



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Modelo cronológico de sedimentos del  
Pleistoceno-Holoceno y abundancia de minerales  
evaporíticos-clásticos en la cuenca Cieneguilla,  
estado de Tamaulipas**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**Ingeniera Geóloga**

**P R E S E N T A**

Alejandra Chávez Arteaga

**DIRECTOR DE TESIS**

Dr. Priyadarsi Debajyoti Roy



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2018**

## **AGRADECIMIENTOS ACADEMICOS**

*Principalmente quiero agradecer al Dr. Priyadarsi, por toda su paciencia, por ser un guía y por todo lo aprendido a su lado, por brindarme una oportunidad de ser parte de su equipo de trabajo e investigación. Así como la amistad, los consejos y muy buenas experiencias en el Laboratorio de Paleoambientes y Paleoclimas. Muchísimas gracias.*

*También agradecer a todos los participantes del Laboratorio Maribel, Irma, Fernando, en especial a Guillermo Vera, por brindarme la dicha de acompañarme durante estos años, por la paciencia y la amistad. Gracias.*

*Agradecer al proyecto del DGAPA-PAPIIT de la UNAM con el numero IN 102217 "Variabilidad climática en el nororiente de México desde el último máximo glacial y evaluación del efecto de Alberca Caliente del Atlántico", por financiar este proyecto.*

*Ademas recibí una beca durante el desarrollo de la tesis con el apoyo del proyecto financiado por UC MEXUS-CONACYT 2016 (CN-16-122) con el titulo "Los efectos del calentamiento global abrupto en el clima y la hidrología del México subtropical".*

*Por último agradecer a la Universidad Nacional Autonoma de México, mi alma mater, por dejarme formar parte de sus aulas y brindarme todos mis conocimientos obtenidos, por las experiencias y forjarme como persona.*

## **AGRADECIMIENTOS PERSONALES**

***A mis padres, ya que, sin sus sacrificios, sus consejos y su apoyo no estaría donde estoy, esto es por y para ustedes. Gracias por hacerme quien soy.***

***A mis hermanos, Mauricio, Raquel y Juan Carlos, por ser un ejemplo para mí, a mis demás familiares por siempre estar a mi lado.***

***Quiero agradecer a todos esos amigos que hice en este recorrido, nada de esto sería sin ustedes, gracias por todas esas experiencias, por todas las risas y todo el aprendizaje, desde mis amigos de la Preparatoria 4, como mis amigos de la gloriosa Facultad de Ingeniería, ustedes formaron parte de esto cada día desde el principio hasta el fin de mi formación académica. Gracias, a Tannia, Karii, Lupita, Axel, Eric, Nancy, por su amistad a lo largo de todos estos años, por su apoyo incondicional y sobre todo por todos esos momentos tan especiales que nos unieron.***

# Índice

## Índice de Figuras

## Índice de Tablas

## Resumen

<b>Resumen.....</b>	<b>ix</b>
<b>Abstract.....</b>	<b>x</b>
<b>Capítulo 1 .....</b>	<b>1</b>
<i>Introducción .....</i>	<i>1</i>
<b>Capítulo 2 .....</b>	<b>3</b>
<i>Objetivos .....</i>	<i>3</i>
2.1 Objetivos Generales .....	3
2.2 Objetivos Particulares.....	3
<b>Capítulo 3 .....</b>	<b>4</b>
<i>Antecedentes I.....</i>	<i>4</i>
3.1 Principios Básicos de la datación por Radiocarbono .....	4
3.2 Mediciones, materiales y problemas.....	5
3.3 Errores .....	6
3.4 Calibración .....	6
2.5 Modelo de edad .....	6
2.6 Ultramoderno <sup>14</sup> C .....	6
<b>Capítulo 4 .....</b>	<b>8</b>
<i>Antecedentes II.....</i>	<i>8</i>
4.1 Ubicación .....	8
4.2 Geología.....	9
4.3 Clima.....	10
4.4 Uso de Suelo y Vegetación.....	11
<b>Capítulo 5 .....</b>	<b>13</b>
<i>Metodología.....</i>	<i>13</i>
5.1. Trabajo de Campo .....	13
5.2 Trabajo de Laboratorio .....	13
5.3 Análisis mineralógico y geoquímico.....	14
5.4 Análisis de Radiocarbono.....	17
<b>Capítulo 6 .....</b>	<b>18</b>
<i>Resultados.....</i>	<i>18</i>
6.1 Columna estratigráfica.....	19
6.2 Materia Orgánica y susceptibilidad magnética .....	20
6.3 Cronología.....	22
6.4 Mineralogía .....	30
6.5 Abundancia de carbonato y sulfato.....	32

<b>Capítulo 7</b> .....	<b>35</b>
<i>Discusión</i> .....	35
7.1 <i>Modelo cronológico y tasa de sedimentación</i> .....	35
7.2 <i>Evolución de la Salmuera</i> .....	38
<b>Capítulo 8</b> .....	<b>40</b>
<i>Conclusiones</i> .....	40
<b>Bibliografía</b> .....	<b>41</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> Modelo esquemático mostrando comportamiento de $^{14}\text{C}$ en diferentes sistemas de la Tierra (modificado de Bradley, 1985).....	5
<b>Figura 2</b> Mapa mostrando la ubicación de la Cuenca Cieneguilla en la parte sur-occidental del estado de Tamaulipas, México. ....	8
<b>Figura 3</b> Extensión de la Cuenca Cieneguilla (en rojo) en los estados de Tamaulipas y San Luis Potosí y ubicación de las ciudades en la cercanía (Fuente: Imagen Google Maps).....	9
<b>Figura 4</b> Carta Geológica de la Cuenca Cieneguilla y sus alrededores (modificada de INEGI). ....	10
<b>Figura 5</b> Gráficas ombrotermicas mostrando la temperatura y precipitación registrado en tres diferentes estaciones meteorológicas ubicadas al norte, este y oeste de la cuenca Cieneguilla. También se muestra una gráfica con el promedio de temperatura y precipitación calculado con los datos de las tres estaciones. (Fuente de datos: <a href="http://www.weatherbase.com">http://www.weatherbase.com</a> ). ....	11
<b>Figura 6</b> Mapa mostrando el uso de suelo y la vegetación en la Cuenca Cieneguilla y sus alrededores (Fuente: INEGI).....	12
<b>Figura 7</b> Mortero de Ágata utilizado para la molienda de muestras colectada de la Cuenca Cieneguilla. ....	13
<b>Figura 8</b> Equipo de DRX utilizado para la identificaron los minerales evaporíticos y clásticos en los sedimentos de la Cuenca Cieneguilla. ....	14
<b>Figura 9</b> Equipo de FRX utilizado para estimación de las concentraciones de elementos mayores y traza en las muestras colectadas de Cuenca Cieneguilla.....	15
<b>Figura 10</b> Equipo Barrington y el estándar MS2E utilizado para la medición de susceptibilidad magnética en las muestras de la Cuenca Cieneguilla.....	16
<b>Figura 11</b> Equipo HiperTOC utilizado para medición de las concentraciones de carbono orgánico total y carbonatos en las muestras de la Cuenca Cieneguilla. ....	17
<b>Figura 12</b> Columna de sedimento colectado en la cuenca Cieneguilla dividido en diferentes unidades, y ubicación de las muestras analizado por radiocarbono y por la difracción de rayos X (DRX). ....	19
<b>Figura 13</b> Comparación entre contenidos de TOC (Carbono Orgánico Total) y susceptibilidad Magnética a lo largo del perfil sedimentario de la Cuenca Cieneguilla. ....	21

<b>Figura 14</b> Gráficos mostrando calibración de los valores de edad convencional a la edad calendario con respecto al año 1950 (antes de presente) en el software Calib 7.1. En el eje X es la edad calibrada en años antes de presente o BP (Before Present) y en el eje Y es la edad convencional obtenida directamente del laboratorio. ....	22
<b>Figura 15</b> Modelo de edad por regresión polinómica basado en las 5 muestras de sedimentos de la cuenca Cieneguilla datadas por radiocarbono. ....	24
<b>Figura 16</b> Modelo de edad con regresión lineal basado en las 5 muestras de sedimentos de la cuenca Cieneguilla datadas por radiocarbono. ....	26
<b>Figura 17</b> Modelo de edad con interpolación lineal generado con las 5 muestras de sedimentos de la cuenca Cieneguilla datadas por radiocarbono. ....	28
<b>Figura 18</b> Diferentes tasas de sedimentación obtenidas a partir del modelo de edad con interpolación lineal. ....	29
<b>Figura 19</b> Difractogramas que muestran los diferentes minerales encontrados en las muestras de la cuenca Cieneguilla. Las alturas de los picos en general muestran sus abundancias. ....	31
<b>Figura 20</b> Las concentraciones de $\text{CaCO}_3$ y $\text{CaSO}_4$ en sedimentos a lo largo del perfil sedimentario colectado en la Cuenca de Cieneguilla. ....	34
<b>Figura 21</b> Las edades estimadas para la base de la secuencia (302 cm) y sedimento ubicado en la profundidad de 96 cm a partir de las tres diferentes modelos de edad generados con las fechas de radiocarbono. ....	37
<b>Figura 22</b> La evolución de salmuera en las cuencas sedimentaria basado en el modelo de Eugster y Hardie (1978). La salmuera de la cuenca Cieneguilla pertenece al flujo inicial tipo III con una composición inicial de $\text{HCO}_3 > \text{Ca} + \text{Mg}$ . ....	39

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> Resultados de las 5 muestras fechadas por la técnica de radiocarbono, ubicación de las muestras, edad convencional y edad calibrada. ....	23
<b>Tabla 2</b> Minerales encontrados en diferentes muestras de la Cuenca Cieneguilla analizadas mediante DRX. ....	30

## Resumen

Cieneguilla (22.5° N, 99.5°O) es una cuenca sedimentaria y está ubicada en el margen de las regiones tropical y subtropical de México, en la parte sur-oeste del estado de Tamaulipas. Los sedimentos colectados de una trinchera con 302 cm de profundidad en la parte central de la cuenca están caracterizados por limo-arena (masivo), limo (masivo y laminado), limo-arcilla, nódulos de carbonato y cristales de evaporitas. El análisis de radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ) de materia orgánica en cinco muestras de sedimento total a las profundidades de 301 cm, 207 cm, 95 cm, 69 cm y 45 cm representa la historia sedimentaria de la Cuenca Cieneguilla entre 13 509 y 160 cal años aP. En este trabajo de investigación, se estiman las tasas de sedimentación de la cuenca durante el Pleistoceno tardío y Holoceno y presentan la composición mineralógica de los sedimentos. Las tasas de sedimentación varían entre 3.8 y 84.7 cm/ka. Sedimentos caracterizados por limo-arcilla con presencia de evaporitas fueron depositados entre 13, 509 y 9364 cal a aP con una tasa de sedimentación de 23 cm/ka. Los limos-arenas depositados entre 526 y 160 cal a aP representan un intervalo con la mayor tasa de sedimentación (84.7 cm/ka). La mínima tasa (3.8 cm/ka) y un contacto abrupto entre limo-arena y limo con laminaciones en la profundidad de 45 cm indican un hiato en sedimentación entre 6875 y 526 cal a aP, posiblemente provocado por la erosión. Los minerales siliciclásticos están representados por cuarzo, plagioclasas y caolinita. La asociación de los minerales evaporíticos contiene calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), basanita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) y halita ( $\text{NaCl}$ ). Variación en las abundancias de carbonatos y sulfatos representan las condiciones paleo-hidrológicas de la cuenca. La basanita es un producto de deshidratación de yeso y posiblemente representan intervalos de sequías en la cuenca. El flujo inicial era de agua tipo III ( $\text{HCO}_3 > \text{Ca} + \text{Mg}$ ) y el tiempo de residencia durante 13,509-7680 cal años aP fue más largo en comparación con el intervalo de 7680-160 cal años aP. El intervalo de mayor tiempo de residencia posiblemente representa un periodo de mayor cantidad de lluvia y/o la menor temperatura. El intervalo con menor tiempo de residencia indica que la cuenca recibió menor cantidad de lluvia y que la temperatura fue mayor en los últimos 7680 cal años, acelerando la evaporación del cuerpo del agua.

## Abstract

Cieneguilla (22.5° N, 99.5°W) is a sedimentary basin and it is located at the limits of the tropical and subtropical Mexico, in the south-western part of the Tamaulipas state. Sediments were collected by digging a pit up to a depth of 302 cm and they are composed of massive silty-sand, massive and laminated silt, massive silty-clay, carbonate nodules y evaporite crystals. The radiocarbon analysis ( $^{14}\text{C}$ ) of organic carbon preserved in 5 different sediments at 301 cm, 207 cm, 95 cm, 69 cm and 45 cm depths suggests that the sediment column represent depositional environments between 13,509 cal yr BP and 160 cal yr BP. In this research, I have estimated the sedimentation rates in the basin during the late Pleistocene and Holocene and present the mineralogical composition of the sediments. Sedimentation rates vary between 3.8 and 84.7 cm/ka. The silty-clay sediments with evaporite crystals were deposited between 13, 509 and 9364 cal yr BP with a sedimentation rate of 23 cm/ka. The silty-sands were deposited during 526-160 cal yr BP and this interval is characterized by the highest sedimentation rate (84.7 cm/ka). The lowest sedimentation (3.8 cm/ka) and an abrupt contact between the massive silty-sand and laminated silts at 45 cm depth indicate presence of a hiatus in sedimentation between 6875 and 526 cal yr BP, possibly caused by erosion. The siliciclastic minerals are represented by quartz, albite and kaolinite. The assemblage of evaporites consist of calcite ( $\text{CaCO}_3$ ), gypsum ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), basanite ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5\text{H}_2\text{O}$ ) and halite ( $\text{NaCl}$ ). Variations in the abundances of carbonates and sulfates represent the paleo-hydrological conditions of the sedimentary basin. Basanite could be dehydration product of gypsum and it was deposited during the arid intervals. This basin received an inflow of type III water ( $\text{HCO}_3 > \text{Ca} + \text{Mg}$ ) and the residence time during 13,509-7680 cal yr BP was relatively longer compared to the interval of 7680-160 cal yr BP. The longer residence time possibly represent an interval of more rainfall in the basin and/or lower temperature. The interval of shorter residence time indicates that the basin received less rainfall over the last 7680 cal yr and the higher temperature accelerated the evaporation of water column from the basin.

