



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN
NICOLÁS DE HIDALGO**



INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**MAESTRÍA EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN
DEL TERRITORIO**

**ESTUDIO TAFONÓMICO DE MAMÍFEROS PEQUEÑOS DE LA FAUNA LOCAL
INIYOO EN EL YACIMIENTO SANTIAGO YOLOMÉCATL, OAXACA
(OLIGOCENO TEMPRANO)**

TESIS

COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRO EN GEOCIENCIAS Y PLANIFICACIÓN DEL TERRITORIO

PRESENTA

LIC. EN BIÓL. JOSÉ EDUARDO HERNÁNDEZ CORTES

ASESORA: DRA. ISABEL ISRADE ALCÁNTARA

COASESOR: DRA. ROSALÍA GUERRERO ARENAS

AGOSTO DE 2020

ÍNDICE

I. INTRODUCCIÓN	
1.1 <i>Tafonomía</i>	5
1.2 <i>Tafonomía: tipos de desgaste en ambientes fluviales</i>	7
1.3 <i>Diagénesis y mineralogía en fósiles</i>	15
II. ANTECEDENTES	
2.1 <i>Micromamíferos en el registro fósil</i>	17
2.2 <i>Tafonomía en México</i>	18
2.3 <i>Tafonomía en ambientes fluviales</i>	19
2.4 <i>Tafonomía espacial y análisis geoestadístico</i>	20
III. JUSTIFICACIÓN	21
IV. HIPÓTESIS	22
V. OBJETIVOS	
5.1 <i>General</i>	22
5.2 <i>Específicos</i>	22
VI. METODOLOGÍA	
6.1 <i>Área de estudio</i>	23
6.2 <i>Método de muestreo, obtención e identificación de fósiles</i>	30
6.3 <i>Análisis tafonómico</i>	32
6.4 <i>Análisis geológico</i>	34
6.5 <i>Análisis Geoestadístico</i>	34
6.6 <i>Reconstrucción artística del paleoambiente</i>	34
VII. RESULTADOS	
7.1 <i>Descripción general de la zona</i>	35
7.2 <i>Estratigrafía: afloramiento fosilífero “Jesús Bones”</i>	35
7.3 <i>Análisis tafonómico</i>	42
7.4 <i>Análisis geoestadístico</i>	53
7.5 <i>Reconstrucción del ambiente sedimentario de la zona</i>	56
VIII. DISCUSIÓN	
8.1 <i>Estratigrafía de la zona</i>	58
8.2 <i>Análisis tafonómico</i>	63
8.3 <i>Mineralogía y permineralización</i>	67
8.4 <i>Análisis geoestadístico</i>	67
IX. CONCLUSIONES	68

ÍNDICE DE FIGURAS

(Fotografías e ilustraciones de autoría propia, excepto en las que se establece su autor)

Figura 1. Mandíbula fósil de <i>Metacervoceros</i>	8
Figura 2. Mandíbula de roedor con manchas de manganeso y materia orgánica.....	9
Figura 3. Microfotografía del patrón dendrítico de manganeso sobre un fósil e incisivo de un roedor fósil en vista transversal.....	10
Figura 4. Fósiles con distintos grados de abrasión.....	11
Figura 5. Poscraneales fósiles con marcas de raíces.....	12
Figura 6. Incisivos fósiles de roedores con marcas de digestión (a y b) y corrosión química (c).....	13
Figura 7. Fracturas en diferentes fósiles.	13
Figura 8. Húmero desarticulado incrustado en los sedimentos originales.....	14
Figura 9. Vista panorámica de la zona de estudio. (Localidad “Jesús Bones”)	24
Figura 10. Macrolocalización de la zona de estudio Santiago Yolomécatl.....	25
Figura 11. Relieve del municipio de Santiago Yolomécatl. Modificado de INEGI (2005).....	28
Figura 12. Geología del municipio de Santiago Yolomécatl.....	29
Figura 13. Huesos de tuza utilizados para la identificación de los especímenes fósiles.....	30
Figura 14. Métodos de trabajo en campo.....	31
Figura 15. Laboratorio de paleobiología de la Universidad del Mar campus Puerto Escondido.....	33
Figura 16. Imagen de los estratos basculados.....	35
Figura 17. Sucesiones estratigráficas identificadas en campo.....	36
Figura 18. Estructuras sedimentarias.....	38
Figura 19. Columna estratigráfica tipo realizada de la zona de estudio.....	39
Figura 20. Lente de arcilla limosa en sedimentos de arcilla.....	40
Figura 21. Lecho lenticular.	41
Figura 22. Abundancia relativa de la totalidad de los restos recuperados.....	42
Figura 23. Abundancia relativa de los elementos craneales.....	43
Figura 24. Abundancia relativa de elementos postcraneales.....	43
Figura 25. Fósiles de roedores de la categoría de meteorización.....	45
Figura 26. Fósiles de roedores de la categoría de abrasión.....	46
Figura 27. Fósiles de roedores de la categoría de desarticulación.....	47
Figura 28. Difractograma de muestra fósil (F1).....	49
Figura 29. Difractograma de muestra fósil (F2).....	50
Figura 30. Difractograma de muestra de sedimentos (S1).....	51
Figura 31. Difractograma de muestra de sedimentos (S2).....	52
Figura 32. Mapa de distribución de fósiles georreferenciados. Elaborada en ArcGis v10.3.....	53
Figura 33. Gráfica de distribución de probabilidades para la prueba de promedio de vecinos más cercanos.....	54
Figura 34. Gráfica de función K de Ripley.....	55

<i>Figura 35. Reconstrucción de la zona de Santiago Yolomécatl para el Oligoceno temprano.....</i>	<i>56</i>
<i>Figura 36. Modelo de enterramiento para fósiles de mamíferos pequeños de la zona.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 37. Evidencia de canales presentes en un diferente afloramiento cercano a la zona de estudio.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 38. Evidencias de rizaduras en estratos arcillosos cercanos a la zona de estudio.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 39. Evidencia de deslizamientos en el yacimiento Jesús Bones.....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 40. Zona de calcreta en el afloramiento.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 41. Sistemas transversales y axiales en un sistema intramontañoso.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 42. Diagrama de abundancia de fósiles en los estratos de la zona.....</i>	<i>66</i>

RESUMEN:

En el presente estudio se analizaron las características tafonómicas y mineralógicas de 404 especímenes fósiles colectados en la región de la Mixteca Alta en el noroeste de Oaxaca. En este yacimiento se han registrado 17 taxones de mamíferos fósiles, tres de reptiles, y dos icnotaxones de abejas y avispas, lo que hace de esta localidad uno de los sitios fosilíferos con mayor riqueza del Oligoceno temprano y el primero para la zona tropical de Norte América. Las características tafonómicas que se analizaron fueron: meteorización, abrasión, desarticulación, color, impregnaciones, integridad y tipo de fracturas. Cada una de estas variables se clasificaron por medio de grados que se establecieron según la intensidad observada en los especímenes, y permitieron conocer el grado de retrabajo que sufrieron antes de su fosilización en los sedimentos de la zona. Los estudios mineralógicos demostraron una relación entre la composición de los sedimentos y la de los fósiles, por lo que se infiere que la fosilización se llevó a cabo por medio de permineralización muy cercana al yacimiento actual. La utilización de herramientas geoestadísticas nos permitió identificar patrones de acumulación en el sitio y explican de cierta manera la abundancia de fósiles en algunos puntos de la zona. Se pudo estimar que los fósiles sufrieron poco transporte durante su diagénesis y escaso o nulo retrabajamiento. Por último, se realizaron ilustraciones científicas de un modelo de enterramiento para los fósiles de la zona y la reconstrucción del paisaje de la zona para el periodo del Oligoceno temprano.

ABSTRACT:

In the present study, the taphonomic and mineralogical characteristics of 404 fossil specimens collected in the Mixteca Alta region in northwest Oaxaca were analyzed. In this site, 17 taxa of fossil mammals, three of reptiles, and two ichnotaxons of bees and wasps have been registered, which makes this locality one of the richest fossil sites of the early Oligocene and the first for the northern tropical zone of America. The taphonomic characteristics that were analyzed were: weathering, abrasion, disarticulation, color, impregnations, integrity and type of fractures. Each of these variables were classified by means of degrees that were established according to the intensity observed in the specimens, and allowed to know the degree of rework that they suffered before their fossilization in the sediments of the area. Mineralogical studies showed a relationship between the composition of the sediments and that of the fossils, so it is inferred that the fossilization was carried out by means of permineralization very close to the current deposit. The use of geostatistical tools allowed us to identify accumulation patterns at the site and explain in a certain way the abundance of fossils at some points in the area. It could be estimated that the fossils suffered little transport during their diagenesis and little or no reworking. Finally, scientific illustrations of a burial model for the fossils of the area and the reconstruction of the landscape of the area for the early Oligocene period were made.

Palabras Clave. *Fósiles, enterramiento, micromamíferos, reconstrucción, ilustración*

I. INTRODUCCIÓN

1.1. Tafonomía

La tafonomía es la ciencia que estudia las “leyes del enterramiento” (del griego *taphos* “enterramiento” + *nomos* “ley”), la transición a partir de restos orgánicos de la biósfera hacia la litósfera; es decir, los procesos de fosilización desde la muerte de un organismo hasta su diagénesis. Aunque el término de tafonomía fue establecido por Efremov (1940), esta ciencia ha sido practicada por siglos. Algunas de las primeras investigaciones referentes a este tema fueron llevadas a cabo por científicos como Leonardo Da Vinci (1452-1519) quien, por medio de observaciones de bivalvos vivos y muertos, infirió que los fósiles ubicados en las montañas cercanas a Monferrato, Italia, no habían sido transportados ahí por el diluvio bíblico, sino que habían habitado y muerto *in situ*. Nicolás Steno (1638-1686) considerado padre de la geología, también por medio de inferencias tafonómicas, llegó a la conclusión que ciertas estructuras llamadas coloquialmente “lenguas de piedra” se trataban en realidad de dientes fósiles de tiburones. Robert Hooke (1635-1703) otro notable científico de su época, comparó la estructura celular del corcho con la madera petrificada, apoyando de esta manera la afirmación de Steno que establecía que los fósiles tenían un origen orgánico y no eran resultado de una “virtud plástica” de la roca contenedora, como era considerado por todos en ese tiempo (Martin, 1999). De esta manera, estos tres grandes personajes mediante sus argumentos, utilizando la razón y un pensamiento crítico, dieron paso al desarrollo de la paleontología, geología y a la tafonomía que se conoce hoy en día.

La tafonomía, más allá de ser una ciencia que nos indica como se entierran los fósiles, tiene su propósito con la humanidad como cualquier ciencia establecida. Integrada con la paleontología, nos proporciona más información acerca del origen de la vida y la biodiversidad del pasado, además de contarnos la historia de los cambios climáticos que han ocurrido a lo largo del tiempo. Dada la naturaleza de que existan sesgos en el registro fósil, es esencial comprender como ocurren éstos para explicar la historia de la biodiversidad y el impacto que los cambios climáticos tuvieron en los sistemas biológicos del pasado, por lo cual la tafonomía es esencial para responder estas cuestiones (Allison y Bottjer, 2011).

Como estudio sistemático de la preservación fósil y sus procesos implicados, la tafonomía puede dividirse en dos amplias subdisciplinas que proveen de información valiosa

para análisis tafonómicos y paleoambientales: 1) la bioestratinomía, la cual considera que los procesos que ocurren entre la muerte de un organismo y su ubicación final dentro de los sedimentos por medio de procesos mecánicos (tanatocenosis) y 2) la fósil-diagénesis, la cual explica los procesos de fosilización que ocurren subsecuentemente al enterramiento (procesos químicos). De esta manera, la calidad de preservación de un fósil y la información en particular que podemos obtener de estos, está determinado mayormente por la bioestratinomía y los procesos diagenéticos en su fase temprana, los cuales ocurren en el entorno del medio de sedimentación y son característicos para distintos tipos de ambientes (Brett y Baird, 1986).

Los procesos tafonómicos a lo largo del tiempo han ejercido un profundo y amplio sesgo en el registro fósil. Puede decirse que hay pocos o ningún conjunto de organismos fósiles que se hayan conservado sin algún tipo de “preservación selectiva”, y esto es debido a que están influenciados principalmente por acción biológica, física o por procesos geoquímicos que son dependientes del medio de depósito (Allison y Bottjer, 2011). Por lo tanto, es inevitable que estos procesos tafonómicos se presenten durante la diagénesis de casi cualquier espécimen o conjunto de fósiles. En este contexto, es importante tener en cuenta que cualquier afloramiento fósil debe someterse inicialmente a un análisis tafonómico, ya que con ayuda de esta disciplina podemos dilucidar el contexto geológico-biológico que tuvo lugar durante los procesos de enterramiento de dichos especímenes, además de poder obtener información sobre su historia paleoecológica y paleoambiental.

Considerando que la tafonomía de conjuntos fósiles ha sido investigada por alrededor de 500 años, los tafónomos han desarrollado algunas generalizaciones empíricas (principios o reglas) que a continuación se describen (Martin, 1999):

- Los organismos son más propensos a preservarse si tienen partes anatómicas “duras”.
- La preservación de los organismos es mejor bajo condiciones de rápido enterramiento, especialmente en sedimentos finos y/o en ausencia de descomposición y carroñeros.
- La pérdida de información sobre la abundancia de especies, diversidad y estructura de una comunidad, es causada por la desarticulación y alteración química provocada por descomposición, abrasión, transporte, depredación, carroñeros o disolución durante la transición de biocenosis-tanatocenosis.

- Los conjuntos de fósiles consisten de restos; *a) autóctonos*, representan organismos que vivieron en la comunidad y pudieron preservarse en su mismo sitio de vida. *b) parautóctono*, representan organismos autóctonos que han sido transportados (desarticulados, orientados, o concentrados) de su posición original por bioturbación, depredadores, o carroñeros, pero no forman parte de otra comunidad. *c) aloautóctono*, restos que han sido transportados desde otras comunidades, es decir han sido reabajados.
- La pérdida de información tafonómica a través de disolución y bioerosión es típica de ambientes someros en aguas poco profundas.
- En las biotas terrestres y fluviales, la pérdida de información es resultado del transporte, desarticulación, clasificación, fracturas por agua, depredadores, carroñeros y pisoteo.
- La bioturbación y reabajamiento por procesos físicos provoca mezcla temporal de diferentes comunidades, y puede conducir a obtener información falsa sobre la diversidad y variación en características morfológicas en linajes fósiles.
- Resultados falsos sobre primeras y últimas fechas de apariciones (FADs & LADs) pueden ser resultado de la bioturbación y el reabajo físico.

1.2. Tafonomía: tipos de desgaste en ambientes fluviales

Los eventos tafonómicos abióticos post-enterramiento, como el transporte por corrientes fluviales pueden originar mezclas espacio-temporales, causando errores potenciales en interpretaciones paleoecológicas y cronoestratigráficas. El estudio de estos eventos, por tanto, proporciona la información necesaria para identificar y caracterizar mezclas potenciales de conjuntos fosilíferos, permitiendo realizar interpretaciones precisas sobre ecosistemas pasados y patrones evolutivos a lo largo del tiempo geológico (García-Morato et al., 2019).

Los sedimentos fluviales constituyen una parte significativa del registro sedimentario de la historia de la Tierra. Aunque los ríos actúan como sistemas de transporte llevando productos intemperizados de las montañas a lagos y océanos, la subsidencia permite la acumulación y preservación de los depósitos fluviales de espesores variables en el interior de los continentes (Einsele, 2000). Este tipo de ambientes promueve la formación de conjuntos

fosilíferos que pueden llegar a preservarse en excelente estado, ya que, al estar en las partes más bajas del relieve, son rellenados rápidamente con abundantes restos de organismos que sucesivamente pueden ser fácilmente transportados por corrientes fluviales que los depositan finalmente en zonas bajas.

Un ambiente fluvial propicia el efecto de diversos tipos de características tafonómicas, entre estos (Fernández-Jalvo y Andrews, 2016):

Color. Los cambios en color pueden indicar la velocidad de enterramiento o exposición a distintos factores ambientales, tales como ácidos húmicos, ambientes oxidantes, quemaduras y humedad (ambientes reductores). También, el color puede variar de acuerdo a la posición de los huesos dentro de los horizontes sedimentarios y del tipo de animal (juvenil o adulto). La característica más útil suele ser la diferencia de color en un mismo espécimen (Fernández-Jalvo y Andrews, 2016) (Figura 1).



Figura 1. Mandíbula fósil de *Metacervoceros*. Parte izquierda teñida por manganeso. Parte central sin tinción. Tomada de Fernández-Jalvo y Andrews (2016). Escala 5 cm.

Los ácidos orgánicos en el suelo causan el aspecto café en un espécimen, y en suelos oxigenados ricos en hierro pueden tornarse rojizos. El crecimiento fúngico oscurece la superficie de un hueso y la exposición al agua puede decolorar o palidecer su color original, aunque si el contenido de oxígeno en agua es alto, puede propiciar el crecimiento de cristales

de dióxido de manganeso, dando un aspecto negro a los especímenes (Figura 2). La formación de dióxido de manganeso está relacionada con condiciones ambientales muy húmedas, medianamente alcalinas y oxidantes, también, indica la presencia de bacterias. El enterramiento en sedimentos pobremente drenados (condiciones gleicas) puede palidecer el color, u oscurecerlos en suelos con alta cantidad de materia orgánica (Fernández-Jalvo y Andrews, 2016).

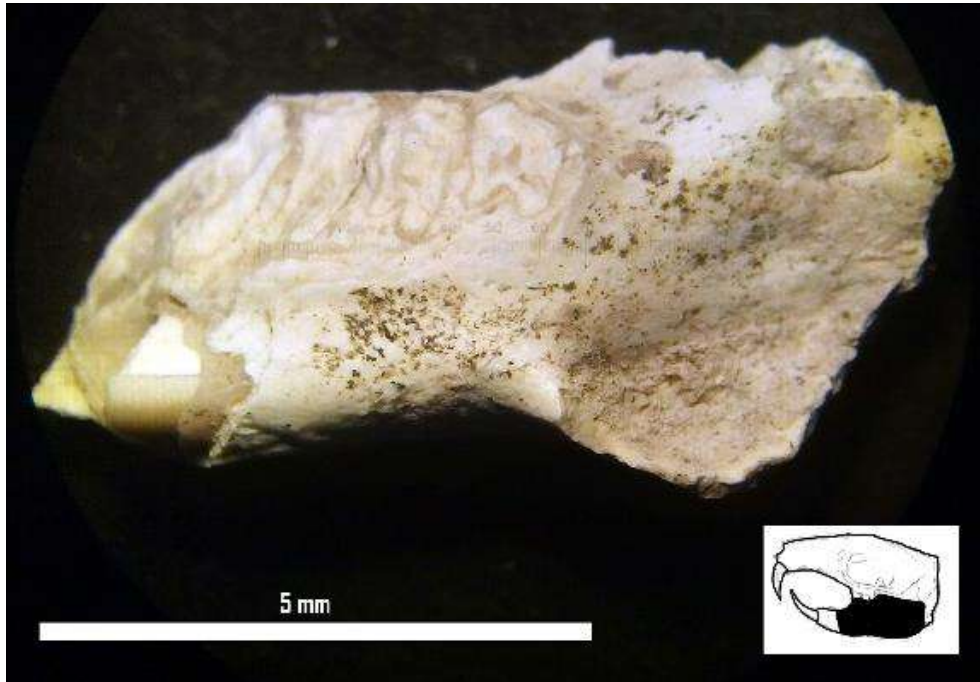


Figura 2. Mandíbula de roedor con manchas de manganeso y materia orgánica. Escala 5 mm.

