



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Caracterización geológica y cronológica de
sedimentos con icnofósiles en la Cuenca de
Sandia, Nor-oriente de México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geólogo

P R E S E N T A

Guillermo Vera Vera

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Priyadarsi Debajyoti Roy



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

AGRADECIMIENTOS ACADEMICOS

A mi director de tesis el Dr. Priyadarsi Debajyoti Roy por su apoyo, enseñanzas, paciencia y entrega para lograr un buen trabajo, agradezco su amistad, consejos y enseñanzas que hacen de mí una mejor persona y un mejor profesionalista. Agradezco todo el apoyo y comprensión que me ha ofrecido a lo largo de mi proceso de titulación.

También debo un agradecimiento a las personas que me acompañaron en el laboratorio y me dieron su apoyo durante este proceso: Ing. Alejandra Chávez, Ing. Cristina Passet e Ing. Nitzia Ceballos que me apoyaron en todo momento para poder lograr mis metas. Quiero hacer un especial agradecimiento al Dr. Jesús David Quiroz por su apoyo, consejos y su amistad que me ayudaron a seguir con mi proceso de titulación.

Al Quim. Rufino Lozano Santacruz por su disposición y apoyo en los análisis de Difracción de Rayos X en el Laboratorio de DRX del Instituto de Geología de la UNAM.

Al proyecto "Variabilidad climática en el nororiente de México desde el último máximo glacial y evaluación del efecto de alberca caliente del atlántico", financiado por DGAPA-PAPIIT número IN102217 y beca durante el proyecto de investigación y también al proyecto Conacyt CB-237579 titulado "Reconstrucción del Monzón Mexicano en escalas milenarias desde el penúltimo interglaciar en los subtrópicos de México: fuentes, forzamientos y distribución geográfica".

Por último, quiero agradecer a la Universidad Nacional Autónoma de México por haberme dado la oportunidad de formar parte de la comunidad estudiantil y desarrollarme como persona.

Agradecimientos Personales

Quiero dedicar esta tesis y darle un agradecimiento a mi familia, que siempre me ha dado su apoyo y cariño. Ellos que me han impulsado a seguir adelante y cumplir mis metas.

Quiero agradecer especialmente a mis padres, Claudia y Guillermo por su comprensión y su incansable apoyo para lograr mis objetivos, así como agradezco los sacrificios que han hecho para lograr darme lo que en verdad importa en la vida y la mejor herramienta para seguir adelante, mi educación.

También quiero agradecer a mis hermanos, Omar y Noemi, por su gran apoyo y compartirme sus experiencias para poder lograr mis objetivos. Dedico un especial agradecimiento a Paula Martínez Vela, por todos los años de apoyo incondicional que me dio durante la carrera y las enseñanzas que dio a mi vida, sin ella no lo habría podido lograr.

No quiero dejar de lado a todos aquellos amigos con los que compartir experiencias y formaron parte de mi desarrollo académico.

Este logro es de todos es gracias a ustedes y para ustedes, agradezco todo su apoyo y su impulso para seguir adelante.

Contenido

Resumen	8
Abstract	9
Capítulo I Introducción	10
Capítulo II Objetivos	12
II.1 Objetivo Principal	12
II.2 Objetivos particulares	12
Capítulo III Antecedentes	13
III.1 Ubicación del sitio	13
III.2 Geología	14
III.3 Clima	15
Capítulo IV Metodología	16
IV.1 Trabajo de campo	16
IV.2 Trabajo de laboratorio	17
IV.3 Análisis mineralógico	18
IV.4 Análisis de elementos mayores y trazas	19
IV.5 Análisis de Susceptibilidad Magnética	21
IV. 6 Análisis de carbono orgánico total (COT) y carbonato (CO ₃)	22
IV. 7 Control Cronológico	24
Capítulo V	25
Resultados	25
V. 1 Estratigrafía	25
V. 2 Mineralogía	27
V. 3 Cronología	29
V. 4 Susceptibilidad Magnética	31
V. 5 Concentraciones de Carbono Orgánico, Carbonato y Sulfato	34
V. 6 Elementos Mayores	38
Capítulo VI Discusión	42
Caracterización geológica	42
Caracterización cronológica	43

Reconstrucción Paleoambiental	44
Capítulo VII Conclusiones	48
Bibliografía	51

Lista de Figuras

Figura 1 Mapa de la ubicación del área de estudio en el nororiente de México, así como la ubicación del desierto de Chihuahua.....	13
Figura 2 La geología de la Cuenca de Sandia y la ubicación del sitio de muestreo (modificado del SGM).	14
Figura 3 Gráfica mostrando la precipitación y la temperatura media por mes entre 1951-2010 en la estación Matehuala. fuente: Servicio Meteorológico Nacional de México (http://smn.cna.gob.mx).	15
Figura 4 Fotografías del perfil de muestreo (A), sedimentos con icnofósiles en campo (B) e icnofósiles en el laboratorio (C).....	16
Figura 5 Mortero de ágata utilizado para moler y homogenizar las muestra de sedimentos colectado de la Cuenca de Sandia.	17
Figura 6 Difractómetro portátil marca olympus modelo terra 476 utilizado para la identificación de minerales carbonatados y evaporíticos en los sedimentos de la Cuenca de Sandia.	18
Figura 7 Fotografía de una muestra molida y seca en una cápsula de plástico para su análisis por FRX.....	19
Figura 8 Equipo de FRX de marca Thermo Scientific y modelo Niton FXL 950 utilizado para la análisis de elementos mayores y trazas de las muestras de la Cuenca de Sandia.....	20
Figura 9 Fotografía del sensor Bartington MS2E y estándar utilizados para la medición de susceptibilidad magnética de las muestras de Cuenca Sandia.....	21
Figura 10 Fotografía del equipo Thermo Scientific modelo HiPerTOC utilizado para la análisis de carbono orgánico y carbonatos.	22
Figura 11 Cápsula de cuarzo utilizado para la medición de carbono orgánico y carbonatos en las muestras.....	23
Figura 12 Sistema de análisis para medición de carbonato en el equipo de HiPerTOC.	23
Figura 13 Columna estratigráfica del perfil sedimentario de la Cuenca de Sandia, estado de Nuevo León.	26
Figura 14 Fotografía de los sedimentos de unidad 5 que presentan icnofósiles.	27
Figura 15 Un modelo de edad generado para el perfil sedimentario de la Cuenca de Sandia utilizado la edad calibrada en profundidad de 181-177 cm y asumiendo los sedimentos de superficie (0 cm) como moderno. La unidad estratigráfica con icnofósiles posiblemente fueron depositado entre 10,083 y 7408 cal. años aP.....	30
Figura 16 Variación de susceptibilidad magnética de los sedimentos de la columna colectado de la Cuenca de Sandia a lo largo de la profundidad.	32
Figura 17 Las concentraciones de carbonatos (CO_3), carbono orgánico total (COT) y sulfato (SO_4) en las muestras del perfil sedimentario de la cuenca de Sandia a lo largo de la profundidad.	36
Figura 18 Distribucion de los elementos mayores (Ca, K, Al, Si, Fe y Mn) en sedimentos de la columna colectado en la cuenca de Sandia a lo largo de la profundidad.....	41
Figura 19. Índices de aporte de cuarzo (Si/Al), aporte de minerales clásticos (Al/Ca), salinidad del cuerpo del agua (SO_4/CO_3), productividad orgánica (TOC/Al) y anoxia (Fe en carbonato) en la cuenca sandia.	46
Figura 20 Diagrama esquemático de estabilidad de diferentes productos sedimentarios en ambientes con variable pH y Eh (modificado de Krumbein y Garrels, 1952). El horizonte con icnofósiles posiblemente fue depositado en un ambiente anóxico con $\text{pH}>8$. (M.O.= materia orgánica)	47

Lista de Tablas

Tabla 1 Presencia y concentración de los minerales encontrados en sedimentos de diferentes unidades estratigráficas de la Cuenca de Sandia.	28
Tabla 2. El valor de análisis radiocarbono y fecha calibrada mediante calib 7.1 del carbono orgánico en un sedimento de la Cuenca de Sandia.	29
Tabla 3 Los Valores máximos, mínimos y promedio de la susceptibilidad magnética de los sedimentos en diferentes unidades estratigráficas del perfil colectado de la Cuenca de Sandia.	33
Tabla 4 Los Valores máximos, mínimos y promedio de las concentraciones de carbonatos (CO ₃), carbono orgánico total (COT) y sulfato (SO ₄) de los sedimentos en diferentes unidades estratigráficas del perfil colectado de la Cuenca de Sandia.	37
tabla 5. Concentración máximos, mínimos y promedio de los elementos mayores en sedimentos de diferentes unidad estratigráfica del perfil colectado de la Cuenca de sandia.	40

Resumen

La Sandia es una cuenca sedimentaria efímera y endorreica, ubicada en el estado de Nuevo León (México), en la parte occidental de la Sierra Madre Oriental. En una columna sedimentaria con longitud de 296 cm, excavada en la margen oriental de la cuenca, los sedimentos caracterizados por limo masivo de tono amarillo ubicados a una profundidad de 246-180 cm contienen icnofósiles. En este trabajo, se presenta la caracterización mineralógica, geoquímica y cronológica de los depósitos con icnofósiles y otros sedimentos a través de las concentraciones de carbono orgánico, carbonato y sulfato, así como las concentraciones de Si, Al, K, Ca, Fe y Mn. La información cronológica proviene del análisis radiocarbono en materia orgánica de sedimento ubicado en la profundidad de 181-177 cm (7431-7287 cal. año aP).

El perfil sedimentario representa al Holoceno y los sedimentos contienen abundante Ca (15.3-43.6%) asociado con la calcita y el yeso. Las concentraciones de elementos asociados con los silicatos y alumino-silicatos son Al: 0-1.5%; Si: 0.9-22.5%; Fe: 0-0.4%. La variación de salinidad del cuerpo de agua durante el Holoceno fue reconstruida con la relación sulfato/carbonato y las relaciones Si/Al y Al/Ca aporta información de la erosión y concentración de diferentes minerales clásticos en la cuenca. Los icnofósiles representan un ambiente sedimentario mayor a 7367 cal. año aP, posiblemente entre 10,083 y 7408 cal. año aP (Holoceno temprano-Holoceno medio). Menor concentración de sulfato (1.9-2.6%) en comparación con carbonato (42.5-57.9%) y mayor deposición de los silicatos (Si: 3.3-17.5%) y alumino-silicatos (Al: 0.2-1.2%) en el horizonte con icnofósiles representan un ambiente relativamente más húmedo con variación en las condiciones hidrológicas. La presencia de Fe y Mn en los carbonatos indican que los sedimentos con icnofósiles fueron depositados en un ambiente con condiciones reductoras.

Palabras claves: Geoquímica, Concentración elemental, Carbono orgánico, Sulfato/Carbonato, Holoceno, Cuenca sedimentaria, México.

Abstract

The Sandia is an ephemeral and endorreic basin and it is located at the western foothills of the Sierra Madre Occidental Mountains, in the state of Nuevo Leon (Mexico). In a 296 cm long sedimentary sequence collected from the eastern margin of the basin, the sediments comprising massive yellowish silt at depths between 246 and 180 cm contain ichnofossils. This thesis presents mineralogical, chemical and chronological characterization of the ichnofossil bearing sediments as well as other sediments, by estimating the abundances of organic carbon, carbonate, sulfate along with concentrations of Si, Al, K, Ca, Fe and Mn. A radiocarbon analysis of organic matter present in sediments at the depth of 181-177 cm (7431-7287 cal yr BP) provides chronological information of the sediment sequence.

The sediment profile was deposited over the Holocene and it contains abundant Ca (15.3-43.6%) associated with the calcite and gypsum. Concentrations of other elements associated with silicates and alumino-silicates are of lower abundance (Al: 0-1.5%; Si: 0.9-22.5%; Fe: 0-0.4%). Variation in salinity of the paleo-water column of this basin during the Holocene was reconstructed from sulfate/carbonate ratio and Si/Al and Al/Ca ratios provide information about the abundances of clastic minerals transported in the basin by erosion in the watershed. The ichnofossils represent an environment older than 7367 cal yr BP, possibly between 10,083 and 7408 cal yr BP (early Holocene-middle Holocene). Lower abundances of sulfate (1.9-2.6%) compared to the carbonate (42.5-57.9%) and higher concentrations of silicates (Si: 3.3-17.5%) and alumino-silicates (Al: 0.2-1.2%) in the ichnofossil-bearing-sediments represent a relatively humid environment with variable hydrological conditions. Presence of Fe and Mn in the carbonate indicates that the ichnofossil-bearing-sediments were deposited in an anoxic environment.

Keywords: Geochemistry, Elementary Concentration, Organic Carbon, Sulfate/Carbonate, Holocene, Sedimentary Basin, Mexico.