## Capítulo 1

### Introducción

Una cuenca sedimentaria es una depresión donde se da una importante acumulación de sedimentos productos de la erosión de la superficie de la Tierra. *Geológicamente es producto de los movimientos de la corteza terrestre que da lugar a zonas topográficamente más bajas que otras, las cuales son rellenadas por sedimentos* (Miralles, 2010). La geoquímica es una especialidad de las ciencias que tiene como base la geología y la química, estudia la composición y como funciona nuestro planeta, determinando la abundancia absoluta y relativa, distribución y migración de los elementos químicos entre las diferentes partes que conforman la Tierra (hidrosfera, atmósfera, biosfera y geosfera). Se enfoca en los procesos de transformaciones de los minerales y rocas componentes de la corteza terrestre, con el propósito de establecer leyes o principios en las cuales se basa tal distribución. Los elementos geoquímicos en una escala de mayor a menor abundancia son: oxígeno, silicio, aluminio, hierro, calcio, sodio, potasio y magnesio (SGM, 2016).

La geocronología es un conjunto de métodos radiométricos y no-radiométricos que permiten datar cuerpos de roca y depósitos sedimentarios en las cuencas, vestigios de plantas y animales, tejidos antiguos y en consecuencia reconstruir evoluciones paleontológicas, climatológicas y tectónicas (Walker, 2005). A través de la información cronológica se han podido establecer edades a las secuencias estratigráficas y así poder conocer el orden de los acontecimientos y de esta manera establecer como y porque ocurrieron los sucesos (Bradley, 1985). A pesar de los progresos, esta ciencia aun es imperfecta y siempre se integra a un margen de error considerando el método utilizado y los materiales fechados y su utilización debe ser cuidadosa.

La geocronología se basa en diferentes métodos de datación (Cohen, 2003), los cuales pueden ser **radioisotópicos** que incluyen, isotópicos ( $^{14}\text{C}$ , K/Ar), mediciones en equilibrio (U-series) y efectos integrados como paleomagnéticos, incidencia de reversiones y variaciones seculares. Los métodos **químicos** se dividen en orgánicos e inorgánicos y por último los métodos **biológicos** que tiene que ver con las tasas de crecimiento y las capas de crecimiento en los árboles. La geocronología por medición de radios isotópicos es en el fondo la más pertinente, puesto que estos métodos de datación se fundan en la medida de la radioactividad de los elementos contenidos en los minerales. Estos métodos se basan en la propiedad de ciertos elementos radioactivos, contenidos en los minerales y los fósiles, de desintegrarse en elementos más estables del mismo cuerpo (sus isótopos) o de cuerpos vecinos, según una ley de decrecimiento exponencial de período conocido. Si se dispone de la masa teórica de elementos radioactivos durante la génesis de una roca o durante la vida de un organismo carbonado, y de la masa residual del mismo elemento hoy en una muestra, se puede determinar cuántos períodos completos o porciones de períodos se han desarrollado entre la creación de la roca y la actualidad, o entre la muerte

del organismo que contiene el carbono y el actual, y en consecuencia, cuántos años (el actual o "presente") (Gerard Hugonie, 2007).

Los compuestos de carbono orgánico varían enormemente. El término "carbono orgánico total o COT" se usa para describir la medición de materia orgánica, lo cual puede tener distintos orígenes. El COT engloba la suma de todos los compuestos orgánicos presentes en la muestra, y como parámetro sumatorio aporta una medida fácil, rápida y precisa, de su nivel. En función de las condiciones externas, una mayor concentración de compuestos orgánicos puede facilitar el crecimiento microbiano, afectar el funcionamiento de otros equipos y favorecer la formación de otros subproductos no deseados e incluso tóxicos. El principal objetivo de esta tesis es generar un modelo cronológico cuantitativo para una secuencia de sedimentos depositado durante el Cuaternario tardío en la cuenca de Cieneguilla a través de la datación por radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ) de la materia orgánica preservada y entender la evolución de salmuera durante el intervalo de tiempo que abarca la columna sedimentaria.

## Capítulo 2

### Objetivos

#### 2.1 Objetivos Generales

El objetivo principal de este trabajo es asignar información cronológica y cuantitativa a los sedimentos depositados durante el Cuaternario tardío en la cuenca Cieneguilla, ubicada en el estado de Tamaulipas y estimar las tasas de sedimentación. Así como también estudiar las características químicas y físicas de los sedimentos para reconstruir la evolución de la salmuera en la escala temporal.

#### 2.2 Objetivos Particulares

(i) Describir las características de los sedimentos (textura, color y estructuras primarias) colectados a lo largo de la columna medida en la cuenca Cieneguilla

(ii) Estimar los contenidos de materia orgánica o TOC preservados en los sedimentos y caracterizar la propiedad física de los sedimentos mediante la medición de susceptibilidad magnética.

(iii) Generar diferentes modelos de edad usando los resultados de análisis de radiocarbono en materia orgánica preservado en sedimentos de diferentes profundidades.

(iv) Estimar las tasas de sedimentación y determinar información cronológica y cuantitativa de los sedimentos ubicados a diferentes profundidades.

(v) Identificación de los minerales clásticos y autigénicos. Así como también cuantificar las evaporitas mediante la estimación de carbonatos y sulfatos.

(vi) Reconstruir la evolución de la salmuera en la escala temporal.

## Capítulo 3

### Antecedentes I

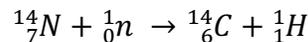
#### Radiocarbono

*“Dado que las plantas viven del dióxido de carbono, todos los animales serán radioactivos: ya que los animales en la Tierra viven de las plantas, todos los animales serán radioactivos. Por lo tanto... todos los seres vivos se volverán radioactivos por la radiación cósmica” Libby (1955).*

La datación por radiocarbono ( $^{14}\text{C}$ ) es la técnica más común para datar los sedimentos y suelos depositado durante el Cuaternario tardío (<57,000 años). Es posiblemente una de las técnicas radiométricas más utilizadas para este corto periodo de tiempo. Su origen se debe al profesor Willard Libby quien en el año 1949 publicó la primera medición de radiocarbono. Las plantas y animales asimilan el  $^{14}\text{C}$  cuando lo respiran, y en la fotosíntesis el contenido de  $^{14}\text{C}$  es el mismo que el de la atmósfera en ese momento. Cuando un ser vivo muere, la concentración de  $^{14}\text{C}$  empieza a decaer con una vida media, por lo que se puede conocer la edad cuando el ser vivo murió sabiendo la concentración de  $^{14}\text{C}$  en la materia orgánica de las muestras geológicas (Bradley, 1985). Sin embargo, la concentración de  $^{14}\text{C}$  no es constante en la atmósfera debido a la variación en la actividad solar (radiación cósmica) y campo magnético (Cohen, 2003). Los anillos de los troncos de los árboles vivos y los anillos de crecimiento en los corales tienen registro de concentración de radiocarbono del Cuaternario tardío; así que se tiene que calibrar la edad convencional (asumiendo que la concentración de  $^{14}\text{C}$  es siempre constante) con respecto a estudios previamente hechos usando de las curvas de calibración.

#### 3.1 Principios Básicos de la datación por Radiocarbono

El radiocarbono es producido en la atmósfera, por el bombardeo de un neutrón en un átomo de nitrógeno en la atmósfera.



Los neutrones son producidos en la atmósfera y se encuentran en su máxima concentración a los 15 km de altura aproximadamente. Los átomos de  $^{14}\text{C}$  son muy inestables y esto provoca que los átomos de  $^{14}\text{C}$  se oxiden de forma muy rápida a  $^{14}\text{CO}_2$ , donde se mezcla con el oxígeno de la atmósfera. Siempre se ha mantenido un equilibrio entre el  $^{14}\text{C}$  que decae y la producción de este, esto quiere decir que se produce alrededor de 7.5 kg de  $^{14}\text{C}$  nuevo y que es proporcional a la pérdida de  $^{14}\text{C}$  en la atmósfera debido al decaimiento de  $^{14}\text{C}$  a nitrógeno y la partícula  $\beta$ .

La pérdida es constante, las plantas y animales asimilan cierto  $^{14}\text{C}$  a través de la respiración y la fotosíntesis, cuando las células mueren son reemplazadas, generando un equilibrio de  $^{14}\text{C}$  en un organismo, sin embargo, cuando este organismo muere el

intercambio de  $^{14}\text{C}$  se acaba y empieza el decaimiento a nitrógeno (Figura 1, modificado de Bradley, 1985).

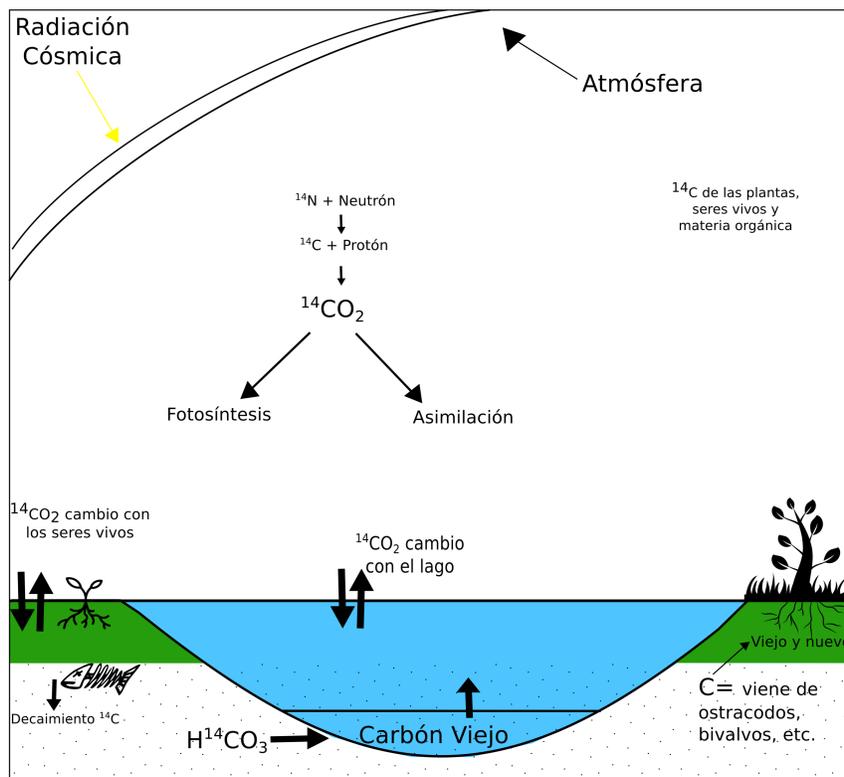


Figura 1 Modelo esquemático mostrando comportamiento de  $^{14}\text{C}$  en diferentes sistemas de la Tierra (modificado de Bradley, 1985).

El carbono cuenta con tres isótopos, ej.  $^{12}\text{C}$ ,  $^{13}\text{C}$  y  $^{14}\text{C}$ , este último es el único radioactivo y solo 10% de los isótopos de carbón son  $^{14}\text{C}$  (solo uno de un millón de millones de átomos es  $^{14}\text{C}$ ). Al entrar en la estratósfera se oxida y se convierte en  $\text{C}^{14}\text{O}_2$ , este decae en  $^{14}\text{N}$  que es un isótopo estable por la emisión de partículas beta ( $\beta$ ). Una partícula beta se libera del núcleo por cada átomo de  $^{14}\text{C}$  que se descompone, es esta inestabilidad/radioactividad la que da el nombre de "Radiocarbono". El contenido de  $^{14}\text{C}$  se obtiene de materiales biogénicos como madera, sedimentos orgánicos de lagos, caracoles, conchas, corales y materiales no convencionales como ropa, pigmentos y metales. Cuenta con una vida media de 5730 años, y en los métodos de datación se pueden encontrar fechas de hasta 10 media vidas, ya que cada vida media disminuye la concentración de  $^{14}\text{C}$  lo que hace más difícil su medición (Bradley, 1985).

### 3.2 Mediciones, materiales y problemas

Se debe contar con diferentes características para que un isótopo radioactivo sea útil para la datación (Bradley, 1985):

- a) Debe ser puro  $^{14}\text{C}$  o el isotopo hijo debe de tener una cantidad que pueda ser medida.
- b) Su vida media debe ser apropiada para el periodo de tiempo que se quiere fechar.
- c) Debemos conocer la concentración inicial del isotopo.

### 3.3 Errores

Uno de los errores más comunes es la mezcla de sedimentos y la contaminación que pueden ser producto de la falta de cuidado en el muestreo, y esto nos puede arrojar edades distintas y causar errores en un modelo de edad (Cohen, 2003). Otro error puede ser causado por los carbonatos antiguos que influyen en el  $\text{CO}_2$  del ambiente, mezclándose y dando datos más antiguos de lo que en realidad son (Bradley, 1985). También un error conocido como "*hard-water effect*" o efecto de agua dura (enriquecido en bicarbonato) que asimila  $\text{HCO}_3$  del lago y los carbonatos, fósiles, plantas y algas también lo hacen, modificando la concentración de  $^{14}\text{C}$  (Bradley, 1985).

### 3.4 Calibración

Se debe tener en cuenta que no todos los materiales tienen la misma concentración de  $^{14}\text{C}$  inicial, así que se debe medir con un espectrómetro de masa la proporción de  $^{14}\text{C}$  para poder obtener una edad convencional y lo cual posteriormente debe ser calibrado usando el software CALIB 7.1, proporcionando una fecha con respecto al año 1950 (considerado como presente).

### 3.5 Modelo de edad

Los datos calibrados que se obtienen después de una datación por radiocarbono deben ser analizados para poder entender y ver si las edades arrojadas tienen sentido, es decir si son estratigráficamente consistentes (sedimentos superficiales son más jóvenes que los sedimentos más profundos). Se obtienen varios modelos que asemejan las condiciones de sedimentación (interpolación puntual, interpolación lineal e interpolación polinómica) (Cohen, 2003) y así poder asignar edades a los eventos representados por cambio en la textura de sedimentos, contenido de minerales y otros aspectos geológicos y geoquímicos para poder generar hipótesis de cómo sucedieron los cambios en las condiciones ambientales.