Formación de cristales de manganeso. El aspecto oscuro o negro por formación de dióxido de manganeso es común. Puede aparecer como manchas negras en todo el hueso, lo cual indica una inmersión total en agua o sedimentos húmedos, aunque comúnmente se presentan en forma de manchones. La distribución de la tinción por manganeso puede estar confinada a un lado del espécimen, lo cual probablemente sea debido a que se encontraba sobre una superficie húmeda o inundada, y que permanecía periódicamente dentro del agua. Se puede presentar en las diáfisis y metáfisis, pero está ausente en las superficies articulares, esto último sugiere que la formación de dióxido de manganeso ocurrió cuando los elementos esqueléticos se encontraban anatómicamente conectados o articulados (Fernández-Jalvo y Andrews, 2016).

El manganeso también puede precipitar en condiciones secas por crecimiento bacteriano, sobre el hueso o formando acreciones masivas. Finalmente, una de las principales fases características de la precipitación de manganeso es la formación de patrones dendríticos y ramificados (Figura 3), que se asemejan al crecimiento de raíces sobre la superficie de huesos y rocas (Fernández-Jalvo y Andrews, 2016).

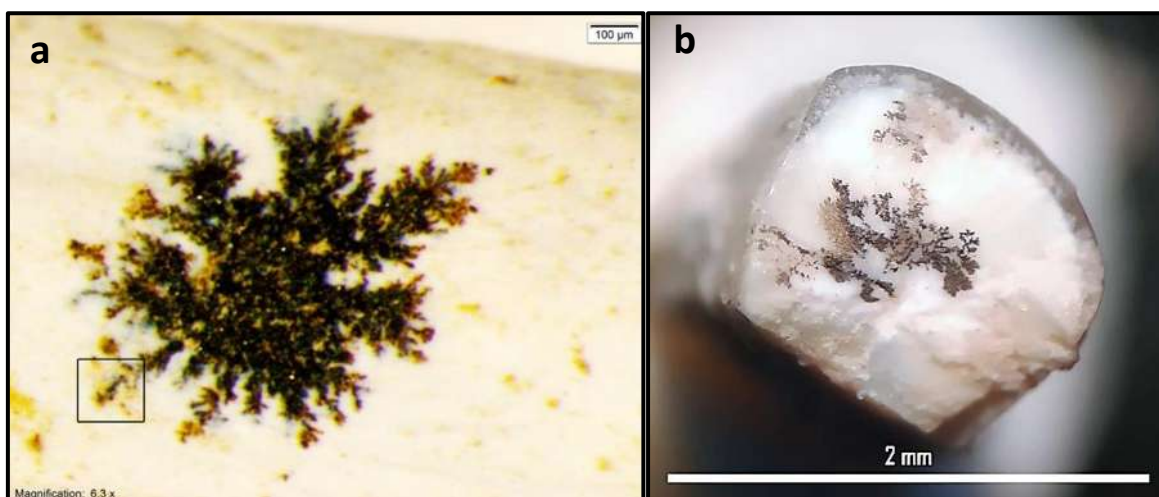


Figura 3. a) Microfotografía del patrón dendrítico de manganeso sobre un fósil (Fernández-Jalvo, 2016). b) Incisivo de un roedor fósil en vista transversal. Escala 2 mm

Abrasión. La abrasión es una de las principales consecuencias que pueden identificarse en los conjuntos fosilíferos que han sido transportados por corrientes fluviales (Wood et al., 1968; Voorhies, 1969; Aslan y Behrensmeyer, 1996; Khajuria y Prasad, 1998), además de la distribución anatómica (desarticulación) y representación esquelética. La abrasión fluvial produce redondeo y pulido, que incrementa con el tamaño de partículas de los sedimentos, el tiempo de exposición y con el estado inicial del espécimen que sufre este proceso (fósil, hueso fresco, seco o intemperizado) (García-Morato et al., 2019). La abrasión incluye cualquier grado de redondez o pulido, ya sea en terminaciones rotas o en procesos que sobresalen de la superficie del fósil (Figura 4). Esta característica tafonómica puede ocurrir a partir de cualquier etapa *post-mortem*, incluyendo el transporte y pisoteo. El grado de redondez puede ser categorizado como ligero, moderado o extremo y su ubicación puede estar restringida a las terminaciones, procesos o alrededor de todo el hueso. Cuando la abrasión se presenta en todo el hueso, es propia de especímenes transportados o de partículas

que impactan parcialmente en la superficie de un hueso. Al ocurrir de un solo lado, puede indicar erosión eólica de un hueso que se encontraba estabilizado en la superficie del suelo (Fernández-Jalvo y Andrews, 2016).

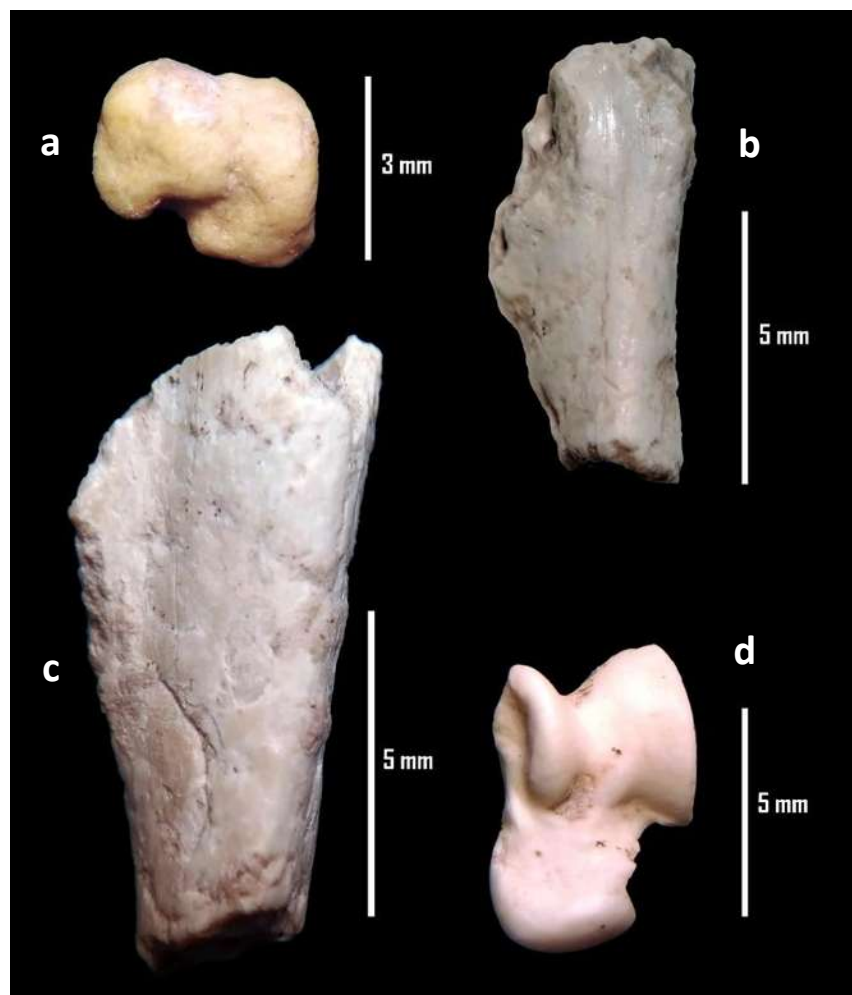


Figura 4. Fósiles con distintos grados de abrasión. a) parte de astrágalo redondeado y pulido. b) Diáfisis de fémur pulido. c) Diáfisis de fémur con redondeo y pulido. d) Astrágalo pulido.

Estrías y perforaciones. Las estrías son definidas como marcas sobre la superficie de los huesos y las perforaciones son marcas que penetran hasta la parte interior del tejido del hueso (Figura 5). Tienen una longitud menor a cuatro veces su grosor para distinguirlas de las marcas lineares. En ambientes fluviales se pueden presentar por acción de: a) agua, provocado por el choque de las partículas sobre la superficie del hueso, b) pisoteo, por la presión de los sedimentos, y c) plantas, debido al crecimiento radicular sobre la superficie de un fósil (Fernández-Jalvo y Andrews, 2016).

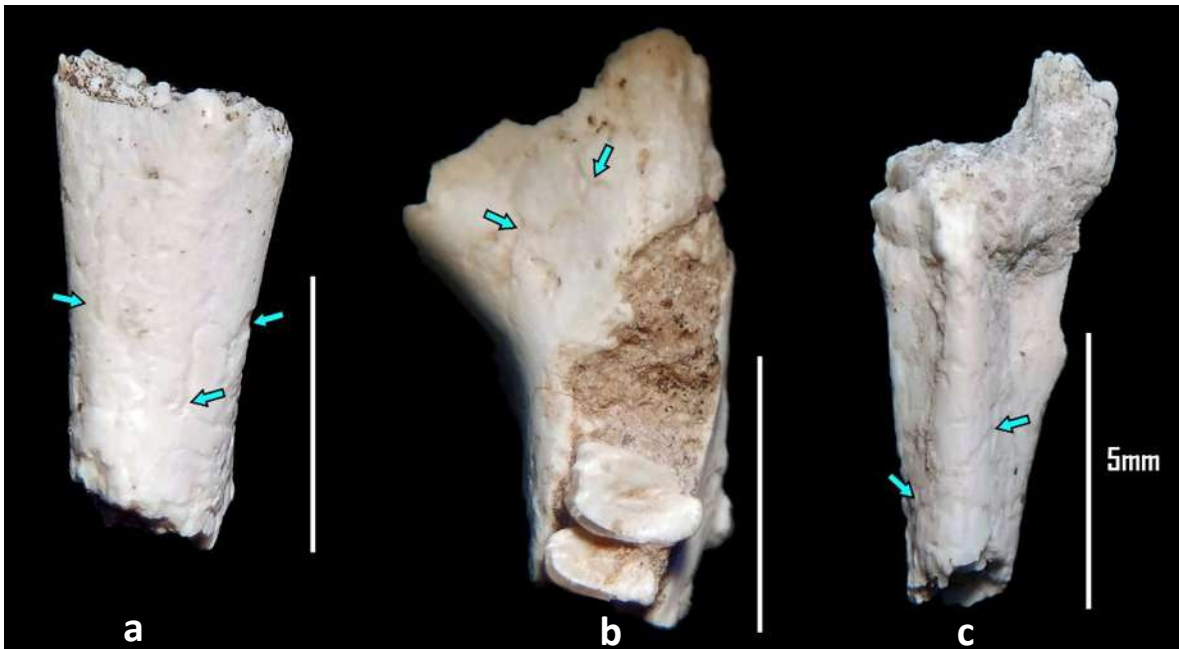


Figura 5. Poscraneales fósiles con marcas de raíces (indicadas con flechas). a) Diáfisis de fémur. b) Maxila de roedor en vista oclusal. c) Diáfisis de tibia. Escala 5 mm

Corrosión. El término “corrosión” se define como modificaciones superficiales iniciadas por reacciones químicas debido a la acción biológica (Figura 6a, 6b) o geoquímica (Figura 6c). Para este proceso, deben estar implicadas la humedad, condiciones reactivas y anóxicas. Este proceso puede darse a partir del enterramiento en el suelo, densa cobertura vegetal o la inmersión a largo plazo en agua estancada. Las condiciones anteriores propician la degradación de la superficie del hueso, ya sea a través de ataque biológico (por algas, por ejemplo) o por la acidez del agua (Fernández-Jalvo y Andrews, 2016).

Fracturas y deformaciones. Los agentes que causan el fracturamiento se llevan a cabo desde la muerte de un organismo hasta después de la sedimentación de sus restos esqueléticos. La depredación por carnívoros o caza por humanos, son ejemplos de causas iniciales de fracturas. La carroña y el pisoteo se dan justo después de la muerte, y la compresión o acción de los sedimentos son ejemplos de fracturamiento tardío. Aunque es poco común, el fracturamiento en fósiles expuestos también suele suceder (Fernández-Jalvo y Andrews, 2016).

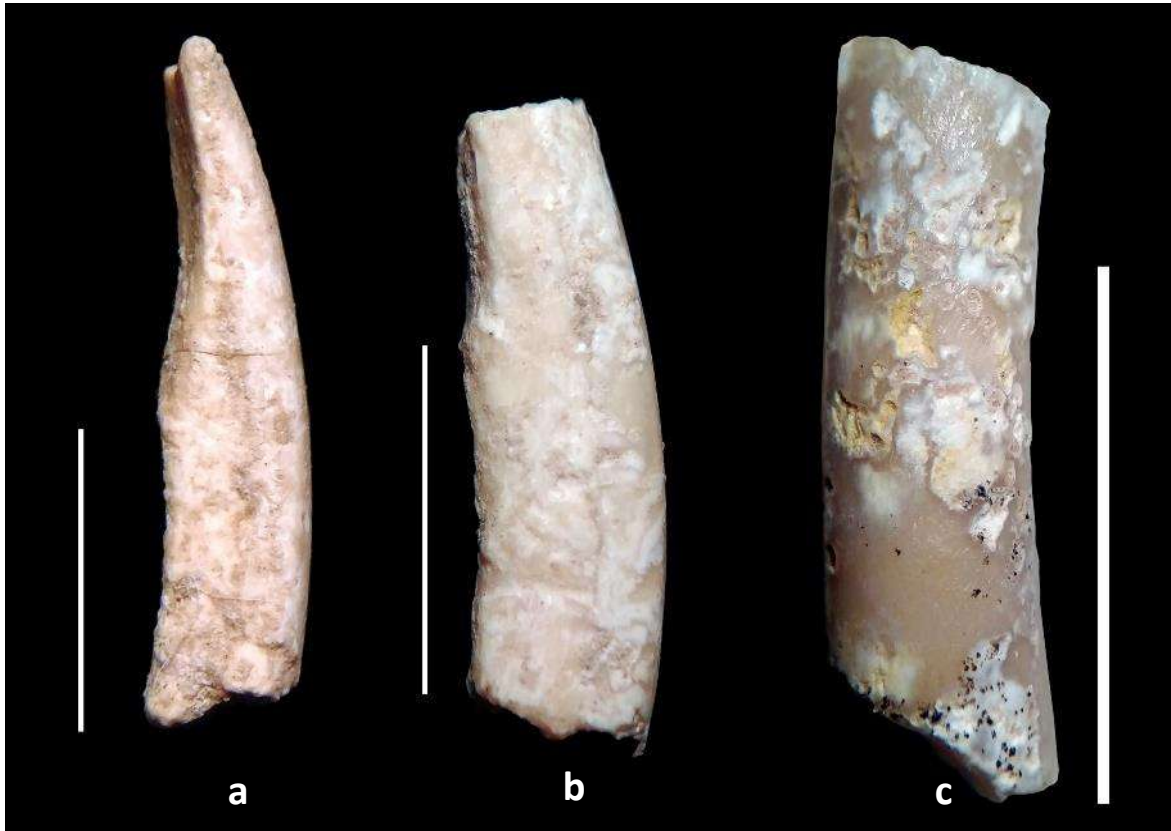


Figura 6. Incisivos fósiles de roedores con marcas de digestión (a y b) y corrosión química (c). Escala 5 mm.

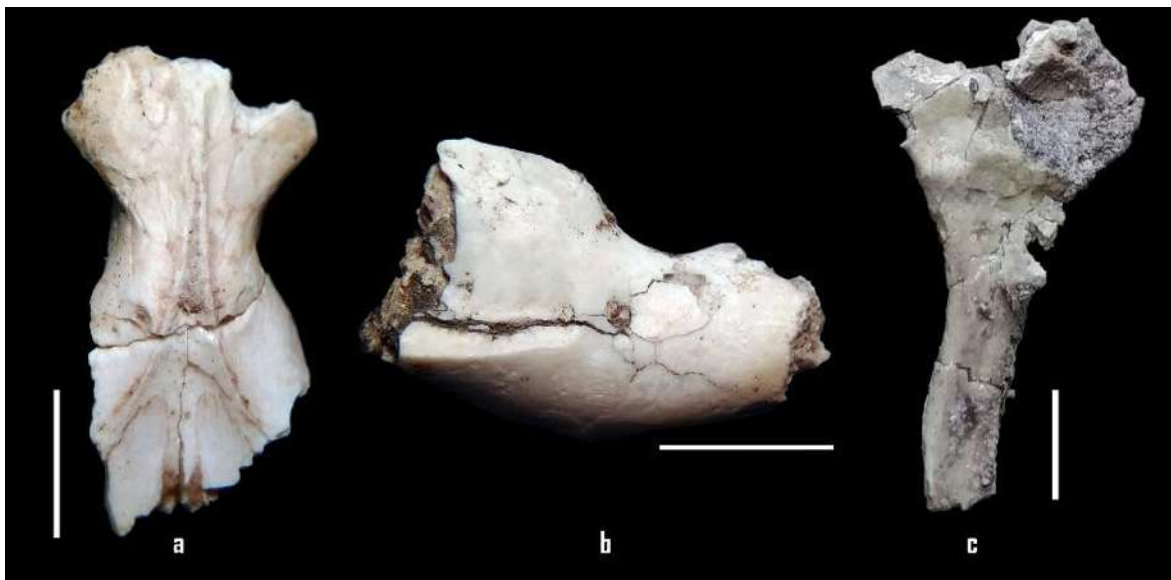


Figura 7. Fracturas en diferentes fósiles. a) Parte frontal de cráneo de roedor. b) rama mandibular de roedor en vista labial. c) Pelvis de roedor. Escala 5 mm.

Los elementos esqueléticos que suelen enterrarse completos en el suelo pueden fracturarse después del enterramiento (Figura 7a, 7b). Los fragmentos permanecen en su posición anatómica hasta que son separados por erosión reciente, muestreo de los sedimentos o por excavaciones sin cuidado (Figura 7c). Los agentes que provocan deformación o cambios en la forma original del espécimen son los mismos, no obstante, producen diferentes efectos en distintos grados de acuerdo al sustrato y el ambiente (húmedo/seco) de depósito incluyendo pisoteo por animales grandes, mordeduras por carnívoros y herbívoros, carroñeo por depredadores, caza por humanos o presión/movimiento de los sedimentos que los contienen (Fernández-Jalvo y Andrews, 2016).

Desarticulación. La desarticulación es la separación y dispersión de los elementos esqueléticos de su posición anatómica en el esqueleto. El grado de desarticulación puede ser evaluado en conjuntos fosilíferos para determinar aspectos esenciales en la historia tafonómica del sitio. Dos tipos de agentes pueden identificarse: procesos naturales y acción humana. El movimiento de los elementos lejos de su posición anatómica, es consecuencia de la desarticulación y el grado de separación o distancia transportada (Figura 8). Además proveen de información sobre la cantidad de disturbio durante la preservación del espécimen (Fernández-Jalvo y Andrews, 2016).



Figura 8. Húmero desarticulado incrustado en los sedimentos originales. Se infiere relativamente escaso transporte y un enterramiento bajo condiciones de humedad dada la presencia de manchas negras de manganeso.

En un ambiente fluvial la desarticulación está más relacionada a la separación por acción de corrientes. Diversos autores han relacionado la distribución de conjuntos fósiles transportados de manera experimental y se basan en la resistencia anatómica de los elementos al ser sujetos a movimiento en agua. Destacan dos aspectos esenciales en los huesos; la densidad relativa y su forma (Shotwell, 1955; Voorhies, 1969; Wolff, 1973; Korth, 1979). Algunos elementos esqueléticos presentan protuberancias, las cuales pueden propiciar el hundimiento en el fondo de corrientes, y otros presentan superficies largas y delgadas que tienen un efecto de “vela” (por ejemplo, la escápula) que capturan el flujo de agua. Por tanto, el movimiento del agua no solo selecciona y transporta huesos, también puede orientarlos de acuerdo a la cantidad de energía y el tipo de hueso (Fernández-Jalvo y Andrews, 2016).

