta profundidad, se cotejan los porcentajes estimados de granos gruesos como eventos de precipitación y/o sequía. Una interpretación de la curva se presenta a continuación.

Entre 1 y 157 cm, (2022 y 1866 AC), se registra un mejoramiento climático; eventos de precipitación y de sequía se alternan, así como eventos extremos, marcan una ciclicidad climática

propia del trópico, caracterizada por lluvias que ocasionan inundaciones o sequías que traen plagas y hambruna, así como incendios.

Entre 157 y 228 cm (1866 a 1794 AC), la precipitación fue más constante y con mayor número de eventos extremos.

Entre 228 y 950 cm, (1794 a 1015 AC), la curva mantiene una ciclicidad muy definida entre granos gruesos y finos, los gruesos marcan periodos de precipitación y los finos de sequía, algunos de ellos abarcan uno, dos o más centímetros, los cuales hacen mérito al tiempo en años de duración, algunos, extremos. El paleo clima fue muy variable y con varios eventos extremos de precipitación/sequia, algunos eventos registrados a nivel global pudieron ser los responsables de dicho comportamiento, tales como el Calentamiento Medioeval (1200-1450 AC); la Pequeña



edad del Hielo (LIA) (1500-1720 AC) y la Constante Solar (1550-1611 AC), entre otros.

La segunda gráfica de la Figura 3, expresa las sumatorias individuales de los conteos de microcomponentes orgánicos, silicofósiles, grumos, carbón y el LOI. En ella dominan los orgánicos, tanto en el techo, en la base y en los sitios donde hay presencia de paleosuelos o turbas en el N14. Este aspecto está corroborado por la curva del LOI, que sigue este patrón, pero en proporción mucho menor. Los grumos son muy abundantes y están asociados a la presencia de materia orgánica y de azufre, ellos son indicativos de ambientes oxidoreductivos con poco oxígeno y alta humedad. Los silicofósiles están dispersos, por lo general, asociados a los orgánicos. Partículas de carbón indican incendios que pudieron corresponder a sequías o a las actividades silvopastoriles, ellos están estratégicamente ubicados en profundidades donde se evidencia tal sequía, como en la base donde existen tres paleosuelos áridos.

La tercera gráfica, muestra el comportamiento de los iones contenidos en los sedimentos del pantano, y que son producidos por meteorización o eventos de precipitación, escorrentía, torrencialidad y depositación, desde la cuenca hasta el pantano. En la gráfica iones como el Na, Ca, K, Mg; Cl, Si, Al, Fe, Ti, y S, principalmente, permiten definir las características geoquímicas de los sedimentos del N14 y puntualizan eventos relacionados con el paleo clima del último milenio. Este comportamiento geoquímico define seis zonas a las que se les asignó un número romano entre (I, II, III, IV, V, VI) para su descripción.

La Zona I, muestra hacia el techo un enriquecimiento en iones, en especial el Si, pero a medida que se profundiza ellos disminuyen sustancialmente siendo el más abundante el Fe, luego, hacia la base de la zona vuelve a aumentar el Si, el cual es relevado por el Fe, estos dos iones dominan toda la geoquímica de los 157 cm de suelos, paleosuelo y turba creando un ambiente óxido reductor. Este comportamiento se mantiene en la Zona II, pero aquí los valores de la concentración iónica son mucho más altos casi el doble de la concentración de la zona I para el Fe y el Si, siendo en este caso, mayor la del Si.

En la Zona III, el comportamiento iónico es muy regular, marcado con preferencia por el Si y el Fe, ligeramente más alto el Si, en toda la zona la ciclicidad es muy regular, con cuatro outlayer en donde resaltan los valores de Fe y Si, principalmente, estos se presentan en 368, 378, 436 y 439 cm de profundidad.

En la zona IV, se mantiene esta ciclicidad aquí baja un poco la concentración del Fe, mientras aumenta casi el doble de la del Si; sin embargo, esta ciclicidad se rompe ya que la concentración iónica decae bruscamente en 663, 747, 755, 817 y 824 cm, lo cual, define cuatro periodos cíclicos en los que aumenta la concentración del S. La Zona V, también es ligeramente cíclica, el Fe es

más regular que el Si, pero las concentraciones de todos los iones son más bajas que en las observadas en la Zona IV, se resalta el aumento de la concentración de S que coincide con un aumento de la concentración del Fe. En la Zona VI, aumenta cuasi exponencialmente el Si, mientras decae la del Fe.

Una mirada en conjunto de las tres gráficas, al igual que la lito estratigrafía, leyéndose de base a techo, es la siguiente:

En la base se observa el predominio de granos finos, los cuales están relacionados con eventos de sequía, la baja cantidad de material orgánico, alta cantidad de grumos, bajo LOI, los grumos y las partículas de carbón, así como la alta presencia de iones de Si, Al, Fe y Ca, corroboran la presencia de suelos desarrollados bajo condiciones áridas. Un mejoramiento de las condiciones climáticas, marcadas por la alternancia de periodos largos de precipitación y cortos de sequía, permiten el desarrollo de dos paleosuelos que suprayacen el Aridisol, aumentan los orgánicos, el LOI y la presencia de grumos (pirita framboidal), al igual, que el carbón.

Suprayaciendo esta zona, continúa un periodo largo que mantiene las condiciones climáticas de precipitación/sequía descritas para la Zona V, pero en este caso los eventos de precipitación son más cortos y los de sequía más largos, los componentes orgánicos se presentan donde hay paleosuelos y a ellos se asocia la presencia de grumos y carbón, el LOI es notablemente más bajo que en la zona antes descrita, pero está presente en todo el rango. Las concentraciones iónicas son las más altas y regulares de todo el núcleo, donde decae, hay coincidencia con la presencia de un paleosuelo y aumenta notoriamente los grumos y el carbón.

Continuando hacia el techo del N14, la precipitación/sequía mantienen el comportamiento cíclico, pero aumentan los eventos de precipitación siendo más frecuentes los de corta duración pero con valores extremos. Eventos largos de precipitación están relacionados con la presencia de paleosuelos, grumos.

Los iones tienen un comportamiento similar al descrito antes, pero con valores más bajos, en ellos se observa un comportamiento cíclico muy regular definido por el Fe y el Si. Le sigue a esta zona, un periodo de máxima pluviosidad que continúa hasta el comienzo de la Zona 1, este comportamiento coincide con la presencia de turbas, paleosuelos de escaso espesor, grumos, carbón, fitolitos y decae significativamente la concentración iónica, seguramente, la intensa lluvia registrada, la escorrentía y la torrencialidad, han sacado del sistema una enorme cantidad de iones por lavado fluvial. Este comportamiento se mantiene hasta el techo del núcleo y no solo decaen los iones, sino que las condiciones climáticas son más favorables para el desarrollo de varios paleosuelos, del suelo actual y de la formación de grumos o pirita framboidal, así como el desarrollo de un pantano arbóreo como el que se puede observar en el presente.

### 4.3 Microcomponentes

4.3.1 De origen inorgánico. **Minerales Primarios.** A este grupo pertenece esencialmente los minerales de origen primario tanto primarios como secundarios. En algunos casos, están altamente meteorizados, entre ellos se encuentra el cuarzo hialino, algunos con bordes ligeramente curvos, sin adherencias. El feldespatos es alcalino, tipo sanidina u ortoclasa. La plagioclasa es esencialmente oligoclasa. Existen dos tipos de piroxeno, ortopiroxenos como hiperstena, que tiene forma euhedral, pleocroísmo blanco y gris y relieve fuerte, y la enstatita, verdosa, se presenta en prismas largos y anchos subhedrales; y el clinopiroxeno, una augita de color verde esmeralda, subhedral, en forma de cristales cortos y anchos, bordes irregulares, algunos en huso, en las superficies pueden o no tener adherencias negras opacas subredondeados. Los anfíboles pueden ser hornblenda subhedral de color verde oliva y/o parda rojiza (oxihornblenda), en cristales más anchos que largos; algunas presentan bordes en forma de huso. La biotita es parda, subhedral, pseudoisotrópica. Los fragmentos de matriz son isotrópicos con abundantes inclusiones de rutilo pseudo orientadas, otros incoloros con inclusiones fluidas y minerales. El vidrio volcánico es incoloro, es coriáceos o no, con superficies lisas o lamelares. El zircón aparece como pequeños cristales euhedrales individuales, al igual que la esfena, espinela y la epidota, esta última de color verde, subhedral o formando agregados aciculares. La Figura 4, muestra algunos rasgos de su apariencia, tanto al microscopio óptico como al de barrido SEM.

**Minerales secundarios.** Proviene tanto de alteración de minerales primarios como a partir de la interacción de estos con materiales orgánicos en descomposición, mediados por el agua y por las condiciones anaerobias que se presentan en el pantano, algunos de ellos son la pirita framboidal, óxidos de hierro, placas negras opacas, anhidrita, agregados organominerales y orgánicos, y coágulos (Figura 5).

La pirita framboidal, es un tipo de mineral que se presenta en formas redondeadas que se apiñan entre sí, asemejándose a una frambuesa, Figura 5. En el caso de los sedimentos del N14, se pueden observar agregados cúbicos de este mineral al usar un microscopio de barrido SEM. Los valores más altos se presentan tanto en el techo (entre HB1 y HB250) como en la base (entre HB799 y HB935), el valor más alto de este microcomponente se encuentra en HB11, con 122 granos de 300, equivalente al 40%, valores más bajos se encuentran en la parte media del núcleo y en algunos puntos no se presenta. Su origen está relacionado a la presencia de sulfatos ácidos en ambientes óxido reductores mediados por lámina de agua permanente o no.

Óxidos de hierro (óxidos ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) y oxihidróxidos ( $\text{FeOOH}$ )), posiblemente hematitas, por lo general se presentan

recubriendo superficies de minerales como masas de color naranja fuerte, que en algunos casos llegan a invadir completamente el grano. Es posible que estas provengan como tal, de los sedimentos del Terciario superior, ya que también fueron observadas en los saprolitos que están en la cuenca la Bramadora y/o que sean un producto de la alteración de minerales ferrosos como piroxenos y anfíboles, esencialmente. En los suelos y turbas del pantano se encuentran adheridos a cristales de clorita, feldespatos, plagioclasas y cuarzos, una imagen de ellos puede ser observada en la Figura 4.