### 3.6 Ultramoderno $^{14}\text{C}$

Las fechas obtenidas por el radiocarbono se expresa en cal. ka (kilo año) aP. o cal. año aP., donde cal. representa edad calibrada y aP. representa antes de presente. En esta técnica el presente se refiere al año 1950 como presente debido que posterior al 1950 ocurrieron muchas pruebas nucleares los cuales perturbaron la concentración de  $^{14}\text{C}$  en la

atmosfera. El radiocarbono que sale después de las pruebas nucleares, ya que incrementa un 120% su concentración en el mundo, se le llama  $^{14}\text{C}$  ultramoderno. Así que por este motivo solo se puede utilizar en fechas anteriores a 1950 (aP. o antes del presente) (Cohen, 2003).

## Capítulo 4 Antecedentes II

### 4.1 Ubicación

La Cuenca Cieneguilla ( $22.5^{\circ}$  N,  $99.5^{\circ}$  O, 1031 m sobre nivel del mar) es una cuenca sedimentaria ubicada en el margen de las regiones tropical y subtropical, en la parte nororiente de México (Figura 2). Esta cuenca almacena un cuerpo lacustre de naturaleza efímero y está situada en la parte suroeste del estado de Tamaulipas, es muy cercana al trópico de Cáncer ubicada en la latitud  $23^{\circ} 26' 14''$  norte.



Figura 2 Mapa mostrando la ubicación de la Cuenca Cieneguilla en la parte sur-occidental del estado de Tamaulipas, México.



Figura 3 Extensión de la Cuenca Cieneguilla (en rojo) en los estados de Tamaulipas y San Luis Potosí y ubicación de las ciudades en la cercanía (Fuente: Imagen Google Maps).

La cuenca tiene un área aproximada de 834 km<sup>2</sup>, localizada principalmente en el estado de Tamaulipas y con una pequeña parte en el estado de San Luis Potosí. Tiene una forma irregular, con perímetro de casi 204 km (38 km de largo y casi 54 km de ancho aproximadamente) (Figura 3). Se encuentra la cuenca a ~15 km sur de ciudad Tula (estado de Tamaulipas), 130 km sur-occidente de Ciudad Victoria, 140 km sur-orientado de Mathuala, 160 km nor-orientado de San Luis Potosí y 155 km nor-occidente de Ciudad Valles.

#### 4.2 Geología

La geología de la cuenca está caracterizada por abundantes afloramientos de caliza con lutitas y lutitas y areniscas de edad Cretácico Superior (Figura 4). Los afloramientos de basalto y brecha volcánica básica esta presentes en la parte sur-occidente de la cuenca. Los conglomerados son productos de erosión de las caliza, lutitas y arenisca y están presentes entre los afloramientos de caliza. Los depósitos más recientes están constituidos por depósitos lacustres del Cuaternario (Fuente: carta geológica de INEGI ).

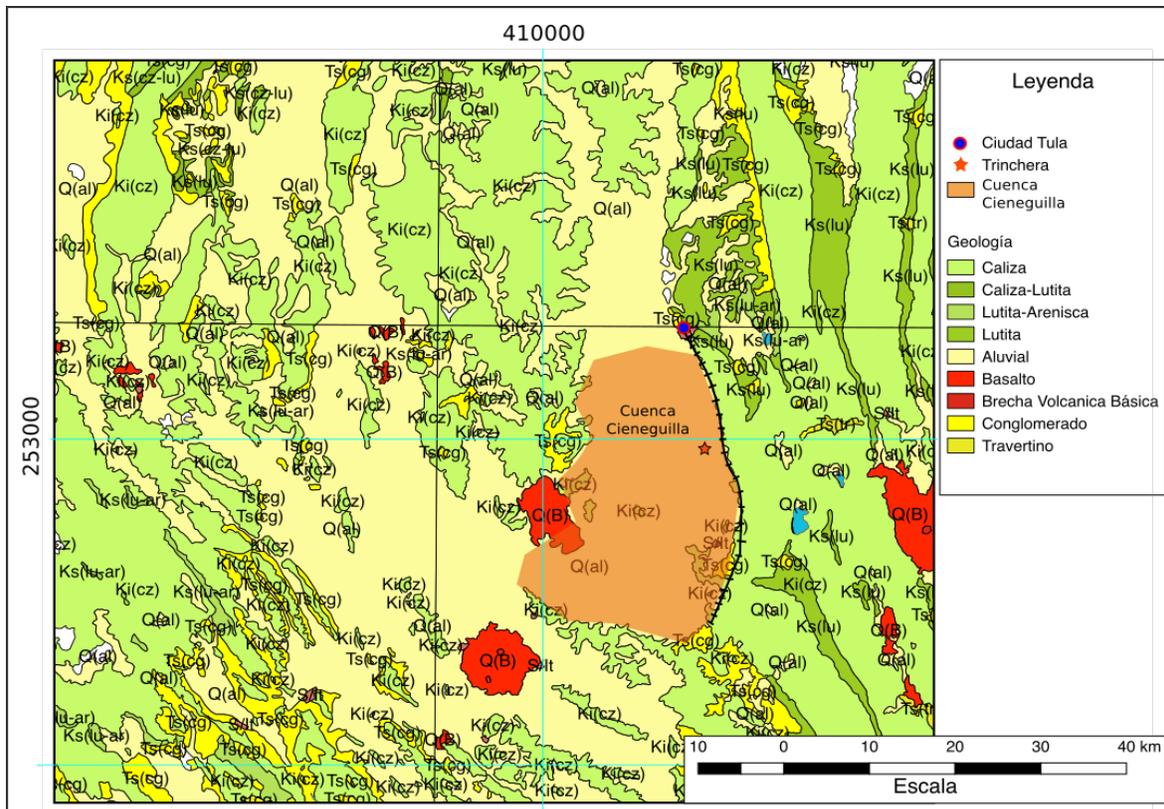


Figura 4 Carta Geológica de la Cuenca Cieneguilla y sus alrededores (modificada de INEGI, carta F14A57).

### 4.3 Clima

Se evaluó el clima de la cuenca tomando en cuenta tres estaciones meteorológicas ubicadas al norte (Tula), este (Mante) y oeste (Santa Rita) de la cuenca. Los datos comprenden precipitación y temperatura mensual de un intervalo representado por los últimos 60 años (Figura 5).

La estación ubicada en Ciudad Tula, al norte de la cuenca, se registra temperaturas promedio de 20 °C. La máxima de temperatura (23.9 °C) fue registrado en el mes de mayo y la mínima (14.6 °C) es en el mes de enero. La precipitación anual total es 412 mm y lluvias durante los meses de mayo-octubre representan 84% de la precipitación anual. Santa Rita, al Oeste de la cuenca, registra una precipitación anual de 314 mm y al igual que la estación de la ciudad de Tula, la época de lluvia ocurre durante el verano y otoño aportando el 80% de la precipitación anual. La temperatura máxima de la estación es de 23.5 °C en el mes de junio y la más baja en enero con 17.8 °C. En cambio, la estación ubicada en Ciudad Mante que se encuentra al este de la sombra orográfica generada por la Sierra Madre Oriental con una altura máxima de 1600 msnm registra temperaturas máximas de 28.9 °C en el mes de agosto. Las temperaturas más bajas de 18.7 °C se

presenta en el mes de enero. La precipitación promedio anual es 1050 mm y el 88% de la precipitación ocurre de mayo a octubre.

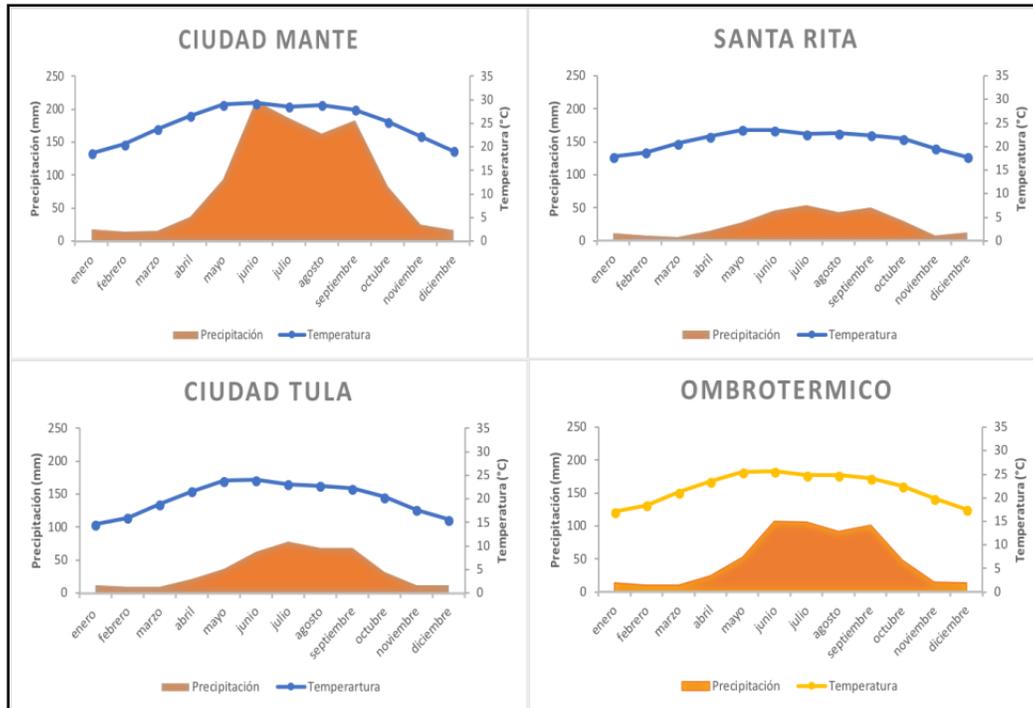


Figura 5 Gráficas ombrotérmicas mostrando la temperatura y precipitación registrado en tres diferentes estaciones meteorológicas ubicadas al norte, este y oeste de la cuenca Cieneguilla. También se muestra una gráfica con el promedio de temperatura y precipitación calculado con los datos de las tres estaciones. (Fuente de datos: <http://www.weatherbase.com>).

#### 4.4 Uso de Suelo y Vegetación

El uso de suelo en la cuenca principalmente es para la agricultura de temporal (una vez al año) y pequeñas zonas se utiliza para riego permanente. (Figura 6). La vegetación comprende de matorrales, mezquite y desértica en su mayoría. Los bosques de encinos y pastizales inducidos se encuentran en las zonas altas de la sierra (Fuente: Mapa de INEGI).

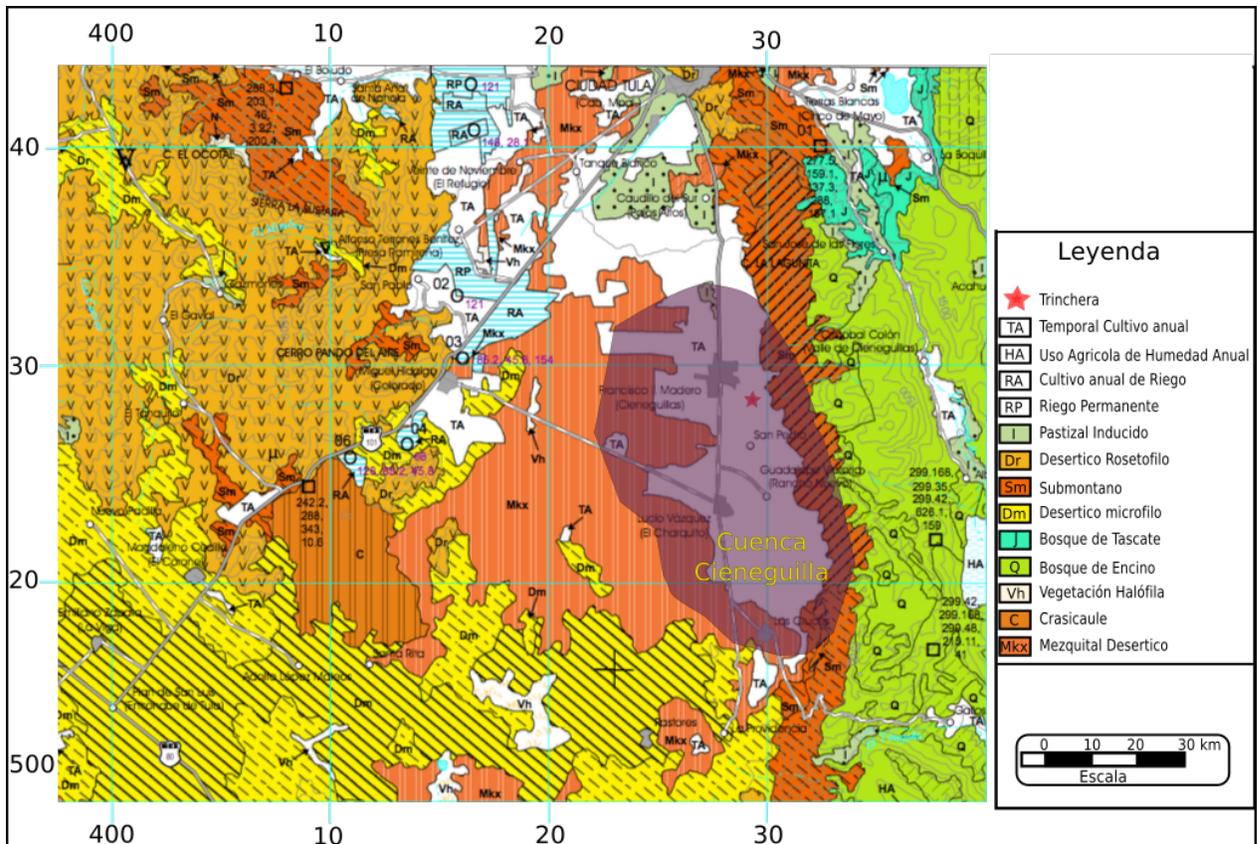


Figura 6 Mapa mostrando el uso de suelo y la vegetación en la Cuenca Cieneguilla y sus alrededores (Fuente: INEGI, carta F14A57).