Capítulo I

Introducción

La sedimentología se define como el estudio del transporte y deposición de sedimentos (Leeder, 1999). Los depósitos sedimentarios son la acumulación de los sedimentos provocados por estos procesos, los cuales se depositan en cuencas sedimentarias. Las cuencas sedimentarias son depresiones donde se acumulan los sedimentos de tal forma que generan un registro de la evolución paleoambiental, paleoclimatología y paleogeografía (Miralles, 2010). Los sedimentos pueden ser estudiados por sus características mineralógicas, biológicas, físicas y químicas. La parte biológica se estudia con la presencia de polen, diatomea y ostrácodos (Chávez-Lara et al., 2012; Metcalfe et al., 2002). Las propiedades físicas pueden ser estudiadas a través de la textura y tamaño de las partículas, color y la propiedad magnética (Tovar y Cardozo 2010; Miralles 2010). La geoquímica es el estudio de la distribución de los elementos e isótopos en sedimentos, suelos y rocas depositados en la Tierra. En general, la geoquímica tiene diversas aplicaciones, las cuales van desde dataciones geocronológicas a diagénesis (Faure, 1998). En este contexto, la geoquímica de sedimentos es el estudio de las concentraciones de los elementos químicos en los ambientes sedimentarios. La composición química de los sedimentos se determina a partir del contenido de carbono orgánico y carbonatos, las concentraciones de los elementos mayores y trazas e isótopos estables (Curtis et al., 1977).

La presencia de fósiles ayuda a inferir las condiciones en cuales se desarrollaron estos organismos. Un icnofósil o pista fósil es el estudio de la icnología, la cual se encarga de los registros del comportamiento de los seres vivos (Vintaned y Liñán, 1996). El estudio de los icnofósiles no solo es la descripción del comportamiento de los seres vivos, también ayuda a interpretar las características geológicas y biológicas de los sedimentos (Frey y Seilacher, 1980). Varios estudios han demostrado las relaciones causales entre las asociaciones de icnofósiles y el cambio ambiental asociado con el Cuaternario tardío (Virtasalo et al., 2006). Los icnofósiles han servido para proponer análogos modernos de antiguos ambientes sedimentarios. En la Formación Chaya, en el sureste de las costas de la India, se encontraron icnofósiles del Holoceno en ambientes costeros y fueron utilizados para proponer análogos de las condiciones en que se encontraron al momento de su formación (Mude, 2011). Por otro lado, Lucas y Lerner (2008) usaron información de la especie que formó los icnofósiles del estuario ubicado en la parte sur del Nuevo México en depósitos correspondientes al Pérmico inferior. Estos fueron usados para interpretar las condiciones en las cuales habitaron los distintos tipos de especies que formaron los icnofósiles encontrados, de esta manera poder interpretar y proponer los

paleoambientes de estas zonas en el Pérmico inferior, interpretándose la evolución y transición de un ambiente no marino a un ambiente marino profundo. Todo esto gracias al registro icnofósiles que pudo demostrar el cambio en las especies, las cuales habitan en distintos ambientes cada una.

Es posible identificar las condiciones de depósito y climáticas en el pasado geológico utilizando las características biológica, física y química de los sedimentos como proxy de humedad (precipitación y evaporación), actividad eólica, procedencia de sedimentos clásticos y productividad de materia orgánica (Quiroz-Jimenez et al., 2017; Rivero Navarrete, 2013; Roy et al., 2012). En este trabajo se presentan las concentraciones de elementos mayores y las concentraciones de carbono orgánico, carbonato y sulfato de una secuencia sedimentaria depositado en una cuenca sedimentaria (paleo-lago) ubicado en la parte nororiente de México.

Capítulo II Objetivos

II.1 Objetivo Principal

El objetivo principal de este trabajo es la caracterización mineralógica, física, química, y cronológica de los sedimentos sub-superficiales con preservación de icnofósiles en la Cuenca de Sandia ubicada en la parte nororiente del México. La caracterización se realizó a través de las concentraciones de elementos mayores, concentraciones de carbono orgánico, carbonato y sulfato, así como susceptibilidad magnética y datación por radiocarbono.

II.2 Objetivos particulares

- Describir la columna estratigráfica y textura de sedimentos con y sin preservación de icnofósiles en el área de estudio.
- Estimar susceptibilidad magnética de las muestras en el perfil sedimentario.
- Analizar las concentraciones de elementos mayores en muestras del perfil sedimentario.
- Cuantificar las concentraciones de carbono orgánico, carbonato y sulfato en sedimentos del perfil.
- Asignar control cronológico al horizonte sedimentario con preservación de icnofósiles.
- Caracterizar las similitudes y diferencias entre propiedad geológicas de los sedimentos con icnofósiles y sin icnofósiles.
- Inferir las condiciones ambientales en las cuales se depositaron los sedimentos con icnofósiles.

Capítulo III Antecedentes

III.1 Ubicación del sitio



FIGURA 1 MAPA DE LA UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO EN EL NORORIENTE DE MÉXICO, ASÍ COMO LA UBICACIÓN DEL DESIERTO DE CHIHUAHUA.

El Desierto de Chihuahua es el desierto más grande de Norteamérica y extiende sobre los estados de Chihuahua, Durango, Coahuila, Zacatecas y San Luis Potosí en México, así como también parte de los estados de Texas, Nuevo México y Arizona en Estados Unidos (Palacios-Fest et al., 2002). Al este del desierto se encuentra la Sierra Madre Oriental y al oeste es la Sierra Madre Occidental. La Cuenca de Sandía se encuentra ubicada en la margen sur-oriental del desierto de

Chihuahua en el estado de Nuevo León (Figura 1), en el municipio de Aramberri en las coordenadas $24^{\circ}11'54.9996''$ Norte y $100^{\circ}04'30''$ Oeste con una elevación de 1585 msnm. Esta cuenca se encuentra ubicada a los pies occidental de la Sierra Madre Oriental y tiene una extensión aproximada de 663 km^2 de área, midiendo un ancho de 15km y un largo de 44 km

III.2 Geología

La cuenca está rodeada por calizas con lutitas del Cretácico Superior que sobreyace en discordancia a calizas del Cretácico Medio (Figura 2). También se presentan pequeños afloramientos de calizas con lutitas con edades del Cretácico Inferior que sobreyacen concordantemente a calizas del Cretácico Medio, de la misma manera se encuentra concordante con el cambio de facie de las calizas del Cretácico Medio de composición caliza con lutitas. La parte central de la cuenca tiene depósitos lacustres del Paleógeno, Neógeno y Cuaternario. Los depósitos de conglomerados del Neógeno están presentes en las márgenes de la cuenca (Fuente: Servicio Geológico Mexicano).

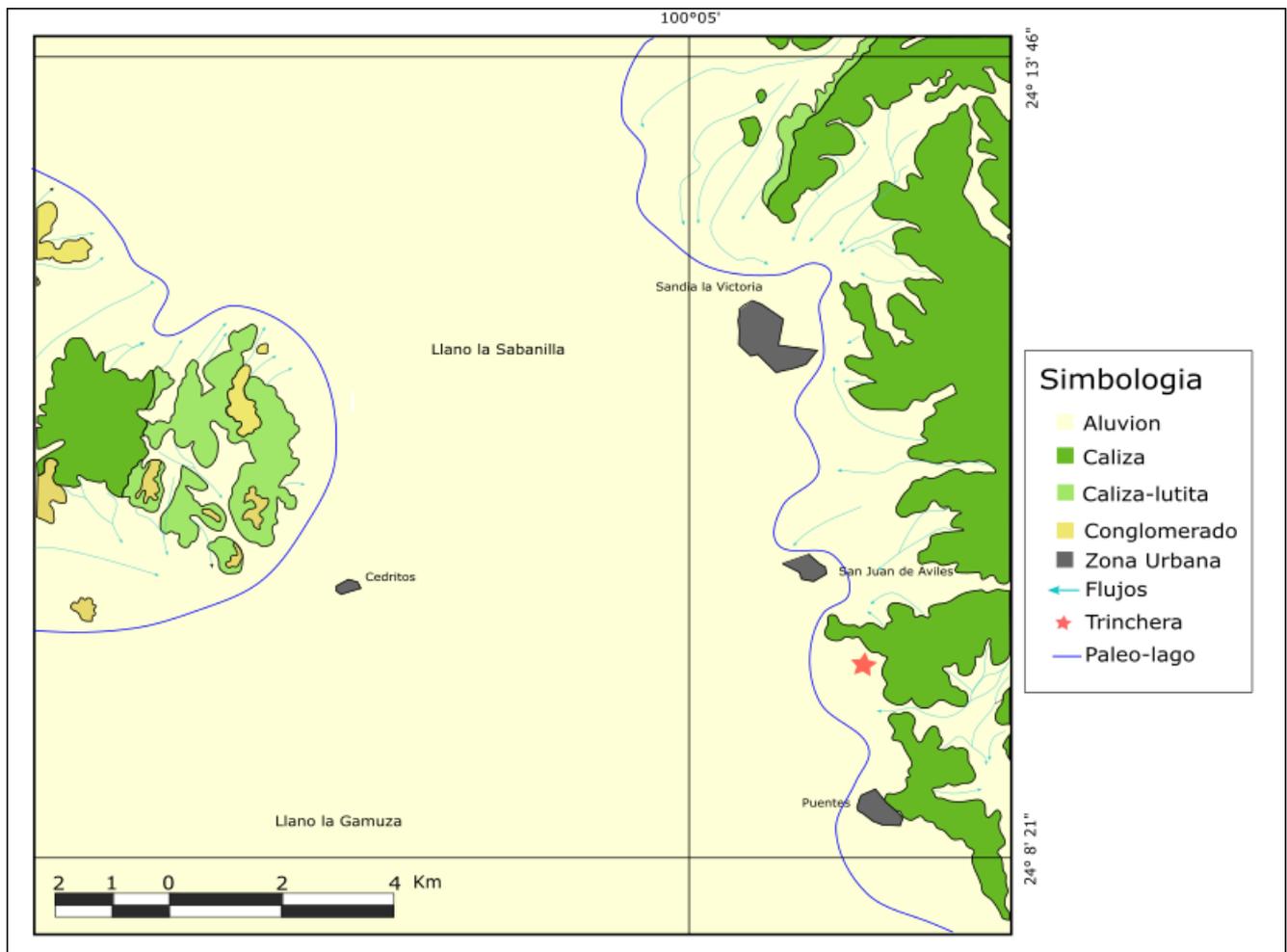


FIGURA 2 LA GEOLOGÍA DE LA CUENCA DE SANDÍA Y LA UBICACIÓN DEL SITIO DE MUESTREO (MODIFICADO DEL SGM).

III.3 Clima

Los datos meteorológicos del periodo entre 1951 y 2010 de la estación ubicado en la ciudad de Matehuala define la condición climática de la cuenca (Figura 3). La cuenca recibió una precipitación anual de 390.9 mm y la temperatura media fue de 20.5 °C durante ese periodo. Los meses de mayo, junio, julio, agosto y septiembre fueron el intervalo de mayor precipitación, así mismo los meses entre mayo y septiembre fueron de mayores temperaturas.

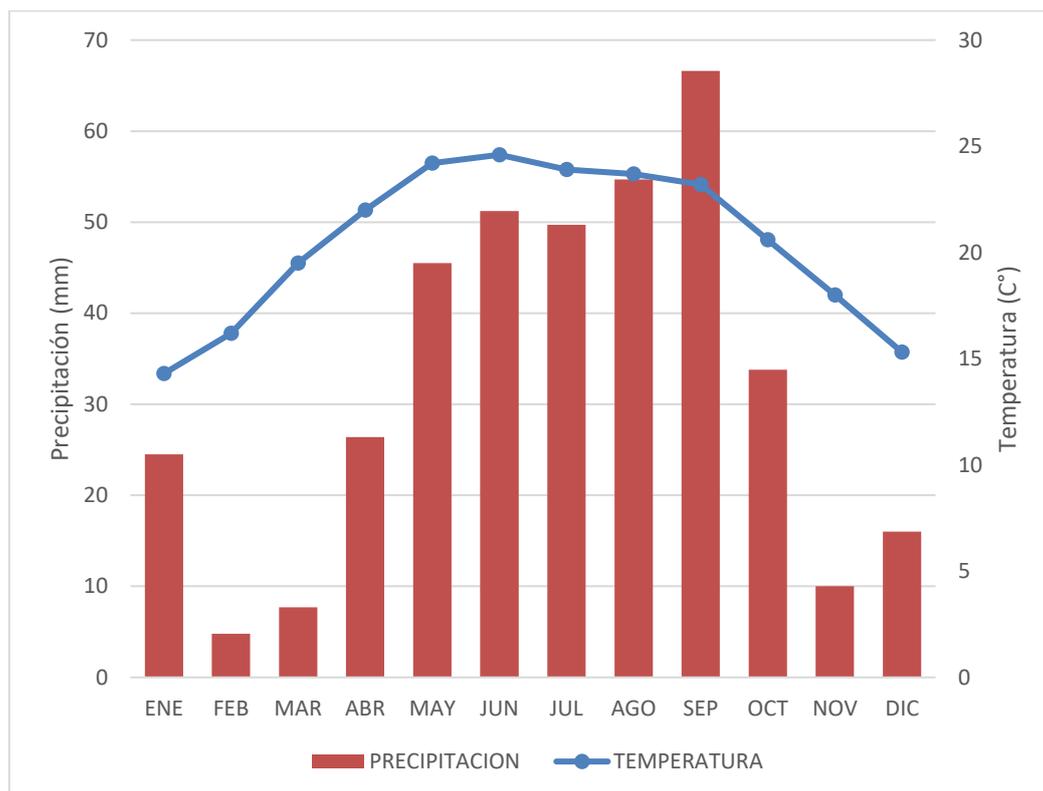


FIGURA 3 GRÁFICA MOSTRANDO LA PRECIPITACIÓN Y LA TEMPERATURA MEDIA POR MES ENTRE 1951-2010 EN LA ESTACIÓN MATEHUALA. FUENTE: SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO ([HTTP://SMN.CNA.GOB.MX](http://smn.cna.gob.mx)).