**Placas negras opacas.** Muchos minerales están invadidos por un material negro que con luz reflejada es opaco y de color negro, estos se han identificado como amorfos de Ilmeno-magnetita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), son tan pequeños (aproximadamente entre 10 y 10 nm) que no logran ser reconocidos fácilmente, a la luz reflejada no presentan brillo. Por lo general, se encuentran en las superficies de minerales primarios y en algunos secundarios como en las cloritas o en las limolitas. Estas se encuentran muy relacionadas con los tejidos carbonizados (Figura 5).

Anhidrita se presenta a ciertas profundidades, especialmente, en: HB796-HB800, HB806-HB818, HB821-HB827, HB829, HB843-883, HB899-HB904, HB907-HB910, HB915-HB916, HB921-HB927 y HB945, coincidiendo tales profundidades con el desarrollado de dos paleosuelos clasificados como Aridisoles con un epipedón gypico, en donde la anhidrita está asociada íntimamente con la presencia de pirita framboidal y la presencia de hematita, además de carbonatos y cloruros (Figura 5).

Agregados organominerales y orgánicos son partículas amorfas, que pueden ser totalmente orgánicas o estar mezcladas con partículas minerales, principalmente, feldespatos, plagioclasas, piroxenos, anfíboles, entre otros, no tienen una organización interna y tienen apariencia como de estar embebidos en un tejido transparente ligeramente gelatinoso. Pueden provenir de tejidos vegetales o animales en los suelos reconocibles se conocen como complejos organominerales (Figura 5).

Los coágulos se presentan en HB412 (32 de 300 granos), sin embargo, en todo el N14, su distribución conforma tres grupos, el primero y en promedio más alto (8 de 300 granos) en la parte superior del núcleo entre HB31 y HB231, en este rango los valores son muy continuos; el segundo, en la parte media entre HB462 y HB645, valores más bajos que el primer grupo (5 de 300 granos, en promedio), aquí los valores son distanciados entre sí, y el tercer grupo se presenta en la parte inferior del núcleo entre HB752 y HB891, con valores mucho más bajos que el anterior (en promedio 3 de 300 granos) y con marcadas distancias en todo el rango. Ellos coinciden en casi todas las profundidades con las cutículas, semillas, principalmente, a ciertas profundidades con los

tejidos vegetales, animales y fúngicos, pero guardando su proporción con respecto a ellos.

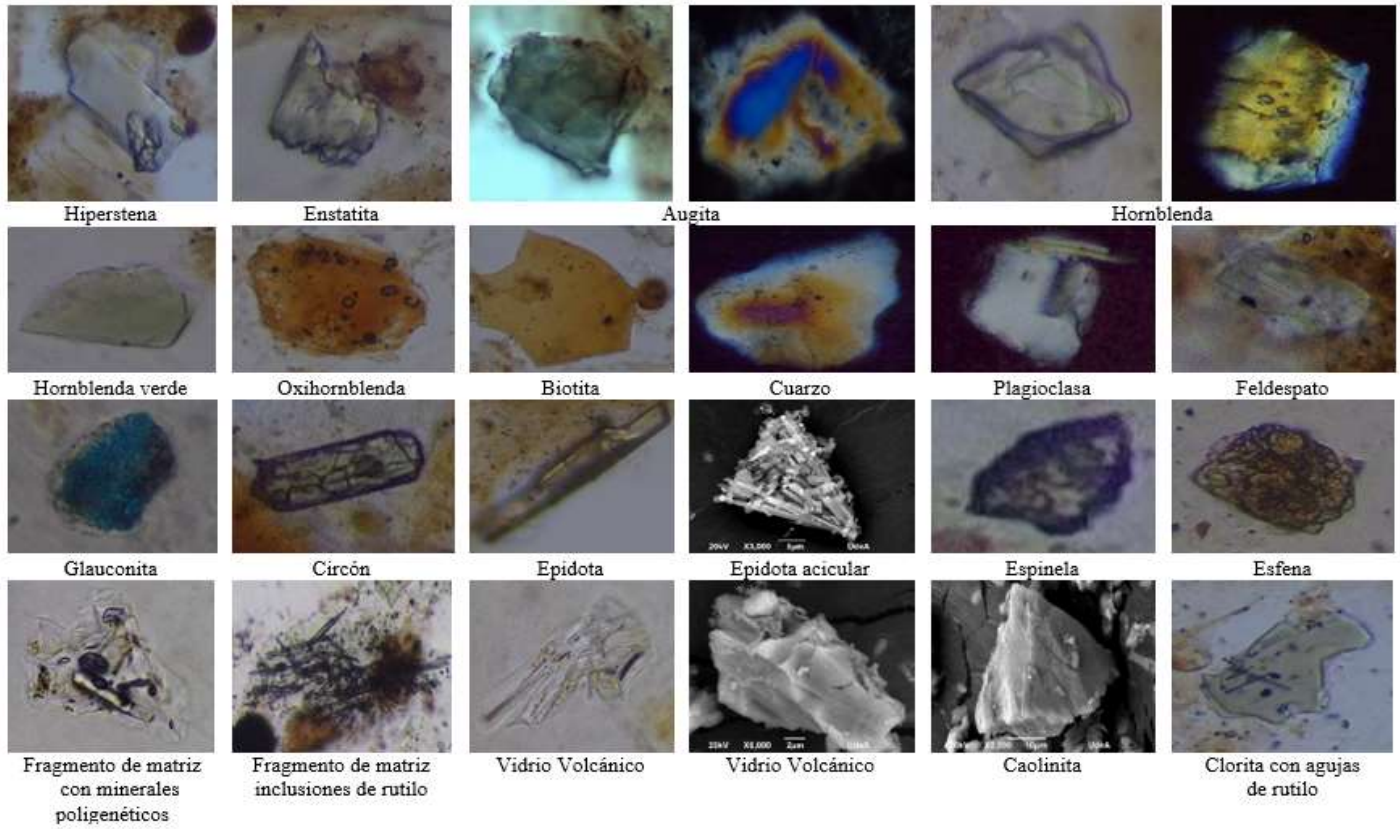


Fig. 4. Microcomponentes de origen inorgánico (minerales primarios), al Microscopio óptico (40X), y al microscopio de Barrido (SEM), presentes en los sedimentos del pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia.

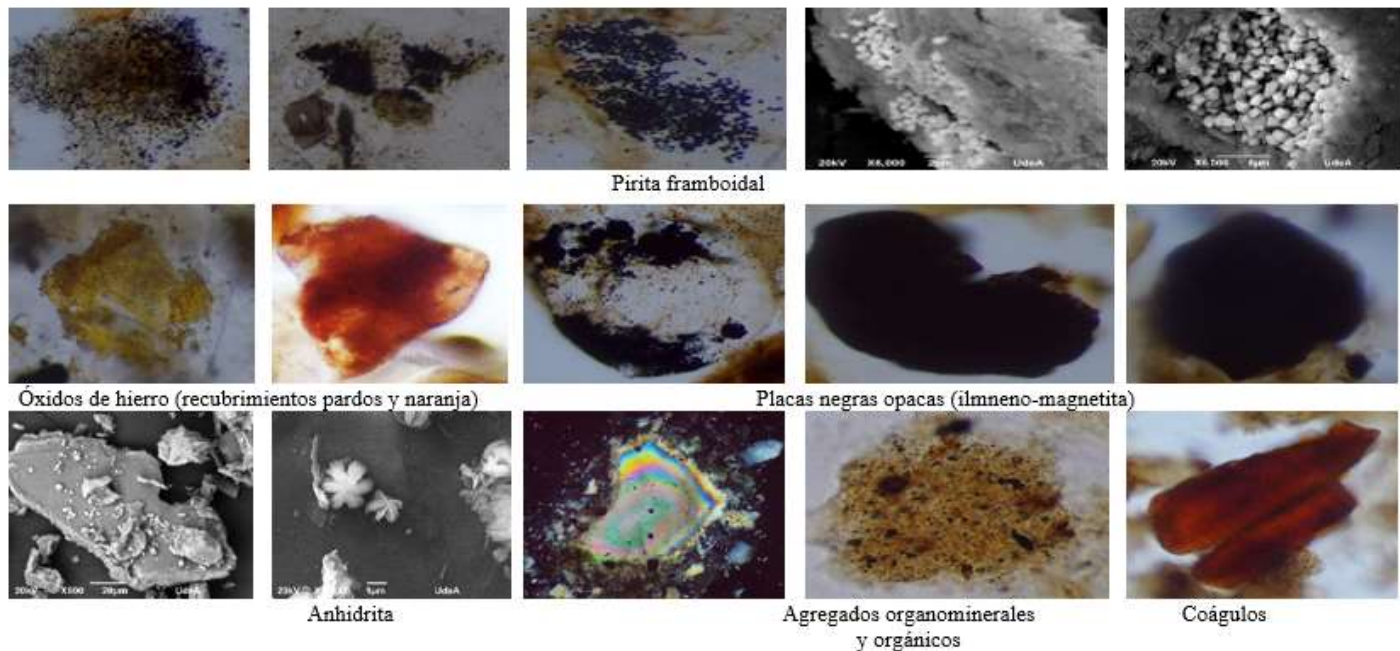


Fig. 5. Microcomponentes de origen secundario (Óxidos e hidróxidos, Placas negras opacas, Agregados organominerales, Pirita framboidal), al Microscopio óptico (40X), y al microscopio de Barrido (SEM), presentes en los sedimentos del pantano La Bramadora.

4.3.2 De origen orgánico. Este aparte hace referencia a tres tipos de tejidos orgánicos: Vegetales o Fitoclastos, Animales o Zooclastos y Tejidos Fúngicos, Polen, Esporas, Semillas, Almidón, Cutículas, Coágulos, Celulosa, etc., una descripción de ellos se hace a continuación, Figura 6.

Los tejidos vegetales o fitoclastos, son los componentes más representativos de la parte orgánica, se encuentran asociados a la presencia de suelos, paleosuelos y turbas (Figura 5).