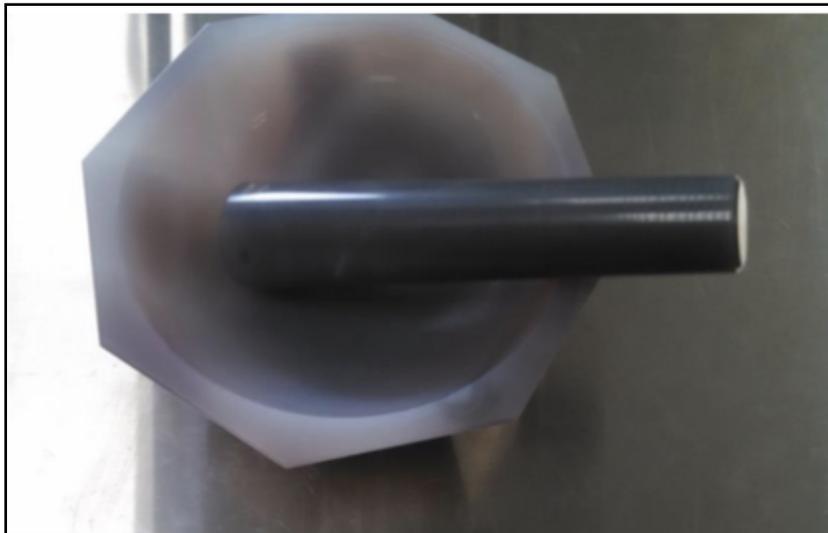
## Capítulo 5 Metodología

### 5.1. Trabajo de Campo

Se realizó una trinchera de tamaño 150 cm × 200 cm con una profundidad máxima de 320 cm en la parte oriente de la Cuenca Cieneguilla (22.5° N, 99.5°O). Se buscó una zona fuera del área agrícola para no encontrar perturbación por la actividad humana. De igual forma se desecharon los primeros 14 cm de la trinchera para evitar sedimentos perturbados por la actividad agrícola. Para el sub-muestreo de la trinchera se limpió una cara de esta y se comenzó a tomar muestras cada dos centímetros en las profundidades entre 302 cm y 14 cm. Las muestras fueron colectadas de 14-16 cm, 16-18 cm, 18-20 cm y así sucesivamente hasta 300-302 cm. Un total de 144 muestras fueron colectadas directamente en campo. Posteriormente las muestras se llevaron al Laboratorio de Paleoambientes y Paleoclimas del Instituto de Geología de la UNAM para su preparación y análisis.

### 5.2 Trabajo de Laboratorio

Las muestras fueron secadas en un horno ECOSHEL modelo 9025H a una temperatura constante de 50°C por un periodo de 24 horas para extraer totalmente cualquier rastro de agua que pudiera quedar. Después se homogeneizaron en un mortero de ágata (Figura 7), hasta llevarlo al tamaño de arcilla. Se guardaron y se colocaron en bolsas herméticas para conservarlas para refrigeraron y evitar cualquier cambio en la muestra en el proceso de análisis en la trinchera.



*Figura 7 Mortero de Ágata utilizado para la molienda de muestras colectada de la Cuenca Cieneguilla.*

## 5.3 Análisis mineralógico y geoquímico

### 5.3.1 Difracción de Rayos X

Los minerales presentes en 10 muestras de sedimentos fueron identificados y semi-cuantificados con el equipo de Difractómetro de Rayos X (DRX) de la marca Olympus modelo Terra 476 (Figura 8) en el Laboratorio Nacional de Geoquímica y Mineralogía (LANGEM) del Instituto de Geología. Este equipo permite identificar las estructuras cristalinas de los minerales cristalino contenido en la muestra. Tiene una fuente de radiación de cobalto y el equipo puede detectar minerales con abundancia mayor de 5% de concentración. Para este análisis se ocupó de 60 mg de muestras molida a  $120\ \mu\text{m}$  y seca y la muestra fue recuperada después del análisis.



*Figura 8 Equipo de DRX utilizado para la identificaron los minerales evaporíticos y clásticos en los sedimentos de la Cuenca Cieneguilla.*

### 5.3.2 Fluorescencia de Rayos X

Las concentraciones de elementos mayores (Ca, Al, Si) y menores (Ti, S) en las 144 muestras están asociadas a la abundancia de minerales evaporíticos y clásticos. Los contenidos de los elementos fueron estimados mediante análisis de fluorescencia de rayos X (FRX) en un equipo de la marca Thermo SCIENTIFIC y modelo Niton FXL 950 (Figura

9) en el laboratorio de Paleoambientes y Paleoclimas del Instituto de Geología en la UNAM. Las muestras molidas y secas fueron empacadas en pequeñas capsulas plásticas con una cara descubierta donde lleva una película especial para rayos X de Polipropileno TF-240-255 de  $4\mu\text{m}$  de grosor y 2.5'' de diámetro. Se colocan 10 gramos de muestra, un filtro más de celulosa y se rellena la capsula con guata y así quedaron listas para su lectura en el equipo de FRX. Se intentó no contaminar la muestra ni la película de polipropileno para no interferir durante este proceso de preparación. El tiempo total de medición es de 240 segundos pasando por 4 filtros de 60 segundos cada uno (principal, alto, bajo y gamma ligera). Se ocuparon un estándar USGS (SdAR-M2) después de la medición de cada 10 muestras analizadas para observar cualquier error y así mismo poder calibrarlo y obtener mejores resultados. Después de este proceso, la muestra queda reutilizable así que se pudo recuperar en su totalidad.



*Figura 9 Equipo de FRX utilizado para estimación de las concentraciones de elementos mayores y traza en las muestras colectadas de Cuenca Cieneguilla.*

### 5.3.3 Susceptibilidad Magnética

La susceptibilidad magnética estima el grado de sensibilidad de las muestras a la magnetización influenciada por un campo magnético. Todas las muestras fueron analizadas utilizando un equipo Bartington MS2E (Figura 10) con un sensor de resolución  $2 \times 10^{-6}$  SI en el laboratorio de Paleoambientes y Paleoclimas del Instituto de Geología en la UNAM. Se utilizaron las capsulas preparados para el análisis en FRX ya que la película de polipropileno permitió tener una superficie lisa. Durante la medición se procuró tener los

objetos de metal lo más lejano posible y las mediciones se hicieron sobre una mesa de madera. Al igual que el análisis de FRX, se utiliza un estándar con valor de susceptibilidad magnética conocida ( $352 \times 10^{-6}$  CGS) después del análisis de cada 10 muestras para detectar cualquier error en la medición.



*Figura 10 Equipo Barrington y el estándar MS2E utilizado para la medición de susceptibilidad magnética en las muestras de la Cuenca Cieneguilla.*

#### 5.3.4 Análisis de Carbono Orgánico Total (COT) y Carbonato ( $\text{CO}_3$ )

Los contenidos de carbono orgánico total (COT) y carbonato ( $\text{CO}_3$ ) fueron analizados en las 144 muestras mediante combustión en alta temperatura y reacción con ácido fosfórico en equipo de marca Thermo SCIENTIFIC y modelo HiPerTOC (Figura 11) en el laboratorio de Paleoambientes y Paleoclimas del Instituto de Geología en la UNAM. Los contenidos de carbono asociados con la materia orgánica y carbonatos fueron estimados en porcentaje. En este análisis se ocupó 20-30 miligramos de muestra molida y seca para llevarlas a dos diferentes procesos. Primero se estimó el contenido de  $\text{CO}_2$  libreado del carbono total (CT) combustionado la muestra a una temperatura de  $980^\circ\text{C}$  con un flujo de oxígeno constante y por medio de dos sensores infrarrojo. El  $\text{CO}_2$  asociado en los carbonatos fue estimado mediante una reacción de la muestra con ácido fosfórico diluido al 10%. Esta reacción provocó la emisión de  $\text{CO}_2$  de lo carbonatos y el carbono asociado con los carbonatos (CIT) fue estimado en el sensor infrarrojo del equipo y se obtuvo el contenido de  $\text{CO}_3$  mediante la siguiente fórmula:  $\text{CO}_3 (\%) = \text{CIT} (\%) \times 4.99$ . Los resultados

de este proceso se calibraron utilizando el software ThEuS. El carbono orgánico total (COT) se obtuvo mediante la diferencia de carbono total y carbono asociado con los carbonatos.



*Figura 11 Equipo HiperTOC utilizado para medición de las concentraciones de carbono orgánico total y carbonatos en las muestras de la Cuenca Cieneguilla.*

#### 5.4 Análisis de Radiocarbono

Se enviaron 5 muestras de sedimento total colectado a diferentes profundidades para su análisis por radiocarbono a un laboratorio comercial “International Chemical Analysis, Inc” en Miami, Florida en E.U.A para generar un control cronológico de la secuencia sedimentaria colectada de la cuenca. Los datos obtenidos fueron calibrados mediante el software CALIB 7.1 y las edades de las muestras de sedimentos en diferentes profundidades se determinó mediante generación de diferentes modelos de edad y obteniendo tasas de sedimentación de los modelos.

## Capítulo 6

### Resultados

La columna estratigráfica de sedimentos medida y muestreada en la trinchera en la Cuenca Cieneguilla tiene una longitud de 302 cm con base en la textura, color y estructura primarias, se dividió en 4 unidades (Figura 12). Los sedimentos están compuestos primordialmente de limos, arenas y arcillas. Se desecharon los primeros 14 cm (0-14 cm) de la columna para evitar muestras alteradas por actividad antropogénica.

La descripción de las unidades de la base a la cima es:

Unidad 4 (302-208 cm): Esta unidad representa la base de la columna y comprende sedimentos entre las profundidades de 302 y 208 cm. Los sedimentos están compuestos por limo-arcillas de color grisáceo masivos con dos intervalos de evaporitas a los 246-252 cm y 280-294 cm de profundidad.

Unidad 3 (208-96 cm): Esta unidad tiene un contacto gradual con la unidad 4 y representa sedimentos depositados entre las profundidades de 208 cm y 96 cm. Los sedimentos de la unidad están compuestos por limos masivos de color marrón claro con nódulos de carbonatos y evaporitas a lo largo de toda la unidad.

Unidad 2 (96-46 cm): Esta unidad tiene un contacto gradual con la unidad inferior (unidad 3) y representa sedimentos depositados entre profundidades de 96 y 46 cm. Los sedimentos están compuestos de limos de color marrón claro y presentan laminaciones. No se observa la presencia de nódulos de carbonatos y evaporitas a lo largo de toda la unidad.

Unidad 1 (46-14 cm): Los sedimentos entre las profundidades de 46 y 14 cm representan la unidad 1 y esta unidad tiene un contacto abrupto/erosional con sedimentos inferiores (unidad 2). Esta unidad comprende limo-arenas de color pardo amarillento y son masivos.

## 6.1 Columna estratigráfica

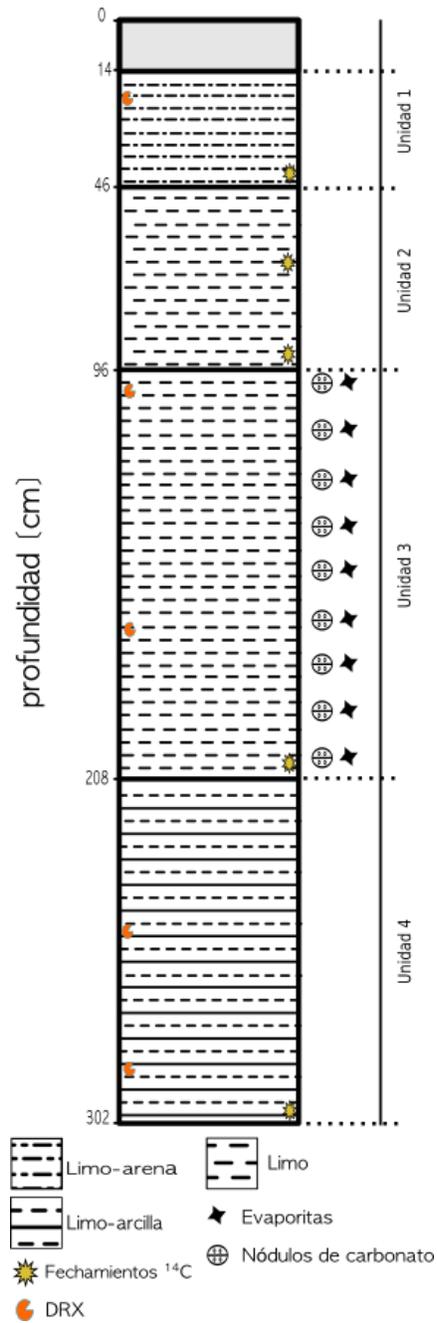


Figura 12 Columna de sedimento colectado en la cuenca Cieneguilla dividido en diferentes unidades, y ubicación de las muestras analizadas por radiocarbono y por la difracción de rayos X (DRX).

## 6.2 Materia Orgánica y susceptibilidad magnética

El contenido de la materia orgánica fue estimado mediante análisis de TOC (carbono orgánico total) en sedimentos de la cuenca. La Figura 13 muestra una comparación de la cantidad de carbono orgánico total de las muestras con valores de susceptibilidad magnética. Los comportamientos de ambos son similares a lo largo del perfil ( $R^2=0.60$ ). Se encuentra mayor cantidad de materia orgánica (TOC=3.01-0.79%) en la parte superficial del perfil (unidad 1, 46-14 cm). Los mismos sedimentos registran valores altos de susceptibilidad magnética ( $54.04-23.34 \times 10^{-5}$  SI). En resto del perfil, los contenidos de TOC (1.42-0.02%) y susceptibilidad magnética ( $28.70-8.49 \times 10^{-5}$  SI) en general son uniformes y bajos. Sedimentos de la unidad 3 (208-96 cm) muestran valores más bajos de susceptibilidad magnética ( $9.03 \times 10^{-5}$  SI), mientras que los valores más bajos de TOC (0.02%) están en sedimentos de la unidad 4.

Unidad 4 (302-208 cm): Los sedimentos de esta unidad contienen 0-1.5% de TOC, con un promedio de 0.76%. Los valores de susceptibilidad magnética varían entre  $11.2-20.9 \times 10^{-5}$  SI con un promedio de  $16.06 \times 10^{-4}$  SI.

Unidad 3 (208- 96 cm): Se estimó de 0.4-1.2% de TOC en sedimentos de la unidad, con promedio de 0.87%. Los valores de susceptibilidad magnética son de  $9.03-17.8 \times 10^{-5}$  SI, con el promedio de  $13.07 \times 10^{-5}$  SI.