Capítulo IV Metodología

IV.1 Trabajo de campo

Se realizó la excavación de una trinchera en la margen oriental de la Cuenca de Sandia con coordenadas 24°09'42.2" Norte y 100°04'08.6" Oeste con una altitud de 1569 msnm. La trinchera excavada conto con una profundidad de 3 m. Posteriormente, se realizó la limpieza del perfil vertical usando unas de las caras de la trinchera para proceder al muestreo de sedimento de los horizontes que componen esta secuencia.



FIGURA 4 FOTOGRAFÍAS DEL PERFIL DE MUESTREO (A), SEDIMENTOS CON ICNOFÓSILES EN CAMPO (B) E ICNOFÓSILES EN EL LABORATORIO (C).

El muestreo constituyó la recolección de sedimentos con un espesor de 2 cm en intervalos de cada 5 cm, es decir que se tomaron muestras de 0-2 cm posteriormente de 5-7 cm, de 10-12 cm y así

sucesivamente hasta obtener muestras a una profundidad de 296 cm (Figura 4). Este muestreo se realizó con el apoyo de dos espátulas metálicas insertadas una en la profundidad inicial de la muestra y otra en la profundidad final. El material contenido entre las espátulas fue colocado en bolsas plásticas con cierre hermético y con la respectiva etiqueta de profundidad. Las muestras obtenidas fueron almacenadas y trasladadas al Laboratorio de Paleoambientes y Paleoclimas del Instituto de Geología (UNAM) ubicado en CDMX donde fueron almacenadas en congeladores para evitar alteraciones.

IV.2 Trabajo de laboratorio

Las muestras obtenidas en campo fueron procesadas para su posterior análisis geoquímico y de susceptibilidad magnética. Esto consistió en un proceso de secado y molienda. Se colocaron alrededor de 10g de muestras en vasos precipitados, cada uno rotulado con el respectivo código de la muestra, en un horno calentado a 50°C durante 24 horas. Al concluir con este tiempo, las muestras sacadas fueron sometidas a un proceso de molienda utilizando un mortero de ágata (Figura 5). Este proceso se realiza con el objetivo de tener una muestra homogénea. El proceso de moler se realizó manualmente hasta obtener granos de tamaños cercanos a arcillas. La muestra molida fue colocada en bolsas herméticas rotuladas con el código de la muestra y almacenadas en refrigeración hasta el término del procesamiento de toda la secuencia.



FIGURA 5 MORTERO DE ÁGATA UTILIZADO PARA MOLER Y HOMOGENIZAR LAS MUESTRA DE SEDIMENTOS COLECTADO DE LA CUENCA DE SANDIA.

IV.3 Análisis mineralógico

Los minerales presentes fueron identificados en 7 diferentes muestras de sedimentos mediante un Difractómetro de rayos X (DRX) portátil de marca Olympus modelo Terra 476 (Figura 6) ubicado en el laboratorio de Fluorescencia de Rayos X del Instituto de Geología (UNAM). La Difracción de Rayos X permite la identificación mineral debido a que los minerales son cristalinos y la distribución regular en el espacio de sus componentes se describe por medio de las redes cristalinas que manifiestan la repetición periódica de la celda del mineral. El equipo utilizado tiene fuente de radiación de cobalto y los datos se adquirieron después de veinticinco ciclos cada treinta segundos para evitar el ruido en los difractogramas. Para este análisis se requieren 60mg de muestra con un tamaño de $120\mu\text{m}$, y otros aditivos no son necesarios. Este es un método no destructivo y la muestra se puede reutilizar para otros análisis mineralógicos y geoquímicos. Con este equipo se pueden detectar minerales con una concentración $> 5\%$.



FIGURA 6 DIFRACTÓMETRO PORTÁTIL MARCA OLYMPUS MODELO TERRA 476 UTILIZADO PARA LA IDENTIFICACIÓN DE MINERALES CARBONATADOS Y EVAPORITICOS EN LOS SEDIMENTOS DE LA CUENCA DE SANDIA.

IV.4 Análisis de elementos mayores y trazas

Las concentraciones de 7 diferentes elementos mayores (Si, K, Ca, Fe, Mn, Al y S) en 53 muestras fueron analizados por un equipo de fluorescencia de rayos X (FRX) de marca Thermo Scientific y modelo Nitón FXL 950 en el laboratorio de Paleoambientes y Paleoclimas del Instituto de Geología (UNAM). El equipo usado es un ED-XRF que cuenta con un tubo de rayos X de 50kV hecho de Ag y un detector optimizado geoméricamente (GOLDD). Este análisis ocupó una preparación no destructiva y la preparación consistió en colocar la muestra en una capsula plástica tapada en una de sus caras con película de polipropileno de TF-240-255 con un espesor de 4 μ m. Se colocó muestras de tal cantidad (aproximadamente 10g) para lograr cubrir toda la superficie de la película de polipropileno (Figura 7). Posteriormente, un filtro de celulosa fue colocado y sobre este se coloca un relleno de guata, este último es un material textil de relleno formado principalmente por filamentos de algodón, para cerrar la capsula y quedar totalmente sellada. Esta cápsula se rotuló con su respectivo código y se almacenó hasta tener todas las muestras preparadas de esta manera. El almacenamiento se realizó de manera cuidadosa, de tal manera que no se tocara con ningún medio la parte expuesta de la película, esto con la intención de no contaminar y tener mejores lecturas al momento del análisis.



FIGURA 7 FOTOGRAFÍA DE UNA MUESTRA MOLIDA Y SECA EN UNA CÁPSULA DE PLÁSTICO PARA SU ANÁLISIS POR FRX.

Para el análisis de las muestras, se usó el protocolo Mina Cu/Zn del equipo Niton FXL 950 (Figura 8). Este protocolo es capaz de medir las concentraciones de al menos 42 elementos. Cada muestra fue analizada por 4 minutos y la medición fue dividida en 4 filtros (principal, alta, baja y gama ligera). Durante el proceso se realizó el análisis de un estándar USGS SdAR-M2, el cual fue creado por United States Geological Survey (USGS). Se midió el estándar tras haber medido diez muestras. Esto se realizó con el objetivo de lograr una calibración del equipo y poder observar la precisión y exactitud del equipo y poder aplicar una corrección si esta fuera necesaria.



FIGURA 8 EQUIPO DE FRX DE MARCA THERMO SCIENTIFIC Y MODELO NITON FXL 950 UTILIZADO PARA LA ANÁLISIS DE ELEMENTOS MAYORES Y TRAZAS DE LAS MUESTRAS DE LA CUENCA DE SANDIA.

IV.5 Análisis de Susceptibilidad Magnética

Se realizó el análisis de susceptibilidad magnética de las 53 muestras utilizando un sensor de la marca bartington y modelo MS2E (Figura 9). El sensor cuenta con una resolución de 2×10^{-6} SI. Esta mediación se realizó sobre las cápsulas en las que fueron empacada las muestras para la medición de fluorescencia de rayos X y utilizando la cara que contaba con la película expuesta. Las mediciones se realizaron sobre una mesa de madera con la intención de evitar interferencias con materiales ferromagnéticos.



FIGURA 9 FOTOGRAFÍA DEL SENSOR BARTINGTON MS2E Y ESTÁNDAR UTILIZADOS PARA LA MEDICIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DE LAS MUESTRAS DE CUENCA SANDIA.

Tras haber concluido con las mediciones de susceptibilidad magnética se abrieron las cápsulas en las cuales se encontraban empaquetadas las muestras, esto se realizó de tal forma que se pudiera recuperar la muestra contenida en estas en la mayor cantidad posible para lograr los posteriores análisis de carbono orgánico y carbonato en la misma muestra. La muestra recuperada se colocó con las bolsas que correspondientes a cada muestra que se habían almacenado previamente.

IV. 6 Análisis de carbono orgánico total (COT) y carbonato (CO₃)

Las concentraciones de carbono orgánico total (COT) y carbonato (CO₃) fueron estimados en 53 muestras en un equipo de marca Thermo Scientific modelo HiPerTOC (Figura 10). El análisis fue dividido en dos diferentes partes: se analizó el contenido de carbono total por la combustión de muestras a una temperatura de 980 °C y posteriormente se estimó la concentración de carbonato (CO₃) tratando la muestra con ácido fosfórico. El contenido de carbono orgánico total (COT) fue estimado de la diferencia entre carbono total y carbono inorgánico presente en los carbonatos.

Para la estimación de carbono total, se colocó alrededor de 10mg de muestra molida y seca en una cápsula de cuarzo (Figura 11). Esta capsula se colocó en el horno del equipo que realizó la combustión de la muestra a una temperatura de 980°C. El equipo realizó la ignición de la muestra de manera progresiva de tal forma que realizara la medición del dióxido de carbono total emitido por la muestra, esto se mide gracias al acarreo de este gas generado en la cámara de combustión con el uso de un flujo de oxígeno que lo transporta a un detector de infrarrojo. Las mediciones que realiza el equipo fueron calibrados a través del software ThEuS y curvas de calibración realiza una conversión de el volumen de dióxido de carbono a masa de carbono. Este método de incineración estima la medición del carbono total contenido en las muestras, ya que al incinerar la muestra se libera tanto el dióxido de carbono contenido en la materia orgánica, como el que se encuentra contenido en los carbonatos.



FIGURA 10 FOTOGRAFÍA DEL EQUIPO THERMO SCIENTIFIC MODELO HIPERTOUC UTILIZADO PARA LA ANÁLISIS DE CARBONO ORGÁNICO Y CARBONATOS.



FIGURA 11 CÁPSULA DE CUARZO UTILIZADO PARA LA MEDICIÓN DE CARBONO ORGÁNICO Y CARBONATOS EN LAS MUESTRAS.

El contenido de carbonato se estimó a temperatura ambiente tratando aproximadamente 10mg de muestra molida y seca con 10% ácido fosfórico. De esta manera, el carbono inorgánico que pertenece a los carbonatos se libera y esta analizado en los detectores de infrarrojo. Para el análisis, la muestra fue colocado en una cámara especial de vidrio en una capsula de cuarzo y la cámara se encuentra sellada y el flujo de oxígeno sirve como medio de acarreo para el dióxido de carbono emitido por la muestra (Figura 12). Se deja fluir el oxígeno, de tal manera que se elimine el dióxido de carbono introducido al cilindro proveniente del medio ambiente, después de determinado tiempo se comienza a introducir con una jeringa ácido fosfórico, de esta manera comienzan a reaccionar los carbonatos emitiendo el dióxido de carbono contenido en estos. Estos son acarreados por el oxígeno, y al igual que en el método anterior son medidos y procesados por el equipo. Al final del análisis, se obtuvo la concentración de carbono inorgánico total en la muestra.

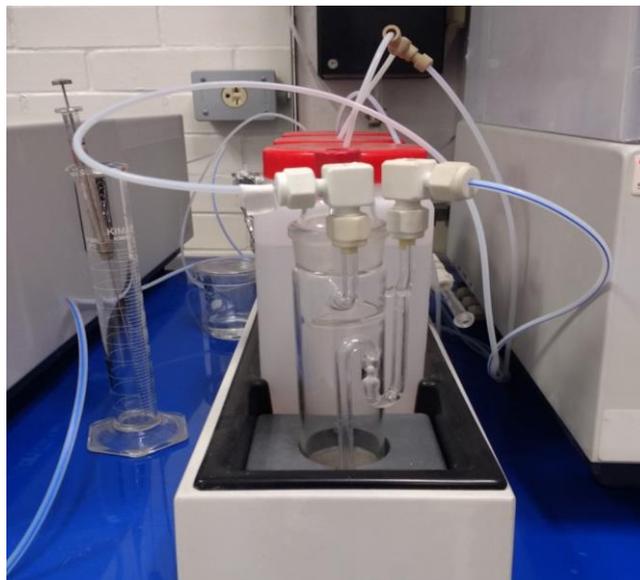


FIGURA 12 SISTEMA DE ANÁLISIS PARA MEDICIÓN DE CARBONATO EN EL EQUIPO DE HiPerTOC.

IV. 7 Control Cronológico

Se envió una muestra de sedimento total ubicado en la profundidad de 181-177cm (donde se encontraron icnofósiles) para análisis de radiocarbono (^{14}C) en el carbono orgánico preservado en la muestra sedimentaria. Este análisis se realizó en el laboratorio comercial de International Chemical Analysis en Florida (EUA) y con base en el decaimiento del isotopo radiogénico del carbono se obtuvo un control cronológico de los sedimentos.

Capítulo V Resultados

V. 1 Estratigrafía

La trinchera realizada esta constituida por 6 unidades estratigráficas a lo largo de los 296 cm de longitud (Figura 13). Estas unidades fueron divididas principalmente por los cambios en la textura y el color, así como en los cambios en el contenido de icnofósiles.

La división de las unidades se concluyó de la siguiente manera:

Unidad A (296-245 cm): Los sedimentos de esta unidad se encuentran compuestos por limos arcillosos de tono amarillo, el cual se encuentra en contacto gradual con la unidad superior.