Dichos materiales, se reconocen como tejidos orgánicos o fitoclastos, entre ellos se pueden diferenciar partes de raíces, tallos, hojas, cutículas, estomas, polen, esporas, pelos, semillas, almidón, celulosa, carbón, traqueidas; algunos muy bien conservados, inclusive en los niveles más profundos, p.e., en el paleosuelo de la base. Pueden ser de colores pardo, rojizo, oscuro o claro, otros son incoloros, y negros, estos últimos se encuentran en ciertos niveles se observa una gran cantidad de astillas negras producidas por la carbonificación puntual, seguramente por incendios forestales. Pueden ser estructurados o no y pueden estar muy bien conservados o extremadamente alterados. Los coágulos son xeroceles orgánicos irregulares, de colores pardo oscuro o negro y rojo, parcialmente translúcido y/o zonalmente. Son producidos tanto por la degradación de organismos como por los procesos bioquímicos, tienen superficies ligeramente suavizadas y de aspecto grasoso o ligeramente suave con bordes un poco más oscuros que el resto del coágulo.

En todo el núcleo los tejidos vegetales son los más abundantes seguidos de tejidos fúngicos y esporas, ellos marcan fuertemente la presencia del suelo actual, las turbas del techo y los paleosuelos que están tanto a diversas profundidades del N14 como en la base, y es precisamente en el techo entre HB1 y HB255, y en la base entre HB794 y HB950, donde estos elementos se hacen más notorios, sin embargo, marcan muy bien los paleosuelos p.e., en HB300-HB302, HB375-HB383, HB623-HB627, HB630-HB637 (paleosuelos “mellizos”), y entre HB744-HB756, entre otros. En estos niveles se encuentran casi siempre todos los microcomponentes orgánicos, pero no en el mismo estado de degradación, lo que sí es claro, a través de todo el N14, si se pueden diferenciar y se hacen más comunes los pertenecientes a algunas de las especies vegetales reportadas, lo cual indica que el pantano, las ha tenido a través del tiempo y que la dinámica de ellas se mantiene, seguramente favorecida por la presencia de la fauna, especialmente, aves, que hacen la tarea de llevar y traer materiales orgánicos como semillas o polen que permiten su dispersión y asentamiento en sitios específicos. El agua pluvial, también contribuye con este proceso, así como el viento. Los tejidos animales tienen buena presencia en la parte superior del N14, y se hacen

apenas visible, donde hay paleosuelos, en la parte basal están presentes, aunque en cantidades inferiores a las expresadas en el techo.

Tejidos carbonizados. Los tejidos carbonizados presentes en el N14 pueden ser indicadores de incendios, ya sean naturales (por extensas sequías) o provocados por el hombre ya sea para el desarrollo de actividades agro-pastoriles o para cocinar. Sin embargo, la falta de datos documentados y la ausencia de recuerdos de tales incendios o de lo que los antiguos utilizaban para hacer sus alimentos, en la memoria de las comunidades actuales hacen que estas conclusiones sean tentativas. Se necesitaría más investigación para confirmar estas hipótesis. En el N14, estos se encontraron a varias profundidades, pero los valores más altos, muy cercanos al 20% (60 granos de 300), se contaron hacia la base del núcleo, en HB898 y en HB916. En ambas profundidades se registra un cambio brusco en la cantidad, calidad y tamaño de microcomponentes, todos aumentan. Las mayores concentraciones se presentaron tanto en el techo entre HB137 y HB252, como en la base entre HB811 y HB943 y ellos coinciden con la presencia de paleosuelos o de turbas.

Tejidos animales o zooclastos. En el N14 del Pantano La Bramadora, las mayores cantidades de tejidos de animales se localizaron en el techo (entre HB1 y HB243) y en la base (entre HB845 y HB924), en ambos casos las cantidades son regulares, más en el techo que en la base, sin exceder los 62 granos sobre 300 (HB75) en el techo y 10 granos sobre 300. Entre estos dos rangos los valores son escasos, solo se presentan en HB378, HB399-HB403, HB630-HB635, y entre HB812-HB820, pero en ninguno de estos los valores pasan de 12 granos de 300, ellos coincidiendo donde hay paleosuelos, Figura 6.

Tejidos fúngicos. Los caracteres que destacan a los hongos como indicadores paleo ambientales, tales como la abundancia relativa, especificidad de huésped y las preferencias de hábitat, tienen importantes implicancias en los estudios de reconstrucción paleoclimática. Los restos fúngicos brindan información sobre la planta hospedante dada su estrecha relación con determinados tipos polínicos. La aparición de esporas de *Glomus* sp. género de micorrizas arbusculares asociada a condiciones más secas, se considera un buen indicador de condiciones de aridez y ambientes estresados, (Limaye et al., 2007). En el N14 recuperado en el Pantano La Bramadora, los tejidos fúngicos, además de *Glomus* sp., se encuentran *Gaeumannomyces*, *Ascoma*., *Gelasinospora*., *Sordaria*, *Sporormiella*, entre otros, Figura 6. La presencia de estos tejidos fúngicos, en todo el núcleo es notoria, siempre está asociada a la presencia de suelos, paleosuelos y turbas, su abundancia y regularidad es más explícita en el techo entre HB1 y HB254 con los valores más altos, en promedio 38 de 300 granos, en HB11, HB75, HB76 y HB102, con valores de 80, 81, 108 y 76

granos respectivamente, se registran los valores más altos de estos microcomponentes. Entre HB262 y HB797 el contenido y su frecuencia baja, no supera los 38 granos; en la base su presencia

es más regular entre HB799 y HB936, en promedio el contenido es de 20 granos de 300, pero tampoco es mayor de 38 granos, aquí es más fuerte la presencia de la especie *Glomus sp.*

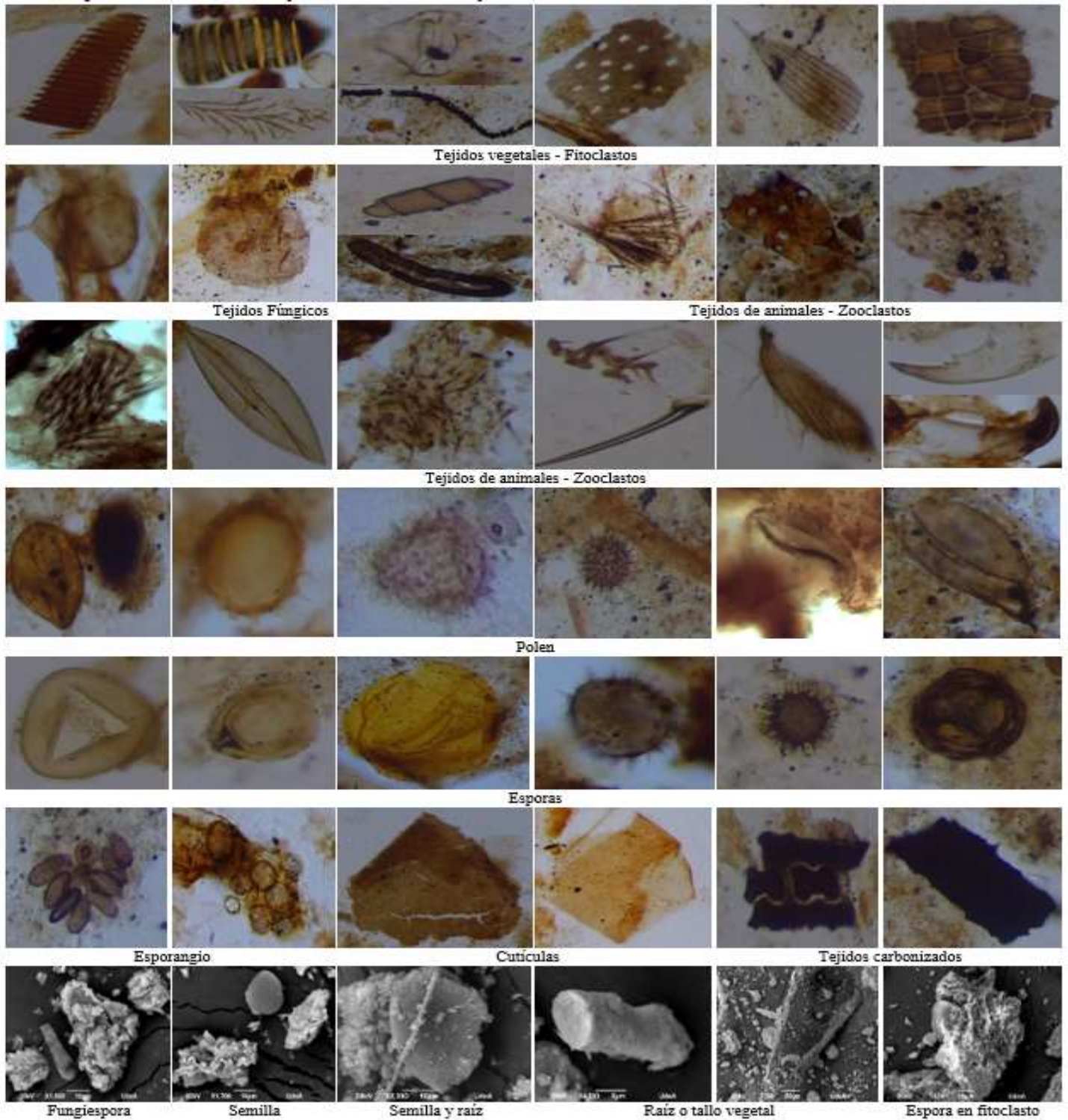


Fig. 6. Microcomponentes de origen orgánico (Tejidos vegetales, Tejidos animales y Tejidos fúngicos), al Microscopio óptico (40X), y al microscopio de Barrido (SEM), presentes en los sedimentos del pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia.

**Polen y esporas.** En el N14 del Pantano La Bramadora, las mayores cantidades de polen y esporas se localizaron en el techo (entre HB1 y HB254) y en la base (entre HB796 y HB943), en ambos casos las cantidades son regulares, más en el techo que en la base, sin exceder los 62 granos sobre 300 (HB169). Entre estos dos rangos los valores se localizan coincidiendo donde hay paleosuelos, su clasificación coincide con la realizada por Restrepo (2003), típica de un bosque seco tropical, la cual se ha mantenido, por lo menos, durante los últimos 1000 años, tal como se puede observar en el tipo de fitoclasto y en la presencia de polen y esporas muy similares en todo el núcleo, Figura 6.