1.3. Diagénesis y mineralogía en fósiles

Los estudios de los procesos bioestratigráficos y sedimentológicos son necesarios y complementarios entre sí y tienen como propósito el de permitir una reconstrucción e interpretación más completa e integral de los paleoambientes, el paleoclima y otros factores que intervienen en la preservación de los fósiles. El estudio de los procesos fosildiagenéticos a partir de los minerales neoformados y precipitados en las cavidades vasculares y en las fracturas de los restos óseos, permiten obtener un conocimiento de las condiciones físicas y químicas existentes en la litosfera durante la litificación, permineralización y demás procesos de fosilización que a veces no son posibles de determinar a partir de las rocas circundantes (Casal et al., 2017). A partir de esta premisa, el estudio de la diagénesis fósil resulta de gran interés para conocer la historia de su enterramiento y de los procesos que se llevaron a cabo.

La diagénesis se define como la alteración de sedimentos en etapas posteriores al depósito. La diagénesis fósil se considera como un proceso que puede llevarse a cabo en tres niveles; el tejido del hueso, los espacios porosos y cavidades del hueso, así como los sedimentos que los contienen. En el primero, ocurre de manera regular la sustitución iónica de los minerales de apatita con otros minerales. En el segundo, los espacios porosos y las trabéculas son rellenadas con minerales diagenéticos: la comparación de estos minerales con los de la matriz contenedora puede indicar un transporte previo a su enterramiento final, si es que los dos conjuntos difieren. Por último, los sedimentos contenedores en los cuales se entierran los restos afecta a: a) la superficie del hueso, b) la naturaleza del agua (su

composición química y transportabilidad) y c) si los elementos esqueléticos pueden fracturarse o deformarse por la presencia o ausencia de cementantes (Lyman, 1994).

Durante el enterramiento un hueso sufre muchos cambios, tales como: absorción de cationes y compuestos orgánicos circundantes; intercambio de algunos iones; descomposición y lixiviación del colágeno; ataque microbiológico; alteración y pérdida de la matriz mineral; relleno con depósitos minerales, entre otros. Por lo tanto, resulta difícil reconocer cuáles, si los hay, son más fundamentales o más descriptivos (Hedges, 2002). En esta etapa fosildiagenética, después de la muerte de un organismo, se lleva a cabo una modificación de la mineralogía y geoquímica original de los elementos esqueléticos, que está controlada por condiciones como pH y potencial redox (Eh) y la química de los fluidos subterráneos y los sedimentos portadores. En este sentido, la incorporación y enriquecimiento con nuevos elementos químicos puede originarse por sustituciones iónicas isomórficas en la estructura cristalina, por precipitación de nuevos minerales en las grietas y espacios de la estructura ósea: como los canales de Havers y de Volkman, a partir de fluidos que circulan en las rocas luego de la pérdida de materia orgánica y por procesos mecánicos de acumulación mineral en los poros y grietas como consecuencia de la compactación de los sedimentos adyacentes. Estos cambios que ocurren en un hueso siempre dependen de factores intrínsecos al organismo; que incluyen el grupo taxonómico, el tamaño de los elementos esqueléticos, la densidad del tejido óseo, su integridad, porosidad, así como su estructura molecular y química. También, dependen de factores extrínsecos como el pH y Eh, características químicas de las aguas subterráneas y de componentes inorgánicos de los sedimentos; como la granulometría, y la actividad de microorganismos. Todas estas alteraciones expresadas en cambios químicos y mineralógicos, proporcionan información sobre el ambiente de depósito en el cual se enterraron los especímenes (Casal et al., 2017).

Algunas investigaciones referentes a este tema se han desarrollado destacando el de Casal et al. (2017) donde explican el ambiente de depósito de un yacimiento en la Patagonia central, Argentina, a partir de las características mineralógicas y tafonómicas de tres fósiles de dinosaurios. Concluyen, a partir de la comparación de la composición química de los fósiles y de la roca contenedora, que no existe transporte, y que la permineralización se llevó a cabo por el intercambio directo con los sedimentos en los que fueron enterrados. Otro

trabajo a destacar es el de Berreteaga et al. (2004) donde describieron la historia diagenética de cuatro localidades del Cretácico superior y Paleógeno de los Pirineos occidentales. En su estudio sugieren que el reemplazamiento de la hidroxiapatita por cristales de carbonato de fluoroapatita está relacionado a cambios diagenéticos en las localidades. La composición geoquímica de los huesos permite inferir que dichos procesos fueron uniformes en todos los sitios, aunque los sedimentos contenedores en cada uno fueron diferentes. Con lo anterior concluyeron, que se descartó la mezcla y el retrabajamiento de los huesos.

II. ANTECEDENTES

2.1. Micromamíferos en el registro fósil

Los restos de mamíferos pequeños suelen ser numerosos en depósitos cenozoicos continentales, y representan un recurso de gran utilidad para llevar a cabo estudios paleoecológicos, paleoambientales, paleoclimáticos, biocronología y bioestratigrafía, ya que, en contraste con mamíferos grandes, los organismos de pequeño tamaño pueden explotar un rango considerable de recursos, tienen hábitats bien definidos y su riqueza está directamente relacionada con el ambiente en el que viven (Andrews, 2006; Demirel et al., 2011; Tomassini et al., 2017). Sin embargo, aunque son excelentes indicadores climáticos, llegan a ser gravemente afectados por procesos tafonómicos, tales como: corrosión, transporte, meteorización subaérea y rompimiento por movimientos horizontales y verticales, factores que dificultan su estudio (Fernández-Jalvo, 1996).

Diversos estudios se han realizado utilizando mamíferos pequeños. Cuenca-Bescós et al. (2009) reconstruyeron ambientes del Cuaternario de una región de España, utilizando conjuntos fósiles de mamíferos pequeños encontrados en una cueva. Con este estudio identificaron siete tipos de hábitats y los relacionaron con cambios climáticos registrados en la Península Ibérica durante los últimos 41,000 años. Fernández et al. (2011) presentaron un análisis tafonómico y paleoambiental de dos sitios arqueológicos de la parte norte de Patagonia, Argentina. Como resultado de la evidencia de marcas de corte, herramientas y alteración térmica, determinaron que estas acumulaciones fueron propiciadas por actividad de antiguos humanos y carnívoros. También, infirieron hábitats y condiciones climáticas basados en la presencia de especies indicadoras de mamíferos pequeños. Estos estudios

demuestran la importancia del análisis de estos mamíferos y la cantidad de información que nos pueden ofrecer para el estudio de largos periodos históricos (Vigne y Valladas, 1996).

2.2. Tafonomía en México

Los estudios tafonómicos en México son realmente pocos en lo que respecta a paleontología, entre estos destacan algunos sobre el mesozoico de la parte norte y noroeste de México, enfocándose principalmente a la paleobotánica y a estudios tafonómicos sobre dinosaurios del periodo cretácico (Serrano-Brañas y Reyes-Luna, 2014; Serrano-Brañas y Espinosa-Chávez, 2017). Para el sector sur de México podemos encontrar pocos estudios y la mayoría se enfocan a invertebrados marinos (Quiroz-Barroso et al., 2010; Serrano-Brañas y Centeno-García, 2014), esto debido a que hasta hace 65 Ma (Cretácico), la mayor parte del sur de México se encontraba bajo el agua (Cevallos-Ferriz, González-Torres, y Calvillo-Canadell, 2012). Además de estos trabajos, existen otras investigaciones sobre actualismo y tafonomía en el golfo de California (Ávila-Serrano, 2000; Liebig, Taylor, y Flessa, 2003; Kowalewski, 2007) que, si bien no están relacionadas con especies fósiles, han permitido conocer el comportamiento de tanatocenosis de organismos recientes de invertebrados y vertebrados, así como los procesos de enterramiento que se llevan a cabo en este tipo de ambientes sedimentarios en el presente.

Otros estudios tafonómicos que se han realizado se enfocan a microorganismos del Holoceno en Sonora (Martin et al., 1996), interpretaciones paleoambientales de concentraciones fosilíferas del Jurásico en Zacatecas (López-Caballero et al., 2018) y estudios de paleoecología en vertebrados del Cuaternario en Nuevo León (Arroyo-Cabrales, 1994). Por último, los realizados en el área de la arqueología tienen gran peso en México debido a la abundancia de ruinas y restos humanos que se pueden encontrar en toda la República Mexicana (Valenzuela-Jiménez et al., 2005; Pijoan Aguadé et al., 2013; Ley-Lara et al., 2016). Sin embargo, como se puede observar de lo expuesto anteriormente, los estudios tafonómicos que abarquen el periodo Paleógeno y específicamente para pequeños mamíferos son escasos en la parte sur del territorio mexicano, ya que la mayoría están restringidos a grupos de grandes tamaños y edades recientes (Montellano-Ballesteros y Jiménez-Hidalgo, 2006).

Algunos de los pocos estudios realizados han sido los de Jiménez-Hidalgo et al. (2017) en el cual se describe una especie nueva de roedor geómodo para la zona sur de México y sus implicaciones en la diversificación temprana de este grupo y el de Jiménez-Hidalgo et al. (2015) donde se reporta la primera asociación faunística del Eoceno para la zona sur de México. Inferencias paleoambientales se han llevado a cabo a partir de diversos estudios asociados a esta zona, para reconstruir el ambiente que existió durante ese periodo de tiempo (Jiménez-Hidalgo y Guerrero-Arenas, 2015; Guerrero-Arenas et al., 2017; Jiménez-Hidalgo et al., 2018).

2.3. Tafonomía en ambientes fluviales

La característica principal de los ambientes fluviales es la interacción de los flujos de agua sobre la orientación, transporte y dispersión de los fósiles en un afloramiento dado. En este medio, pueden ocurrir fenómenos conocidos como mezcla temporal y espacial, dando lugar al transporte, mezcla y retrabajamiento de los fósiles llegando incluso a combinarse con otros de distintas épocas, distintos estratos o incluso de diferentes tipos de hábitats, modificando la composición original de la fauna del sitio (Andrews, 2006). Por tanto, las características que resultan de estas interacciones pueden analizarse de una manera espacial y temporal, permitiendo identificar patrones indicados por la disposición de los hallazgos fósiles actuales.

La importancia paleontológica de los depósitos fosilíferos asociados a ambientes fluviales ha promovido diversidad de investigaciones. Los fósiles en estos depósitos son colectados, analizados y de ellos se toman en cuenta por lo general variables como frecuencia, tipo de hueso, tamaño, partes esqueléticas preservadas, grado de abrasión, intemperismo y el contexto sedimentológico. Por ejemplo Badgley (1986) evaluó los métodos para el conteo de número de individuos por taxón asociados a un sistema fluvial en Pakistán. Khajuria y Prasad (1998) realizaron un análisis tafonómico de un conjunto de microvertebrados fósiles del Cretácico tardío, estos fósiles se preservaron en una planicie de inundación de un lago en extinción, ellos concluyen que la acumulación de los especímenes fue debido a un evento de sequía que provocó que los animales en vida se agruparan en esa zona en busca de alimento y agua. Tomassini et al. (2010; 2017) estudiaron la tafonomía de yacimientos de mamíferos fósiles del Cuaternario en el este central de Argentina; en el contexto de un ambiente sedimentario asociado a llanuras de inundación.

Cabe señalar que se han realizado estudios experimentales, que se enfocan principalmente en caracterizar el comportamiento del transporte fluvial actual dentro de un rango de diferentes condiciones sedimentológicas y con diversos organismos (Aslan y Behrensmeyer, 1996; Ávila-Serrano, 2000; Liebig et al., 2003; Kowalewski, 2007). De esta manera, por medio del actualismo se pueden inferir posibles ambientes de depósitos antiguos similares a los actuales. Un estudio interesante es el realizado por Dodson (1973), el cual llevó a cabo un experimento evaluando la descomposición y susceptibilidad de dispersión en tres organismos de talla pequeña (ratón, rana y sapo). Sus resultados indican que el ratón tiene un tiempo mayor de descomposición, y la dispersión es diferencial dependiendo del elemento esquelético (incisivos, mandíbula, ulna, radio, húmero, calcáneo, fémur, cráneo y tibia). Los elementos, en ese orden, son menos susceptibles a un transporte, comparados con las vértebras y pelvis.

2.4. Tafonomía espacial y análisis estadístico

A lo largo de los años, la tafonomía ha desarrollado herramientas analíticas para comprender la pérdida de información paleobiológica, así como la obtención de conocimiento tafonómico de diversos tipos de agentes y procesos que potencialmente intervienen e interactúan sobre la formación de un sitio (Domínguez-Rodrigo et al., 2018). En las últimas décadas, este conocimiento teórico y metodológico se ha ampliado hacia investigaciones integrativas y multidisciplinarias que se complementan para reconstruir el pasado en todos sus detalles, incorporando cualquier tipo de señal (incluyendo señales espaciales) de los procesos culturales y naturales que modifican las propiedades originales de los componentes orgánicos e inorgánicos. A medida que la tafonomía evolucionó hacia un enfoque evolutivo y sistémico abarcando múltiples niveles de organización tafonómica, del mismo modo, el estudio de las propiedades espaciales de los procesos tafonómicos se extendió desde el análisis básico de la distribución espacial de los restos de animales, en relación con la configuración estratigráfica hacia una investigación cuantitativa multinivel del comportamiento espacial de diferentes entidades tafonómicas (Giusti et al., 2019).

A múltiples escalas y niveles de organización, los patrones espaciales observados en cualquier conjunto paleontológico o arqueológico almacenan información invaluable acerca de los procesos tafonómicos de acumulación y reabajamiento. De esta manera, los datos

tafonómicos espaciales, debidamente registrados, pueden analizarse cuantitativamente dentro de un marco estadístico con el propósito de extraer inferencias de manera confiable sobre los procesos tafonómicos y aportar información para reconstrucciones paleoecológicas, estimaciones biocronológicas e interpretaciones pasadas del comportamiento humano en el caso de la arqueología (Giusti et al., 2019).

Algunos estudios se han realizado utilizando un enfoque estadístico. Domínguez-Rodrigo *et al.* (2018) relacionaron el grado de disturbio de huesos recientes transportados por un sistema fluvial trenzado en un río de España comparándolos con los procesos tafonómicos post-depósito que sufrieron bajo corrientes fluviales de baja y alta energía. Los autores analizan estadísticamente la distribución de huesos mediante experimentación. Como resultado mostraron una pérdida o modificación de información de la mayoría de las relaciones espaciales tafonómicas y el grado de pérdida de hueso de acuerdo al elemento. Otro estudio que resalta es el de Giusti *et al.* (2019) donde revelan la historia tafonómica de un conjunto de vertebrados fósiles del Pleistoceno temprano mediante el uso de geoestadística (variogramas direccionales), ondículas y análisis de patrones de puntos para revelar anisotropía a nivel del conjunto fósil. Con base en lo anterior, ellos sugieren eventos de dispersión y retrabajamiento espacial, determinando que se trató de un conjunto fósil autóctono que experimentó cambios cíclicos laterales asociados a un sistema fluvial trenzado. Sin embargo, aún con estos estudios que aportan conocimiento paleontológico, se considera importante el ofrecer un enfoque estadístico espacial donde en lo posible se incluyan los sistemas de información geográfica (SIG). Este enfoque ha sido mayormente utilizado en investigaciones arqueológicas (Verhagen, 2018), sin embargo en sitios de hallazgos paleontológicos son muy escasos.

III. JUSTIFICACIÓN

Debido a la gran cantidad de microfósiles encontrados en los afloramientos fosilíferos de Santiago Yolomécatl, es importante realizar un estudio tafonómico que nos proporcione información acerca de los procesos que tuvieron lugar durante la formación de este conjunto fosilífero, y nos ayude a entender qué tipo de proceso tafonómico afectó a los fósiles. Un estudio sobre las características tafonómicas del lugar, ayudará a resolver la formación y las asociaciones de esta fauna.

Observaciones preliminares en la zona de estudio demuestran que los fósiles están asociados a un sistema fluvial, por lo que, debido a fenómenos de mezcla temporal (time averaging) y espacial (spatial averaging) pueden presentar gran variabilidad durante su diagénesis fósil (Tomassini et al., 2010). Lo anterior representa pérdida de información en la reconstrucción ambiental o en estudios paleoecológicos.

IV. HIPÓTESIS

Las características tafonómicas que presentan los fósiles serán óptimas para inferir el grado de retrabajamiento que pudieron haber sufrido durante su diagénesis fósil, dado que en el ambiente en el que fueron sepultados es posible realizar una caracterización más precisa del posible transporte.

V. OBJETIVOS

5.1. General

- Realizar un estudio tafonómico en uno de los afloramientos de la localidad fosilífera cercana a Santiago Yolomécatl, Oaxaca, utilizando especímenes fósiles de mamíferos pequeños.

5.2. Específico

- Elaborar una columna estratigráfica para relacionar la geología del sitio con la ubicación temporal/espacial de los fósiles.
- Realizar una evaluación cuantitativa y cualitativa de los rasgos tafonómicos más frecuentes en los fósiles.
- Realizar el análisis de la composición mineralógica de los fósiles y de los sedimentos que los contienen.
- Realizar un análisis de la distribución espacial de los fósiles.
- Realizar una reconstrucción artística preliminar del ambiente de depósito de la zona.

VI. METODOLOGÍA

6.1. Área de estudio

El presente proyecto de tesis se realizó mediante prospecciones en la localidad fosilífera de Santiago Yolomécatl, Oaxaca (Figura 9). Corresponde a la región de la Mixteca Alta, la cual se ubica dentro de la cadena montañosa de la Sierra Madre del Sur (Figura 10). Con anterioridad se realizaron estudios de rocas basados en radiometría K-Ar que estimaron la edad en la que se encuentran los fósiles corresponde a 35.7 ± 1 y 32.9 ± 0.9 Ma., y aunado a esto, se registró la presencia del fósil índice *Miohippus assiniboensis* que sugirió una fauna correspondiente al Eoceno-Tardío (Jiménez-Hidalgo et al., 2015). Sin embargo, estudios más recientes basados en la bioestratigrafía de docenas de nuevos especímenes de mamíferos, demostraron que la edad de este sitio corresponde al Oligoceno temprano (Arikareano temprano) (Jiménez-Hidalgo et al., 2018). Se ha sugerido que la configuración de este sitio en ese tiempo, correspondía a un sistema fluviolacustre con intercalaciones de paleosuelos (Guerrero-Arenas et al., 2017; Jiménez-Hidalgo et al., 2015; 2017).

En la zona se han recolectado ejemplares que constituyen a la fauna local Iniyoo (Oligoceno temprano), (Jiménez-Hidalgo y Guerrero-Arenas, 2015; Jiménez-Hidalgo et al., 2015; 2017; Guerrero-Arenas et al., 2017). En estos afloramientos se han registrado 17 taxones de mamíferos, de los cuales la mayoría pertenecen a dos especies de mamíferos pequeños de la familia Geomyidae (*Gregorymys veloxikua* y *Gregorymys* sp.), tres de reptiles, y dos icnotaxones producidos por abejas y avispa (Guerrero-Arenas et al., 2017), por lo que esta localidad se considera como uno de los sitios fosilíferos con mayor riqueza del Oligoceno temprano y el primero para la zona tropical de América del Norte (Jiménez-Hidalgo et al., 2015).