Unidad B (245-180 cm): La unidad contiene sedimentos con una matriz limosa de tonos amarillos con icnofósiles (Figura 14). Los icnofósiles tienen distribuciones horizontales y verticales al respecto de los horizontes sedimentarios. Las longitudes de los icnofósiles varían entre 10 y 15cm.

Unidad C (180-110 cm): Esta unidad se encuentra compuesta de manera masiva por limo-arcilla calcáreas de tonos ligeramente rosados. Se encuentra cambios graduales de manera irregular con la unidad superior y cuenta con la presencia de un horizonte localizado en la profundidad de 175-170cm que contiene materia orgánica de forma lenticular con un largo aproximado de 65cm.

Unidad D (110-38 cm): Esta unidad tiene una composición masiva de limo-arena con un color ligeramente amarillento, la cual presenta nódulos de carbonatos y se encuentra, al igual que la anterior, con una transición gradual con la unidad superior.

Unidad E (38-13.5 cm): Los sedimentos de esta unidad se encuentra compuesta por limo calcáreo que presenta un ligero tono rosado, se encuentra en un cambio gradual con la unidad superior. Esta se encuentra de manera masiva y sin presencia de raíces.

Unidad F (13.5-0 cm): La unidad superficial del perfil se encuentran compuestos por limos de color gris oscuro. Los sedimentos son de carácter masivo con alto contenido en materia orgánica, así como la presencia de gran cantidad de los restos de raíces.

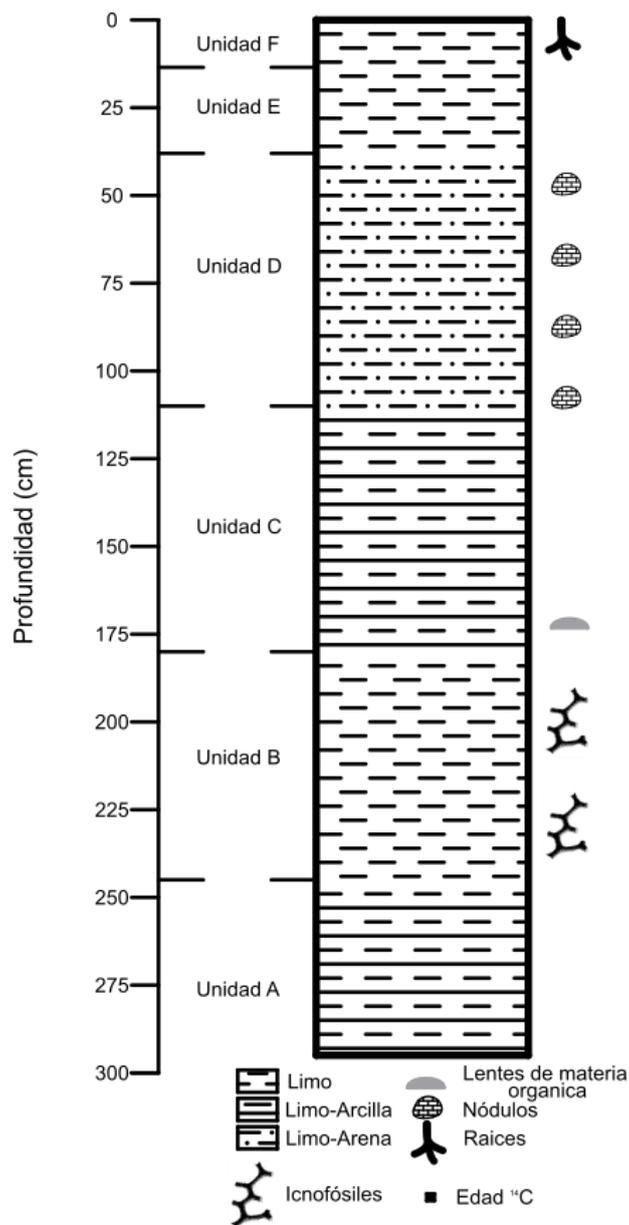


FIGURA 13 COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DEL PERFIL SEDIMENTARIO DE LA CUENCA DE SANDIA, EN EL NE DEL ESTADO DE NUEVO LEÓN.



FIGURA 14 FOTOGRAFÍA DE LOS SEDIMENTOS DE UNIDAD 5 QUE PRESENTAN ICNOFÓSILES.

V. 2 Mineralogía

Los sedimentos están compuestos por minerales detríticos (silicatos y aluminosilicatos) y autigénicos como carbonatos y sulfatos. No se identificaron minerales detríticos mediante DRX, por lo cual se propone que las concentraciones de los silicatos y aluminosilicatos fueron menores al 5% o nulo. Los minerales autigénicos están representados por calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) y yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$). La mayor abundancia de dolomita y yeso es en los sedimentos de las unidades más superficiales, mientras que en la parte más profunda la mayor ocurrencia es de calcita (Tabla 1).

A continuación, se enlistan las unidades sedimentarias del perfil medido, de lo más profundo a lo más somero:

Unidad A (296-245 cm): La muestra en profundidad de 262-260 cm tiene solo calcita (100% de concentración) y no se observó presencia de ningún otro mineral.

Unidad B (245-180 cm): La caracterización mineralógica de esta unidad se determinó a través del análisis mineralógico en dos muestras con profundidades de 197-195 cm y 232-230 cm. En ambas muestras se observó, al igual que la muestra de la unidad 6, solamente calcita (100% de concentración).

Unidad C (180-110 cm): El contenido mineralógico de la unidad estratigráfica fue caracterizado con el análisis en una muestra en la profundidad de 167-165 cm. Calcita fue el único mineral encontrado en la muestra.

Unidad D (110-38 cm): La muestra con profundidad 70-72 cm fue usada para caracterizar los sedimentos de esta unidad, la cual está compuesta por 100% de yeso.

Unidad E (38-13.5 cm): La identificación y semi-cuantificación de minerales de la unidad 2 fue mediante el análisis mineralógico de la muestra con profundidad de 27-25 cm. Los sedimentos están compuestos totalmente por yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$).

Unidad F (13.5-0 cm): A partir de la muestra tomada con profundidad de 7-5 cm, se caracterizó la propiedad mineralógica de sedimentos de la unidad 1. La muestra está principalmente constituida por yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) con una concentración de 88% y en menores contenido de calcita (CaCO_3) y dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) con concentraciones de 5% y un 6%, respectivamente.

TABLA 1 PRESENCIA Y CONCENTRACIÓN DE LOS MINERALES ENCONTRADOS EN SEDIMENTOS DE DIFERENTES UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS DE LA CUENCA DE SANDIA.

Unidad estratigráfica	Clave de muestra	Profundidad	Mineral (composición química): concentración
F (13.5-0 cm)	San3 5-7	7-5 cm	yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): 88% dolomita($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$): 6% calcita (CaCO_3): 5%
E (38-13.5 cm)	San3 25-27	27-25 cm	yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): 100%
D (110-38 cm)	San3 70-72	70-72 cm	yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$): 100%
C (180-110 cm)	San3 165-167	167-165 cm	calcita(CaCO_3): 100%
B (245-180 cm)	San3 195-197 San3 230-235	197-195 cm 232-230 cm	calcita(CaCO_3): 100% calcita(CaCO_3): 100%
A (296-245 cm)	San3 260-262	262-260 cm	calcita(CaCO_3): 100%

V. 3 Cronología

El análisis por radiocarbono de la muestra tomada en profundidad 181-177 cm (San3 177-181), con clave de laboratorio 1605/0418, arrojó una edad de 6450 ± 40 años aP y -23.9 ‰ de $\delta^{13}\text{C}$ (Tabla 2). La edad tradicional fue calibrada utilizando la curva de intcal 13 en el software de Calib 7.10 (Reimer et al., 2013; Stuiver et al., 2017) a la edad del calendario (0 cal. año aP = 1950 AD). La edad calibrada se encuentra entre el rango de 7431-7287 cal. año aP y con una probabilidad media en la edad 7367 cal. año aP. Para la generación de un modelo de edad para la columna sedimentaria, se asumió que la muestra superficial (profundidad 0 cm) representa el ambiente moderno y se calculó la tasa de sedimentación considerando que los sedimentos de 181-177 cm de profundidad fueron depositados hace 7367 años. Con base en estos datos obtenidos, se asume una tasa de sedimentación constante a lo largo del perfil sedimentario (lo cual actualmente es una estimación conservadora). La tasa de sedimentación fue 0.024 cm/año. Se extrapolo usando esta tasa de sedimentación y logró definir una posible edad de los sedimentos depositados en la parte basal de la columna sedimentaria (296 cm = 12,017 cal. año aP). Así mismo, la unidad estratigráfica D con presencia de icnofósiles posiblemente fueron depositados entre 10,083 y 7408 cal. años aP (Figura 15).

TABLA 2. EL VALOR DE ANÁLISIS RADIOCARBONO Y FECHA CALIBRADA MEDIANTE CALIB 7.1 DEL CARBONO ORGÁNICO EN UN SEDIMENTO DE LA CUENCA DE SANDIA.

Muestra	Profundidad	Clave del laboratorio	Edad ^{14}C	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	Edad Calibrada (aP)
San3 177-181	177-181	1605/0418	6450+40	-23.9	7287-7431



FIGURA 15 UN MODELO DE EDAD GENERADO PARA EL PERFIL SEDIMENTARIO DE LA CUENCA DE SANDIA UTILIZADO LA EDAD CALIBRADA EN PROFUNDIDAD DE 181-177 CM Y ASUMIENDO LOS SEDIMENTOS DE SUPERFICIE (0 CM) COMO MODERNO. LA UNIDAD ESTRATIGRÁFICA CON ICNOFÓSILES POSIBLEMENTE FUERON DEPOSITADO ENTRE 10,083 Y 7408 CAL. AÑOS AP

V. 4 Susceptibilidad Magnética

La susceptibilidad magnética de los sedimentos del perfil varía entre 24×10^{-5} y -0.99×10^{-5} SI (

Tabla 3). El valor promedio de la susceptibilidad magnética de los sedimentos de la columna es de 0.97×10^{-5} SI (Figura 16). En general, los sedimentos muestran valores negativos debido que los minerales diamagnéticos (calcita, dolomita y yeso) están presentes con mayor concentración y los minerales paramagnéticos y ferromagnéticos están en cantidades trazas. Los sedimentos con valores positivos de susceptibilidad magnética tienen relativamente mayores concentraciones de minerales paramagnéticos y ferromagnéticos (no detectado en DRX). Los valores de susceptibilidad magnética más altos se encontraron en sedimentos de la unidad en las profundidades de 6 cm (24×10^{-5} SI) y 1 cm (22.4×10^{-5} SI), respectivamente. Los valores más bajos se encuentran en sedimentos de la unidad A y la unidad D en las profundidades de 251 cm (-0.87×10^{-5} SI) y 106 (-0.99×10^{-5} SI) cm, respectivamente.

Unidad A (296-245 cm): Los sedimentos de esta unidad tienen valores generalmente inferiores al promedio y en su parte inferior se vuelven superiores a este. Los valores varían entre 0.31×10^{-5} y -0.87×10^{-5} SI y el valor promedio es de -0.26×10^{-5} SI.

Unidad B (245-180 cm): Esta unidad cuenta con valores cercanos al promedio general. Sin embargo, los sedimentos tienen susceptibilidad magnética que se encuentran tanto en los valores más bajos y más altos (sin contar los valores de la unidad F). Los valores varían entre 0.43×10^{-5} y -0.71×10^{-5} SI, así como el promedio es de -1.21×10^{-6} SI.

Unidad C (180-110 cm): Esta unidad presenta valores cercanos al promedio. Sin embargo, los sedimentos de la profundidad 122-126 cm presentan valores altos, sus valores varían entre 0.66×10^{-5} y -0.57×10^{-5} SI. El valor de susceptibilidad magnética promedio de la unidad es de -0.05×10^{-5} SI.

Unidad D (110-38 cm): Los sedimentos presentan valores generalmente abajo del promedio y valores más bajos en la columna. Esta unidad cuenta con susceptibilidad magnética entre 0.51×10^{-5} y -0.99×10^{-5} SI con el promedio de -0.29×10^{-5} SI.

Unidad F (38-13.5 cm): Los sedimentos de esta unidad cuentan valores entre 9.55×10^{-5} y -0.36×10^{-5} SI y un valor promedio de 2.24×10^{-5} SI.

Unidad F (13.5-0 cm): Esta unidad cuenta con una susceptibilidad magnética promedio de 23.2×10^{-5} SI. Sedimentos de esta unidad tiene el valor más alto en toda la columna. Por ejemplo, la muestra de

la profundidad 1 cm muestra susceptibilidad magnética de 24×10^{-5} SI y la muestra de 6 cm tiene un valor de 22.3×10^{-5} SI.