#### 4.3.3 Microcomponentes de origen silíceo (Silicofósiles)

Los silicofósiles son restos biológicos que utilizan la sílice como parte fundamental de su estructura corporal. Estos incluyen diatomeas, fitolitos, quistes de crisofíceas, espículas de esponjas de agua dulce, y escamas o placas de testáceas. Cuando la materia orgánica de los sedimentos es eliminada, estos silicofósiles pueden llegar a constituir la fracción más importante del residuo, superando incluso a la fracción mineral. En los sedimentos del Pantano La Bramadora estos silicofósiles son un grupo de gran importancia y potencial paleo ecológico y paleo climático. Su presencia, importancia y distribución varían a través de los materiales presentes en el N14, Figura 7, está influenciada por una variedad de factores, incluyendo la ubicación geográfica, la profundidad del agua, y las condiciones ambientales como la sequedad y el aporte de agua. así:

**Diatomeas.** Se constituyen en bioindicadores de la calidad del agua, en especial, marcan las condiciones de eutrofización, cantidades excesivas de CO<sub>2</sub>, estimula su crecimiento, ellas se constituyen en bombas biológicas al captar una gran cantidad de CO<sub>2</sub> por fotosíntesis para producir materia orgánica, lo cual contribuye a la disminución del CO<sub>2</sub> y, por ende, disminuir la temperatura. En el N14 se presentan agrupadas en tres rangos, entre HB1 y HB239, en el techo, siendo muy continua su presencia. Entre HB376 y HB637, en la parte central, con alta dispersión y discontinuidad y, entre HB755 y HB886, en la base, poco continuas. Los mayores valores se encuentran en HB378 con 35 de 300 granos y en HB827 con 38 de 300 granos. En ambos casos en paleosuelos, Figura 7. Los géneros asociados son: En HB378, *Pinularia mayor*, *Pinularia sp.*, *Eunotia biseriata* y *Diploneis subovalis* y en HB827 *Terpsinae musica* (abundante en los paleosuelos de la base clasificados como Aridisoles, asociada a la anhidrita y a la pirita frambooidal), también hay *Pinularia*, *Auracoseira*, *Eunotia*, *Navicula*, *Gonphonema*, *Nitzschia* y *Coconeis*.

**Tecamebas.** Son importantes tanto en la zona central como litoral, disminuyendo fuertemente con la profundidad para aumentar de nuevo en el fondo de las perforaciones. En el N14 se presentan

preferentemente en el techo y casi de manera continua entre HB1 y HB137, entre HB147 y HB212, se vuelven más escasas y discontinuas y a medida que se profundiza en el núcleo son escasas y puntuales, y están relacionadas a la presencia de paleosuelos; en HB25 presentan la mayor abundancia (25 de 300 granos), Figura 7.

**Crisofíceas.** Son igualmente importantes y tienen un comportamiento muy similar al descrito para las tecamebas. Tanto las tecamebas como las crisofíceas tienen su mejor desarrollo en los pantanos y las charcas, pero decrecen en importancia al aumentar la profundidad del cuerpo de agua. En el N14 se presentan con mayor abundancia y muy discontinuas entre HB129 y HB239) y HB402, HB803, HB827 y HB923, los valores son muy bajos en todos los casos (menos de 5 granos de 300), excepto en HB202 con 16 sobre 300 granos, Figura 7.

**Fitolitos.** Su presencia en el pantano podría estar indicando los diversos periodos de sequedad o el descenso frecuente del nivel del agua. Esto permite establecer algunos procesos geoquímicos ocurridos, en el último milenio, no solamente en relación con los suelos y paleosuelos, sino también con respecto a los estratos arcillosos. En los fitolitos se pueden visualizar rasgos como anillos de hidratación y corrosión superficial, que son respuesta a condiciones de alta humedad y acidez en presencia de sustancias orgánicas, así también, una ligera coloración rosa y en otros un aspecto oscuro como si estuvieran carbonizados. En el N14 se presentan agrupadas en tres rangos, coincidiendo con la distribución de las diatomeas, pero en cantidad mucho más alta.

El primer grupo se define entre HB1 y HB251, en el techo, siendo muy continua su presencia; entre HB318 y HB756, en la parte central, con alta dispersión y discontinuidad y, entre HB799 y HB950, en la base, continuas. Los mayores valores se encuentran en HB84, HB96 y HB 907 con 48, 52, 68 y 48 granos de 300, respectivamente. En todos los casos relacionados con suelos, paleosuelos y turbas, Figura 7. Con base en los conteos y su frecuencia, se establecieron dos asociaciones de fitolitos que permiten hacer una interpretación sobre las condiciones climáticas y ambientales del pasado: a) *Flabellulita-Prismatolita*, bastante común en los géneros búcaro (*Erihtina fusca*), trompillo (*Guarea guidonia*) e higuieron (*Ficus sp.*), entre otras cuyas especies son más abundantes en los sitios de alta humedad y, b) *Prismatolita-Bilobulita*, típicas de *Gramineae* y *Juncaeeae*, plantas que prefieren las áreas más secas.

**Espículas de esponjas.** Estarían indicando aguas abiertas, es decir, el aporte frecuente de agua al pantano por escorrentía. En el N14 se presentan en puntos muy específicos como en HB2, entre HB134 y HB143, entre HB151 y HB158, entre HB166 y HB241, entre HB864 y HB895, Figura 7.

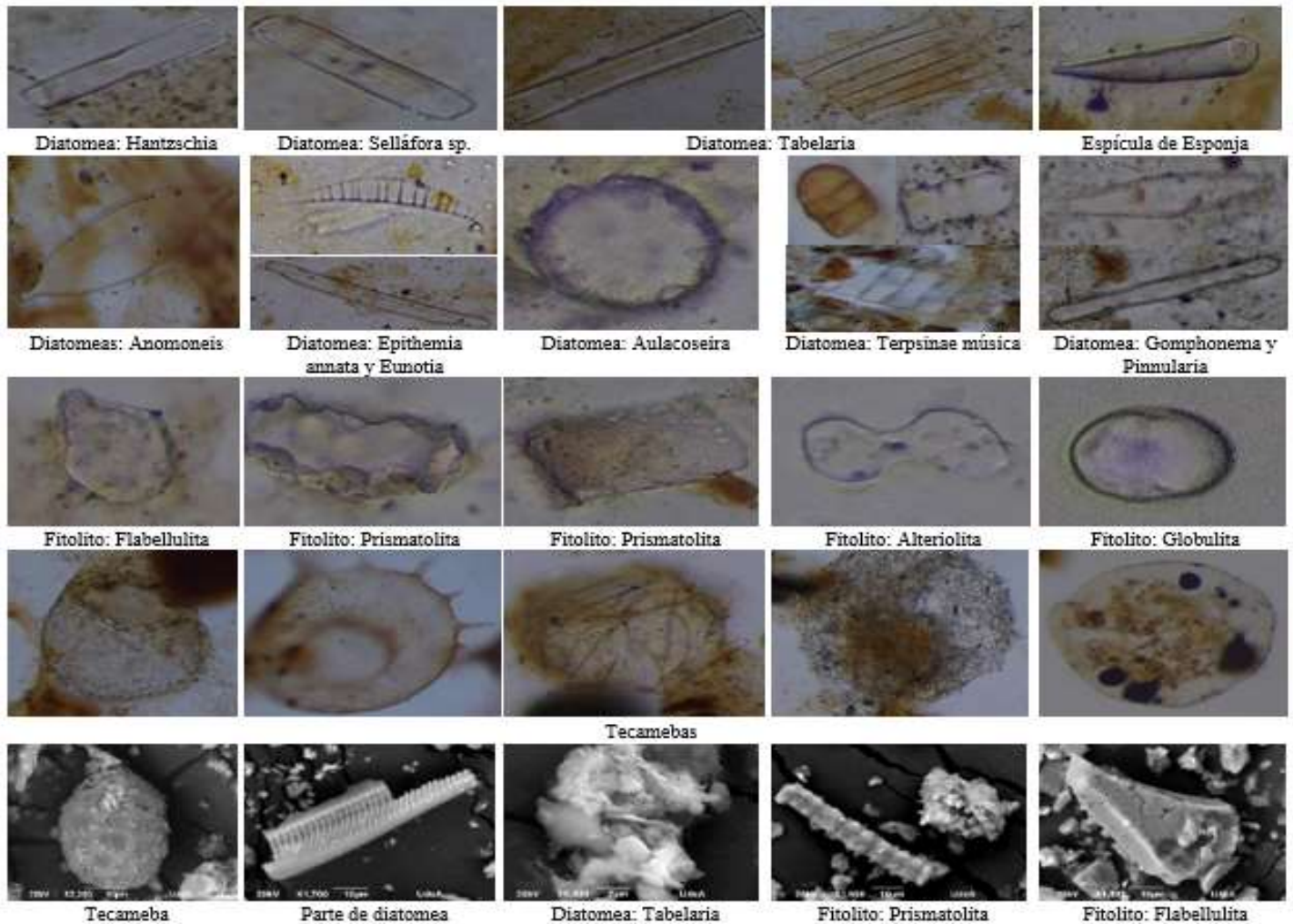


Fig. 7. Microcomponentes de origen silíceo (Silicofósiles: Diatomeas, Fitolitos, Tecamebas, Crisofíceas, Espículas de esponjas, Minerales primarios y secundarios), al Microscopio óptico (40X), y al microscopio de Barrido (SEM), presentes en los sedimentos del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia.

**4.4 Estado de alteración de los microcomponentes.** Los procesos de meteorización son evidentes en minerales, tejidos vegetales, animales o fúngicos, y en los silicofósiles, actúan como indicadores de eventos de precipitación/sequia ocurridos, al menos, durante el último milenio, los materiales que están hoy, han resistido, por lo menos, tres eventos de alteración: 1) inicial, que permitió la conformación de los materiales litológicos de la propia cuenca, 2) la que se presentó antes de que iniciará su erosión en la cuenca, y 3) la que se dio y se da, una vez fueron depositados en el pantano.

Observando los materiales de partida, algunos de los cuales se pueden ver en la Figura 4, y los que están ahora en el pantano, en las Figuras 8 y 9, es imposible detallar la secuencia de meteorización, y menos deducir el rasgo de alteración que corresponda a uno u otro evento de alteración; sin embargo, en las muestras del N14, si se puede apreciar que con respecto al material de partida en muchos niveles, existe un material extremadamente fino

que coincide con los niveles arcillosos, marcadores de periodos secos, mientras que en otros niveles, microcomponentes gruesos que indican periodos de lluvias.