Unidad 2 (96- 46 cm): Los valores de carbono orgánico total (TOC) son de 0.27-1.42%, con un promedio de 0.96%. Se obtuvieron valores de  $14.62-28.70 \times 10^{-5}$  SI de susceptibilidad magnética, con promedio de  $20.68 \times 10^{-5}$  SI.

Unidad 1 (46-14 cm): Los contenidos de TOC y los valores de susceptibilidad magnética son altos en sedimentos de esta unidad. Los valores de carbono orgánico total son de 0.79-3.01%, con un promedio de 1.73%. Así mismo, los valores de susceptibilidad magnética son  $23.34-54.04 \times 10^{-5}$  SI, con un promedio de  $42.17 \times 10^{-5}$  SI.

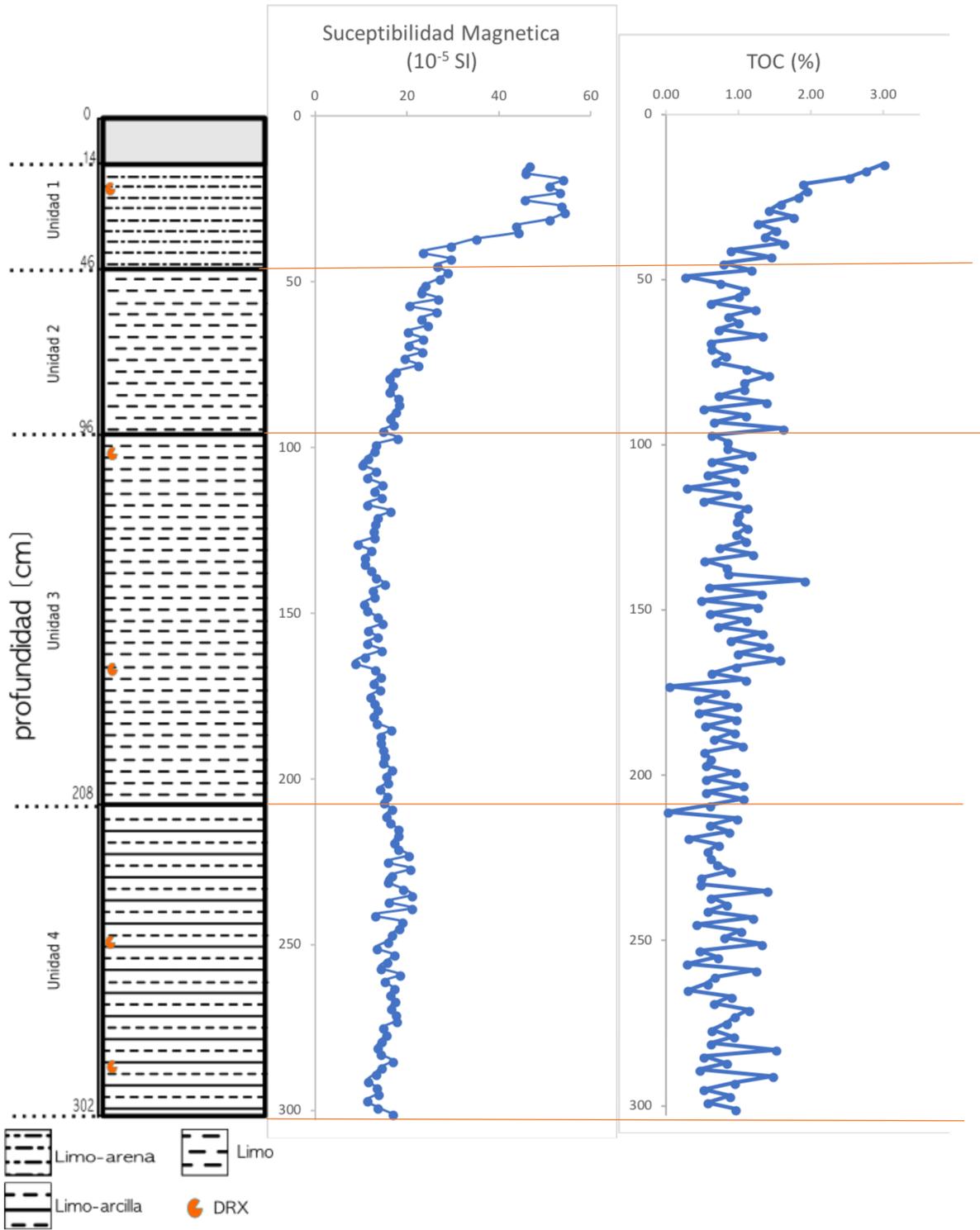


Figura 13 Comparación entre contenidos de TOC (Carbono Orgánico Total) y susceptibilidad Magnética a lo largo del perfil sedimentario de la Cuenca Cieneguilla.

### 6.3 Cronología

La cronología de la columna se obtuvo por la datación de radiocarbono de materia orgánica preservada en 5 muestras ubicadas a las profundidades de 301 cm, 207 cm, 95 cm, 69 cm y 45 cm a lo largo de la columna sedimentaria (Tabla 1). Todas las fechas fueron calibradas por el software CALIB 7.1, usando la curva Int Cal 13 que permite corregir las edades obtenidas a partir de los resultados convencionales (Figura 14).

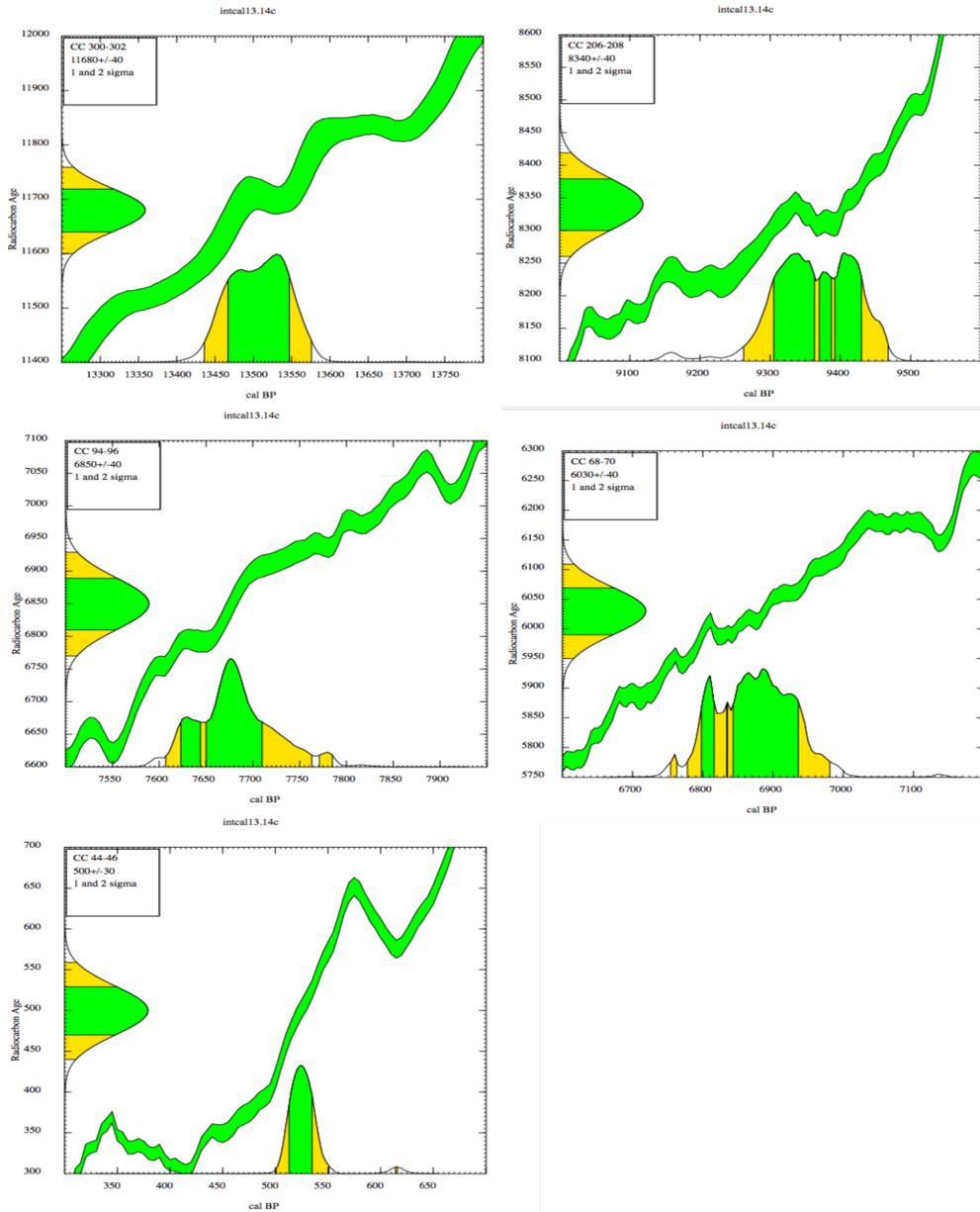


Figura 14 Gráficos mostrando calibración de los valores de edad convencional a la edad calendario con respecto al año 1950 (antes de presente) en el software Calib 7.1. En el eje X es la edad calibrada en años antes de presente o BP (Before Present) y en el eje Y es la edad convencional obtenida directamente del laboratorio.

Tabla 1 Resultados de las 5 muestras analizadas por la técnica de radiocarbono, profundidad de las muestras, edad convencional y edad calibrada.

Muestra	Profundidad (cm)	Edad <sup>14</sup> C	Edad Calibrada (cal año aP)	
			Rango 2-sigma	Mediana Probabilidad
CC 44-46	44-46	500 ± 30	502 - 552	526
CC 68-70	68-70	6030 ± 40	6778 - 6981	6875
CC 94-96	94-96	6850 ± 40	7608 - 7763	7680
CC 206-208	206-208	8340 ± 40	9262 - 9469	9364
CC 300-302	300-302	11680 ± 40	13436 - 13577	13509

Se generaron tres diferentes modelos de edad (diagrama XY, donde X representa la edad calibrada y Y representa profundidad) con los valores calibrados, que permitió estimar las diferentes tasas de sedimentación con respecto a los modelos.

### 6.3.1 Modelo de edad regresión polinómica

En este modelo de edad, se asume que los sedimentos de la cuenca fueron depositados en forma polinómica y no uniforme. El diagrama XY (edad calibrada vs. profundidad) permitió asignar edades a los sedimentos de diferentes profundidades, usando la ecuación exponencial  $y = 1E-06x^2 + 0.0043x$  con correlación ( $R^2 = 0.89$ ) (Figura 15). La base de la secuencia a 302 cm fue depositada hace 15360 cal año aP y los sedimentos presentes a la profundidad de 14 cm fueron depositado hace 2165 cal año aP. El perfil sedimentario representa la historia sedimentaria entre 15360 y 2165 cal años aP.

Limo-arcillas de color grisáceo con esporádica presencia de evaporitas de la unidad 4 (302-208 cm) representa el intervalo entre 15360-12431 cal años aP y limos masivos con nódulos de carbonatos y evaporitas de la unidad 3 (208-96 cm) fueron depositado entre 12431-7881 cal años aP. Los sedimentos de unidad 2 (96-46 cm, limos laminados) representan la historia de depositación entre 7881-4965 años aP y los limo-arenas masivas de la unidad 1 (46-14 cm) fueron depositado entre 4965-2165 cal años aP.

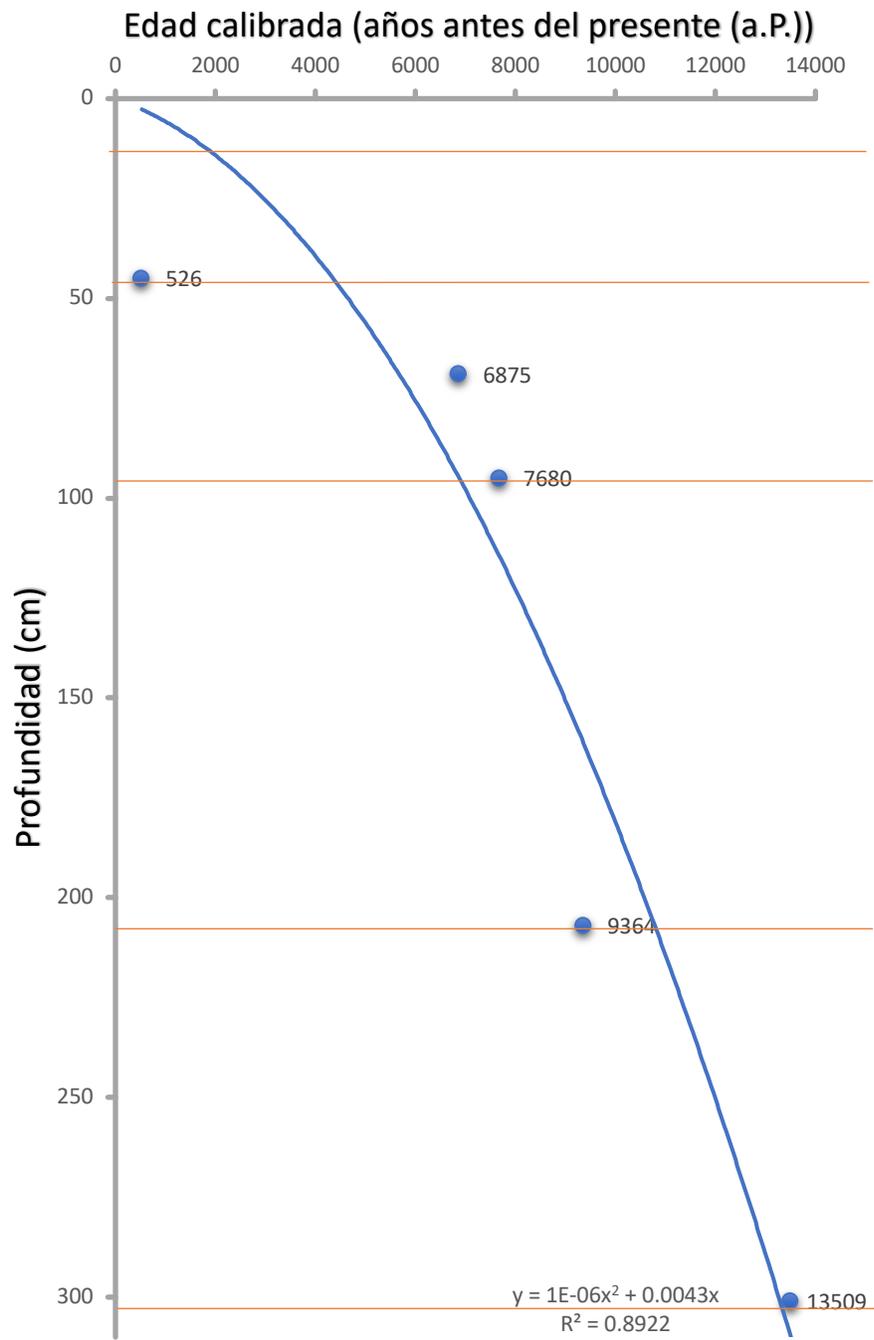


Figura 15 Modelo de edad por regresión polinómica basado en las 5 muestras de sedimentos de la cuenca Cieneguilla datadas por radiocarbono.