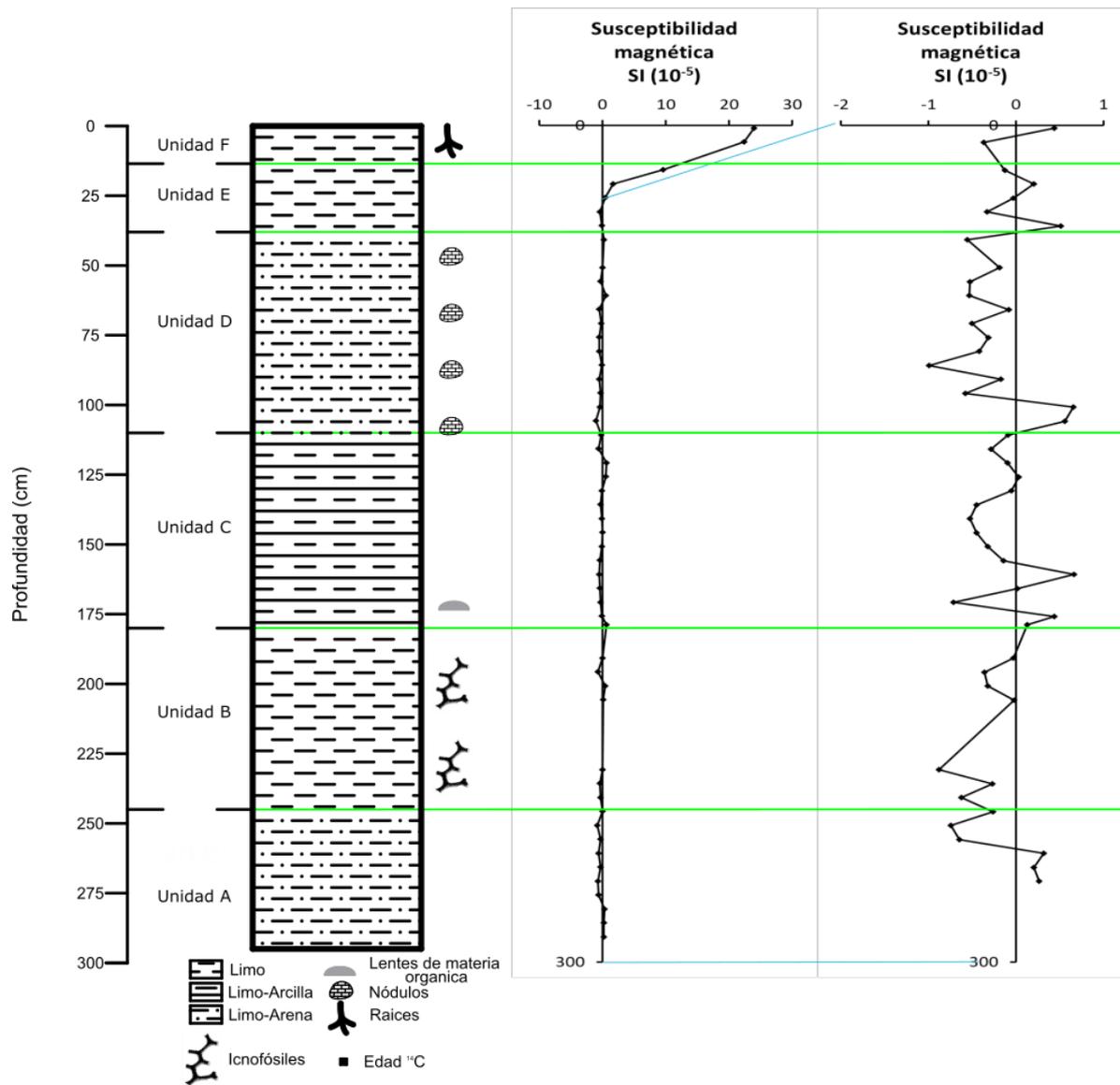


FIGURA 16 VARIACIÓN DE SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DE LOS SEDIMENTOS DE LA COLUMNA COLECTADO DE LA CUENCA DE SANDIA A LO LARGO DE LA PROFUNDIDAD.

TABLA 3 LOS VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE LA SUSCEPTIBILIDAD MAGNÉTICA DE LOS SEDIMENTOS EN DIFERENTES UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS DEL PERFIL COLECTADO DE LA CUENCA DE SANDIA.

Unidad	No. de muestras	Susceptibilidad Magnética (10^{-5} SI)		
		Mínimo	Máximo	Promedio
F	2	22.39	24.01	23.20
E	5	-0.37	9.55	2.24
D	13	-0.99	0.51	-0.29
C	15	-0.58	0.66	-0.06
B	7	-0.71	0.44	-0.12
A	10	-0.88	0.32	-0.27
General	52	-0.99	24.01	0.97

V. 5 Concentraciones de Carbono Orgánico, Carbonato y Sulfato

La concentración de carbono orgánico total (COT) varía entre 3.73% y 0% con un promedio de 0.7% (Figura 17). Sedimentos de la unidad F muestran mayores contenidos de COT (3.73-1.63%) y los sedimentos de las unidades A y B presentan valores menores (2.08-0%). Algunas muestras de las unidades A y B presentan valores nulos (p.ej. sedimentos en las profundidades de 171 cm, 206 cm, 246 cm). Por otro lado, la concentración de los carbonatos (CO_3) fluctúa entre 65.65-1.1 % con el promedio de 27.35%. Los sedimentos de las unidades más superficiales (D, E, F) presentan los valores más bajos (3.95-1.1%) y los más altos (65.65-30.5%) están en los sedimentos de las tres unidades más profundas (A, B, C). Se observa un cambio en la concentración de CO_3 abrupto en el límite de la unidad C y unidad D. Así mismo, el contenido de sulfato (SO_4) presenta una distribución inversa al carbonato. La concentración de SO_4 varía entre 86.36-1.19% con el promedio de 33.73% (Figura 17). Los valores altos (86.36-39.33%) están en los sedimentos de las tres unidades superficiales (D, E y F) y valores bajos y homogéneos (4.73-1,19%) están en los sedimentos de las unidades más profundas (A, B y C).

Unidad A (296-245 cm): Las concentraciones de COT varían entre 2.08 % y 0 %, con un promedio de 0.56 %. Las muestras de esta unidad presentan gran variabilidad en el contenido de carbono orgánico y en varios intervalos la concentración de COT es nula. El contenido de CO_3 fluctúan entre 65.65 % y 30.58 % con un promedio de 48.12 %. Por otro lado, los sedimentos presentan un comportamiento homogéneo en la concentración de los SO_4 con valores bajos que van desde 2.03 a 1.19 %, con un promedio de 1.65%.

Unidad B (245-180 cm): Los sedimentos de esta unidad presentan concentraciones de COT generalmente bajas entre 1.74% y 0%, con promedio de 0.35%. La concentración de CO_3 es generalmente alto (57.96- 45.37%, con promedio de 50.82%). Al igual que la unidad 6, el contenido de SO_4 es bajo y homogéneo, teniendo una concentración entre 2.27% y 1.9% (promedio= 2.10%).

Unidad C (180-110 cm): La concentración de COT muestra gran oscilación, con valores altos y algunos con nulos. COT varía entre 1.92% y 0 %, con un promedio de 0.93%. La concentración de carbonato varía entre 58.06 y 2.20%, con un promedio de 34.45%. La concentración de SO_4 presenta un enriquecimiento drástico hacia la unidad 3 dando valores de concentración entre 83.74% y 1.83%, con un promedio de 16.54%.

Unidad D (110-38 cm): El COT varía entre 1.32% y 0.32 %, con un valor promedio de 0.92%. El contenido de CO₃ es 3.90- 1.25 %, con un valor promedio de 2.45%. La concentración de sulfatos es bastante uniforme con los valores más altos en toda la columna que varían de 86.36 a 77.63 % con un valor promedio de 80.63%.

Unidad E (38-13.5 cm): El COT varía entre 0.95 y 0.23 %, con un valor promedio de 0.55%. La concentración de CO₃ está bajo y uniforme, variando desde 3.50% al 1.10% (promedio=1.90%). Los valores de SO₄ son altos y varían entre 81.70% y 64.08% (promedio de 76.28%).

Unidad F (13.5-0 cm): El contenido de COT es alto en las muestras de superficie y la concentración disminuyen con la profundidad. La concentración de COT varía entre 3.73% y 1.63% con un promedio de 2.68%. Los sedimentos de esta unidad presentan baja concentración de CO₃, las cuales varían entre 3.95% y 1.30%, con un promedio de 2.62%. Los sedimentos de esta unidad presentan mayor concentración de SO₄ y los valores varían entre 49.98% y 39.33%, con el promedio de 44.65%.

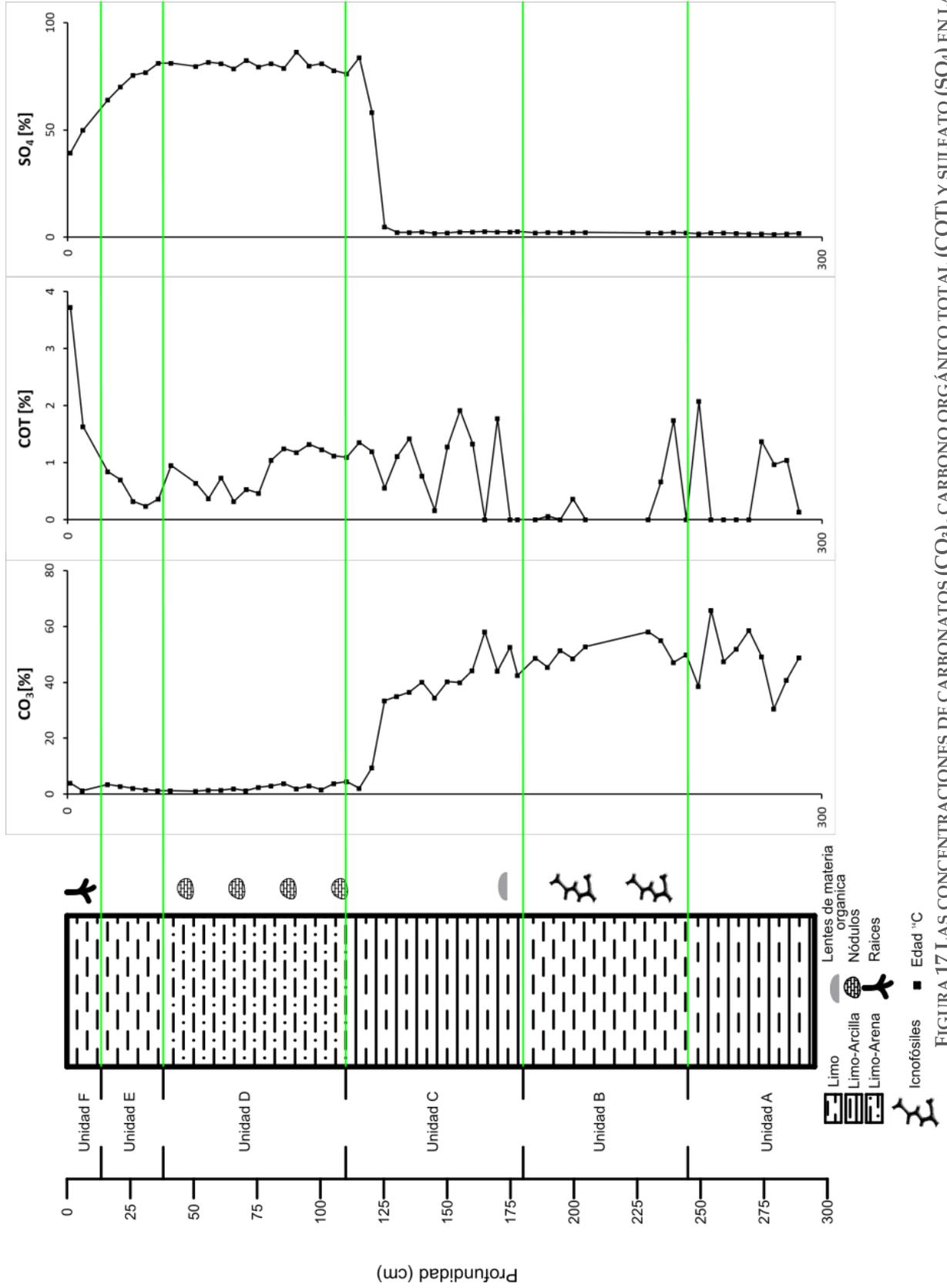


FIGURA 17 LAS CONCENTRACIONES DE CARBONATOS (CO₃), CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT) Y SULFATO (SO₄) EN LAS MUESTRAS DEL PERFIL SEDIMENTARIO DE LA CUENCA DE SANDIA A LO LARGO DE LA PROFUNDIDAD.

TABLA 4 LOS VALORES MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE LAS CONCENTRACIONES DE CARBONATOS (CO₃), CARBONO ORGÁNICO TOTAL (COT) Y SULFATO (SO₄) DE LOS SEDIMENTOS EN DIFERENTES UNIDADES ESTRATIGRÁFICAS DEL PERFIL COLECTADO DE LA CUENCA DE SANDIA

Unidad	No. de muestras	CO ₃ (%)			COT(%)			SO ₄ (%)		
		Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio
F	2	1.30	3.95	2.62	1.63	3.73	2.68	39.33	49.98	44.65
E	5	1.10	3.50	1.90	0.23	0.95	0.55	64.08	81.70	76.28
D	13	1.25	3.90	2.45	0.32	1.32	0.92	77.63	86.36	80.63
C	15	2.20	58.06	34.45	0.00	1.92	0.93	1.83	83.74	16.56
B	7	45.37	57.96	50.82	0.00	1.74	0.35	1.90	2.27	2.10
A	10	30.58	65.65	48.12	0.00	2.08	0.56	1.19	2.03	1.65
General	52	1.10	65.65	27.35	0	3.73	0.70	1.19	86.36	33.73

V. 6 Elementos Mayores

Las concentraciones de Ca, Si, K, Al, Fe y Mn aportan información acerca de la característica geoquímica de los sedimentos (Figura 18). El Ca es el más abundante, la concentración de Si es intermedia y las concentraciones de Al, K, Fe y Mn son relativamente más bajas. La concentración de Ca varía entre 15.35 % y 43.64 % y la concentración de Si fluctúa entre 0.85 % y 22.54 %. Los sedimentos contienen 0-1.50% de Al, 0-0.28% de K, 0-0.41% de Fe, 0-0.03% de Mn (Tabla 5). Generalmente, sedimentos de las unidades C, D y E presentan concentraciones menores de los elementos con la excepción de Si que comienza a tener valores altos en la unidad C. Los valores altos se encuentran en sedimentos de las unidades A, B y C. Por otra parte, la distribución de Mn muestra el máximo en la profundidad de 126 cm con concentración de 0.03%.