En ciertos niveles de profundidad se observan fragmentos carbonizados que están como testigos de incendios ocurridos en el pasado; igualmente, a diversas profundidades la presencia de pirita framboidal, asociada muy fuertemente a la materia orgánica, podría estar evidenciando periodos de máxima humedad. También se observan placas negras y opacas de Ilmeno-magnetita, en los minerales de partida como en los del pantano, pero en este último su cantidad es mayor. Los óxidos de Fe, están en ambos casos, pero en los del pantano, su presencia es limitada.

De todas las observaciones realizadas en los materiales bióticos y abióticos, los rasgos de meteorización más dominantes son: superficies y bordes corroídos por hidrolisis (rompimiento de la molécula de agua y aporte de  $H^+$ , provocando colapso y desintegración de la estructura), esto es más común en minerales

primarios y secundarios. En anfíboles y piroxenos se logra desarrollar una textura astillosa con oquedades y terminaciones en huso (agudas), Figuras 8, 9 y 10. A medida que avanza el proceso muchos cristales se rompen en partículas más pequeñas hasta que se disuelven totalmente en el medio.

Superficies irregulares, acanaladas, lamelares, con burbujas de reacción, con evidencias de disolución o corrosión (disolución por la presencia de adherencias orgánicas u organometálicas en las superficies de los cristales), en los cristales, esta corrosión, empieza a manifestarse como una simple oquedad superficial que es tan grande o pequeña como sea el tamaño del material adherido, lo cual da a los materiales un aspecto cavernoso o fantasmal y a los bordes una terminación en huso. Se observa tanto en anfíboles, piroxenos, feldspatos y plagioclasas, y en algunos vidrios volcánicos).

Acentuación de clivajes por hidratación (incorporación de moléculas de agua o grupos hidroxilo al mineral), principalmente se observa en anfíboles, piroxenos, esfenas, espinelas y rutilos. Presencia de películas en las superficies de los minerales que pueden variar entre naranja, rojo, rojo oscuro y negro por oxido-reducción (reacción geoquímica cuando el contenido de oxígeno es alto en los minerales y las demandas biológicas del medio son bajas, la cual se facilita con las fluctuaciones del nivel del agua. Se reduce cuando hay exceso de agua y en el caso contrario se oxida), ocasiona la desintegración de minerales ricos en Fe y Mn, y la liberación de estos y/o la posterior formación de óxidos o hidróxidos.

La acción de los materiales bióticos sobre los abióticos acentúa clivajes, bordes, porosidad, cavernación o disolución, esto es favorable principalmente a las plagioclasas y feldspatos. Superficies y bordes redondeadas por rodamiento, especialmente en cuarzos.

En tejidos vegetales, animales y fúngicos, así como en el polen y las esporas, pérdida de la coloración por disolución en medio ácido, lo cual puede llegar a ser totalmente transparente o convertirse en un tejido celulósico; pérdida parcial o total de la estructura, por disolución o corrosión. En los silicofósiles por disolución y corrosión se pueden presentar anillos de reacción, destrucción de superficies y bordes en fitolitos y espículas de esponjas; fragmentación o eliminación de la estructura, en diatomeas, tecamebas y crisofíceas.

Todos estos procesos de meteorización en materiales bióticos y abióticos ocasionan la producción de residuos, iones, cationes, óxidos, hidróxidos, unos y otros quedan expuestos al ambiente lacustre, son o no aprovechados por otras especies o en la fabricación de minerales secundarios como la piritita framboidal,

caolinitas, cloritas y cualquier otro tipo de arcillas; los iones pueden agruparse y formar masas indeterminadas metálicas, o complejos órgano metálicos conjuntamente con la materia orgánica, la cual también puede formar agregados orgánicos u órgano minerales.

**4.5 Indicadores de eventos extremos de paleo precipitación y/o sequía.** El Pantano la Bramadora es un ecosistema que se desarrolla en condiciones extremas, con altas temperaturas del aire, extremos de irradiación solar y grandes amplitudes térmicas diarias. La interacción de estos factores con las variables hídricas, como el carácter húmedo (precipitación) o seco de la atmósfera, la altura de la lámina de agua y la profundidad del nivel freático, son fundamentales para explicar el funcionamiento del ecosistema. Estas variables actúan como variables maestras en su desarrollo. En la Tabla 1, se expresan los indicadores considerados y se les asigna un valor de calificación así: 3-Excelente; 2-Bueno; 1-Aceptable.

## 5. DISCUSIÓN

Los materiales del pantano están restringidos por la cuenca que es relativamente pequeña, materiales ya con un estado de alteración visible y que, al ser arrastrados por agua de escorrentía hasta el pantano, empiezan a desarrollar otros procesos de alteración, ya sea borrando rasgos del primero o fortaleciendo estos rasgos, lo cual ocasiona la disminución del tamaño original. Pese a que se trató de distinguir los dos eventos de alteración no fue posible indicar las diferencias entre estas. Se parte de un sedimento ya alterado que ha sido a través de los años sometidos a eventos de alteración, lavado, lixiviación y transporte hasta el pantano, una vez allí, conjuntamente con aguas acumuladas y cargadas de iones, así como la vegetación y sus procesos bioquímicos dan paso a afianzar lo que ya está alterado o a reaccionar con la nueva condición geoquímica y ambiental.

Los autores del artículo realizaron una exhaustiva búsqueda de información sobre eventos de precipitación, conocidos como Evento Niña, y de sequía, Eventos Niño, ocurridos en Colombia que tuvieran una influencia directa en la sedimentación del pantano, pero la información al respecto resultó ser muy limitada. Solo se encontraron datos de registros instrumentados que pudieron ser aprovechados en el desarrollo del objetivo de este artículo para las fechas entre 2022 a 1944 y entre 1914 a 1866 AC, dicha información medida, en tres sitios diferentes del país. Para el periodo entre 1866 a 1015 AC, se trabajó con datos históricos, de relatos realizados por algunos viajeros provenientes de otros países y que hacían referencia a las lluvias, los intensos calores y algunos incendios. En la literatura citada puede hallarse estas anotaciones.



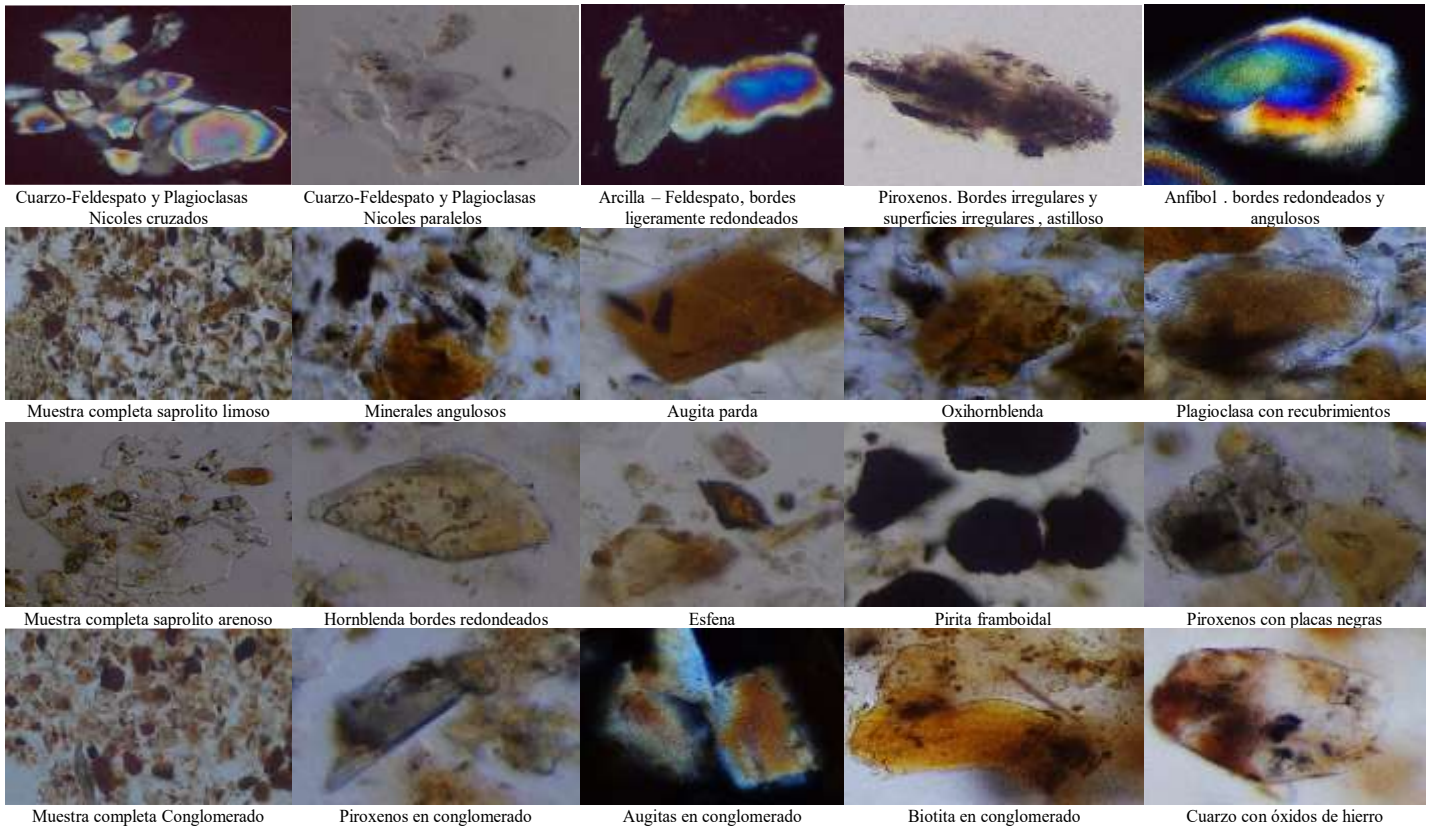


Fig. 8. Saprolitos y conglomerados de los sedimentos del Terciario Superior presentes en la cuenca La Bramadora. Observe el estado de alteración de minerales primarios y secundarios afectados por procesos de disolución, corrosión, óxido-reducción, al Microscopio óptico (40X). En su orden de arriba hacia abajo y en línea de cuatro: arenas; saprolito, conglomerado. Cuenca La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia.