Figura 9. Vista panorámica de la zona de estudio. (Localidad “Jesús Bones”)

6.1.1. *Clima*

En la zona predomina un clima templado subhúmedo con lluvias en verano, de poca humedad (69.62%) y templado subhúmedo con lluvias en verano, de humedad media (30.38%). La oscilación diaria es de 20° C con las temperaturas más altas al medio día, el mes más frío entre -3°C y 18°C y el mes más caliente menor a 22°C. La precipitación anual es de 700-900 mm, con precipitación en el mes más seco menor a 40 mm (INEGI, 2005). El clima también está determinado por la localización del área dentro de la Mixteca Alta. La Sierra Juárez actúa a nivel regional como barrera para los vientos del Golfo impidiendo la entrada de humedad, este efecto de sombra orogénica determina las condiciones del régimen hídrico y la de los climas presentes en el sitio de estudio. De manera general se identifican tres tipos climáticos: clima tipo Bs (cálido seco), clima templado seco en la parte centro-norte y más húmedo en la parte sur. (Montes-Cruz y López-Blanco, 2005).

6.1.2. *Vegetación y uso del suelo*

La diversidad vegetal de la Mixteca Alta está relacionada con el suelo, el clima y la litología. Se agrupan tres principales tipos: Bosque y matorral (*Quercus* spp.), matorral (*Arctostaphylos* spp.) y pastizales (Montes-Cruz y López-Blanco, 2005). El municipio de Yolomécatl se caracteriza por la presencia de pastizales inducidos (62.04%) y bosques de encino-pino y pino-encino (20.89%) de los cuales el 14.88% se utiliza para la agricultura de temporal y 2.19% para zona urbana (INEGI, 2005).

6.1.3. *Relieve*

Los tipos generales de relieve que se presentan son 80% de lomeríos, 15% de laderas montañosas y 5% del terreno está compuesto por planicies aluviales, con altitudes desde 1900 a 2500 msnm (Figura 11) (INEGI, 2005; Montes-Cruz 2009). El relieve dominante en la región de la Mixteca Alta presenta altos niveles de erosión hídrica debido a la configuración geomorfológica y a problemas de crecimiento poblacional desmedido, como el sobrepastoreo y la remoción de la cubierta vegetal para cultivo. Como resultado la configuración del paisaje consta de un sistema de cárcavas generadas por la erosión hídrica que caracteriza a la zona. Además, la geomorfología está estrechamente relacionada con un sistema morfogenético

denominado sistema Concepción Buenavista, formado por rocas volcánicas del Terciario, que van desde el Eoceno medio (50 Ma.) hasta el Mioceno (26 ± 0.5 Ma.) (Montes-Cruz y López-Blanco, 2005; Montes-Cruz 2009).

6.1.4. Geología

El área de Yolomécatl yace sobre la Sierra Madre del Sur al noroeste de Oaxaca. Dentro del área existen unidades cenozoicas que yacen en discordancia sobre unidades de roca clásticas y carbonatos. Se presentan rocas con edades que van desde el Paleozoico tardío hasta el Cretácico, así mismo se encuentra en el límite de los terrenos estratotectónicos Mixteco y Oaxaca (Ferrusquía-Villafranca et al., 2016). Existen secuencias mesozoicas constituidas por rocas cretácicas marinas, mientras que el Cenozoico está representado por unidades fluviales que incluyen al Conglomerado Tepelmeme el cual está relacionado litológicamente con el Conglomerado Tamazulapam. De este último, le sobreyacen secuencias volcánicas como la Toba Llano de Lobos, Formación Yanhuitlan, Andesita Yucudaac y el intrusivo Suchixtlahuaca (Montes-Cruz y López-Blanco 2005; Santamaría-Díaz et al., 2008).

La geología de la zona está constituida por la presencia de rocas de los periodos Paleógeno (51.99%), Terciario (37.31%) y Cuaternario (10.70%). Afloran andesitas (37.31%) y calizas (41.93%), así como limolitas arenosas (10.06%). Estos depósitos están cubiertos por depósitos aluviales y suelos (10.70%) (INEGI, 2005), sin embargo se han identificado paleosuelos no referidos previamente por la cartografía del INEGI (Figura 12).

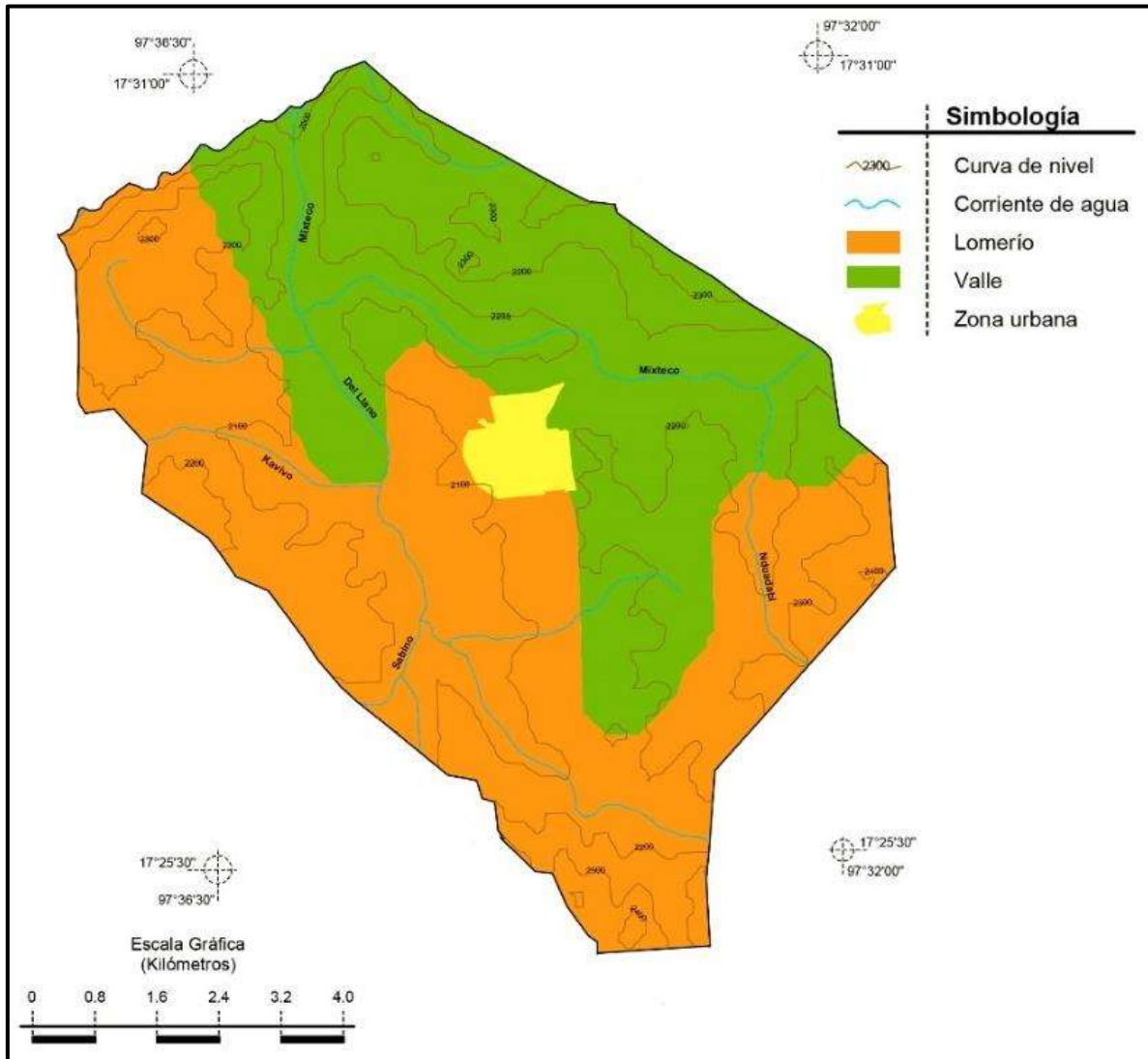


Figura 11. Relieve del municipio de Santiago Yolomécatl. Modificado de INEGI (2005).

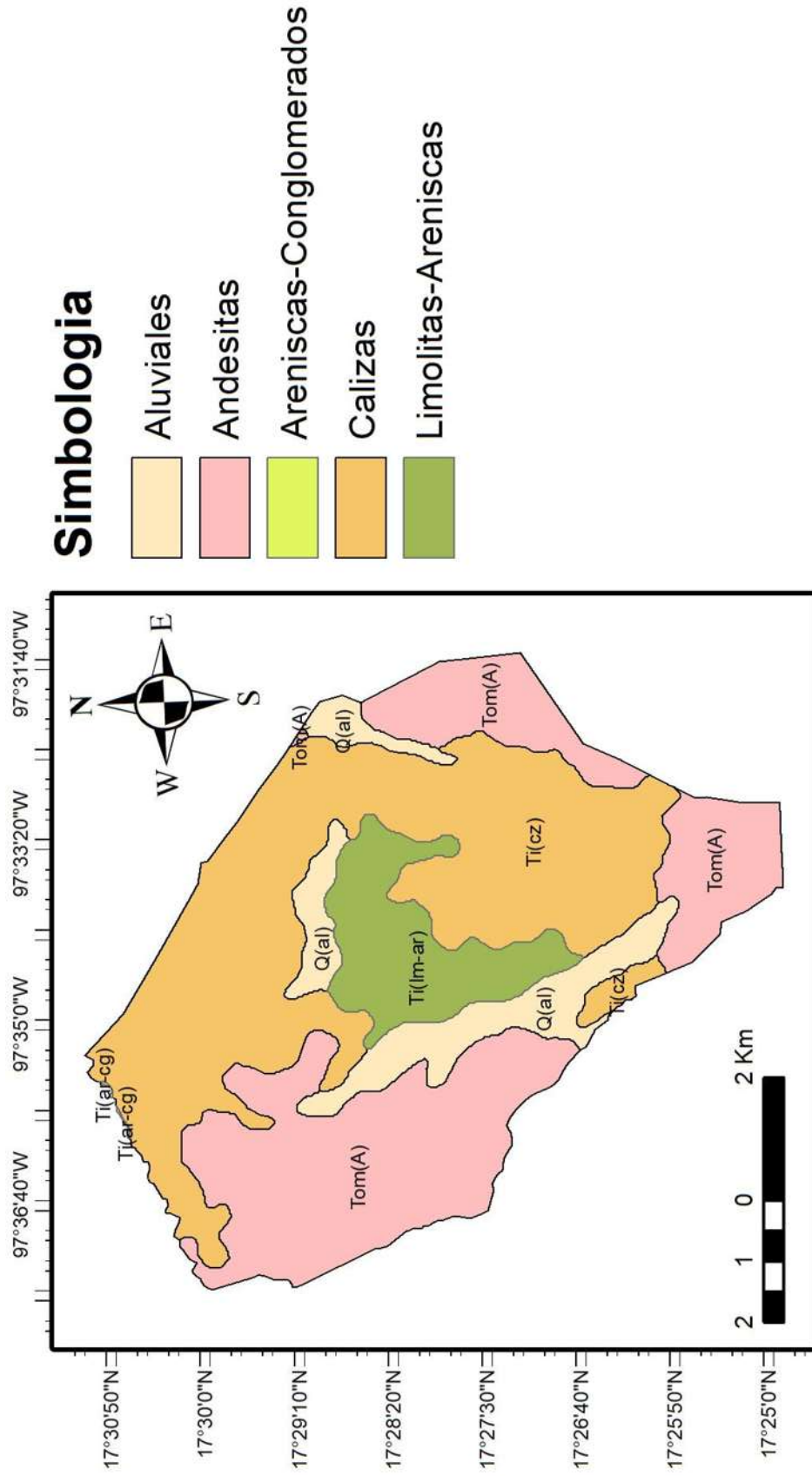


Figura 12. Geología del municipio de Santiago Yolomécatl.

6.2. Método de muestreo, obtención e identificación de fósiles

Para el presente estudio tafonómico se utilizaron especímenes recolectados del sitio “Jesús Bones” y especímenes bajo resguardo en el laboratorio de Paleobiología de la Universidad del Mar campus Puerto Escondido. Estos especímenes fueron recolectados previamente en otras temporadas. La identificación anatómica de los elementos se realizó por comparaciones con roedores actuales, utilizando un esqueleto de una tuza reciente (Geomyidae) (Figura 13), guías y descripciones morfológicas (Hillson, 2005; Carrizo y Díaz, 2011; Fernández et al., 2011).



Figura 13. Huesos de tuza utilizados para la identificación de los especímenes fósiles.

Para la obtención de los fósiles se realizaron prospecciones en campo mediante observación directa de los sedimentos que afloran en el sitio, se buscaron y se identificaron los elementos fósiles que fueron descubiertos por intemperismo físico previo o mediante excavación en lugares donde previamente se hallaron fósiles.

El método de búsqueda y extracción fue el siguiente: mediante caminatas en el sitio, si se reconoció un ejemplar, se tomaron datos de su ubicación estratigráfica. Para su recolección, se utilizaron martillos de geólogo, picas, brochas y picahielos para extraerlos de

los sedimentos. En algunos elementos encontrados, debido a su fragilidad o a que se encontraban articulados, se realizaron férulas de yeso (jackets) para un mejor transporte sin destruir el ejemplar (Figura 14).

Una vez extraídos, los ejemplares se embalaron y etiquetaron con los datos correspondientes. Se almacenaron en bolsas de plástico selladas para su posterior análisis tafonómico en el laboratorio (Figura 15).



Figura 14. Métodos de trabajo en campo. a) materiales utilizados: brochas para limpiar la superficie, martillo para realizar las férulas, picahielos para extraer el fósil. b) fósil *in situ* en sedimentos superficiales: expuesto por erosión previa. c) técnica de férula de yeso o “jacket” para transporte de especímenes frágiles.

6.3. *Análisis tafonómico*

La metodología para realizar el análisis tafonómico se basó en una modificación del protocolo de Tomassini et al. (2010; 2017). Su método describe sistemáticamente variables tafonómicas de los fósiles.

Con el uso de un microscopio estereoscópico (Motic SMZ-168) (Figura 15), se observaron los especímenes en aumentos totales de 10x y 40x para cada variable listada a continuación. Las variables tomadas en cuenta fueron las siguientes;

- Análisis taxonómico y anatómico (AED). Se utilizaron los siguientes índices para la descripción del conjunto fósil del sitio; número de restos recuperados (NR), número mínimo de individuos (NMI), número mínimo de elementos esqueléticos (NME) y abundancia relativa de los diferentes elementos esqueléticos (Ri).
- Grado de meteorización. Se analizó el grado de daño por intemperismo que presentaron los fósiles. Se utilizaron tres categorías cualitativas; categoría 1 (sin alteración), categoría 2 (pérdida de materia ósea superficial) y categoría 3 (pérdida de materia ósea profunda con tejido esponjoso expuesto).
- Integridad. Se refiere a si los especímenes se encontraron completos o incompletos. Se evaluó el grado de fractura de los elementos esqueléticos (mandíbulas, maxilas, húmero, radio, ulna, fémur y tibia) de acuerdo a dos categorías cualitativas; completo (conserva todas sus partes) e incompleto (faltan alguna o la mayoría de sus partes).
- Tipo de fractura (transversal 60°-90°, longitudinal 0°-29° y diagonal 30-59°). Solo se evaluó en huesos largos (húmero, radio, ulna, fémur y tibia), y se comparó el porcentaje de porciones distales, proximales y diáfisis encontradas.
- Grado de abrasión o pulido. Se consideraron los especímenes inalterados o con algún grado de pulido. Se utilizaron tres categorías para su descripción: categoría 1 (intacto), categoría 2 (redondeado) y categoría 3 (pulido).
- Grado de desarticulación. Se analizó el grado de articulación de los fósiles al momento de su descubrimiento *in situ* mediante tres categorías; categoría 1 (articulado), categoría 2 (desarticulado pero asociado), categoría 3 (desarticulado aislado).
- Comparación mineralógica. Para la identificación y comparación de los minerales en las muestras de fósiles (F) y sedimentos (S), se usó la técnica analítica de espectrometría de

dispersión de energía de rayos X (EDS) mediante el método de polvo, con la cual se realizó un análisis comparativo de la composición del hueso y de los sedimentos donde se encontraron los restos fósiles. Se utilizaron 4 muestras (dos fósiles y dos de sedimentos).

- Otras modificaciones. Se consideraron aquellos fósiles con marcas de dientes, garras, digestión y bioerosión.
- Se creó una base de datos en una hoja de cálculo, enumerando cada espécimen y sus correspondientes valores para cada variable tafonómica examinada. Una vez finalizadas las observaciones se realizaron tablas y descripciones generales basadas en la abundancia o ausencia de estas variables para estimar el grado de retrabajamiento de todo el conjunto fosilífero.



Figura 15. Laboratorio de paleobiología de la Universidad del Mar campus Puerto Escondido. Área de trabajo donde se realizó el análisis tafonómico.

6.4. Análisis geológico

Se realizó una columna estratigráfica del sitio describiendo las características sedimentarias de cada estrato presente en la zona. Se tomaron en cuenta seis aspectos esenciales: litología, textura, estructuras sedimentarias, color, geometría y relaciones entre lechos o unidades de rocas, así como la distribución de los fósiles e icnofósiles en los estratos.

Se realizaron dos salidas de campo durante la temporada de febrero y mayo de 2019, durante las cuales, se prospectó en campo para identificar las zonas fosilíferas. Se realizó la columna sedimentaria identificando las características físicas de los estratos, así como las estructuras sedimentarias presentes. Se tomaron datos y descripciones en una libreta de campo, al mismo tiempo que se fue realizando una reconstrucción in situ de la columna estratigráfica. La columna estratigráfica tipo se basó en las descripciones que se llevaron a cabo de diferentes perfiles de los afloramientos, ya que la continuidad vertical en ocasiones se veía interrumpida por la erosión y/o discordancias de estratos superiores. Se utilizaron herramientas digitales para elaborar el diseño de la columna estratigráfica final: Photoshop y la tableta digitalizadora Wacom Intuos CTL-4100.

6.5. Análisis geoestadístico

Con los datos georreferenciados se llevaron a cabo tres análisis geoestadísticos utilizando el software ArcGIS v10.3. 1) Análisis de elipse de desviación estándar; para determinar patrones de dirección basados en la ubicación de cada espécimen georreferenciado. 2) Promedio de vecinos más cercanos; para reconocer si existe distribución aleatoria o agrupamiento. 3) Análisis de función K de Ripley, con el cual se analizó el patrón espacial de las ubicaciones de los fósiles, resumiendo su dependencia espacial en un rango de distancias. Esta herramienta fue útil para examinar como cambia el agrupamiento en distintas distancias (ESRI, 2018). Se presentaron para cada análisis sus graficas correspondientes.

6.6. Reconstrucción artística del paleoambiente

Basado en los resultados del presente estudio y estudios previos de la zona (Jiménez-Hidalgo et al., 2015; 2017; Guerrero-Arenas et al., 2017; Jiménez-Hidalgo et al., 2018) se realizó una reconstrucción visual del paleoambiente del sitio durante el Oligoceno temprano. Se

utilizaron técnicas clásicas de dibujo y pintura en óleo sobre lienzo para realizar bocetos previos, y para la presentación final se utilizaron medios digitales (Adobe Photoshop) para mejorar la presentación de la reconstrucción.

VII. RESULTADOS

7.1. *Descripción general de zona*

La zona de estudio está conformada por un sistema de cárcavas formadas por la erosión. Los sedimentos que afloran consisten en una serie rítmica de sedimentos fluviolacustres que incluyen arcillas, arcillas limosas, limos arcillosos, arenas finas y conglomerados intercalados. Los estratos identificados presentan un echado de 10° en dirección SO-NE (Figura 16).