### 6.3.2 Modelo de edad regresión lineal

Se asume un comportamiento lineal en la tasa de sedimentación, lo cual indica que no hubo un cambio significativo en las tasas de deposición en la cuenca con el paso del tiempo. El modelo de edad lineal obtenido con las 5 fechas de radiocarbono fue representado por la ecuación de regresión lineal  $y = 0.0202x - 9.9219$  y la ecuación presenta una correlación ( $R^2$ ) de 0.78. Se estimó que la tasa de sedimentación fue uniforme y de 49.5 cm/año (Figura 16). En contraste con el modelo de edad polinómica, este modelo sugiere que la base de la secuencia a 302 cm fue depositada hace 15 441 cal año aP y los sedimentos presentes a la profundidad de 14 cm fueron depositados hace 1184 cal año aP. El perfil sedimentario representa la historia sedimentaria de la Cuenca Cieneguilla entre 15 441 y 1184 cal años aP.

Los sedimentos de la unidad 4 (302-208 cm) compuesto por limo-arcillas de color grisáceo con esporádica presencia de evaporitas representa el intervalo entre 15 441- 10 788 cal años aP y limos masivos con nódulos de carbonatos y evaporitas de la unidad 3 (208-96 cm) fueron depositado entre 10 788-5 243 cal años aP. Los sedimentos de unidad 2 (96-46 cm, limos laminados) representan la historia de deposición entre 5 243-2 768 años aP y los limo-arenas masivas de la unidad 1 (46-14 cm) fueron depositado entre 2768-1184 cal años aP.

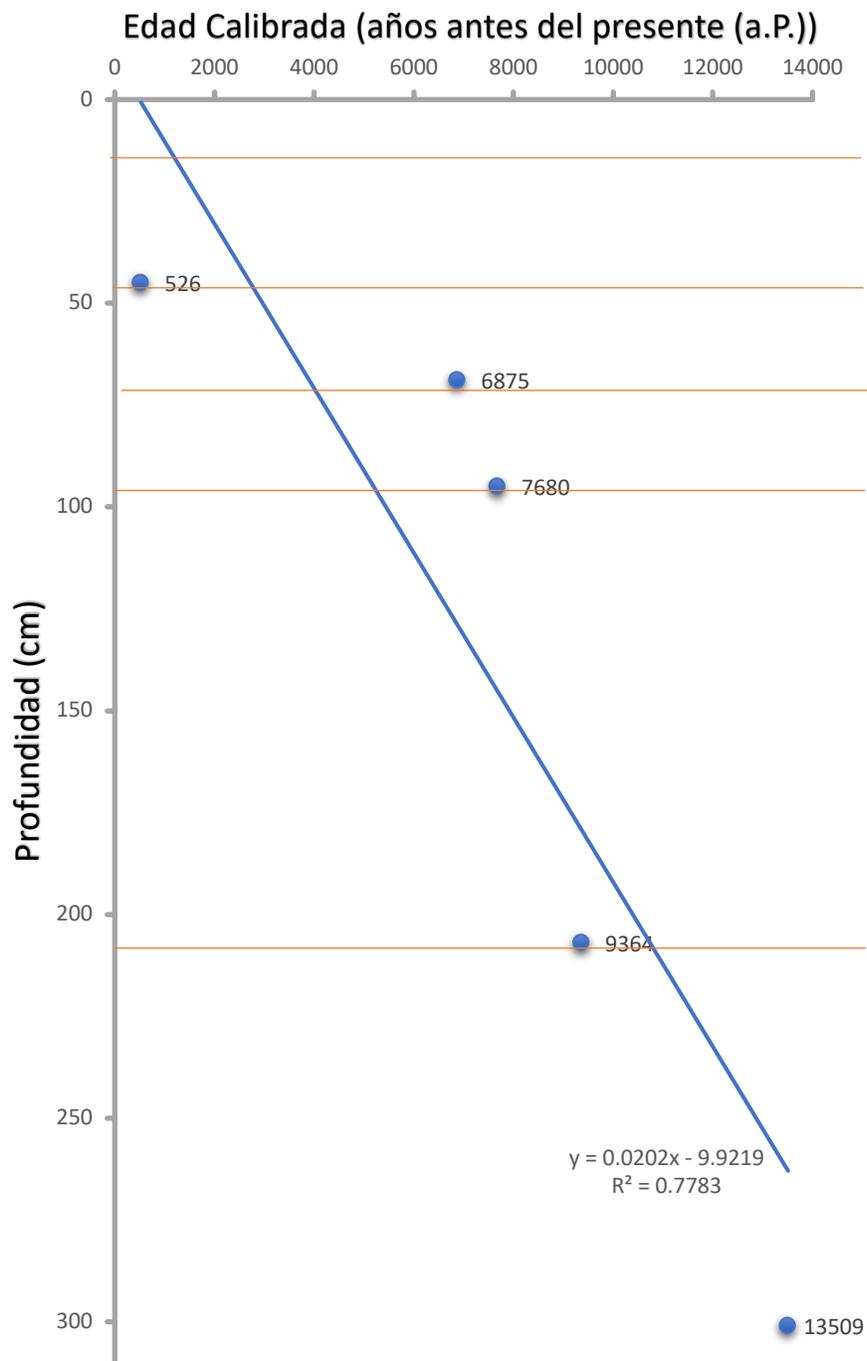


Figura 16 Modelo de edad con regresión lineal basado en las 5 muestras de sedimentos de la cuenca Cieneguilla datadas por radiocarbono.

### 6.3.3 Modelo de edad con interpolación lineal

Se considera que la tasa de sedimentación fue variable en este modelo de edad y se puede obtener más de una tasa de sedimentación dependiendo de los números de las muestras datadas (Figura 17). Las tasas de sedimentación se calculan entre dos diferentes muestras fechadas. Este modelo de edad está más cercano a la realidad debido a que la acumulación de sedimentos en las cuencas sedimentarias es variable, debido al régimen tectónico y condición climática. La vegetación y geología de la cuenca también controla la tasa de sedimentación. Basado en este modelo, las tasas de sedimentación varían de 3.8 cm/año a 84.7 cm/año (Figura 18). Sedimentos depositados entre 46-48 cm y 14-16 cm presentan la máxima tasa de sedimentación (84.7 cm/año) y representan entre 526 y 160 cal años aP. Así mismo, los sedimentos depositados entre 68-70 cm y 44-46 cm presentan la mínima tasa de sedimentación (3.8 cm/año) y representan entre 6875 y 526 cal años aP, lo que indica que posiblemente se trate de un hiato en el registro sedimentario provocado por la erosión. Los sedimentos entre 300-302 cm y 206-208 cm (13,509-9364 cal años aP) fueron depositados en una tasa de 22.7 cm/año y los sedimentos entre 96-98 cm y 46-48 cm (cal años aP) fueron depositados con una tasa de 32 cm/año. El perfil sedimentario representa la historia sedimentaria de la Cuenca Cieneguilla entre 13 509 y 160 cal años aP.

Este modelo de edad asigna un intervalo de tiempo entre 13 509 - 9364 cal años aP a los sedimentos de la unidad 4 (302-208 cm, limo-arcillas de color grisáceo con esporádica presencia de evaporitas). Limos masivos con nódulos de carbonatos y evaporitas de la unidad 3 (208-96 cm) fueron depositados entre 9364 - 7680 cal años aP. Los sedimentos de la unidad 2 (96-46 cm, limos laminados) representan la historia de deposición entre 7680 - 526 años aP y los limo-arenas masivas de la unidad 1 (46-14 cm) fueron depositados entre 526 - 160 cal años aP.

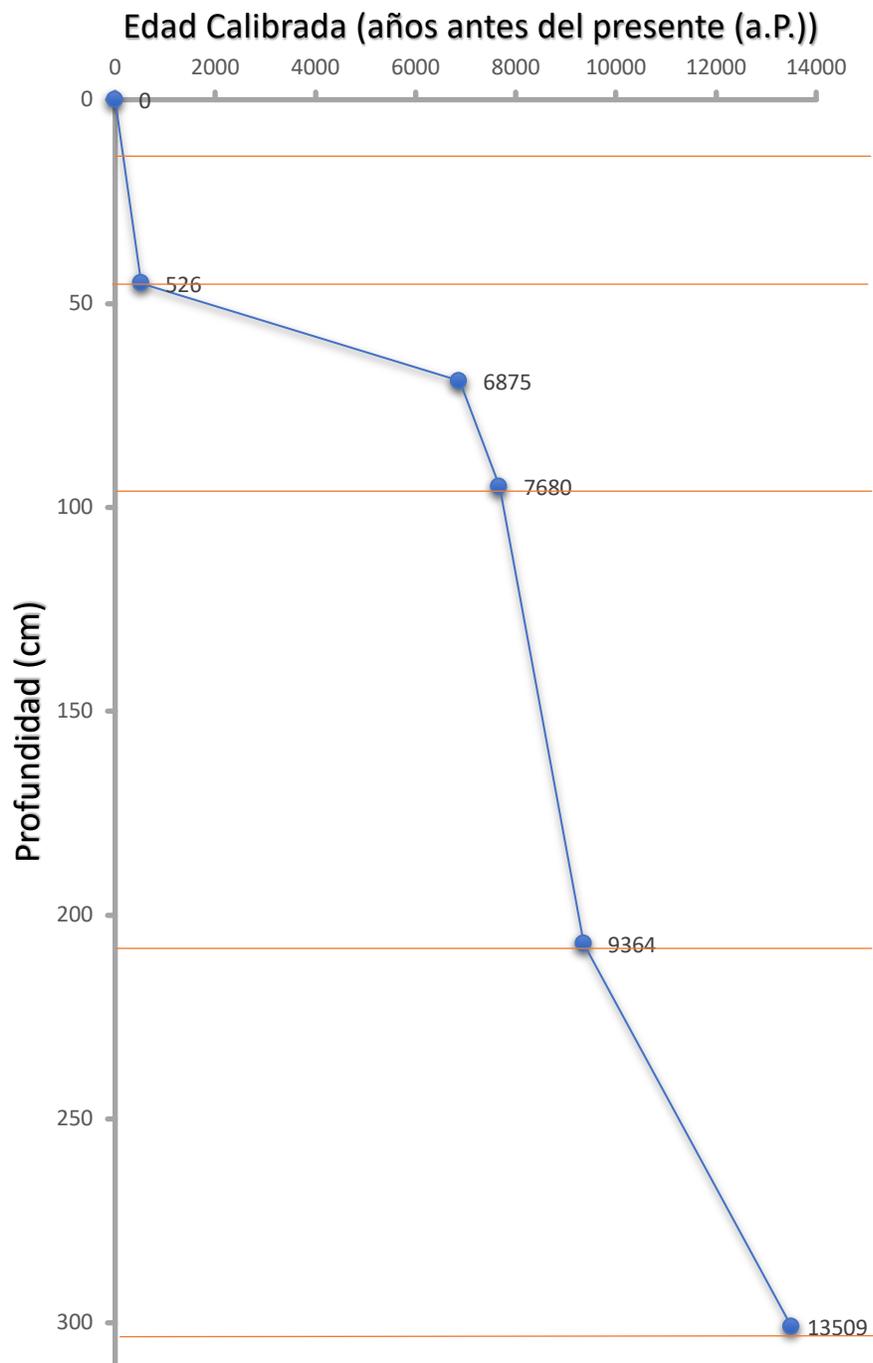


Figura 17 Modelo de edad con interpolación lineal generado con las 5 muestras de sedimentos de la cuenca Cieneguilla datadas por radiocarbono.