Unidad A (296-245 cm): La concentración de Ca varía entre 25.84-43.15% con el promedio de 36.36%. La distribución de Si (3.49-20.96%, promedio=10.28%) presentan la máxima concentración (20.96%) en los sedimentos con profundidad 281 cm. Los sedimentos de esta unidad varían las concentraciones de Al entre 0.20-0.88% (promedio= 0.29%) y el máximo valor de Al (0.88%) está en sedimentos de la profundidad 286 cm. El contenido de K varía entre 0-0.21% con un promedio de 0.07% y la distribución de K presenta el máximo en la profundidad de 286 cm con concentración de 0.21%. Fe (0-0.22%, promedio=0.06%) y Mn (0-0.004%, promedio=0.002%) están presentes en menor concentración.

Unidad B (245-180 cm): Los sedimentos de la unidad contienen 29.56-43.64% de Ca con el promedio de 37.63%. La concentración de Si fluctúa entre 3.27% y 17.49% con el promedio de 8.43%. Los sedimentos con profundidad de 186 cm (en el límite con la unidad 4) presentan el máximo (17.49%) de la distribución de Si. La concentración de Al (0.15-0.62%, promedio= 0.34%) y K (0-0.21%, promedio=0.08%) son menores que las concentraciones de Ca. Concentraciones de Fe (0.01-0.19%, promedio=0.07%) y Mn (0-0.01%, promedio=0.01%) son los más bajos en sedimentos de esta unidad.

Unidad C (180-110 cm): La concentración de Ca esta entre 24.18% y 38.87% con promedio de 31.14%. Los sedimentos de esta unidad presentan las concentraciones de Si más altas del perfil sedimentario. La distribución de Si (2.02-22.53%, promedio=12.86%) muestra dos intervalos de mayor concentración en las profundidades de 146 cm (22.53%) y 126 cm (19.69%). La concentración de Al (0.11-1.16%, promedio=0.25%) muestra el máximo (1.16%) en la profundidad de 179 cm (en el límite con la unidad 5). Al igual que Al, la distribución de K (0-0.34%, promedio=0.05%) muestra el máximo en la profundidad de 179 cm. La variación en la concentración de Fe (0-0.21%, promedio=0.03%) es

similar a las distribuciones de Al y K. El contenido de Mn (0-0.03%, promedio=0.003%) exhibe su máximo en los sedimentos con profundidad 126 cm.

Unidad D (110-38 cm): La concentración de Ca es homogénea y varía entre 22.73% y 25.17% con promedio de 23.85%. La concentración de Si en los sedimentos de la unidad es la más baja en toda la columna (0.85-3.13%, promedio=2.27%). Asimismo, los contenidos de Al (0-0.14%, promedio=0.09%) y K (0-0.04%, promedio=0.01%) son los más bajos del perfil. Las concentraciones de Fe y Mn se presentan menores al límite de detección del equipo de FRX.

Unidad E (38-13.5 cm): Los sedimentos de la unidad contienen Ca entre 20.50% y 22.88% con el promedio de 22.04%. Si presenta un enriquecimiento paulatino hacia la parte superior de la unidad con concentraciones que varían entre 1.96% y 4.92% (promedio= 2.81%). La distribución de Al de igual manera que el Si presenta un enriquecimiento hacia la parte superficial de la unidad con concentraciones de 0-0.59% y el promedio de 0.14%. De la misma manera, K presenta un enriquecimiento hacia la parte más superficial con contenidos entre 0.03% y 0.12% (promedio= 0.06%). Las concentraciones de Fe (0-0.11%, promedio=0.02%) y Mn 0-0.01%, promedio=0.00%) tienen el mismo comportamiento que los otros elementos.

Unidad F (13.5-0 cm): La concentración de Ca varía entre 15.35% y 16.92% con el promedio de 16.13%. El contenido de Si (8.65-9.02%, promedio=8.83%) es menor que Ca y Al presentando concentraciones de 1.37-1.50% (promedio=1.43%). K presenta concentraciones de 0.12-0.34% con el promedio de 0.20%. Los sedimentos de la unidad presentan los valores más altos del perfil con concentraciones entre 0.33-0.41% (promedio=0.37%). El contenido de Mn fluctúa entre 0.01% y 0.02% con el promedio de 0.02%.

TABLA 5. CONCENTRACIÓN MÁXIMOS, MÍNIMOS Y PROMEDIO DE LOS ELEMENTOS MAYORES EN SEDIMENTOS DE DIFERENTES UNIDAD ESTRATIGRÁFICA DEL PERFIL COLECTADO DE LA CUENCA DE SANDÍA.

Unidad	Ca (%)			K (%)			Al (%)			Si (%)			Fe (%)			Mn (%)		
	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio	Min	Max	Promedio
F	15.347	16.921	16.134	0.122	0.283	0.203	1.370	1.499	1.435	8.645	9.021	8.833	0.334	0.407	0.371	0.013	0.018	0.016
E	20.504	22.887	22.048	0.037	0.122	0.060	0.000	0.591	0.144	1.965	4.922	2.816	0.000	0.115	0.017	0.000	0.005	0.001
D	22.737	25.171	23.855	0.000	0.040	0.014	0.000	0.136	0.093	0.859	3.130	2.279	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
C	24.186	38.874	31.146	0.000	0.345	0.055	0.110	1.161	0.258	2.028	22.536	12.860	0.000	0.217	0.033	0.000	0.033	0.003
B	29.566	43.642	37.639	0.022	0.212	0.087	0.156	0.624	0.347	3.274	17.498	8.436	0.009	0.197	0.067	0.000	0.008	0.005
A	25.837	43.149	36.355	0.000	0.211	0.065	0.195	0.882	0.355	3.493	20.956	10.280	0.000	0.220	0.056	0.000	0.004	0.002
General	15.347	43.642	29.793	0.000	0.345	0.060	0.000	1.499	0.286	0.859	22.536	8.041	0.000	0.407	0.047	0.000	0.033	0.003

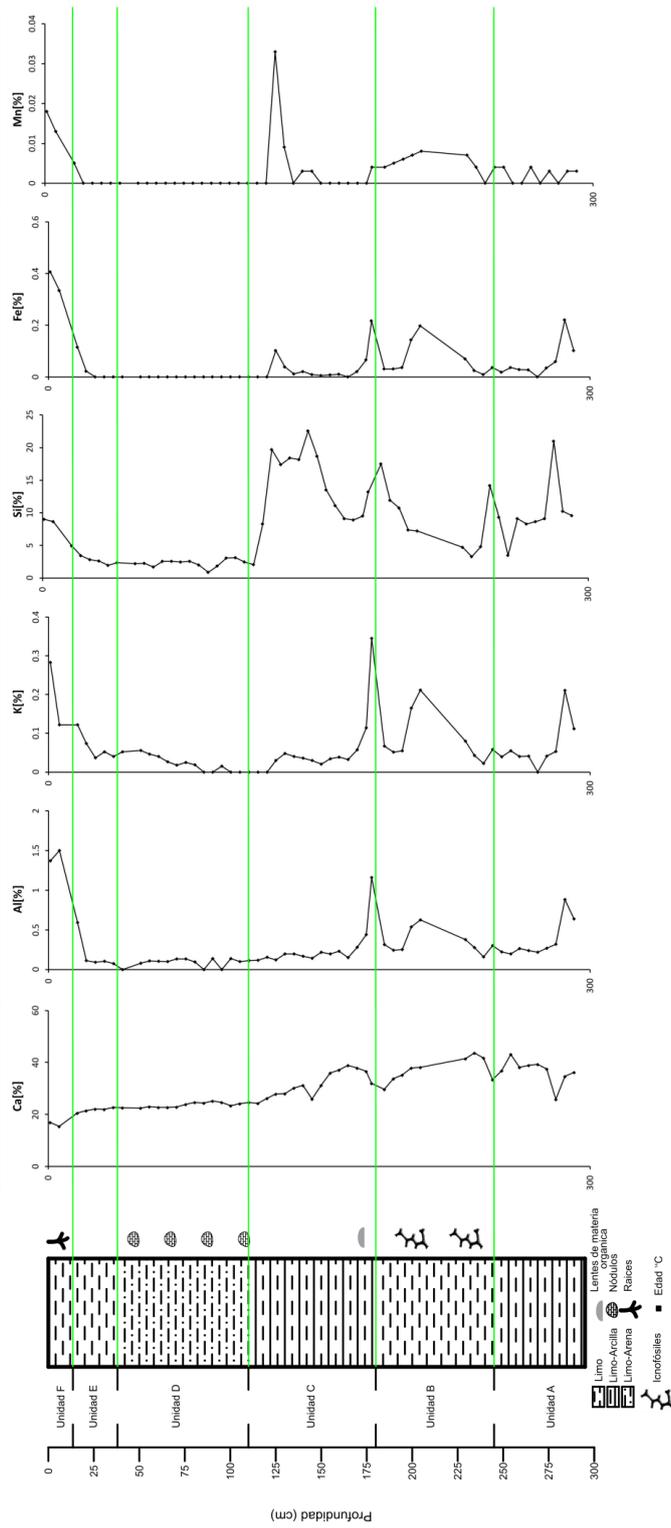


FIGURA 18 DISTRIBUCION DE LOS ELEMENTOS MAYORES (Ca, K, Al, Si, Fe y Mn) EN SEDIMENTOS DE LA COLUMNA COLECTADO EN LA CUENCA DE SANDIA A LO LARGO DE LA PROFUNDIDAD.

Capítulo VI

Discusión

Caracterización geológica

La geología de la Cuenca de Sandia está caracterizada por la presencia dominante de caliza y en menor cantidad de lutita, ambas del Cretácico, y conglomerado del Neógeno. Las texturas de los sedimentos varían entre limo-arcilla, limo y limo-arena que sugieren una energía de transporte a la cuenca variable. La geología de la cuenca está reflejada en la composición mineralógica de los sedimentos. Los sedimentos contienen abundante carbonato (CO_3) y sulfato (SO_4) con trazas de silicatos, aluminosilicatos y óxidos. La ocurrencia de minerales diamagnéticos también está reflejada en los valores de susceptibilidad magnética (Figura 16). Abundante de calcita y traza de dolomita representan a los minerales de yeso y carbonato, el yeso es el único mineral de composición sulfatada (Tabla 1). Los sedimentos del perfil contienen en promedio 27.35% de CO_3 y 33.73% de SO_4 (Tabla 4). Menor concentraciones de Si (promedio=8.04%), Al (promedio=0.28%) y K (promedio=0.06%) indican presencia de minerales clásticos (silicatos y aluminosilicatos) en concentraciones traza, los cuales no fueron identificados en el análisis DRX (Tabla 5). Así mismo, menores concentraciones de Fe (promedio=0.047%) y Mn (promedio=0.003%) representan los óxidos de Fe y Mn. Las correlaciones entre los elementos asociados con minerales clásticos separan los alóctonos en dos diferentes grupos. Correlación fuerte y positivo entre K y Al ($r=0.84$) indican posible ocurrencia de ilita o feldespato de potasio. Así mismo, la correlación entre Si y Al está bajo ($r=0.17$), lo cual indica presencia de cuarzo en los sedimentos.

La composición química y mineralógica divide al perfil sedimentario en dos partes (Figura 17 y Figura 18). Las distribuciones de CO_3 y SO_4 muestran coeficientes de correlación negativo ($r=-0.94$). Los sedimentos de la parte inferior del perfil (296-110 cm, unidades A, B y C) tienen mayor concentración de CO_3 (>34.45%) en comparación con SO_4 (<16.56%) y el contenido de COT es <0.93%. Los datos de DRX y correlación entre Ca y CO_3 ($r=0.81$) indican ocurrencia de abundante calcita en sedimentos de la parte inferior del perfil. La concentración de SO_4 (>44.65%) es mayor en comparación con CO_3 (<2.62%) en sedimentos de la Ca y parte superior del perfil (110-0 cm, unidades D, E y F). Los datos de DRX y correlación positiva entre Ca y SO_4 ($r=0.72$) muestran abundante presencia de yeso en los

sedimentos superiores del perfil. El contenido de COT es variable (hasta 2.68%) en estos sedimentos con mayor concentración de yeso.