Figura 16. Imagen de los estratos basculados. Inclinación de los estratos 10° . Escala 30 cm. (línea vertical amarilla)

7.2. *Estratigrafía: afloramiento fosilífero “Jesús Bones”*

La columna estratigráfica realizada está constituida por cuatro sucesiones sedimentarias distinguibles en campo (Figura 17):

La sucesión I (Figura 17a) consiste en una secuencia de intercalaciones limo-arcillosas y arcillo-limosas con presencia de rizolitos e icnofósiles. Su base está constituida por un conglomerado basal con matriz clasto-soportada con un espesor de 25 cm. Los clastos redondeados son volcánicos de dos a seis centímetros, con madurez textural media y de baja esfericidad. Sobreyaciendo al conglomerado basal en contacto erosivo se observa una

sucesión limo-arcillosa color café (2.5YR 6/2) de dos metros de espesor, de textura fina (0.25 a un cm) y compacta. En esta sucesión limo-arcillosa se observaron abundantes trazas de actividad orgánica, destacando icnofósiles y rizolitos (Figuras 18a y 18b). Le sobreyace en contacto difuso una arcilla limosa de color verde oscuro (5YR 5/2), con un espesor de 30 cm. La arcilla no presenta fósiles, y se encuentra cubierta en contacto paralelo por un limo color verde oscuro (5YR 5/2), de 15 cm de espesor. En contacto transicional, se depositó un estrato limo arcilloso de color café (2.5YR 6/1), de 30 cm de espesor. Este limo cambia transicionalmente a una arcilla limosa de color gris (5YR 4/2), de un espesor promedio de 10 cm, la cual varía en su espesor a lo largo del estrato. La arcilla-limosa presenta vetillas de uno a tres cm de espesor (Figura 18c), y el material que los compone es muy deleznable. En otras zonas, a lo largo de este estrato, existe una continuidad horizontal y se encuentra silicificada con gran dureza; esta silicificación no aparece a lo largo de la columna sedimentaria. En su parte superior presenta estructuras primarias constituidas por lentes de arcilla limosa inmersas en una matriz de arcilla (Figura 20 y 21). Los fósiles son muy escasos.

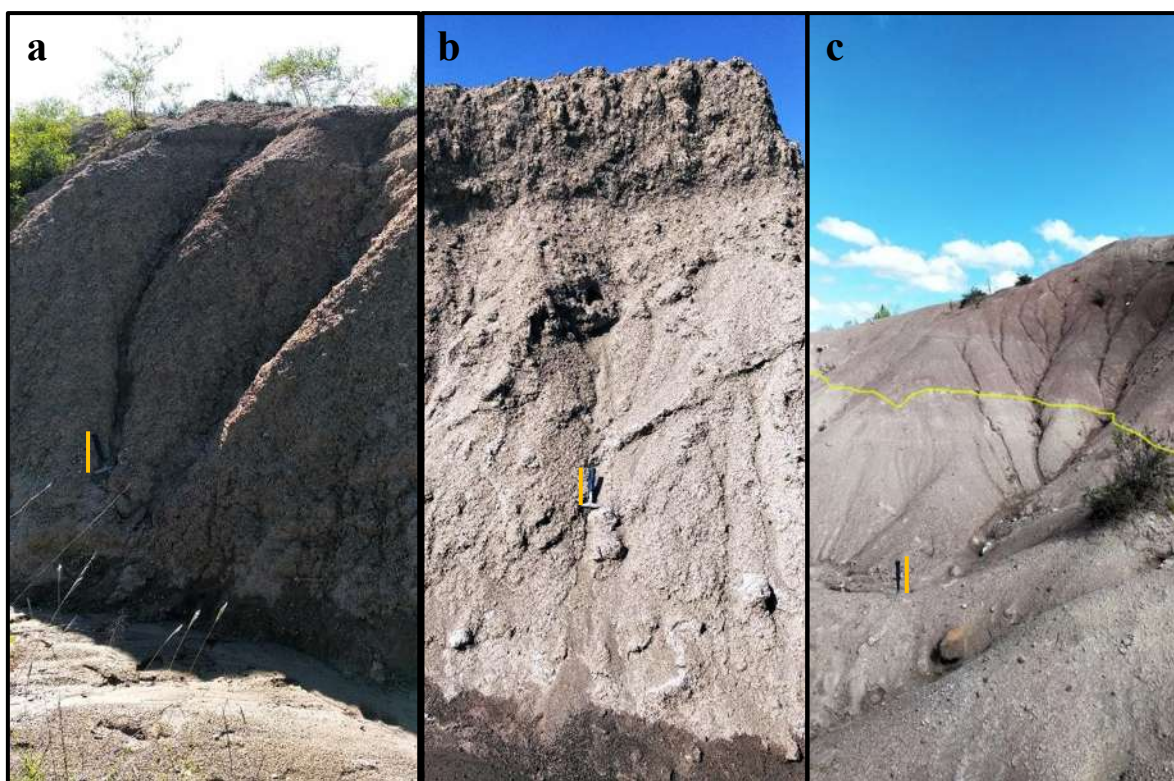


Figura 17. Sucesiones estratigráficas identificadas en campo. a) Sucesión I. b) Sucesión II (Se pueden apreciar galerías fósiles) c) Sucesión III inferior y IV superior a partir de línea horizontal amarilla. Escala 30 cm.

La sucesión II se depositó en discordancia erosiva sobre la anterior (Figura 17b). Esta segunda está formada por una sucesión de arcilla limosa de color café claro. Se caracteriza de las demás secuencias sedimentarias por sus numerosas icnofacies que incluyen rellenos de madrigueras además de una abundancia de fósiles de vertebrados. Dentro del mismo se distinguen paleocanales y lentes de materiales limoso-arcillosos.

En la parte basal de esta sucesión, el nivel 1 sobreyace en contacto paralelo, el cual consta de un estrato limo-arcilloso de color café (5YR 6/4), con un espesor de cuatro metros. Presenta gran abundancia de galerías fósiles de roedores y fósiles de vertebrados (Figura 17b). La evidencia fósil de avispas y abejas son escasos. Seguido de éste, mediante una discordancia erosiva se observa un conglomerado de afinidad volcánica de un metro de espesor. Se caracteriza por una matriz soportada con clastos de baja esfericidad con diámetros de uno a 15 cm. Un estrato limo arcilloso de color café obscuro (7.5YR 4/2), de 1.5 metros como espesor promedio se depositó encima, por contacto difuso. Le sobreyace en contacto brusco discordante una arcilla de color gris ligeramente oliva (5Y 6/2) de un metro de espesor, la cual está cubierta por otro contacto discordante en el que aparece una arenisca, de color gris oscuro (5YR 5/1) de un metro de espesor. En esta última son muy características numerosas galerías fósiles de roedores muy bien conservadas. Se suelen presentar fósiles de vertebrados dentro de las madrigueras. Esta arenisca subyace a un estrato limo-arcilloso en contacto difuso, de color gris (5YR 5/2) y de un metro de espesor. Las marcas de oxidación es la característica más notable de estos sedimentos.

La sucesión III se presenta en franca discordancia erosiva sepultando a la sucesión II. Consiste de conglomerados cubiertos por sedimentos limo arcillosos intercalados. Existe la presencia de fósiles de vertebrados, pero la abundancia es menor comparada con la de la sucesión II. El primer estrato de esta sucesión III corresponde a un conglomerado de afinidad volcánica denominado como nivel 2, clasto-soportado de 75 cm de espesor. Los clastos tienen baja esfericidad y son redondeados, varían de 5 a 10 cm de diámetro. El nivel 3 le sobreyace en contacto difuso; éste está compuesto de arcilla limosa, de color rosado (5YR 7/4), de 2.2 metros de espesor. Existe escasa presencia de fósiles de vertebrados. Este estrato está sobreyacido por otra arcilla de color blanco, la cual constituye el nivel 4. Éste tiene un espesor de 10 cm, en el que destacan abundantes concreciones evidentes de oxidación.

Por último, en la cima de la localidad se distingue la sucesión IV, la cual consiste de una serie de estratos de composición más arcillosa, con colores cafés a verdes y de mayores espesores que varían de dos a cuatro metros; éstos son mayores comparados con las unidades anteriores. En esta unidad se han encontrado en menor número tanto madrigueras fósiles como fósiles de vertebrados.

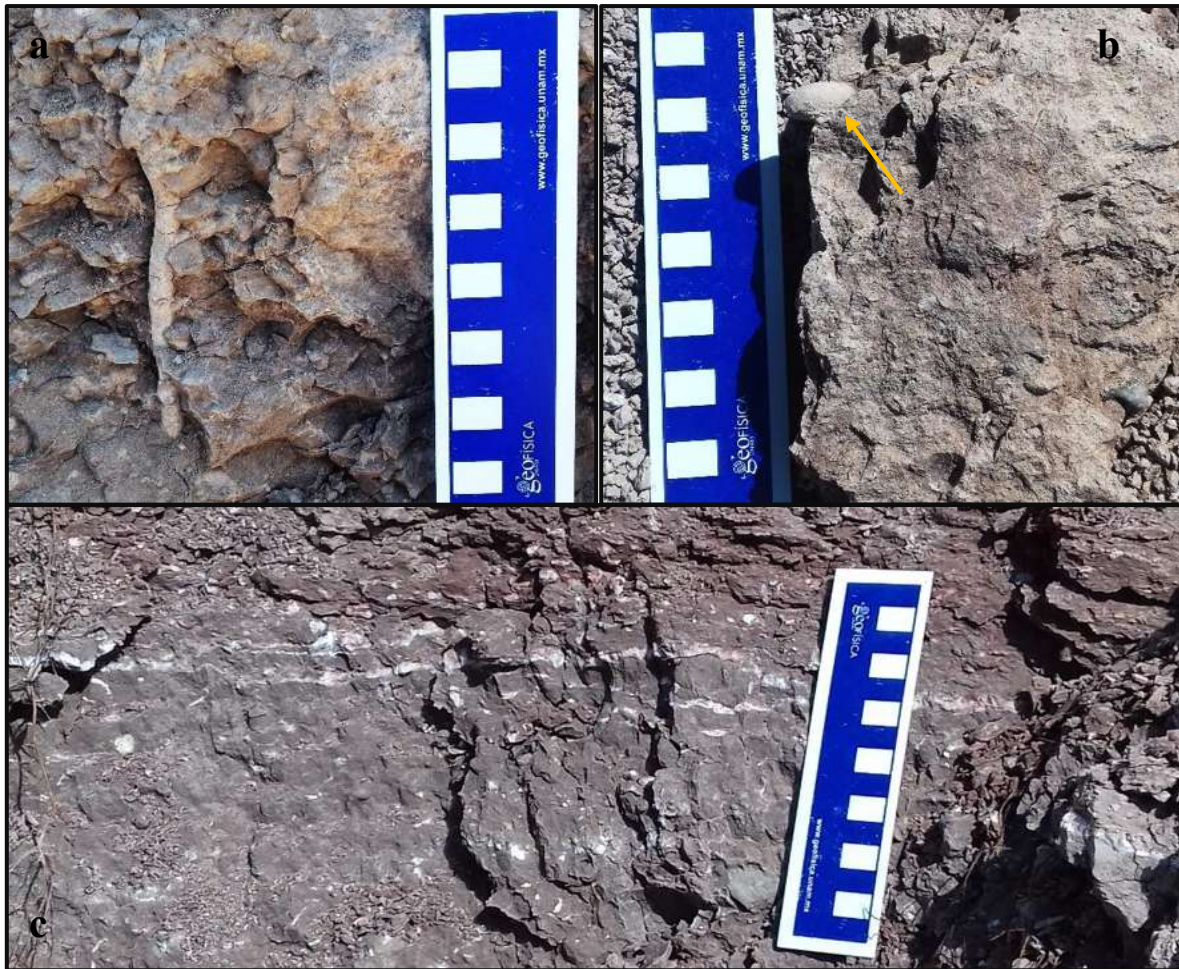


Figura 18. Estructuras sedimentarias. a) Rizolitos. b) Icnofósil. c) Líneas blancas en sedimentos de arcilla. Escala 10 cm.

Sucesión/Espesor (m)

Niveles

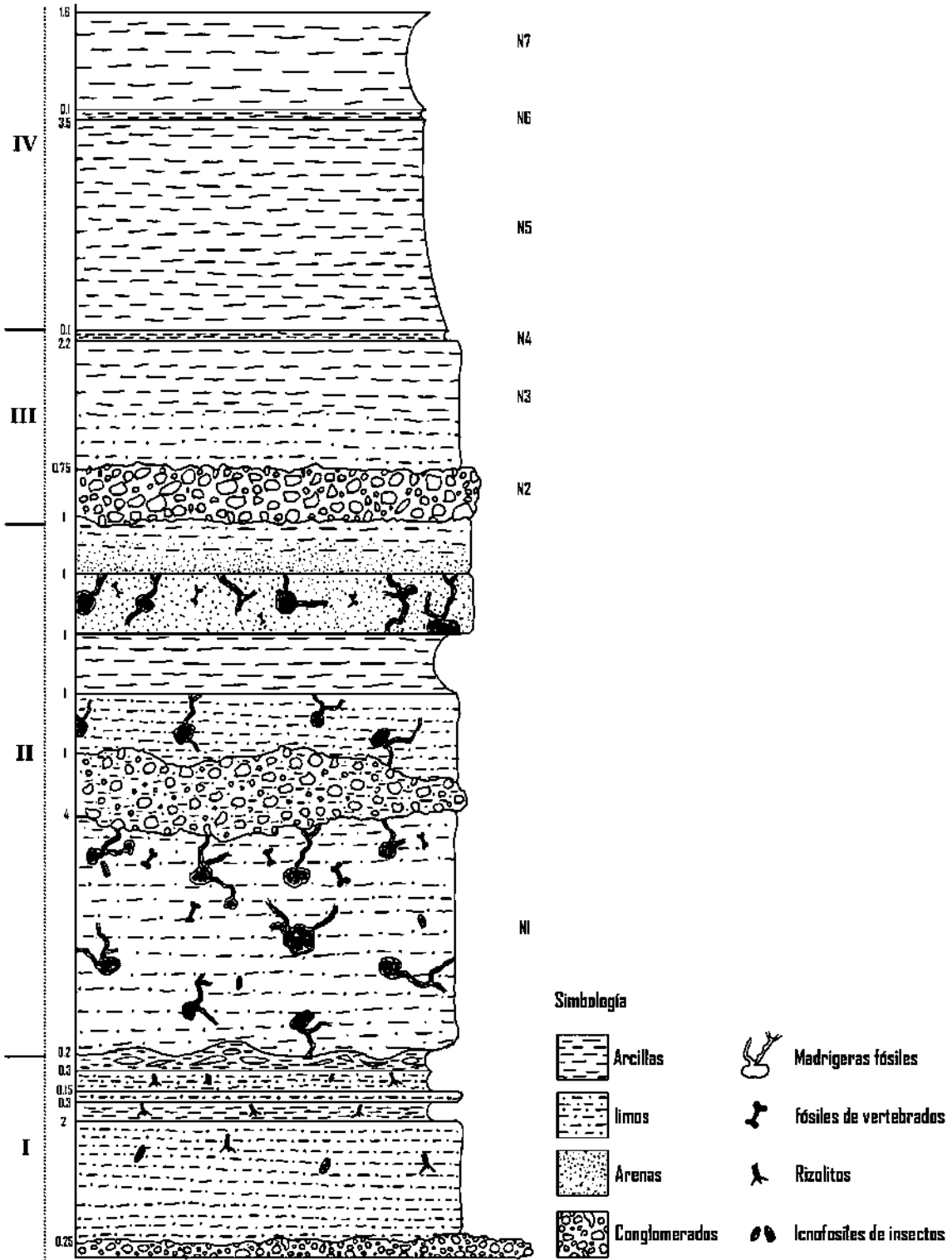


Figura 19. Columna estratigráfica tipo realizada de la zona de estudio. Escala 1:100

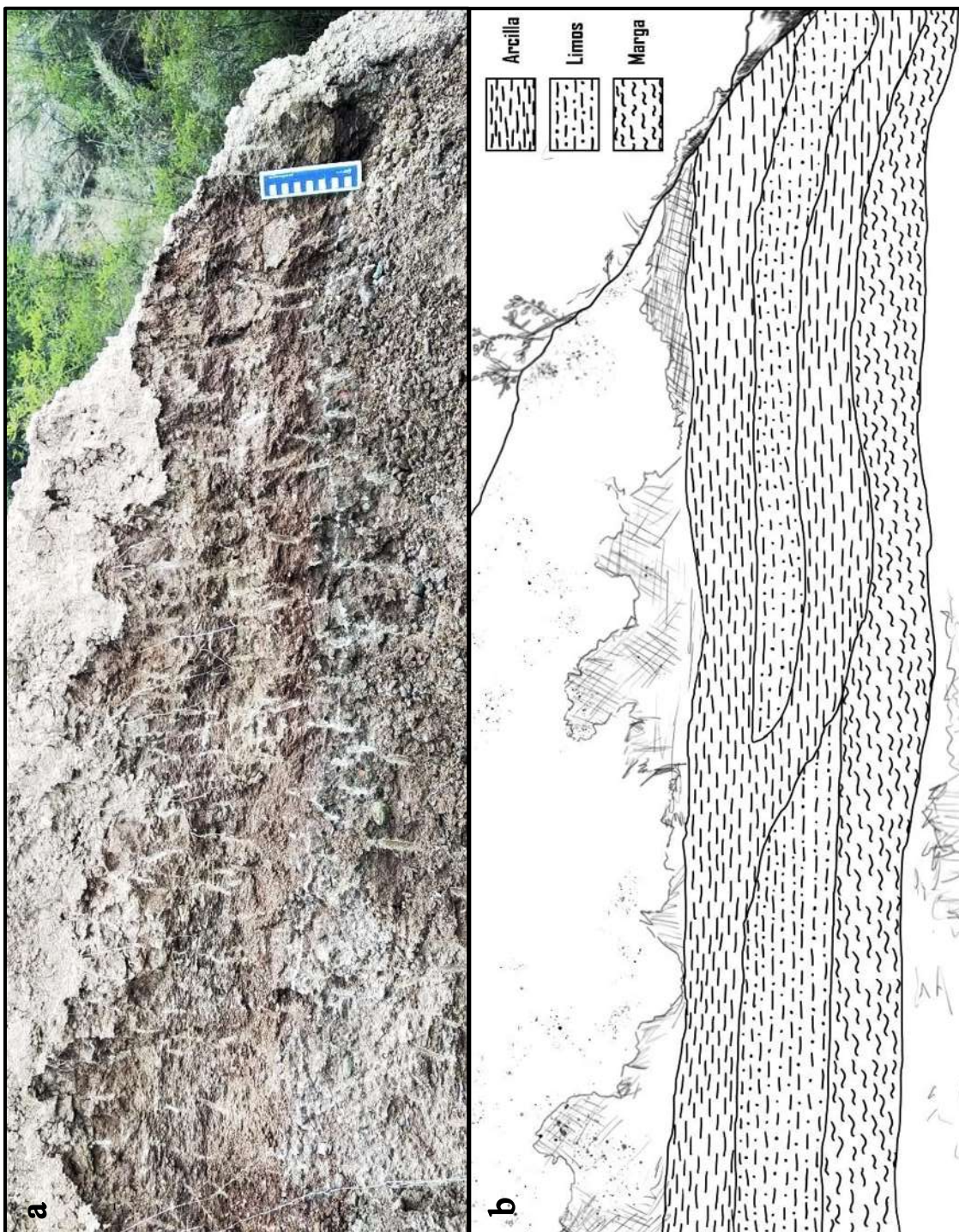


Figura 20. Lente de arcilla limosa en sedimentos de arcilla. a) Figura tomada en campo. b) Ilustración digital. Escala 10 cm