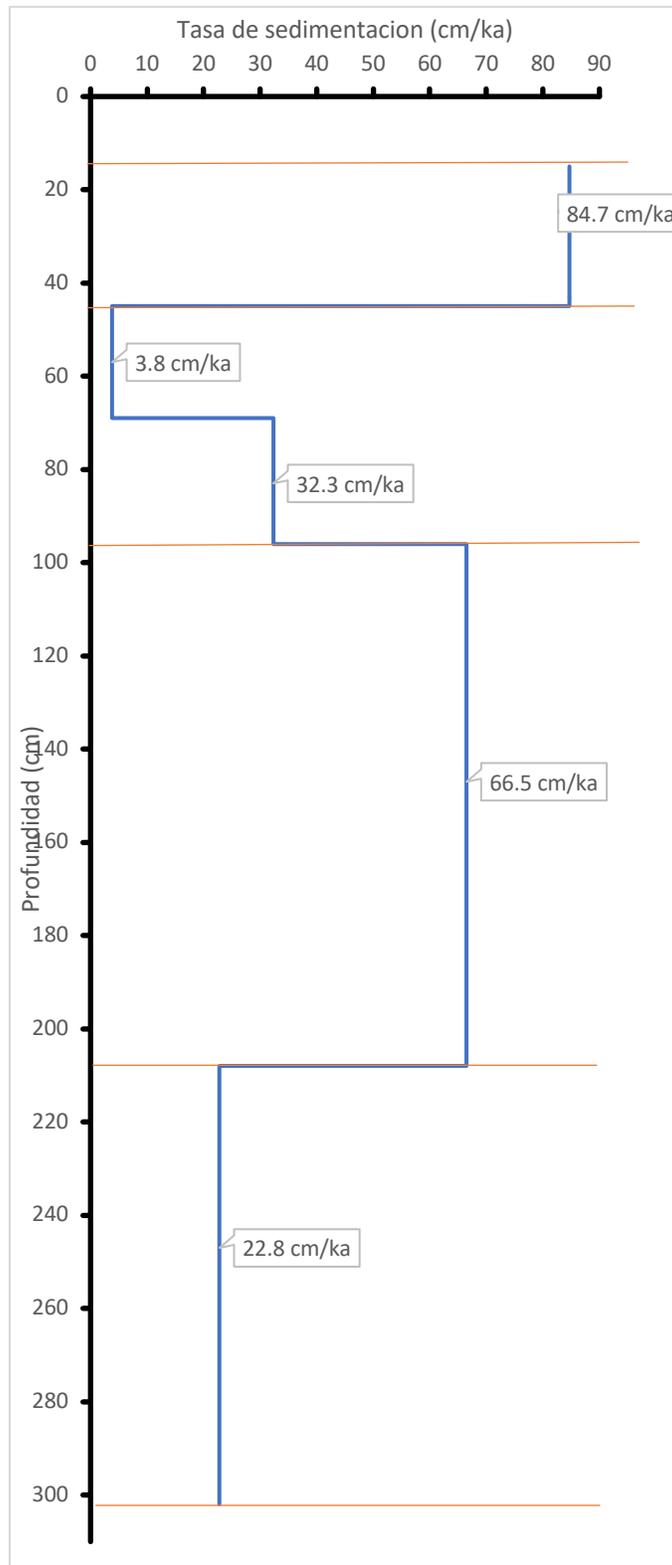


Figura 18 Diferentes tasas de sedimentación obtenidas a partir del modelo de edad con interpolación lineal.

## 6.4 Mineralogía

La mineralogía de las muestras colectadas en la cuenca fue identificada mediante DRX y está compuesta por minerales clásticos y autigénicos (Tabla 2 y Figura 19). Los minerales clásticos son representados por los silicatos como cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y aluminosilicatos como caolinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) y albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ). Yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ), basanita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5(\text{H}_2\text{O})$ ), calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) y halita ( $\text{NaCl}$ ) son los minerales autigénicos. Yeso y basanita representan los sulfatos y calcita representa los carbonatos. Halita representa los cloruros. Las abundancias de clásticos son: cuarzo > albita > caolinita. Los contenidos estimados por DRX son semi-cuantitativos. El contenido de cuarzo varía entre 11 y 33.5% y la abundancia de albita es 6-15%. El contenido de caolinita varía entre 4% y 13.5%. La asociación y abundancia de los clásticos en general son uniforme en todas las unidades.

Tabla 2 Minerales encontrados en diferentes muestras de la Cuenca Cieneguilla analizadas mediante DRX.

Muestra	Profundidad (cm)	Clásticos	Autigenicos
CC 20-22	20-22	Cuarzo [ $\text{SiO}_2$ ] Caolinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ] Albita [ $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ]	Calcita [ $\text{CaCO}_3$ ]
CC 40-42	40-42	Cuarzo [ $\text{SiO}_2$ ] Caolinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ] Albita [ $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ]	Calcita [ $\text{CaCO}_3$ ]
CC 72-74	72-74	Cuarzo [ $\text{SiO}_2$ ] Caolinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ] Albita [ $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ]	Calcita [ $\text{CaCO}_3$ ]
CC 100-102	100-102	Cuarzo [ $\text{SiO}_2$ ] Caolinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ]	Calcita [ $\text{CaCO}_3$ ] Basanita [ $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5(\text{H}_2\text{O})$ ] Yeso [ $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ]
CC 164-166	164-166	Cuarzo [ $\text{SiO}_2$ ] Caolinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ] Albita [ $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ]	Halita [ $\text{NaCl}$ ] Calcita [ $\text{CaCO}_3$ ] Basanita [ $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5(\text{H}_2\text{O})$ ] Yeso [ $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ]
CC 188-190	188-190	Cuarzo [ $\text{SiO}_2$ ] Caolinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ] Albita [ $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ]	Calcita [ $\text{CaCO}_3$ ] Yeso [ $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ]
CC 218-220	218-220	Cuarzo [ $\text{SiO}_2$ ] Caolinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ] Albita [ $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ]	Calcita [ $\text{CaCO}_3$ ] Yeso [ $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ]
CC 250-252	250-252	Cuarzo [ $\text{SiO}_2$ ] Caolinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ] Albita [ $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ]	Calcita [ $\text{CaCO}_3$ ] Yeso [ $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ]
CC 280-282	280-282	Cuarzo [ $\text{SiO}_2$ ] Caolinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ] Albita [ $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ]	Calcita [ $\text{CaCO}_3$ ] Yeso [ $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ]
CC 292-294	292-294	Cuarzo [ $\text{SiO}_2$ ] Caolinita [ $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ] Albita [ $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ]	Yeso [ $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ] Calcita [ $\text{CaCO}_3$ ] Basanita [ $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5(\text{H}_2\text{O})$ ]



Unidad 4 (302-208 cm): Los sedimentos de la unidad están compuestos por calcita y yeso. Los carbonatos y evaporitas muestran variación. En general, la abundancia de yeso es mayor en comparación con la calcita. La abundancia de calcita varía entre 25.5-62% y el yeso varío entre 2-23.5%. La muestra ubicada en la profundidad de 294-292 cm contiene 40.3% de basanita.

Unidad 3 (208-96 cm): Sedimentos de esta unidad contienen carbonatos, sulfatos y cloruros. En general, el carbonato está representado por 22-40.5% de calcita y sulfato esta representados por 2-23.5% de yeso. Algunas muestras (166-164 cm y 102-100 cm) contienen 18.5-40.5% de basanita. Así mismo, halita está presente en una muestra en trazas (<3%).

Unidad 2 (96-46 cm): La muestra en la parte superior de la unidad (72-74 cm) están principalmente compuesto por calcita.

Unidad 1 (46-14 cm): Sedimentos de la unidad contienen solo calcita.

## 6.5 Abundancia de carbonato y sulfato

Después de identificar y estimar semi-cuantitativamente los minerales con DRX, se calculó el contenido de  $\text{CaCO}_3$  para cuantificar la abundancia de calcita utilizando los datos de TIC (Carbón Inorgánico Total). Así mismo, se cuantificó las abundancias de yeso y basanita (juntos) con los datos de S (azufre) calculando el contenido de  $\text{CaSO}_4$ . Los sedimentos del perfil contienen 8.91-30.9% de  $\text{CaCO}_3$  (promedio de 22.80%) y 0.5-48.5% de  $\text{CaSO}_4$  (promedio de 5.64%) (Figura 20). Los comportamientos de  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaSO}_4$  son inversos ( $R^2=-0.60$ ), es decir en los horizontes con más carbonatos se observan menor abundancia de sulfatos y viceversa.

Unidad 4 (302- 208 cm): El contenido de  $\text{CaCO}_3$  en sedimentos de esta unidad es 8.9-25.4% (promedio=23.91%) y los contenidos de  $\text{CaSO}_4$  varía entre 0.8-47.6% (promedio=5.24%). hasta 0.79%. En general, la abundancia de  $\text{CaCO}_3$  es relativamente más uniforme en comparación con los valores de  $\text{CaSO}_4$ . Se observaron mayor abundancia de  $\text{CaSO}_4$  en muestras de las profundidades de 293 cm (47.6%), 281 cm (20.0%) y 251 cm (24.1%). Muestras en las mismas profundidades muestran menor contenido de  $\text{CaCO}_3$ .

Unidad 3 (208-96 cm): Los contenidos de  $\text{CaCO}_3$  y  $\text{CaSO}_4$  son comprables con los sedimentos de la unidad 4.  $\text{CaCO}_3$  varía entre 8.9% y 25.4%, con un promedio de 20.45%. Los contenidos de  $\text{CaSO}_4$  son 0.8- 48.5%, con un promedio de 9.56 %. El contenido de  $\text{CaSO}_4$  es mayor en las profundidades de 165 cm (48.5%), 147 cm (25.5%) y 101 cm (24.7%).

Unidad 2 (96-46 cm): Los sedimentos de esta unidad casi no contienen  $\text{CaSO}_4$ . La concentración de  $\text{CaSO}_4$  varía entre 0.7 % y 2.1%, con un promedio de 0.84%. El contenido de  $\text{CaCO}_3$  está entre 23.5-30.9% (promedio=26.86%) refleja los resultados de DRX mostrando que los sedimentos la unidad están principalmente compuesto por la calcita.

Unidad 1 (46-14 cm): La composición química de los sedimentos es similar a la composición química de la unidad 2. Sin embargo, los sedimentos de esta unidad contienen menor  $\text{CaCO}_3$ . El contenido de  $\text{CaSO}_4$  es 0.5-0.7% (promedio= 0.58%) refleja ausencia de evaporitas como yeso y basanita. El contenido de  $\text{CaCO}_3$  es 16.8-27.6% (promedio=21.32%), refleja la composición mineralógica de la unidad. Los sedimentos de la unidad principalmente tienen presencia de calcita.

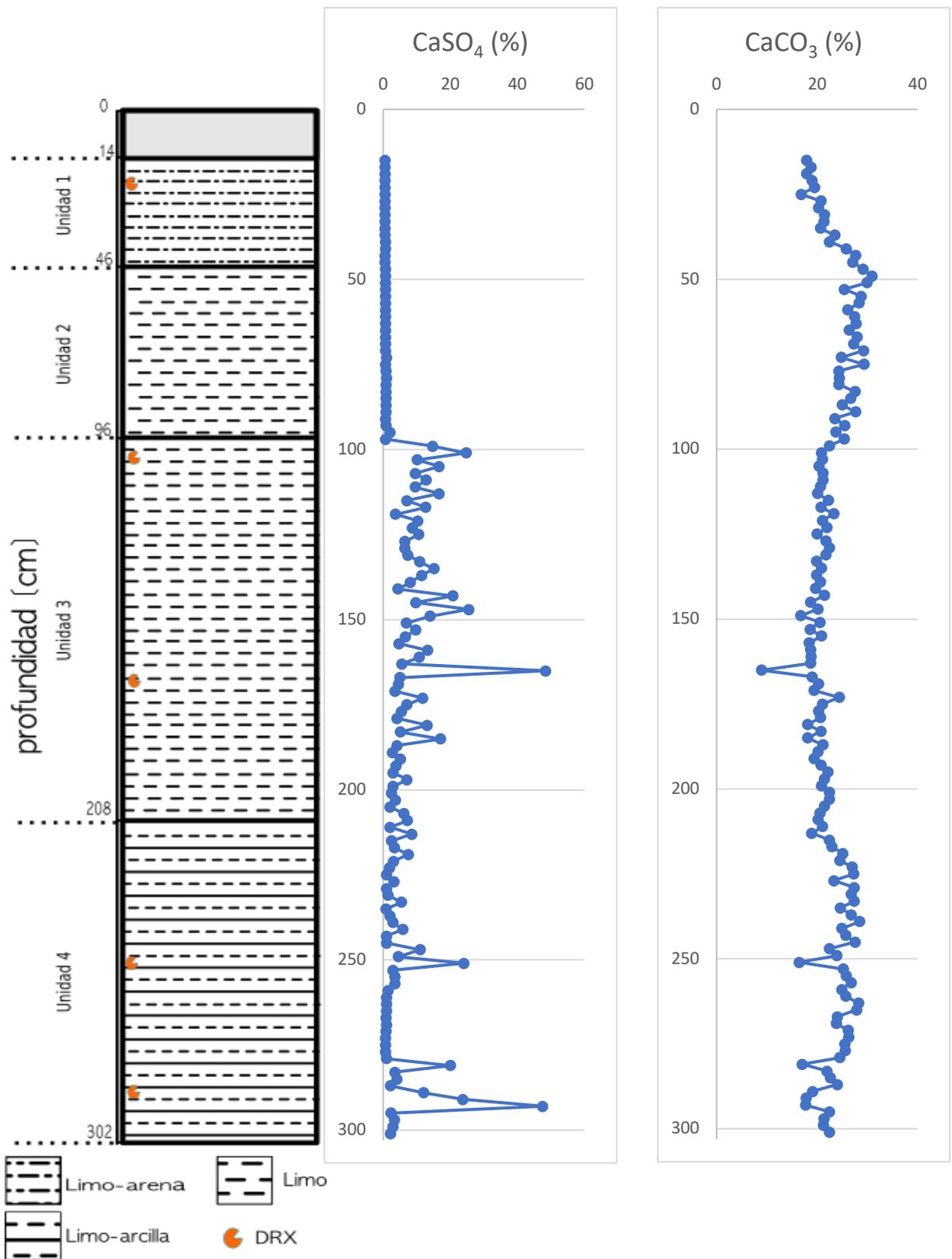


Figura 20 Las concentraciones de CaCO<sub>3</sub> y CaSO<sub>4</sub> en sedimentos a lo largo del perfil sedimentario colectado en la Cuenca de Cieneguilla.

## Capítulo 7

### Discusión

Considerando los objetivos particulares de este proyecto de investigación, los resultados de este trabajo se agruparon en dos diferentes conceptos de “modelo cronológico y tasa de sedimentación” y “evolución de la salmuera de la cuenca en la escala temporal”.