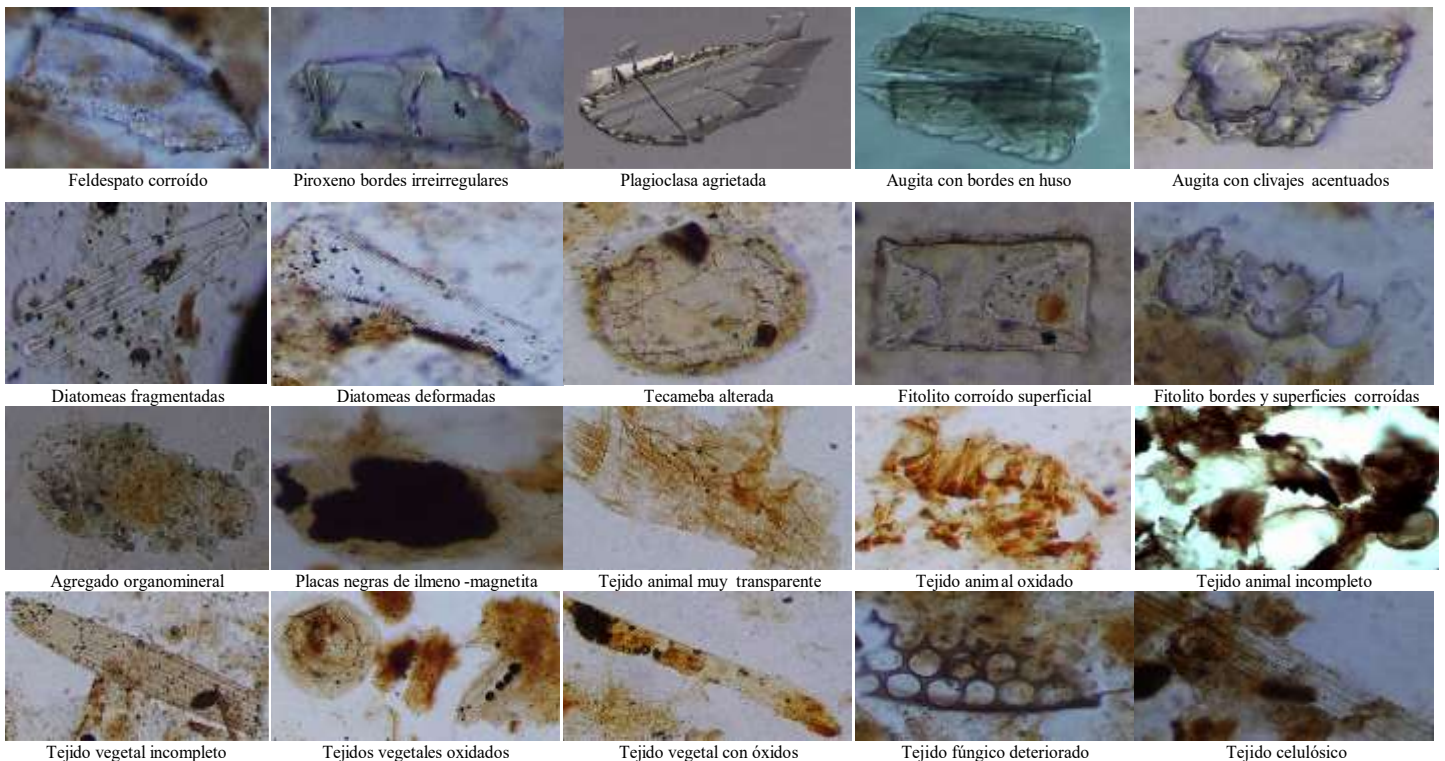


Fig. 9. Saprolitos y conglomerados de los sedimentos del Terciario Superior presentes en la cuenca La Bramadora. Observe el estado de alteración de minerales primarios y secundarios, de los tejidos orgánicos y de los silicofósiles, afectados por procesos de disolución, corrosión

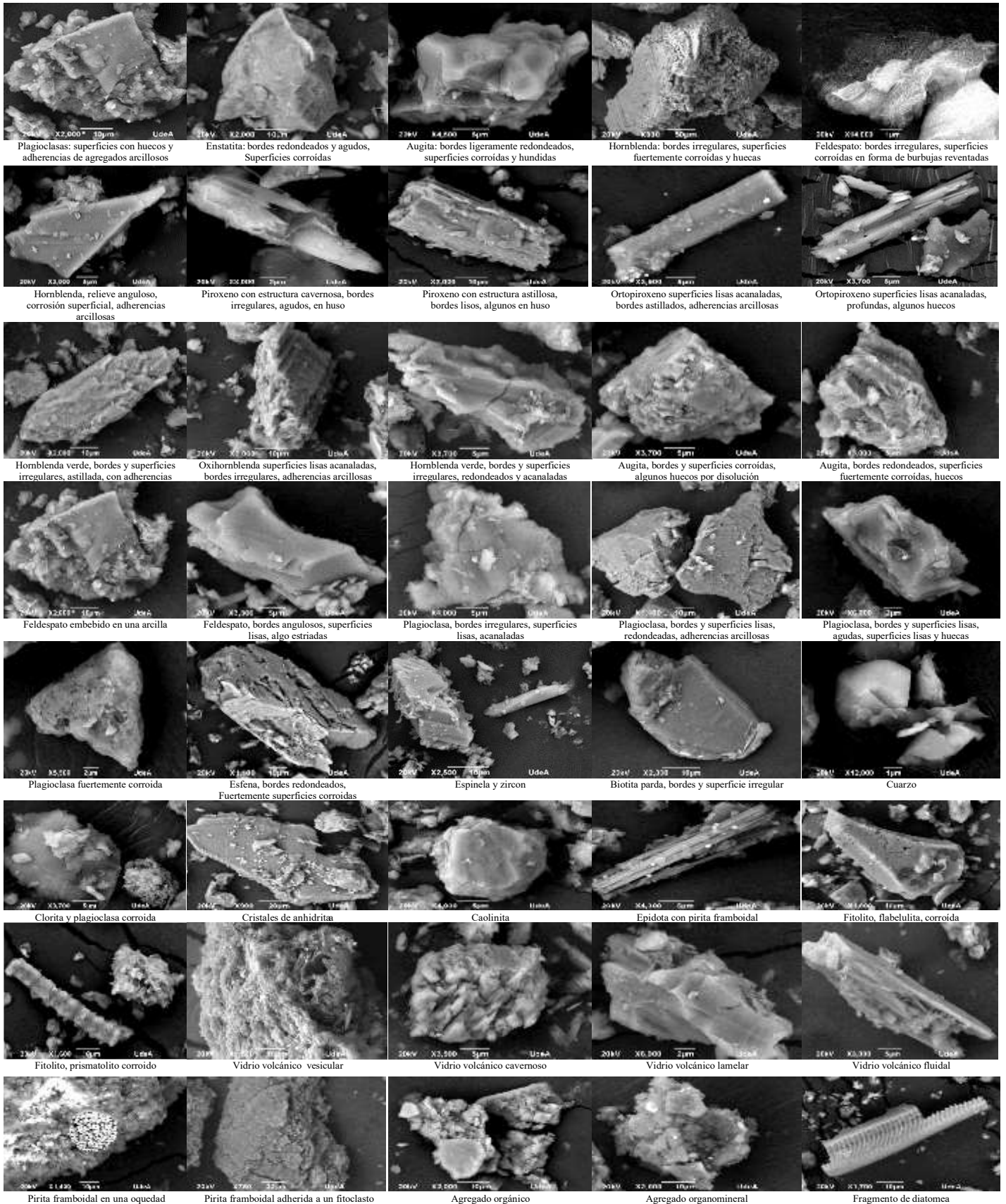


Fig. 10. Microcomponentes que evidencian procesos de alteración fuerte al microscopio de Barrido (SEM), presentes en los sedimentos del pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia.

**Tabla 1.** Indicadores de eventos extremos de Precipitación/Sequia: 3-Excelente; 2-Bueno; 1-Aceptable, definidos para los sedimentos del N14 del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia.

Indicadores	Indicador	Valor	Característica
Paleo precipitación	Paleo precipitación registrada para el segmento entre 2022 y 1866 AC. Paleo precipitación registrada en el N14 entre 2022 y 1015 AC	3	En el primer caso, tomados por terceros a partir de instrumento meteorológicos. En el segundo caso, deducidos tanto de información relatada históricamente como de una investigación temática. Reflejan los eventos de precipitación/sequia, entendidos como eventos Niña y/o Niño, respectivamente, así como eventos de precipitación/ sequía extremos, fuertes, moderados, débiles o normales.
Tamaño del grano	Porcentaje estimado de granos gruesos.	2	Granos gruesos hacen referencia a eventos de precipitación extrema, escorrentía o torrencialidad, eventos Niña. Granos finos hacen referencia a eventos de sequía, eventos Niño.
Micro componentes	Inorgánicos Orgánicos Silicofósiles Carbón y/o Tejidos carbonizados	1	Inorgánicos: reflejan la composición mineral de los sedimentos, están muy relacionados con el tamaño del grano, si son muy finos podrían corresponder a arcillas, si son medios a limos y si son gruesos a arenas. Orgánicos. Reflejan las características del medio biótico y del material que se adjunta a los sedimentos, e intervienen en diversos procesos bioquímicos como, p.e., en la presencia de la piritita framboidal. Tejidos carbonizados provenientes incendios de la vegetación. Reflejan condiciones de sequía.
Minerales secundarios	Grupos (pirita framboidal) Placas negras de Ilmeno-magnetita Óxidos e hidróxidos de hierro Anhidrita, Clorita, Caolinita	2	Actúan como indicadores de la paleo precipitación ya que su formación y acumulación es favorecida por la humedad y la presencia de materia orgánica en el caso de la piritita framboidal. La presencia de óxidos e hidróxidos, así como de placas negras es debida a procesos de déficit de agua en el sistema y exceso de calor en la atmosfera. La anhidrita, se forma bajo condiciones de máxima aridez, y en el caso de la clorita y la caolinita, su formación es favorecida por condiciones de alta humedad.
Perdidas por Ignición	LOI	3	El LOI define los climas y los ambientes registrados en el pantano así: valores elevados del LOI pudieran corresponder a climas Cálidos-Secos, que permitieron el desarrollo de un Pantano Arbóreo, con déficit de agua en la cuenca, disminución en la precipitación, incorporación de MO inorgánica, menor erosión hídrica, mayor contenido arbóreo (expansión del bosque), desarrollo de árboles híbridos (terrestres y anfíbios). Bajo esta condición se da el desarrollo del suelo (paleosuelos), con abundante MO en diferentes estados de descomposición.
Estado de alteración de los micro componentes	Inorgánicos Orgánicos Silicofósiles	2	Altamente meteorizados hacen parte de los materiales de la microcuenca que son esencialmente sedimentos del Terciario, en un estado de alteración avanzado. Por escorrentía y eventos torrenciales son transportados hasta el pantano, allí, continúan este proceso de alteración hasta convertirse en minerales secundarios y en iones activos dentro del sistema, los cuales son asimilados en procesos bióticos y abióticos del propio pantano. Tejidos vegetales, animales y fúngicos arrastrados por las corrientes torrenciales de la microcuenca y de los aportes propios del pantano, ocasionan el deterioro de estos, si están favorecidos por un clima moderado, pueden transformarse en materia orgánica que da paso a un suelo si no, quedan como restos fósiles en los sedimentos del pantano. Los silicofósiles hablan sobre el ambiente geoquímico del pantano, un calor ejemplo es la presencia de la diatomea <i>Terpsinae musica</i> que marca la condición de aridez.
Geoquímica por XRF	Iones de elementos mayores y menores	3	Iones marcadores de eventos de Precipitación/Sequia, algunos de ellos extremos, los principales son el Na, Ca, K, Mg; Cl, Si, Al, Fe, Ti, y S.