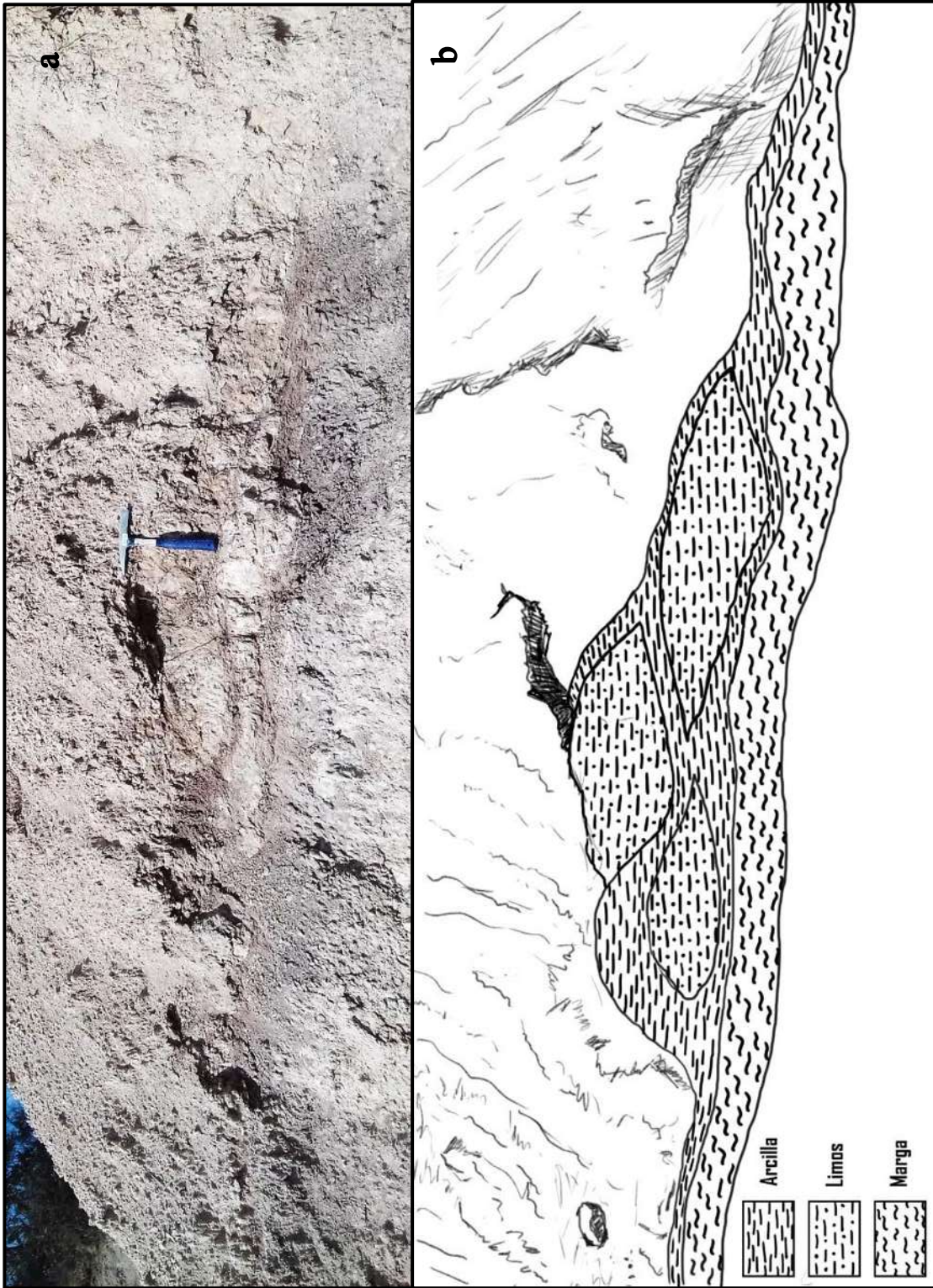


Figura 21. Lecho lenticular. a) Figura tomada en campo. b) Ilustración digital. Escala 30 cm (martillo geológico).

7.3. Análisis Tafonómico

Se analizaron un total de 404 fósiles (NR), 202 partes craneales y 202 postcraneales (Figura 22). La información obtenida se registró en el anexo 1 (https://drive.google.com/open?id=1dinFGBTsWOP_w6Cmec-c793rUgvYcfe). Se obtuvo un número mínimo de individuos de 22-39 individuos (NMI) basados en el número mínimo de elementos esqueléticos (NME) de fémur e incisivos. De las partes craneales, los incisivos fueron los más abundantes y para los postcraneales, el fémur fue el elemento más representado (Figuras 23 y 24).

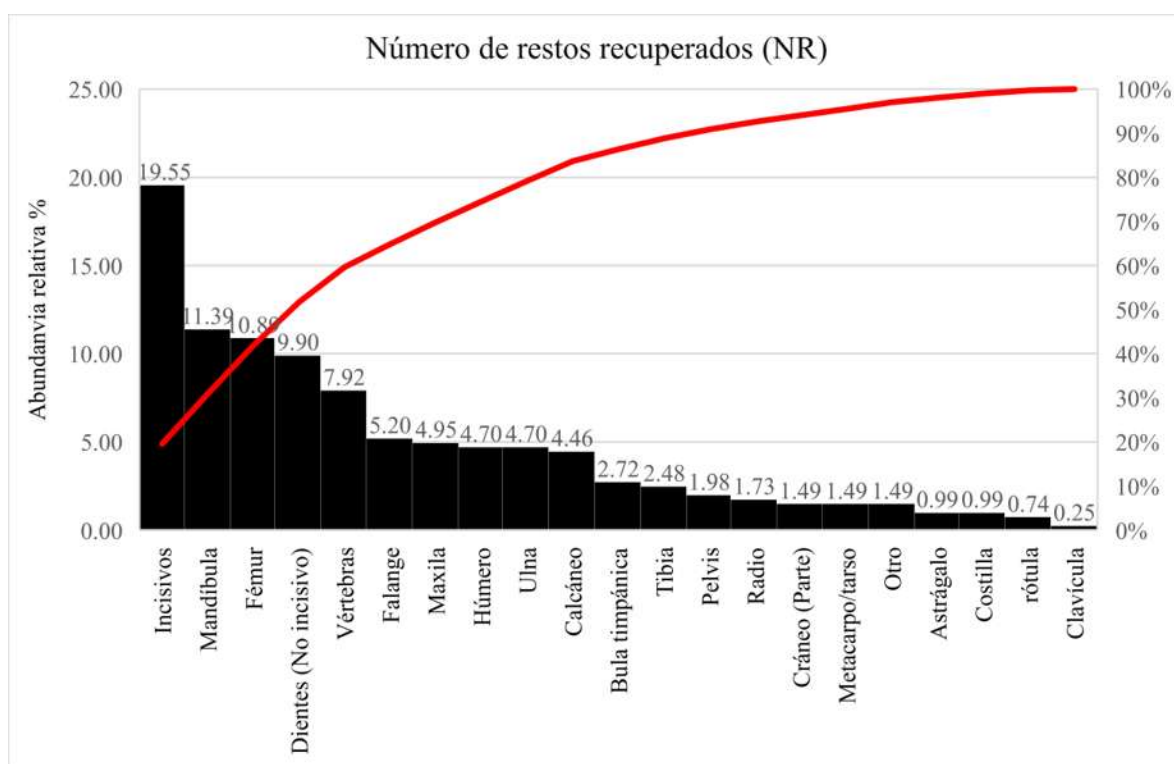


Figura 22. Abundancia relativa de la totalidad de los restos recuperados. Abundancia acumulada (Línea roja).



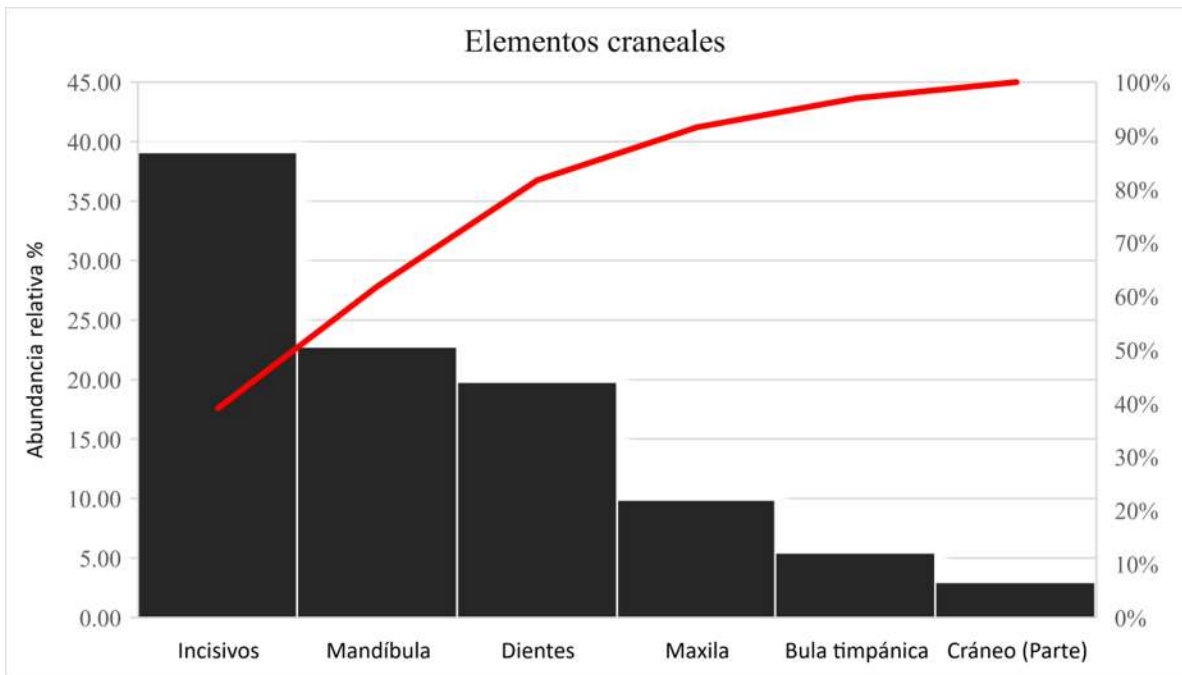


Figura 23. Abundancia relativa de los elementos craneales. Abundancia acumulada (Línea roja)

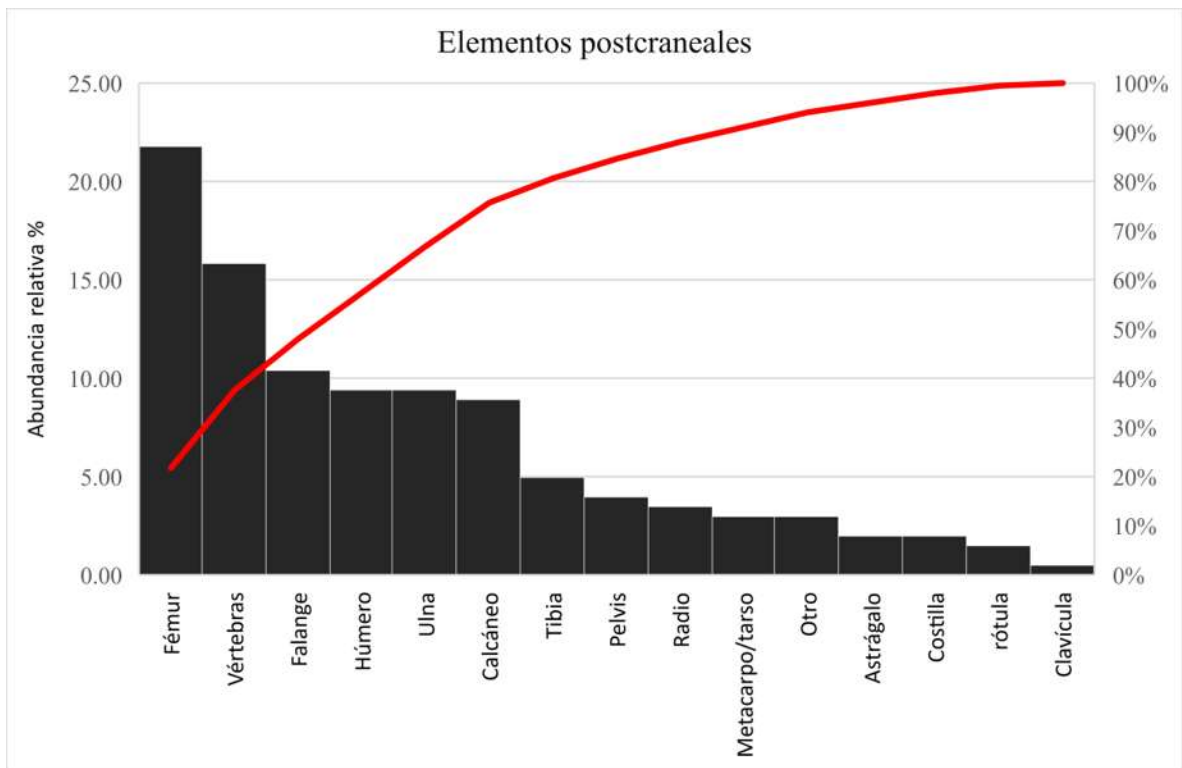


Figura 24. Abundancia relativa de elementos postcraneales. Abundancia acumulada (línea roja)

Los resultados generales de las variables tafonómicas analizadas en los fósiles se muestran en la Tabla 1. Para cada variable se identificó el número de especímenes (columna derecha) relacionado con la categoría de cada una de las características tafonómicas (columna izquierda). Solo el 7.4 % de los restos analizados se encontraron completos (30 ejemplares). Sin embargo, aunque la mayoría de los especímenes están incompletos, su grado de meteorización (Figura 25) y abrasión (Figura 26) permitieron identificarlos correctamente (Tabla 1).

Tabla 1. Características tafonómicas del conjunto fósil estudiado.

Meteorización (1)					
Grado 1 (sin alteración)		203			
Grado 2 (perdida de materia ósea superficial)		183			
Grado 3 (tejido esponjoso expuesto)		18			
Abrasión (2)					
Grado 1 (intacto)		371			
Grado 2 (redondeado)		33			
Desarticulación (3)					
1 (articulado)		38			
2 (desarticulado pero asociado)		104			
3 (aislado)		262			
Color e impregnaciones (4)					
Manchas negras		116			
Manchas amarillas		26			
Manchas blancas (la mayoría en incisivos)		29			
Color blanco y mineralizado		15			
Color amarillento		6			
Traslúcido		6			
Integridad y tipo de fracturas (5)					
Completo		30			
Incompleto		374			
	Roturas	<i>Diagonal</i>	<i>transversal</i>	<i>longitudinal</i>	<i>completo</i>
Fémur		7	35	-	-
Húmero		-	14	-	-
Ulna		3	14	1	-
Radio		-	7	-	-
Calcáneo		1	9	-	3
Falanges		-	16	-	3
Tibia		1	9	-	-

En el apartado de desarticulación, predominó el grado aislado (64%). Se encontraron elementos articulados con poco grado de meteorización y abrasión (9.4%) (Figura 27). En el apartado de color e impregnaciones observadas predominan las manchas negras (28%), seguido de manchas blancas (7%) y manchas amarillas (6.4%).

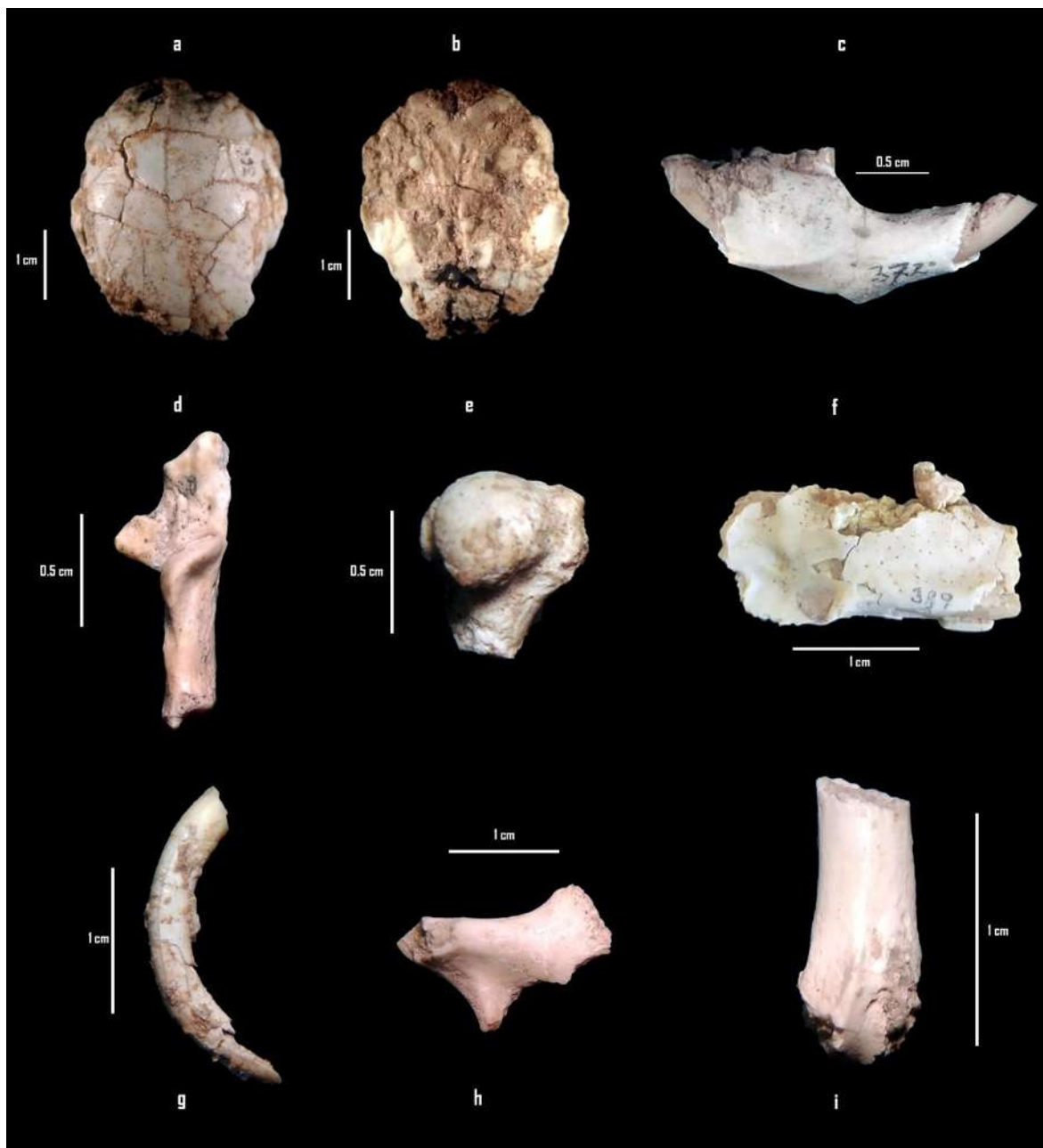


Figura 25. Fósiles de roedores de la categoría de meteorización. Se puede observar en cada espécimen la poca pérdida de material superficial del hueso conservando su forma y permitiendo su identificación. a y b) Cráneo de posible roedor en vista dorsal y ventral. c) Mandíbula derecha en vista labial. d) Calcáneo. e) Cóndilo humeral. f) Mandíbula derecha en vista labial. g) Incisivo. h) Parte de pelvis. i) Epífisis distal de fémur.