El horizonte con icnofósiles, (245-180 cm, unidad B) presenta características distintas y similares con los horizontes, superiores (180-110 cm, unidad C) e inferior (296-245 cm, unidad A) a los icnofósiles. Este horizonte está caracterizado por sedimentos del tamaño de limo, indicando relativamente mayor energía de transportación. Por el contrario, los sedimentos superiores e inferiores se encuentran compuestos principalmente por sedimentos más finos (limo-arcilla). Los sedimentos del horizonte con icnofósiles y los sedimentos del horizonte inferior contienen contenidos comparables de CO_3 , SO_4 , Ca, K y Al. Los sedimentos del horizonte superior están relativamente más enriquecidos en SO_4 y relativamente más empobrecido en CO_3 . Sin embargo, los sedimentos con icnofósiles contienen la menor concentración de COT en comparación con los sedimentos de las unidades superior e inferior (Tabla 4).

Caracterización cronológica

La información cronológica del perfil sedimentario con una longitud de 296 cm proviene del análisis por radiocarbono en materia orgánica de sedimento ubicado en la profundidad de 181-177 cm (7431-7287 cal. año aP, mediano 7367 cal. año aP). Se asumió que los sedimentos superficiales (profundidad 0 cm) son contemporáneo al ambiente moderno para la generación de un modelo de edad para la columna sedimentaria. La tasa de sedimentación fue calculada considerando que los sedimentos de 181-177 cm de profundidad fueron depositados hace 7367 años. Considerando una tasa de sedimentación uniforme de 0.024 cm/año a lo largo del perfil sedimentario, el perfil sedimentario posiblemente representa los últimos 12,017 cal. año aP (Figura 15). Los sedimentos con presencia de icnofósiles entre las profundidades de 245-180 cm (unidad B) fueron depositado antes de 7367 cal años y posiblemente entre 10,083 y 7408 cal. años aP (Holoceno temprano y Holoceno medio). Los sedimentos de unidades C, D, E y F (180-110 cm) representan últimos 7408 cal años (Holoceno medio y tardío) y los sedimentos de unidad A (296-245 cm) representan entre 12,017-7408 cal. año aP (Holoceno temprano).

Reconstrucción Paleoambiental

La reconstrucción paleoambiental está basado en las relaciones de Si/Al, Al/Ca, SO₄/CO₃, TOC/Al y las asociaciones de Fe y Mn con carbonato (Figura 19). La concentración de cuarzo y variación en el aporte de cuarzo a la cuenca está estimada con la relación Si/Al (Roy et al., 2016). La relación Al/Ca elimina el efecto de dilución por diferentes concentraciones de calcita y yeso y estima la concentración de minerales clásticos (ilita y feldespato de K en este caso) generado por la erosión alrededor de la cuenca y su transportación a la cuenca (Quiroz-Jiménez et al., 2017). Se consideró el modelo de evolución de salmuera propuesto por Eugster y Hardie (1978) para reconstruir la salinidad del cuerpo del agua en la cuenca y modelo de estabilidad de productos sedimentarios propuesto por Krumbein y Garrels (1952) para la reconstrucción de oxidación-reducción potencial (Eh) y alcalinidad (pH) del ambiente representado por sedimentos con icnofósiles. La geología de la cuenca (dominante caliza) y presencia de calcita, yeso y dolomita en los sedimentos indican que el aporte pluvial/fluviol a la cuenca era de composición $Ca \geq HCO_3 + CO_3$ (en proporciones equivalentes de Ca y bicarbonato-carbonato). La deposición o precipitación de calcita ocurrió primero en condiciones relativamente diluidas con menor evaporación. La calcita fue seguida por precipitación de dolomita en una condición de relativamente mayor salinidad y la precipitación de yeso ocurrió de un cuerpo de agua con condiciones de mucha mayor salinidad causada por una mayor evaporación y un menor aporte pluvial/fluviol. La variación en la relación SO₄/CO₃ indica la salinidad del cuerpo de agua en la Cuenca de Sandia. Los sedimentos con mayor valor de SO₄/CO₃ fueron depositado en condiciones relativamente más saladas en comparación los sedimentos con menor valor de SO₄/CO₃, que fueron depositado en condiciones con mayo dilución de sales. En condiciones de oxidación, Fe y Mn están estables en estado de valencia Fe³⁺ y Mn⁴⁺ (insoluble) y entra a la cuenca como óxidos e hidróxidos y deposita junto con los minerales clásticos. Así mismo, Fe²⁺ y Mn²⁺ están estables en ambiente reductor (anóxico) y precipitan junto con los carbonatos (Cohen, 2003). El contenido promedio de COT (0.70%) siguiere que la productividad orgánica fue bajo y la cuenca fue oligotrófico. También, la correlación entre COT y Al (r=0.46) es moderado y eso indica un gran parte de la materia orgánica fue transportado (origen alóctono) junto con los minerales clásticos de los alrededores de la cuenca. Se considera la relación COT/Al para eliminar el efecto de dilución en los contenidos de materia orgánica por variable aporte de minerales clásticos y estimar la productividad orgánica de la cuenca (Vazquez-Castro et al., 2017).

En general, los sedimentos de la parte inferior (296-120 cm, unidades A, B y C) incluyendo el horizonte con icnofósiles fueron depositado en condiciones relativamente diluidos en salinidad y se observa un aumento en la salinidad de los sedimentos superiores (120-0 cm, Figura 19). La tasa de sedimentación

indica el aumento de salinidad ocurrido más o menos en 5050 cal. año aP. El aporte o transporte de cuarzo (Si/Al) a la cuenca fue mayor durante el intervalo diluido durante 12,017-5050 cal. año aP y la concentración de cuarzo es menor en el intervalo de mayor salinidad en los últimos 5050 cal. años. Los sedimentos de la unidad C (180-110 cm, posiblemente entre 7408-5000 cal. año aP) indican un intervalo de mayor aporte de cuarzo a la cuenca. La textura de los sedimentos de esta unidad (limo-arcilla) y la relación de SO_4/CO_3 sugieren condición más húmeda de la cuenca. Las concentraciones de minerales clásticos (ilita y feldespato de K) muestran aumento en intervalos de mayor salinidad (13.5-0 cm, unidad F) e intervalos de cuerpo de agua diluidas (196-180 cm, unidades A y B), lo cual sugiere que los minerales clásticos que contienen Al posiblemente fueron transportados vía pluvial y eólico a la cuenca.

La correlación negativa entre Fe y CO_3 ($r=-0.50$) y Mn y CO_3 ($r=-0.40$) y la correlación positiva entre Fe y Al ($r=0.94$) en sedimentos de todo el perfil indican transportación de Fe y Mn como óxidos e hidróxido junto con otros minerales clásticos. Sin embargo, los sedimentos del horizonte con icnofósiles presentan correlaciones positivas entre Fe y Mn con CO_3 ($r=0.20-0.30$) lo cual indica presencia de Fe y Mn en la calcita. Esta asociación propone un ambiente anóxico y $pH>8$ (Figura 20) por lo cual se interpreta que la materia orgánica debe de haber sido preservado en sedimentos de este horizonte. Se observa menores valores de TOC/Al (menor o nulo materia) en sedimentos con icnofósiles (Figura 19). Los horizontes superior e inferior a los icnofósiles presentan valores variables de COT/Al, pero mayor en comparación con los valores de COT/Al en el horizonte con icnofósiles. La materia orgánica posiblemente fue consumida por el organismo que formo los icnofósiles, a pesar de que las condiciones ambientales fueron óptimas para tener conservación de materia orgánica.

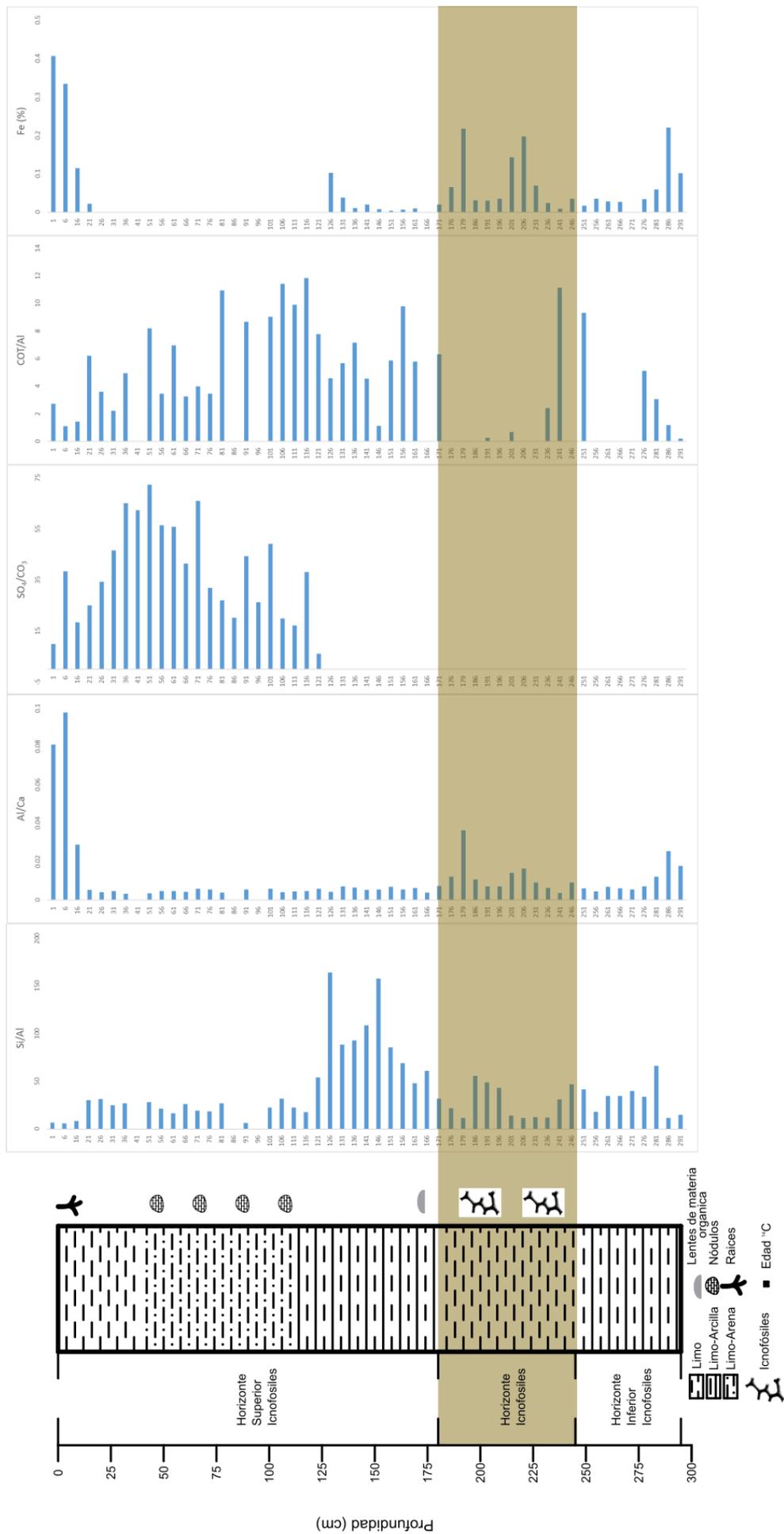


FIGURA 19. ÍNDICES DE APORTE DE CUARZO (Si/Al), APORTE DE MINERALES CLÁSTICOS (Al/Ca), SALINIDAD DEL CUERPO DEL AGUA (SO₄/CO₃), PRODUCTIVIDAD ORGÁNICA (TOC/Al) Y ANOXIA (FE EN CARBONATO) EN LA CUENCA SANDIA.