En la actualidad a pesar de que existen mucho avance y estaciones de monitoreo climático no se tiene la suficiente información que permita reconstruir el paleoclima, se trabaja mucho en el clima atmosférico y muy poco en el paleoclima y mucho menos si se trata de investigarlo a partir de un registro lacustre a anual o subanual. La intención de esta aseveración no es una disculpa, lo que pasa es que apenas se están realizando estos estudios a esta escala en Colombia, lo peor es que no hay recursos suficientes para avanzar en esta pesquisa. El boom del clima, solo llega hasta interpretar series de precipitación y/o sequía de los últimos años, basadas en el uso de numerosos datos que permiten calcular grandiosas ecuaciones que no están dirigidas a plantear soluciones para un problema latente como es el clima.

## 6. CONCLUSIONES

Indicadores tales como la paleo precipitación, el porcentaje estimado de granos gruesos, los micromponentes, su estado de alteración, los minerales secundarios, la presencia de partículas carbonizadas, la curva del LOI (*Loss on Ignition*) y la geoquímica por XRF, fueron clave para evidenciar la paleo precipitación interanual del último milenio guardada como un archivo en los sedimentos del Pantano la Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia.

Los indicadores señalados resaltan eventos de precipitación/sequia ocurridos, al menos, durante el último milenio, la tasa

de sedimentación promedio de 1 cm/año, calculada en el N14, permite precisar la duración de esos eventos.

En ciertos niveles de profundidad se observan fragmentos carbonizados que pueden estar relacionados con incendios en periodos secos. Igualmente, a diversas profundidades, la presencia de pirita framboidal, asociada con la materia orgánica y el azufre, podría estar evidenciando periodos de máxima humedad.

Las placas negras y opacas de Ilmeno-magnetita, así como de óxidos de hierro tanto en los minerales de partida (sapolitos y conglomerados del Terciario) como en los materiales del N14, indican procesos de óxido-reducción favorecidos por la fluctuación del nivel freático, lo cual podría entenderse como fluctuación del clima o alternancia de un clima lluvioso con uno seco en periodos poco prolongados.

Desde el punto de vista sedimentológico, este pantano actúa como un ecosistema extremo. Normalmente, solo dos componentes entran en la composición de los materiales: la materia orgánica y la arcilla. Cuando ocurren juntas, representan los casos opuestos de preservación y destrucción de los tejidos. Algunos cambios sedimentológicos en el pantano pueden ser extremadamente rápidos y ser parte de la dinámica interna del pantano, sin necesidad de un disparador externo como un cambio climático.

Los minerales son esencialmente piroxenos (hiperstena, augita y enstatita), anfíboles (oxihornblenda y hornblenda verde), plagioclasas, feldespatos, biotita, esfena, espinela, circón, epidota acicular, Ilmeno-magnetita, cuarzo, criptotefras, fragmentos de matriz. Los minerales secundarios son cloritas, caolinitas, pirita framboidal, anhidrita, óxidos de hierro. En los silicofósiles se distinguieron fitolitos, tecamebas, crisofíceas, espículas de esponjas y diatomeas, en estas se destacan, p.e. *Terpsinae musica*, que indica presencia de cloruros (condición de salinidad y aridez como la que se presenta en los paleosuelos de la base).

Se observaron tejidos vegetales, fúngicos y animales, estos últimos en cantidades más bajas que los anteriores; su estado de alteración señala bien la rigurosidad geoquímica del ambiente. Los tejidos orgánicos marcan igualmente la presencia del suelo actual, las turbas y los paleosuelos presentes en el núcleo y con ello los diferentes cambios climáticos ocurridos, al menos en el último milenio.

En el techo del N14, predominan eventos de sequía, lo que ha permitido el progreso de un pantano arbóreo, y el desarrollo del suelo actual, un Alfisol de 18 cm, bajo condiciones acuicas (condición del suelo que está virtualmente libre de oxígeno disuelto porque está saturado con agua). Debajo de este un paleosuelo y una capa de turbas, y luego, arcillas mediadas por paleosuelos de bajo espesor. En la parte media lluvias moderadas y periodos de sequedad dan paso a la acumulación de arcillas, luego

un evento extremo de precipitación crea el límite con otro periodo de sequedad, en donde las arcillas se imponen y otro de lluvias ligeras le continúa. En la base se presentan una alternancia de por lo menos cuatro periodos de precipitación extrema, con cierta ciclicidad, mediados por periodos de sequedad, también cíclica, que dieron paso a la formación de dos paleosuelos desarrollados bajo condiciones de aridez.

## FINANCIACIÓN

Esta investigación fue aprobada por el Comité de Investigación de la Universidad de Antioquia –CODI-, e inscrita en el Sistema de Investigación de la Sede de Investigación de la Universidad de Antioquia –SIIU-, con el Código 2022-48550. Bajo el proyecto de Investigación titulado: “Evidencias de eventos de precipitación extremos registrados a escala subanual en los sedimentos del Humedal La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia”. Dicho proyecto ha sido financiado por la Universidad de Antioquia, Facultad de Ingeniería y los Grupos de Investigación GAIA y SIDEMAT de la Universidad de Antioquia.

## MATERIAL SUPLEMENTARIO

Anexo 1. Relación Precipitación interanual-% estimado tamaño de grano grueso-Microcomponentes-Geoquímica-Entre HB1 y HB157 cm de los sedimentos del Pantano la Bramadora, Sopetrán, Antioquia. Colombia.

Anexo 2. Relación Precipitación interanual-% estimado tamaño de grano grueso-Microcomponentes-Geoquímica-Entre HB1 y HB950 cm de los sedimentos del Pantano la Bramadora, Sopetrán, Antioquia.

Ver: <https://doi.org/10.32685/0120-425/bol.geol.51.1.2024.726>

## DECLARACIÓN DE CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen intereses financieros o relaciones personales que puedan haber influido en el trabajo reportado en este artículo.

## RECONOCIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental GAIA, al Departamento de Materiales, y a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Antioquia por el apoyo incondicional. A Luna, por su constante acompañamiento y su amor. A nuestras familias por su

paciencia. De manera especial al Editor y todo el equipo del Boletín Geológico del Servicio Geológico Colombiano; del mismo modo, a los revisores del artículo.