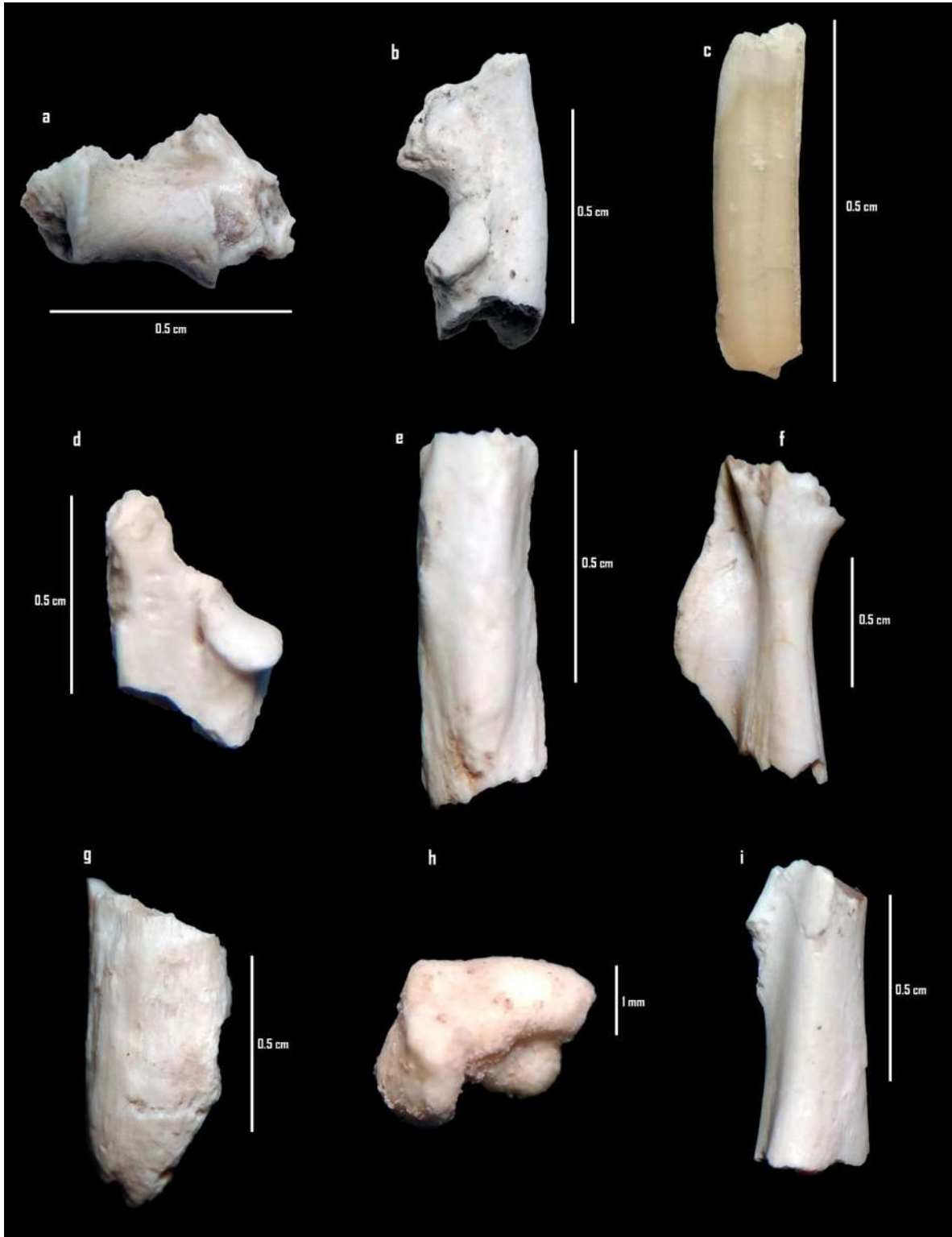


Figura 26. Fósiles de roedores de la categoría de abrasión. Nótese que para cada espécimen la característica principal observada es el pulido en general del hueso y el redondeado de sus aristas y fracturas. Sin embargo, éste no es de alto grado, permitiendo observar la forma original del hueso. a) Epífisis distal de húmero. b) Epífisis proximal de ulna. c) Incisivo. d) Parte de epífisis proximal de ulna. e) Diáfisis de radio. f) Parte proximal de fémur. g) Diáfisis de fémur. h) Astrágalo. i) Diáfisis de húmero.

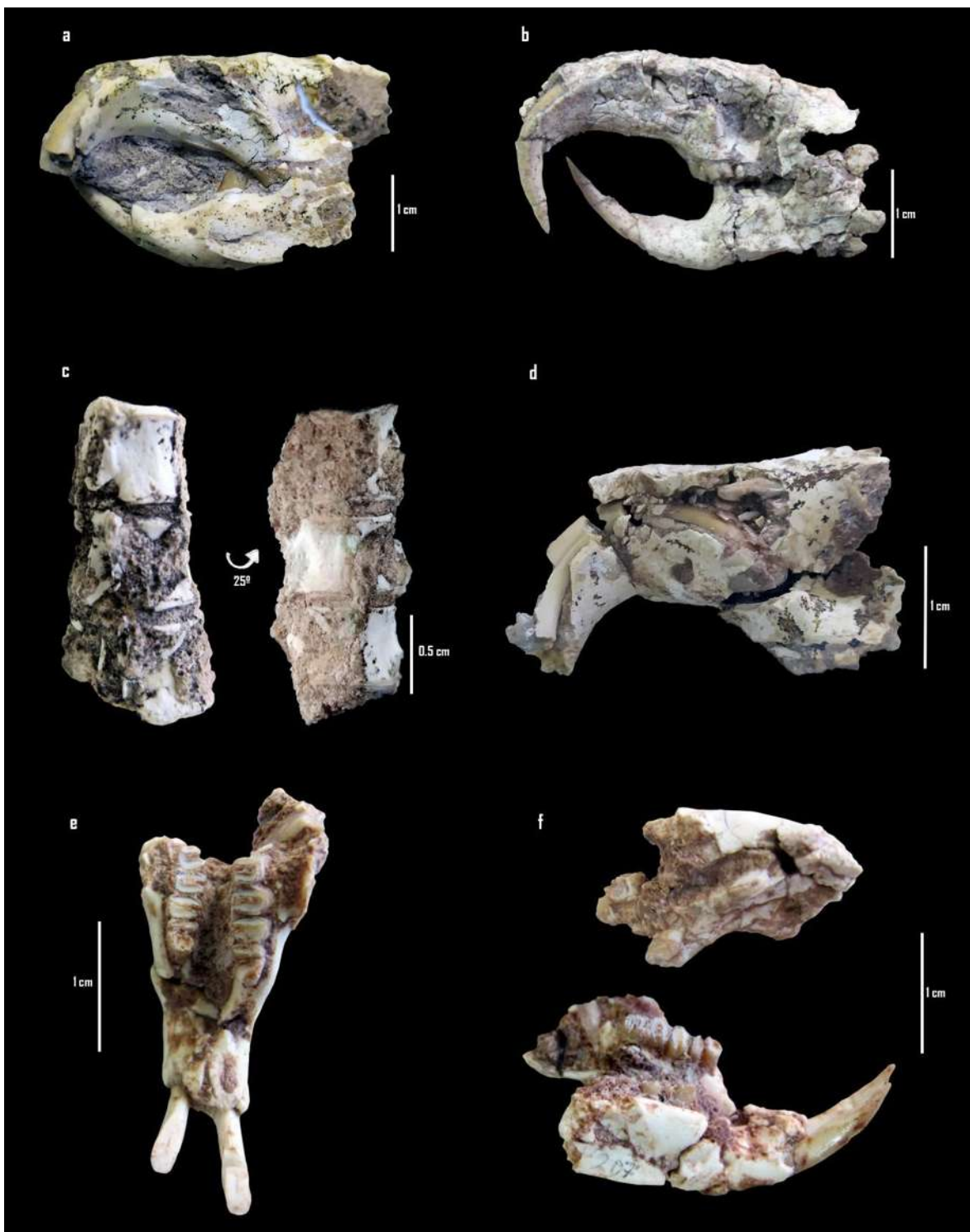


Figura 27. Fósiles de roedores de la categoría de desarticulación. Para estos especímenes resalta su excelente grado de preservación, así como la proximidad a la cual fueron encontrados, permitiendo determinar que se tratan de las partes de un solo individuo para cada conjunto de elementos. a y b) Cráneos completos en vista lateral. c) Vértebra articulado (se puede diferenciar la diferencia de color del lado enterrado y el lado expuesto al intemperismo). d) Maxila. e) Mandíbula en vista oclusal. f) Mandíbula y maxila articuladas. Fósiles e y f corresponden al mismo individuo.

7.3.1. Mineralogía

Las cuatro muestras (dos de fósiles y dos de sedimentos) que fueron analizadas utilizando el método de polvo en un espectrómetro de dispersión de rayos X dieron como resultado difractogramas con picos que muestran los diferentes minerales abundantes en los ejemplares (Figuras 28, 29, 30 y 31).

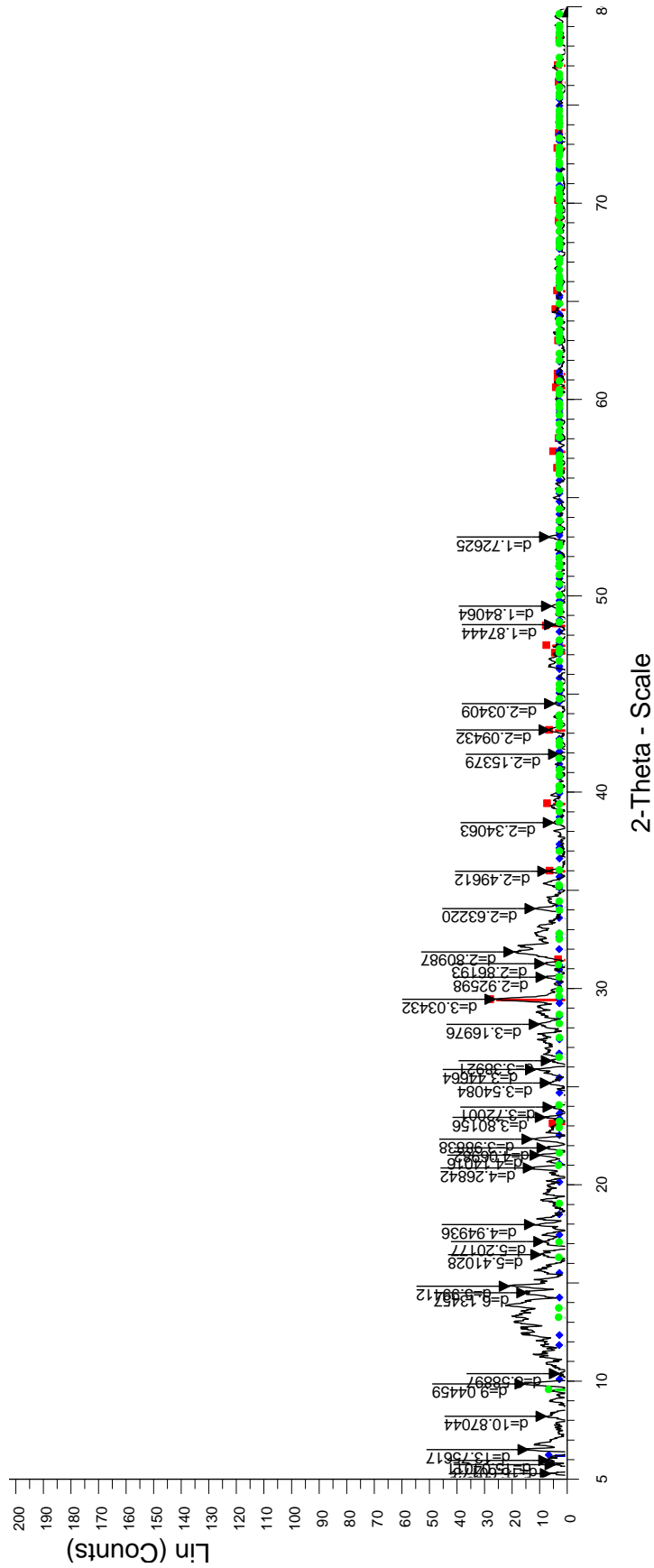
Los minerales más abundantes corresponden a la familia de las zeolitas. También se encontró la presencia de calcita y cuarzo tanto en fósiles como en los sedimentos.

Tabla 2. Resultados de DRX. Presencia de minerales en las muestras analizadas.

Muestra	Minerales identificados
Fósiles	F1 Calcita, Faujasita, Chabazita.
	F2 Faujasita, Chabazita, Carbono, Estilbita.
Sedimentos	S1 Calcita, Calcopirita, Faujasita, Cristobalita.
	S2 Anortita, Faujasita, Vermiculita, Carbono, Cuarzo.

La base de datos creada con los datos obtenidos se encuentra en el anexo 2 (https://drive.google.com/open?id=1W_eIG1wFPYGlePV8568PwjdcMb92qSbl).





F1 - File: F1.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 5.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.020 ° - Step time: 0.6 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 6 s - 2-Theta: 5.000 ° - Theta: 2.500 ° - Chi: 0.00 ° - Phi: 0.0
 Operations: Smooth 0.150 | Background 1.000,1.000 | Import
 01-072-1937 (C) - Calcite - CaCO3 - Y: 98.07 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.H.axes - a 4.99400 - b 4.99400 - c 17.08100 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 120.000 - Primitive - R-3c (167) - 6
 01-084-0586 (C) - Faujasite (Ag-exchanged), syn - Ag79.7Al86S1106O384 - Y: 15.39 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Cubic - a 25.06000 - c 25.06000 - alpha 90.000 - beta 90.000 - gamma 90.
 01-085-0594 (C) - Chabazite (Ca-exchanged, dehydrated) - Ca1.95Al3.9Si8.1O24 - Y: 15.43 % - d x by: 1. - WL: 1.5406 - Rhombo.R.axes - a 9.37000 - b 9.37000 - c 9.37000 - alpha 92.020 - beta 92.02

Figura 28. Difractograma de muestra fósil (F1).

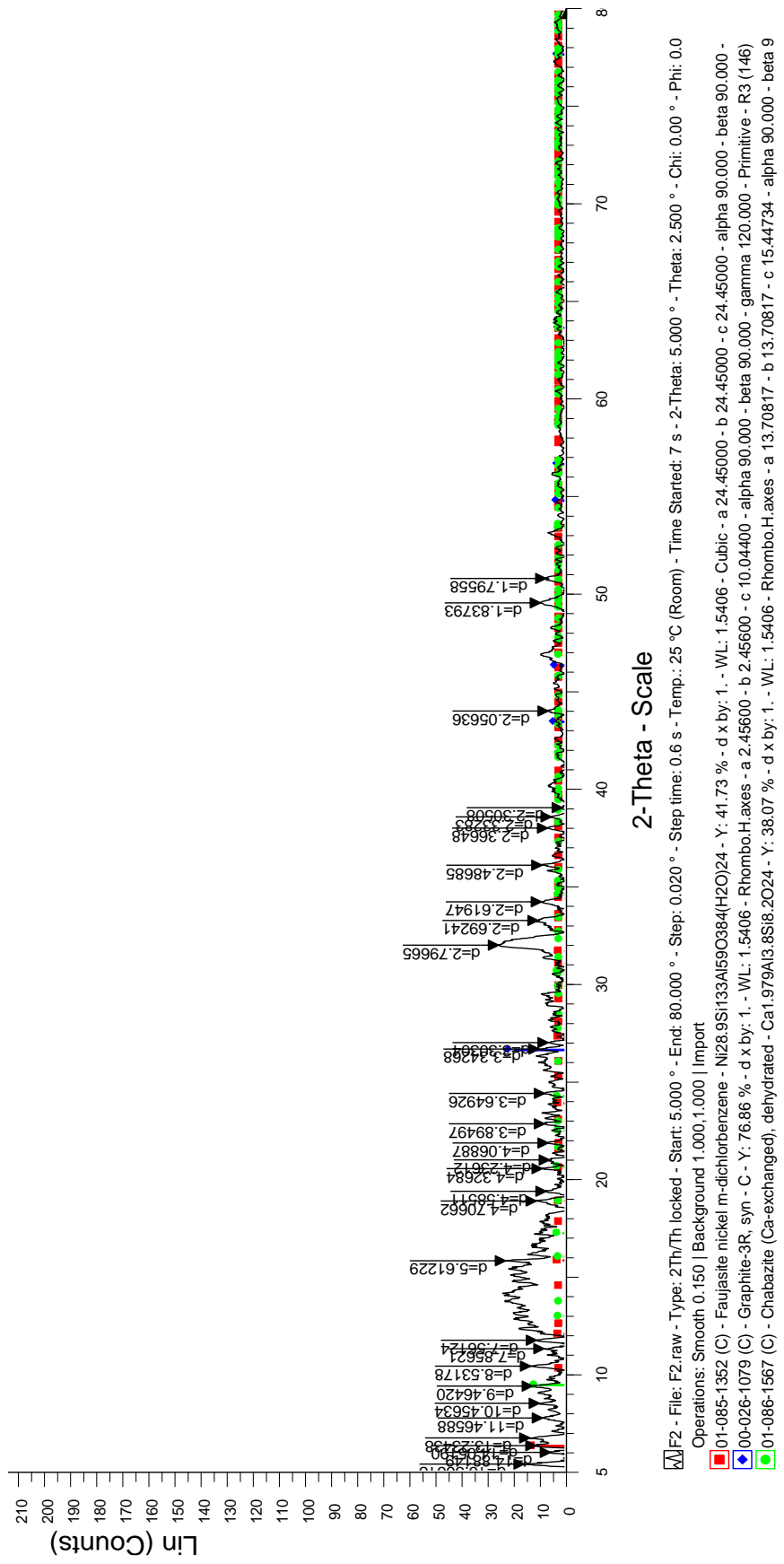


Figura 29. Difractograma de muestra fósil (F2).

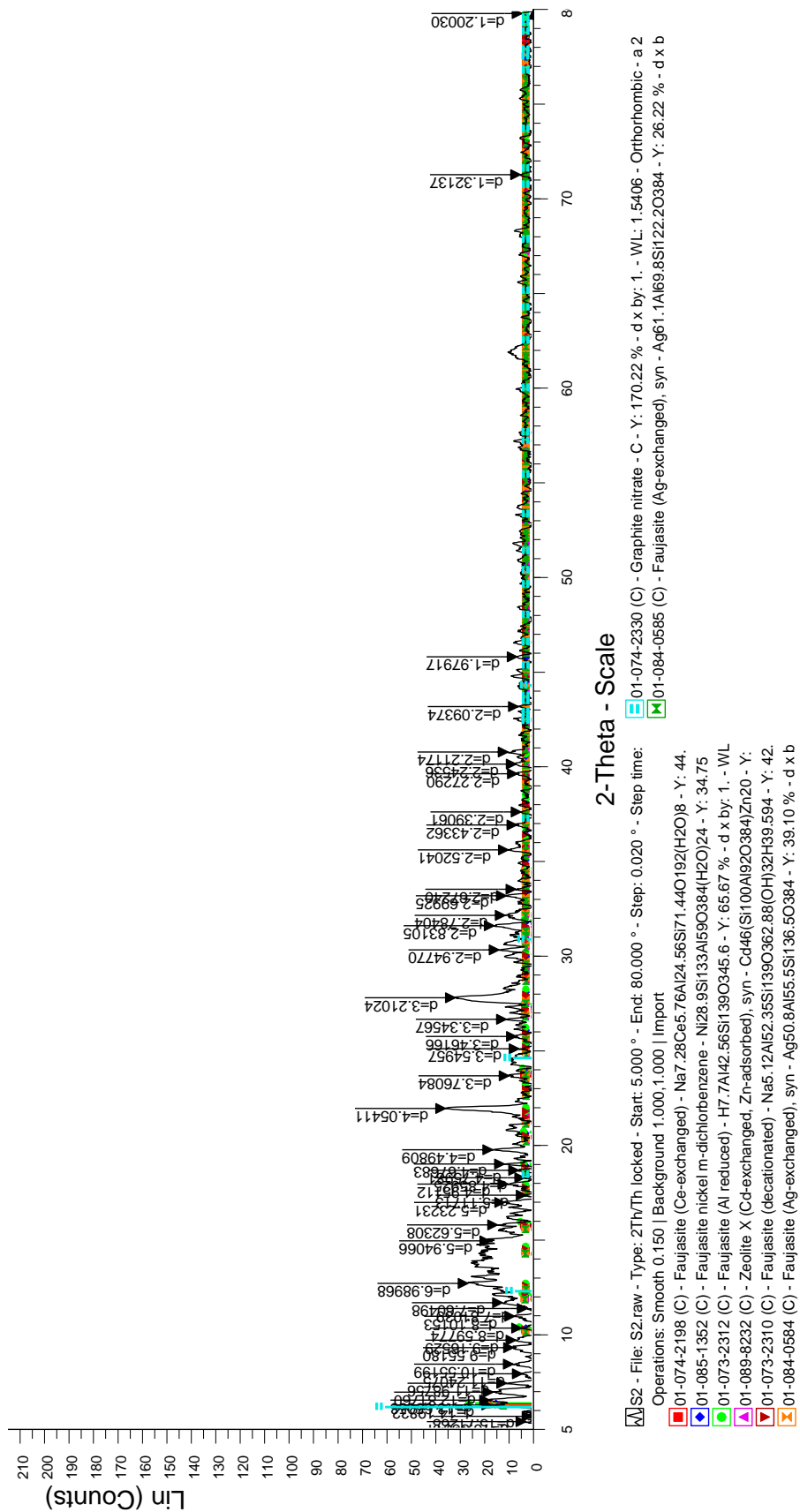


Figura 31. Difractograma de muestra de sedimentos (S2).