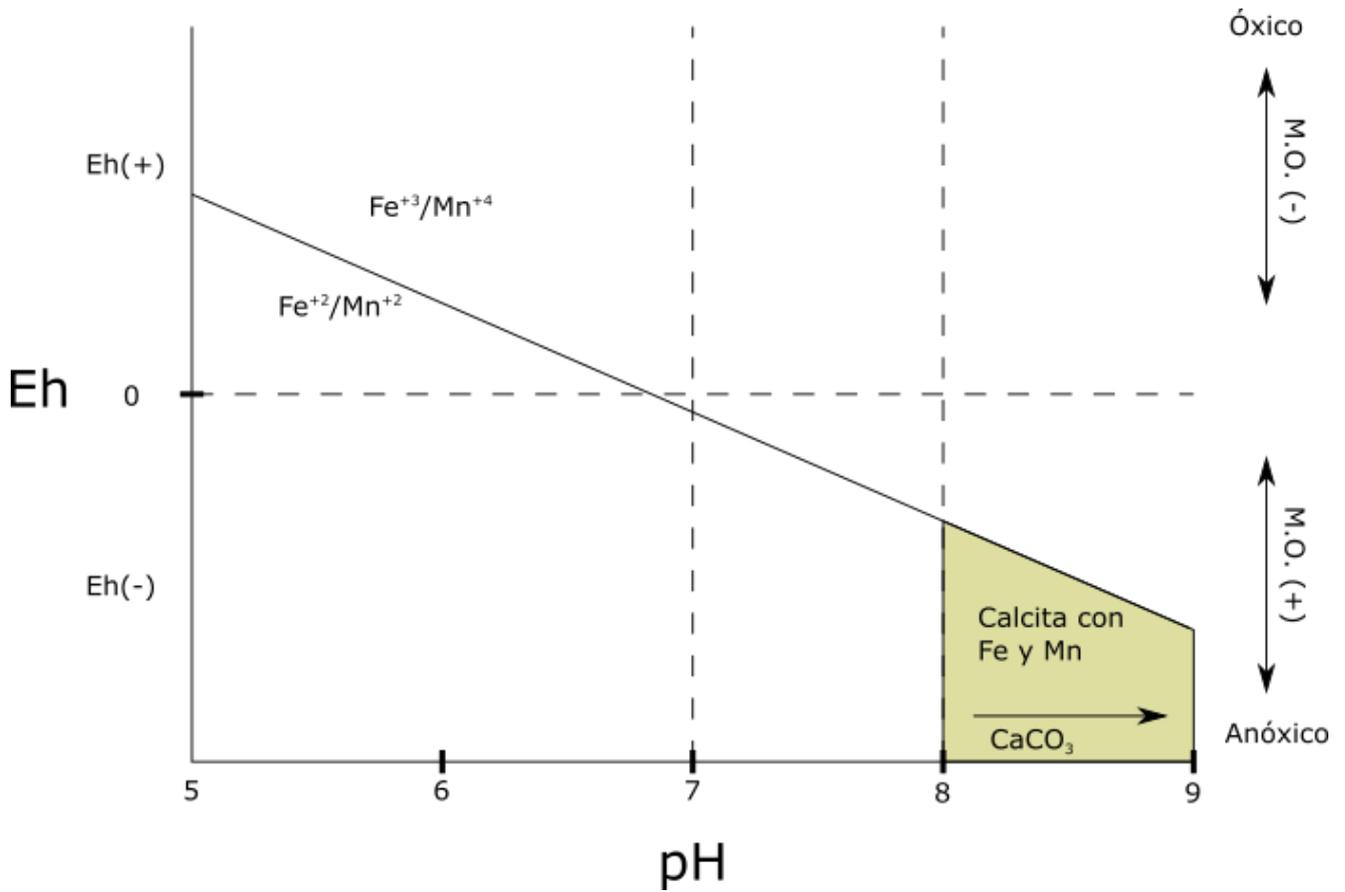


FIGURA 20 DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DE ESTABILIDAD DE DIFERENTES PRODUCTOS SEDIMENTARIOS EN AMBIENTES CON VARIABLE pH Y EH (MODIFICADO DE KRUMBEIN Y GARRELS, 1952). EL HORIZONTE CON ICNOFÓSILES POSIBLEMENTE FUE DEPOSITADO EN UN AMBIENTE ANÓXICO CON $\text{pH} > 8$. (M.O.= MATERIA ORGÁNICA)

Capítulo VII

Conclusiones

Las conclusiones del este trabajo de investigación son:

- El perfil sedimentario tiene una longitud de 296 cm y representa probablemente los últimos 12,017 cal. año aP. Los sedimentos con presencia de icnofósiles encontrados entre las profundidades de 245-180 cm (unidad B) fueron depositado antes de 7367 cal años, posiblemente entre 10,083 y 7408 cal. años aP (Holoceno temprano y Holoceno medio). Los sedimentos de unidades C, D, E y F (180-110 cm) representan últimos 7408 cal años (Holoceno medio y tardío) y los sedimentos de unidad A (296-245 cm) se encuentran representando entre 12,017-7408 cal. año aP (Holoceno temprano).
- La composición mineralógica y geoquímica de los sedimentos de la Cuenca de Sandia refleja la geología de la cuenca, la cual está caracterizada por presencia de dominante caliza de edad Cretácico y menores cantidades de lutita del Cretácico y conglomerado del Neógeno. Los sedimentos contienen abundante carbonato (CO_3) y sulfato (SO_4). Calcita y dolomita representan a los minerales de carbonato, mientras que el yeso es el único mineral con composición de sulfato. Se encontraron menores concentraciones de Si, Al, K y Fe que indican presencia de minerales clásticos (silicatos, aluminio-silicatos y óxidos) en concentraciones trazas.
- El contenido promedio de COT (0.70%) sugiere baja productividad orgánica y la cuenca posiblemente fue oligotrófico. Por otro lado, el moderado coeficiente de correlación entre COT y Al ($r=0.46$) indica un gran parte de la materia orgánica fue transportado (origen alóctono) junto con los minerales clásticos de los alrededores de la cuenca.
- La concentración de calcita y yeso dividen el perfil sedimentario en dos partes. Una mayor concentración de CO_3 (>34.45%) en comparación con SO_4 (<16.56%) en sedimentos de la parte inferior del perfil (296-110 cm, unidades A, B y C), lo cual indica la ocurrencia de abundante calcita. La concentración de SO_4 (>44.65%) es mayor en comparación con CO_3 (<2.62%) en sedimentos de la Ca y parte superior del perfil (110-0 cm, unidades D, E y F) debido a la abundante presencia de yeso.
- El aporte pluvial/fluvial a la cuenca tenía una composición química de $\text{Ca} \geq \text{HCO}_3 + \text{CO}_3$. La precipitación de calcita ocurrió en condiciones relativamente diluidas, mientras que la precipitación de dolomita sucedió en una condición de relativamente mayor salinidad y la

precipitación de yeso ocurrió de un cuerpo de agua en condiciones de mucha mayor salinidad. Esto causado por mayor evaporación y menor aporte pluvial/fluvial. En general, los sedimentos de la parte inferior (296-120 cm, unidades A, B y C) incluyendo el horizonte con icnofósiles fueron depositado en condiciones relativamente más diluidas en sulfatos, posteriormente se observa un cambio, lo cual provoca un aumento en la salinidad de los sedimentos superiores (120-0 cm, unidades D, E y F). La tasa de sedimentación indica el aumento de salinidad ocurrido más o menos en 5050 cal. año aP. Los sedimentos de la unidad C (180-110 cm, posiblemente entre 7408-5000 cal. año aP) indican un intervalo de mayor aporte de cuarzo a la cuenca.

- Los sedimentos del horizonte con icnofósiles presentan correlaciones positivas entre Fe y Mn con CO₃ ($r=0.20-0.30$) lo cual indica presencia de Fe y Mn en la calcita. Esta asociación propone un ambiente anóxico y pH>8. A pesar de que las condiciones ambientales fueron óptimas para tener conservación de materia orgánica, los organismos que formaron a los icnofósiles posiblemente consumieron la materia orgánica depositada en este horizonte.
- Las relaciones de Si/Al, Al/Ca, SO₄/CO₃ COT/Al y la concentración de Fe fueron los proxys usados para la interpretación de las condiciones ambientales, tales como aporte de cuarzo, aporte de minerales clásticos, salinidad del cuerpo de agua, productividad orgánica y condiciones de oxidación, respectivamente.
- Los sedimentos del horizonte con icnofósiles presentan alto aporte de cuarzo y minerales clásticos, también se observó un ambiente con salinidad diluida, concentración de Fe moderada (asociado con carbonato) y baja conservación de materia orgánica.
- Las condiciones en las que se depositaron los sedimentos del horizonte con icnofósiles tuvieron un aporte de sedimentos clásticos controlado por una mayor precipitación, lo cual coincide con la dilución en la salinidad de los cuerpos de agua y la alta deposición de carbonatos provenientes de los afloramientos, la baja conservación de materia orgánica se propone que es ocasionada por que fue consumida por el organismo que formo los icnofósiles.
- Los datos meteorológicos actuales indican menor húmeda en la cuenca, y se observó un mayor aporte de clásticos por procesos eólicos durante la campaña de muestro. La mayor abundancia de Fe en los sedimentos superficiales está asociada con los minerales clásticos y no en los carbonatos, lo cual representa condiciones oxidantes. Así mismo la salinidad es mayor, la cual es provocada por las altas tasas de evaporación y la desaparición de los cuerpos de agua permanentes (Sandía es una cuenca efímera y solo mantiene un cuerpo de agua estacional). Por

lo cual se concluye que el aporte de minerales clástico (representado por Al/Ca) se encuentra controlado actualmente por erosión eólica.

- Los sedimentos de la parte inferior (296-120 cm, unidades A, B y C) del perfil sedimentario (incluyendo el horizonte con icnofósiles) fueron depositado en condiciones con abundantes precipitaciones y un ambiente anóxico durante el Holoceno temprano. Hace aproximadamente 5050 cal. año aP, la condición hidrológica sufrió un cambio hacia un ambiente semiárido más oxidante controlado por procesos eólicos.

Bibliografía

- Chávez-Lara, Claudia M., Priyadarsi D. Roy, Margarita M. Caballero, Ana Luisa Carreño, y Chokkalingam Lakshumanan. «Lacustrine ostracodes from the Chihuahuan Desert of Mexico and inferred Late Quaternary paleoecological conditions.» *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* (Universidad Nacional Autónoma de México) 29 (2012): 422-431.
- Cohen, Andrew S. *Palaeolimnology: the history and evolution of lake systems*. na, 2003.
- Curtis, C. D., R. G. Burns, y J. V. Smith. «Sedimentary geochemistry: environments and processes dominated by involvement of an aqueous phase.» *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences* (The Royal Society) 286 (1977): 353-372.
- Eugster, H. P., y L. A. Hardie. «Saline lakes. In 'Lakes, Chemistry, Geology, Physics'(A. Lerman, Ed.) pp. 237--294.» Springer-Verlag, New York. Google Scholar, 1978.
- Faure, Gunter. *Principles and applications of geochemistry: a comprehensive textbook for geology students*. Prentice Hall, 1998.
- Frey, Robert W., y Adolf Seilacher. «Uniformity in marine invertebrate ichnology.» *Lethaia* (Wiley Online Library) 13 (1980): 183-207.
- Krumbein, W. C., y R. M. Garrels. «Origin and classification of chemical sediments in terms of pH and oxidation-reduction potentials.» *The Journal of Geology* (University of Chicago Press) 60 (1952): 1-33.
- Lucas, Spencer G., y Allan J. Lerner. «Lower Pennsylvanian invertebrate ichnofossils from the Union Chapel Mine, Alabama: a preliminary assessment.» *Pennsylvanian Footprints in the Black Warrior Basin of Alabama. Alabama Paleontological Society Monograph* 1 (2005): 147-152.
- Metcalf, Sarah, Alison Say, Stuart Black, Robert McCulloch, y Sarah O'Hara. «Wet conditions during the last glaciation in the Chihuahuan Desert, Alta Babicora Basin, Mexico.» *Quaternary Research* (Cambridge University Press) 57 (2002): 91-101.
- Miralles, Alfredo Arche. *Sedimentología: del proceso físico a la cuenca sedimentaria*. Vol. 46. Editorial CSIC-CSIC Press, 2010.
- Mude, Shyam N. «Paleoenvironmental significance of ichnofossils from the Chaya Formation, Porbandar Group, southwest coast of India.» *Greener Journal of Physical Sciences* 1 (2011): 29-36.
- Nicholls, G. D. «Environmental studies in sedimentary geochemistry.» *Science Progress (1933-)* (JSTOR) 51 (1963): 12-31.
- Palacios-Fest, Manuel R., Ana Luisa Carreño, José R. Ortega-Ramírez, y Guillermo Alvarado-Valdéz. «A paleoenvironmental reconstruction of Laguna Babicora, Chihuahua, Mexico based on ostracode paleoecology and trace element shell chemistry.» *Journal of Paleolimnology* (Springer) 27 (2002): 185-206.

- Quiroz-Jimenez, Jesús David, Priyadarsi D. Roy, Rufino Lozano-Santacruz, y Patricia Giron-García. «Hydrological responses of the Chihuahua Desert of Mexico to possible Heinrich Stadials.» *Journal of South American Earth Sciences* 73 (2017): 1-9.
- Reimer, Paula J., y otros. «IntCal13 and Marine13 radiocarbon age calibration curves 0--50,000 years cal BP.» *Radiocarbon* (Cambridge University Press) 55 (2013): 1869-1887.
- Roy, Priyadarsi D., Axel Rivero-Navarrete, José L. Sánchez-Zavala, Laura E. Beramendi-Orosco, Gowrappan Muthu-Sankar, y Rufino Lozano-Santacruz. «Atlantic Ocean modulated hydroclimate of the subtropical northeastern Mexico since the last glacial maximum and comparison with the southern US.» *Earth and Planetary Science Letters* (Elsevier) 434 (2016): 141-150.
- Roy, Priyadarsi D., Muthuswamy P. Jonathan, Ligia L. Pérez-Cruz, María M. Sánchez-Córdova, Jesús D. Quiroz-Jiménez, y Francisco M. Romero. «A millennial-scale Late Pleistocene--Holocene palaeoclimatic record from the western Chihuahua Desert, Mexico.» *Boreas* (Wiley Online Library) 41 (2012): 707-718.
- Stuiver, M., Reimer, P.J., Reimer, R.W. «CALIB 7.1 [WWW program].» *CALIB 7.1 [WWW Document]*. s.f. <http://calib.org/calib/> (último acceso: 30 de 3 de 2017).
- Tovar, Br Daniel Alfonso Hernández, y Br José Del Carmen Ocanto Cardozo. «Caracterización Físico-Química, Bacteriológica, Pigmentos Fotosintéticos Y Sedimentológicas De La Laguna El Hato Sector La Isleta, Isla De Margarita, Edo. Nueva Esparta, Durante El Periodo Enero-Diciembre 2009.» s.f.
- Vintaned, J. A. Gámez, y Eladio Liñán. «Revisión de la terminología icnológica en español.» *Revista Española de Paleontología* 11 (1996): 155-176.
- Virtasalo, Joonas J., Aarno T. Kotilainen, y Murray K. Gingras. «Trace fossils as indicators of environmental change in Holocene sediments of the Archipelago Sea, northern Baltic Sea.» *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* (Elsevier) 240 (2006): 453-467.