## REFERENCIAS

- Álvarez, 1938. Rev. Acad. Colomb. Cienc. Ex. Fis. Nat. 41(Suplemento):491-515, 2017.
- Barrón E. (2002). Indicios de paleo incendios en el Terciario de la Península Ibérica. NEMUS, Revista de l'Ateneu de Natura, 1: 5-16 (2002)
- Battarbee W.R. (2000). Paleolimnological approaches to climate change, with special regard to the biological record. Quaternary Science Reviews. V. 19(1):107-124 DOI: 10.1016/S0277-3791(99)00057-8
- Boussingault, J.B. (1849). Viajes científicos a los Andes ecuatoriales. Colección de memorias sobre física, química e historia natural de la Nueva Granada, Ecuador y Venezuela, presentadas a la Academia de Ciencias de Francia. París: Librería Castellana, Lasserre Editor.
- Bell M., and Walker J. (1992). Late quaternary environmental change: Physical and human perspectives., Publisher Longman Scientific and Technical, Harlow 1992 (273 pp) ISBN 0 582 04514 2 £15.99
- Benavides B.H. y Rocha E.C. (2012). Indicadores que manifiestan cambios en el sistema climático de Colombia (Años y décadas más calientes y las más y menos lluviosas). IDEAM–METEO/001-2012 Nota Técnica Del IDEAM. 26 p.
- Castañeda C.P. (2021). El uso de indicadores indirectos para reconstrucción ambiental del Cuaternario / Revista CIBIOS- BUAP, 2021, Año 1, No. 2: 14-27.
- Chorley J.R., Schumm S.A., & Sugden D.E. (1984). Geomorfology. 1st Edition, London. 656 p. eBook ISBN9780429273636 DOI: <https://doi.org/10.4324/9780429273636>.
- Flórez-Molina, M.T. y Parra-Sánchez, L.N. (2024). Mineralogía, granulometría y facies asociadas a sedimentos de fondo en tres embalses de Empresas Públicas de Medellín. BOLETÍN DE CIENCIAS DE LA TIERRA.55, pp. 21 - 41. DOI: <https://doi.org/10.15446/rbct.n.55.111438>
- Flórez M.T., Parra L.N., Abril G. y Monsalve C. (2023). Sensores paleoclimáticos del último milenio preservados en los sedimentos del pantano La Bramadora, Sopetrán, Colombia. Boletín Geológico, 50(2). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.50.2.2023.711>
- Flórez M.T., Parra L.N. (2023). Datos del Núcleo 14 - Sedimentos del Pantano La Bramadora, Sopetrán, Antioquia, Colombia. Boletín Geológico, 50(2). <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bol.geol.50.2.2023.712>
- Flórez M.T., Parra, L.N. y Calderón J.A. (2023). Evidencias de eventos extremos de precipitación y de explosiones volcánicas entre 1455-2022, A.D, en el humedal la Bramadora, Antioquia, Colombia. Boletín De Ciencias De La Tierra, 53, pp. 9 - 24. DOI: <https://doi.org/10.15446/rbct.n53.108060>
- Flórez-Molina, M.T., Parra-Sánchez, L.N., Bolaños-Benítez, S.V., Gallo-Sánchez, L.J., Poveda-Sáenz, A., y Agudelo-Echavarría, D.M. (2018). Tasas de sedimentación y características de sedimentos de fondo en tres embalses de Antioquia, Colombia, Colombia. Ingeniería del agua, 22(4), pp.177-194, 2018. DOI: <https://doi.org/10.4995/Ia.2018.8001> [3]
- Flórez-Molina, M.T., Parra-Sánchez, L.N., Bolaños-Benítez, S.V., Gallo-Sánchez, L.J., Poveda-Sáenz, A., y Agudelo-Echavarría, D.M. (2017). Caracterización de los sedimentos de tres embalses de Empresas Públicas de Medellín, Colombia. Revista Politécnica, 24, pp.49-63, 2017.
- Flórez, M.T. et al. (2016). Dinámica de sedimentos y de materiales asociados y reconstrucción paleoambiental en los embalses Riogrande II, La Fe y Porce II. En: Estudio de la problemática ambiental de tres embalses de Empresas Públicas de Medellín para la gestión integral y adecuada del recurso hídrico Documento interno EPM. Informe parcial, 2016.
- Flórez M.T. (2004). Meteorización experimental de los fragmentos de matriz y de los vidrios volcánicos. Tesis PhD. Universidad Nacional De Colombia, Sede Palmira. 300p.
- Flórez M.T. (2000). Génesis de suelos y paleosuelos ándicos a partir del estudio de pedocomponentes. Tesis De Maestría. Universidad Nacional De Colombia. Medellín. 190p.
- Flórez, M.T. y Parra, L.N. (2000). Pedocomponentes en suelos y paleosuelos ándicos. Parte I. Universidad de Antioquia. Revista Facultad de Ingeniería. 21, pp.19-34, 2000
- Flórez M.T. (1999). 1999. Fitolitos en paleosuelos Andicos altoandinos, San Félix, departamento de Caldas. Revista de Silicofósiles Altoandinos. P42-56. Ed. Colciencias, Universidad Nacional, Universidad de Antioquia.
- Flórez M.T. (1987). Litoestratigrafía y génesis de las tefras de la Unión, Sonsón y San Diego. Tesis Pregrado. Universidad Nacional de Colombia. Sede Medellín. 180p.
- Hicks, W.; G. Bowman y R. Fitzpatrick. (2002). The geochemistry of Australian tropical acid sulfate soil and their environmental hazard. Symposium No 63. Paper No. 238. 17th World Congress in Soil Science, Thailand, 2002.
- Hodell, D., Curtis, J. y Brenner, M., (1995). Posible papel del clima en el colapso de la civilización maya clásica. Naturaleza 375, pp. 391-394. DOI: <https://doi.org/10.1038/375391a0>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), et al. (2017). Análisis de vulnerabilidad y riesgo por cambio climático en Colombia. Tercera Comunicación Nacional de Cambio Climático. Ideam, PNUD, MADS, DNP, Cancillería, FMAM. Bogotá, DC., Colombia.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2013). AR5 Synthesis report: climate change 2014. [online]. Available at: [https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5\\_SYR\\_FINAL\\_All\\_Topics.pdf](https://archive.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_All_Topics.pdf)
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2018). Impactos, adaptación y vulnerabilidad. [en línea]. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-ii/> Margalef, R. (1983). Limnología. Ediciones Omega,

- S.A., Barcelona, 1010 p.
- Jones, P. D., et al. (2009). High-resolution paleoclimatology of the last millennium: A review of current status and future prospects. *The Holocene*, 19, 3-49. <https://doi.org/10.1177/0959683608098952>.
- Leyden, B., Brenner, M., Hodell, D., and Curtis, J., (1994). Orbital and internal forcing of climate on the Yucatan Peninsula for the past 36 ka. *Paleoclimatology Paleogeography Paleoecology* 109, pp. 193-210.
- Limaye, R.B., K.P.N. Kumaran, K.M. Nair & D. Padmalal. (2007). Non-pollen palynomorphs as potential palaeoenvironmental indicators in the Late Quaternary sediments of the west coast of India. *Current Science* 92(10): 1370-1382.
- Lorente, M. A. (1986). Palynology and palynofacies of the Upper Tertiary in Venezuela. *Diss. Bot.*, band 99, J. Cramer, Berlin. 222 p.
- Lucas, S.G. (2007). Proxies and Triassic GSSPs. *Albertiana*, 36, 174-175.
- Luterbacher, J, Dietrich, D, Xoplaki, E, Grosjean, M., and Wanner, H. (2001). European seasonal and annual temperature variability, trends, and extremes since 1500 *Science* 303 pp. 1499-1503.
- Maher, B.A., y Thompson, R. (2001). *Quaternary climates, environments and magnetism*. Editorial Cambridge University Press. Reino Unido.
- Marcial E.R., Albarracín V.H., y Esteban S.B. (2022). Framboides de pirita como indicadores de condiciones redox en la Formación Lampazar (Cámbrico superior, Sierra de Cajas, Cordillera Oriental, Argentina). *Tucumán, 2022 - ISSN 1514-4186 - ISSN on-line 1666-9479. Serie Correlación Geológica - 39 (1): 18 – 31. DOI 10.5281/zenodo.7926836*
- Mora P.K. (2019). “Tras la pista de ‘terribles veranos’ y ‘copiosas lluvias’”. *Historia Crítica*. N. 74 (2019): 19-40, doi: <https://doi.org/10.7440/histcrit74.2019.02>
- Mora P.K. y Cortes G. J. (2021). “Bajo el sol ardiente y la lluvia torrencial. Viajeros extranjeros y clima colombiano en el siglo XIX”. *Anuario de Historia Regional y de las Fronteras* 26.2 (2021): 137-164.
- Osorio A. C., (2016). *Dinámica del clima y la vegetación de los últimos 200 años del Holoceno en el humedal La Bramadora (Antioquia-Colombia)*. Tesis de Maestría. Universidad Nacional de Colombia Facultad de Ciencias, Escuela de Geociencias Medellín, Colombia 2016. 59p En: [https://repository.eia.edu.co/bitstream/handle/11190/2199/VelasquezDaniela\\_2018\\_ImpactoPotencialCambio.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.eia.edu.co/bitstream/handle/11190/2199/VelasquezDaniela_2018_ImpactoPotencialCambio.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Orlove, B., (2005). Human adaptation to climate change: a review of three historical cases and some general perspectives. *Environment Science & Policy*, 8(6), pp. 589-600. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.06.009>
- Organización Meteorológica Mundial (OMM) (2020). Declaración de la OMM sobre el estado del clima mundial en 2019. OMM-No. 1248. ISBN 978-92-63-31248-8. 41p.
- Plazas, C., Falchetti, A.M., Sáenz, J. y Archila, S. (1993). *La sociedad hidráulica Zenú: Estudio arqueológico de 2000 años de historia en las llanuras del Caribe colombiano*. Banco de la República, Bogotá, Colombia. <https://doi.org/10.2307/971824>
- Pabón C.D., (2006). *El clima en Colombia durante los siglos XVI-XIX a partir de material histórico. Parte I: Inventario de fuentes de información*. Cuadernos de Geografía 15. 2006. ISSN: 0121-215X. Bogotá, Colombia. Pp. 75-91
- Parra S. L.N. (2005). *Análisis facial de alta resolución de sedimentos del Holoceno Tardío en el Páramo de Frontino, Antioquia*. Tesis de Doctorado en Biología. Universidad Nacional de Colombia, Sede Bogotá. 230p.
- Parra-S, L. N., Velásquez-R, C. y Rangel-CH, J. O., (2002). El agua fósil, un extraordinario indicador paleoambiental, *Memorias Congreso Mundial de Páramos*, pp. 170-175.
- Parra L. N. y M. T. Florez. 2001. *Propuesta de Clasificación Morfológica para los fitolitos en Colombia*. CODI, Universidad de Antioquia, Universidad Nacional. En *Revista Crónica Forestal*, Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín, pp.
- Piperno, D. 1988. *Phytolith Analysis. An Archaeological and Geological Perspectives*. London. Academic Press, Inc. 280p.
- Plazas, C., Falchetti A., Sáenz J. y Archila S. (1993). *La sociedad hidráulica Zenú. Estudio arqueológico de 2.000 años de historia en las llanuras del Caribe colombiano*. Banco de la República. Bogotá.
- Restrepo Correa A., (2003). *Estudio de reconstrucción de la historia de la flora del Bosque Seco Tropical En El Occidente medio de Antioquia, con base en el análisis e identificación del polen fósil depositado en sedimentos de la Cuenca de Santa Fe de Antioquia*. Programa Biodiversidad Para El Desarrollo. Proyecto Manejo y Conservación de Flora. Contrato No. 5018 de 2003. En: <https://repositorio.unal.edu.co/bitstream/handle/unal/58755/Din%C3%A1mica%20del%20clima%20y%20Version%205.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Ruddiman, W. F., (2008). *Los tres jinetes del cambio climático. Una historia milenaria del hombre y el clima*.
- Ruddiman, W.F. (2008). *Earth’s Climate: Past and future*. 2da Ed. W. H. Freeman. 465 p.
- Soil Survey Staff. (SSS). (2014). *Keys to Soil Taxonomy*, 12th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington, DC. 2018.
- Taylor, R.M. 1990. Some observations on the formation and transformation of iron oxides. pp. 85-104. In: De Boedt, M.F., M.H.B. Hayes y A. Herbillon (eds.). *Soil colloids and their associations in aggregates*. Plenum Press. New York