#### 7.1 Modelo cronológico y tasa de sedimentación

La secuencia de sedimentos fue muestreada en la parte oriental de la cuenca Cieneguilla, ubicada en los límites de la mesa central y la Sierra Madre Oriental, en la sombra orográfica de la Sierra Madre Oriental. La cuenca alberga un lago efímero y recibe una precipitación anual entre 314-412 mm, principalmente por las lluvias en los meses de junio a septiembre (Figura 5). La secuencia sedimentaria comprende sedimentos ubicados en las profundidades entre de 302 - 14 cm, ya que los primeros 14 cm de la trinchera no se tomaron en cuenta debido a que pudieron estar perturbados por procesos antropogénicos (Figura 12). Los sedimentos contienen bajos contenidos de materia orgánica y la concentración de TOC preservado en los sedimentos varía entre 0.02% y 3.01% (Figura 13). Una correlación intermedio y positivo ( $R^2= 0.60$ ) entre el TOC y susceptibilidad magnética de los sedimentos muestran que el contenido de materia orgánica aumenta proporcionalmente cuando las abundancias de minerales magnéticos aumentan. Eso indica que la materia orgánica que se encuentra en la cuenca es de origen alóctona, y fue arrastrada a la cuenca por las lluvias y durante la erosión. Debido a que los sedimentos están empobrecidos en materia orgánica, las muestras fueron analizadas mediante AMS (espectrometría de masas con aceleradores) para la obtención de las fechas de radiocarbono en 5 muestras ubicadas en las profundidades de 302-300 cm, 208-206 cm, 96-94 cm, 70-68 cm y 46-44 cm, arrojando edades estratigráficamente consistentes. De este modo las fechas obtenidas fueron 13, 509 años calibrados ante del presente con respecto al 1950 para el intervalo de 302- 300 cm, 9364 años calibrados para 208-206 cm de profundidad, 7680 años en 96-94 cm y 6875 años calibrados para 70-68 cm. Por último, la muestra más somera de la secuencia fue depositada hace 526 años calibrados en la profundidad de 46-44 cm. El error asociado en los datos de radiocarbono es de 24 años a 105 años (Tabla 1).

Se generaron tres diferentes modelos de edad para asignar un control cronológico a la secuencia y a los sedimentos muestreados en diferentes profundidades a lo largo de la secuencia sedimentaria. El modelo de edad indica que la tasa de sedimentación fue disminuyendo de forma polinómica bajo la ecuación  $y = 1E-06x^2 + 0.0043x$  (Figura 15), mientras que la regresión lineal sugiere que la tasa de sedimentación fue de forma uniforme y no cambio con el paso del tiempo (Figura 16). Considerando los dos modelos de edad, la base de la secuencia (302 cm) fue depositado hace 15,360 años y 15,441 años, respectivamente. Ambos modelos sobreestiman la edad de la muestra obtenido por el análisis de radiocarbono de la muestra ubicada en la profundidad de 302 cm indicando

13,509 años antes del presente (Figura 21). Así mismo, los modelos de regresión polinómica y regresión lineal asignan edades de 2165 años y 1184 años a la muestra ubicada en la profundidad de 14 cm. En este trabajo se observa un cambio en las texturas en la secuencia sedimentaria (limo-arena, limo y limo-arcilla) lo cual indica cambios en las energías de depositación. Así mismo el contacto erosional y abrupto entre los sedimentos de las unidades 2 y 1 en la profundidad de 46 cm (Figura 12) indica que las tasas de sedimentación no fueron lineal y uniforme. Se generó el modelo de edad interpolación puntual (Figura 17), el cual considera diferentes tasas de sedimentación. Las tasas de sedimentación variaron entre 3.8 cm/ka y 84.7 cm/ka. La mínima tasa de sedimentación (3.8 cm/ka) muestra la presencia de un hiatus, posiblemente provocado por la erosión durante un intervalo seco entre 6875 y 526 cal años aP. En general, la secuencia sedimentaria representa una historia sedimentaria de la cuenca Cieneguilla ocurrido entre 13, 509 años y 160 años y no hubo preservación de sedimentos depositados entre 6875 y 526 cal años aP.

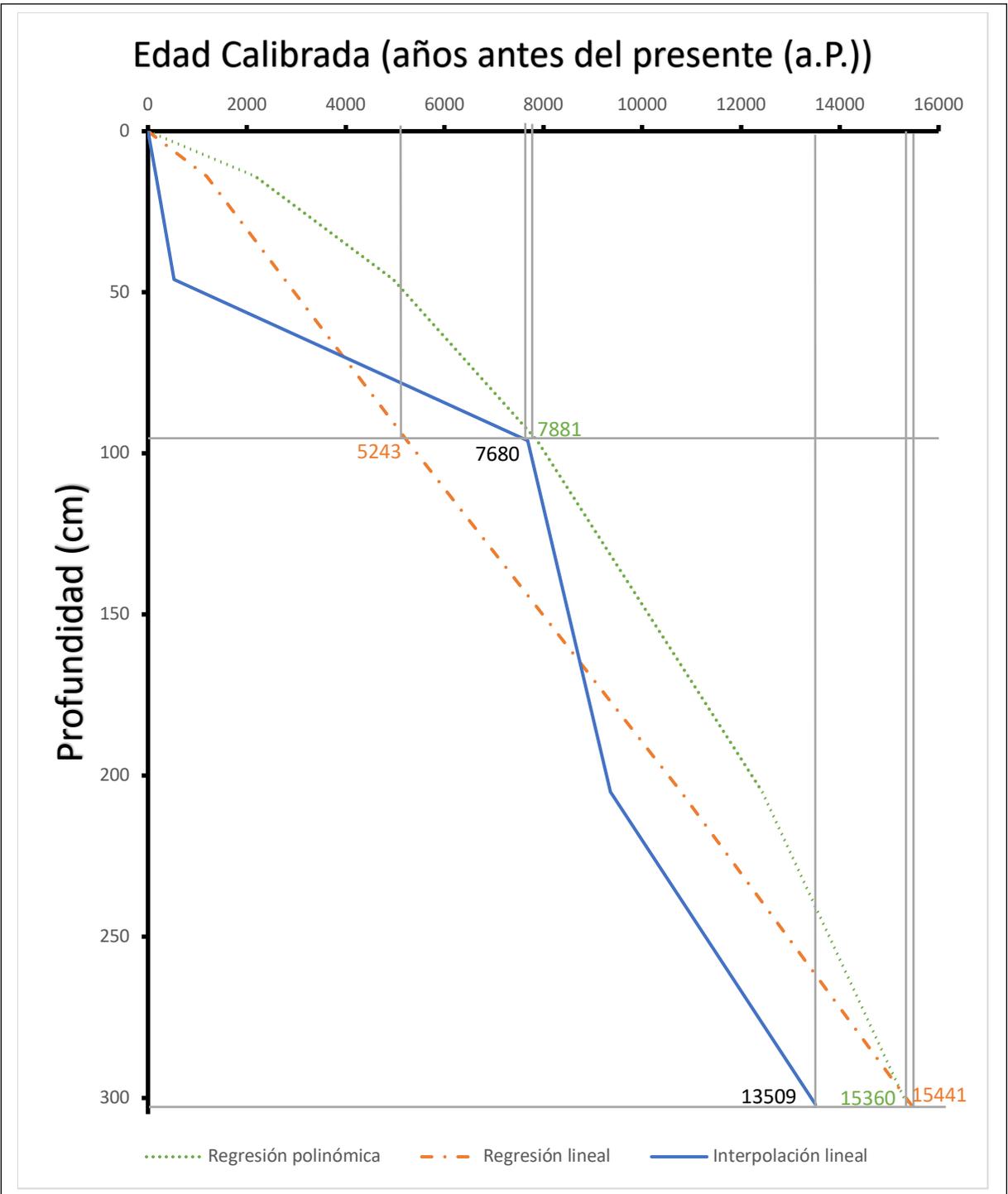


Figura 21 Las edades estimadas para la base de la secuencia (302 cm) y sedimento ubicado en la profundidad de 96 cm a partir de las tres diferentes modelos de edad generados con las fechas de radiocarbono.

## 7.2 Evolución de la Salmuera

Los minerales clásticos provienen principalmente de la erosión de lutitas, areniscas y basaltos expuestos alrededor de la cuenca y fueron arrastrados vía procesos eólico y pluvial para la sedimentación en la cuenca. Caolinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) proviene de las lutitas y las areniscas. El cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ) y la albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ) provienen de la arenisca y el basalto. Cabe resaltar que la asociación y abundancia de los clásticos a lo largo de la secuencia, es decir desde hace 13509 años, no muestra variación y fueron uniformes en las 4 unidades de sedimentos.

Sin embargo, los minerales autigénicos muestran variaciones en sus composición y abundancias. Se observa un cambio brusco con respecto a la composición de minerales autigénicos en la profundidad los 96 cm (hace 7680 cal años aP). En la parte más profunda de la secuencia sedimentaria (302-96 cm), se encuentran carbonatos y sulfatos, principalmente representados por calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ) y basanita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 0.5(\text{H}_2\text{O})$ ). Algunas muestras de este intervalo también contienen cloruros. La presencia de basanita en la secuencia pudo ser debido a los procesos de deshidratación de la muestra por medio del secado a  $50^\circ\text{C}$  durante el procesamiento para los análisis mineralógico y geoquímico. La presencia de halita representa los cloruros en la profundidad de 168-166 cm. La parte superior de la secuencia (96-14 cm) esta compuesta principalmente por los carbonatos, representado por la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Los sulfatos y cloruros están ausentes en sedimentos de este intervalo. La variación en la composición y abundancia de las evaporitas proveen información sobre la composición de flujo de agua y evolución de la salmuera con el paso de tiempo en los últimos 13,509 cal años.

Según el modelo de la evolución de salmueras propuesto por Eugster y Hardie (1978), tres tipos de agua representan el flujo inicial a las cuencas sedimentarias (Figura 22). El agua tipo I (alcalinas,  $\text{pH} > 7$ ) están enriquecidas por bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) y contienen mínimo o nulo calcio (Ca) y magnesio (Mg). Este tipo de agua precipita minerales del tipo carbonatos sódicos (como trona o nahcolita) durante la concentración evaporítica. El agua tipo II (agua dura), al contrario, está mayormente enriquecida de Ca+Mg y carece del bicarbonato ( $\text{Ca} + \text{Mg} \gg \text{HCO}_3^-$ ). Este tipo de agua no precipita carbonatos y así iniciando con la precipitación de sulfatos de Ca (yeso) durante la concentración evaporítica. El agua tipo III esta enriquecidas en menor medida por bicarbonato en comparación con Ca y Mg ( $\text{HCO}_3^- > \text{Ca} + \text{Mg}$ ). Al inicio de la concentración evaporítica de este tipo de agua, los carbonatos precipitan (inicialmente la calcita y después otros carbonatos como protodolomita y magnesita aumentando el contenido de Mg). Mientras el flujo de agua siga siendo el mismo y la mayor temperatura y el mayor grado de evaporación precipitaría los sulfatos de Ca (yeso). Si aun hay agua (mayor residencia en la cuenca), la evolución de salmuera llega hasta la precipitación de cloruros como la halita ( $\text{NaCl}$ ).



## Capítulo 8

### Conclusiones

Las conclusiones de este trabajo son las siguientes:

- La columna estratigráfica de la trinchera tiene un espesor de 302 cm de profundidad. No se tomaron en cuenta los primeros 14 cm ya que podían presentar anomalías causadas por la actividad humana (agricultura) en la cuenca Cieneguilla. La columna se divide en 4 unidades donde las texturas indican presencia de limo-arena, limo y limo-arcilla.
- El contenido de carbono orgánico total (TOC) varía entre 0.02-3.01%, mientras que la susceptibilidad magnética fluctúa entre  $8.49 \times 10^{-5}$  y  $54.04 \times 10^{-5}$  SI. El comportamiento de ambos es similar con  $R^2=0.60\%$ , indicando que la materia orgánica preservada en los sedimentos es alóctona.
- Se plantearon 3 diferentes modelos de edad: regresión lineal, regresión polinómica e interpolación lineal, donde el último fue el más adecuado e indica que la secuencia sedimentaria (302-14 cm) fue depositada entre 13,509 y 160 cal años aP.
- El modelo de interpolación lineal arroja diferentes tasas de sedimentación a lo largo de la secuencia. La más baja (3.8 cm/ka) en la unidad 2 indica un hiato de depositación, mientras que la tasa de sedimentación mayor (84.7 cm/ka) se encuentra en la unidad 1 para los sedimentos depositados entre 526 y 160 años.
- Los minerales clásticos fueron representados por cuarzo ( $\text{SiO}_2$ ), caolinita ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ) y albita ( $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ ). La asociación y abundancia de los clásticos a lo largo de la secuencia fueron uniformes. Los minerales autigénicos fueron compuestos predominantemente por la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ), así como yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2(\text{H}_2\text{O})$ ). La halita ( $\text{NaCl}$ ) está presente en contenidos de trazas. La variación en la composición y abundancia de las evaporitas indican la evolución de la salmuera con el paso de tiempo en los últimos 13,509 cal años.
- La presencia de calcita, yeso y halita indican que el flujo inicial era de agua tipo III ( $\text{HCO}_3 > \text{Ca} + \text{Mg}$ ). El tiempo de residencia durante la primera fase (desde 13,509 hasta 7680 cal años aP) fue más largo y la evolución de salmuera permitió la precipitación de carbonatos, sulfatos y cloruros. Durante la segunda fase (desde 7680 hasta 160 cal años aP), el tiempo de residencia fue corto, así que permitió la precipitación de solo carbonatos, representado por la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ). Los dos intervalos con diferentes tiempos de residencia del agua posiblemente indican la cuenca recibió mayor cantidad de lluvia entre 13,509 y 7680 cal años aP en comparación con el intervalo de 7680- 160 cal años aP. Posiblemente, la temperatura fue mayor durante el segundo intervalo, acelerando la evaporación del cuerpo del agua en la cuenca.

## Bibliografía

Bradley, Raymond S., 1999, «*Paleoclimatology Reconstructing Climates of the Quaternary, Second Edition*»

Cohen, Andrew S., 2003, «*Paleolimnology: The History and Evolution of Lake Systems*», 2003

Eugster, H. P., y L. A. Hardie, 1978 «*Saline lakes. In 'Lakes, Chemistry, Geology, Physics' (A. Lerman, Ed.)* » pp. 237-294, Springer-Verlag, New York. Google Scholar.

Hugonie, Gerard, 2007, «*Geocronología*», Hipergéo, artículo, 1-3 pp.

INEGI, 2001, Descarga de mapas, México en cifras, <http://www.beta.inegi.org.mx/app/mapas/>, consulta: 07 de agosto de 2018

Miralles, Alfredo Arche. «*Sedimentología: del proceso físico a la cuenca sedimentaria.*» Vol 46. Editorial CSIC-CSIC Press, 2010.

Servicio Geológico Mexicano, 2017, «*Geoquímica*», <https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Geoquimica/Introduccion-geoquimica.html>, consulta: 06 de agosto del 2018

Walker Mike «*Quaternary Dating Methods*», 2005