7.4. Análisis Geoestadístico

Se utilizó un total de 22 fósiles que se georreferenciaron para este análisis. La cantidad utilizada para este análisis fue determinada por la presencia de fósiles encontrados *in situ*. Para cada análisis, se obtuvieron gráficas de distribución de los datos y del comportamiento del patrón analizado para cada caso.

7.4.1. Elipse de desviación estándar

La elipse o elipsoide obtenida nos indica una tendencia de distribución y dirección de los fósiles NE-SO (Figura 32). La mayoría de los ejemplares georreferenciados se encuentran en la parte NE de la zona y hacia el sur se observan en menor número y más dispersos. La diferencia de color en el área indica la altitud a la cual fueron hallados los restos; colores azules indican posiciones superiores y rojos posiciones inferiores dentro del mismo estrato. Todos los fósiles son del nivel 1 a excepción de las muestras 022 y 023 que son del nivel 7.

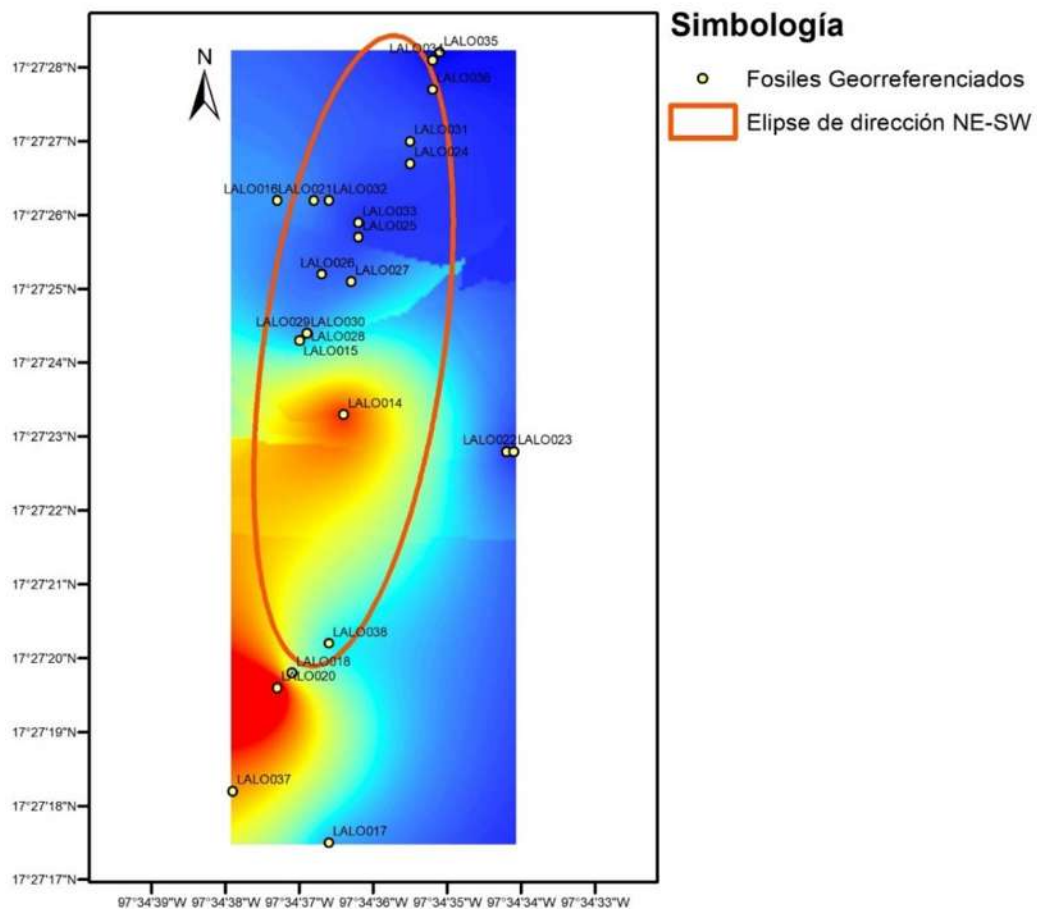


Figura 32. Mapa de distribución de fósiles georreferenciados. Elaborada en ArcGis v10.3.

7.4.2. Análisis de promedio de vecinos más cercanos

Los resultados obtenidos rechazan la hipótesis de distribución aleatoria (Figura 33), dado que el puntaje del valor Z es -3.69524084608 , por tanto, existe una probabilidad de menos del 1% de que este patrón agrupado podría ser el resultado de una probabilidad aleatoria.

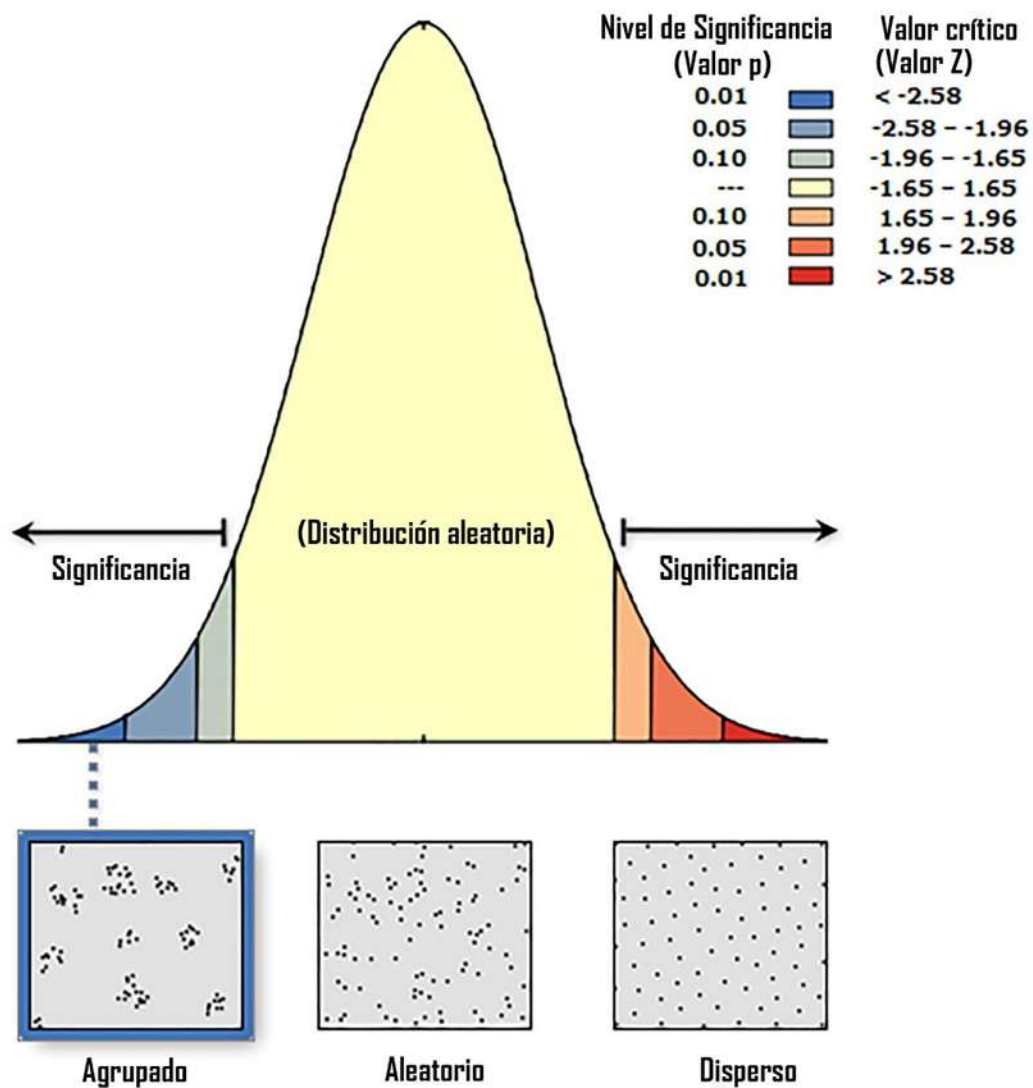


Figura 33. Gráfica de distribución de probabilidades para la prueba de promedio de vecinos más cercanos.

7.4.3. Análisis clúster espacial de distancia múltiple (Función K de Ripley)

El resultado obtenido a partir de este análisis nos indica una distribución de la acumulación que varía según distancias dadas por la gráfica obtenida mediante el análisis.

La gráfica de función K de Ripley (Figura 34) nos indica que cuando las distancias entre los fósiles corresponden a un intervalo entre 10 y 50 metros un comportamiento de agrupamiento se hace evidente, mientras que en distancias mayores a 50 metros se obtiene una dispersión estadísticamente significativa.

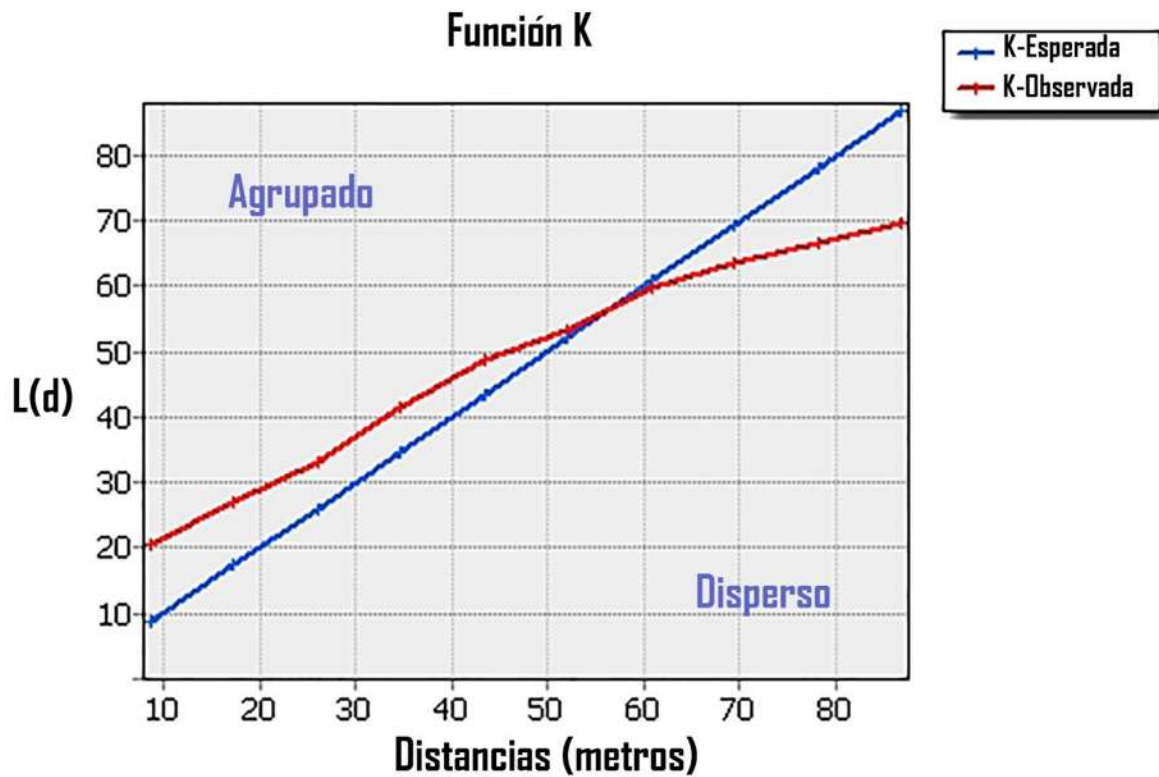


Figura 34. Gráfica de función K de Ripley.

7.5. *Reconstrucción del ambiente sedimentario de la zona.*

Basada en la descripción de los estratos de la zona, las características tafonómicas de los fósiles, así como en estudios previos que han realizado inferencias sobre las posibles condiciones del ambiente (Jiménez-Hidalgo et al., 2015, 2017; Guerrero-Arenas et al., 2017; Jiménez-Hidalgo et al., 2018), se presenta una reconstrucción de lo que fue la zona para el Oligoceno temprano en Santiago Yolomécatl. La ilustración describe un área intramontañosa en la cual se acumulaban sedimentos por corrientes fluviales. La ilustración representa la zona en temporada de lluvias (Figura 35).



Figura 35. Reconstrucción de la zona de Santiago Yolomécatl para el Oligoceno temprano.

Algunos organismos que se ilustran en la imagen han sido los registrados en estudios realizados por Jiménez-Hidalgo (2015; 2017). Estos corresponden a tortugas terrestres de la familia Testudinidae, icnotaxas de avispas y roedores geómidos (*Gregorymys sp*). La cobertura vegetal pudo haber estado dominada por arbustos pequeños cercanos a los cuerpos de agua y plantas criptógamas en las zonas más húmedas y pantanosas. En las zonas montañosas pudieron habitar árboles grandes como las coníferas (Pérez-crespo, 2011).

Se realizó además un modelo del posible enterramiento para los fósiles, considerando las características ambientales que se describen para la zona (Figura 36).

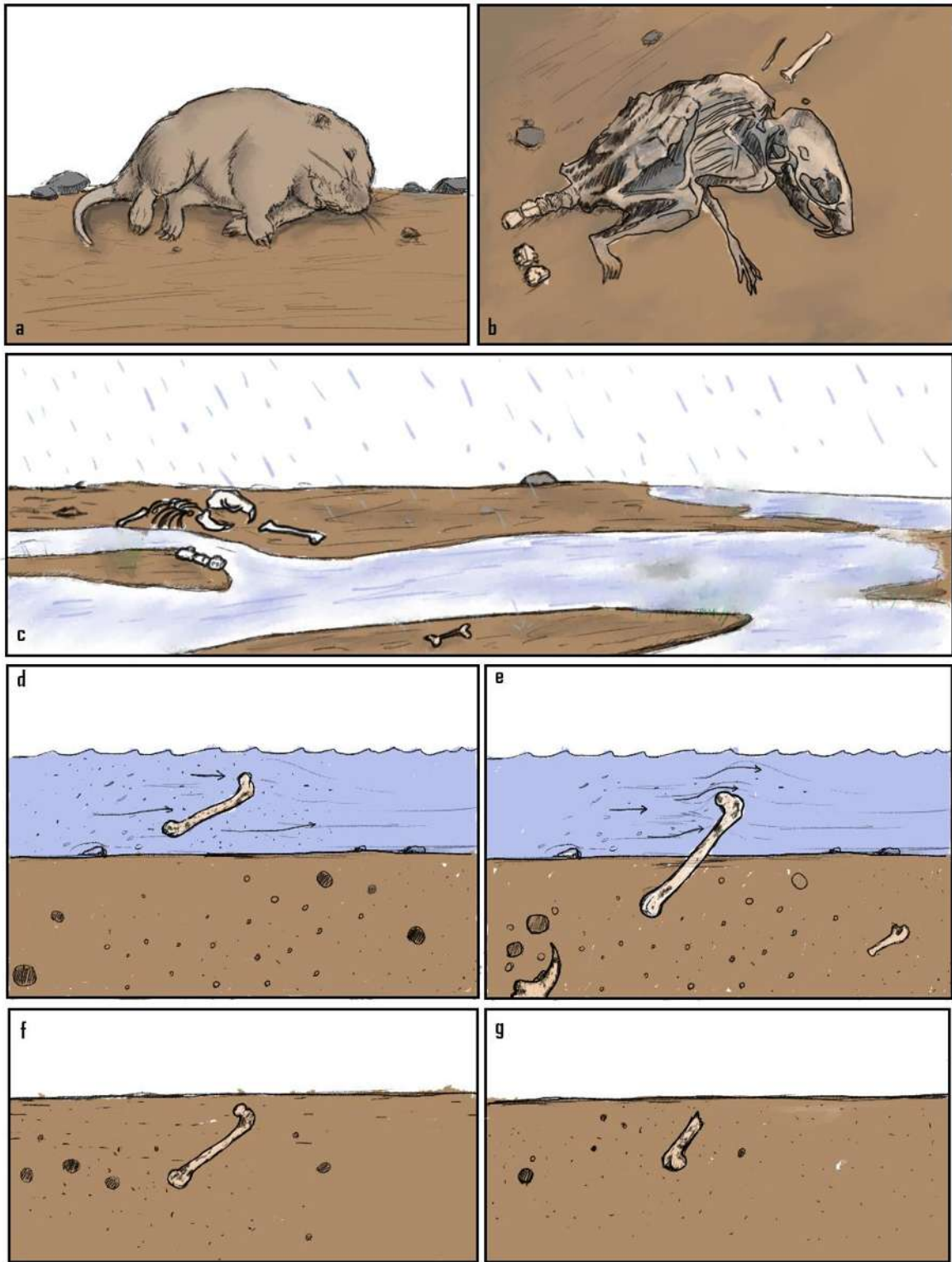


Figura 36. Modelo de enterramiento para fósiles de mamíferos pequeños de la zona. a) Muerte del organismo en la superficie del suelo. b) Descomposición y separación de elementos del esqueleto axial. c) Se propone que la dispersión de los elementos esqueléticos se llevaba a cabo por corrientes fluviales. d) El transporte se realizaba por movimiento y flote de los elementos en corrientes. e) Los elementos se depositaban en sedimentos finos y podía ocurrir abrasión y pulido. Por último, podían ocurrir dos eventos posteriores al depósito del fósil: f) El elemento era enterrado por sedimentos finos rápidamente y su preservación era completa, o g) El fósil por el desgaste previo se hacía frágil y se fracturaba, en este caso solo se conservaban algunas partes del elemento.

VIII. DISCUSIÓN

8.1. Estratigrafía y ambiente de depósito de la zona

De acuerdo con los resultados obtenidos respecto a la secuencia estratigráfica, se pudo deducir que desde el punto de vista paleoambiental, el sitio era una zona con alto grado de acumulación de sedimentos clásticos que van desde texturas finas y medias, hasta conglomerados con abundantes clastos volcánicos de tamaños desde uno hasta 20 cm de diámetro.

La columna está representada por sedimentos arcillosos, limos arcillosos, areniscas y tres pulsos de conglomerados que se intercalan entre los demás estratos. Estos conglomerados junto con los sedimentos, representan evidencia de antiguos canales con media a alta sinuosidad dentro de un sistema fluvial de carga mixta o de carga suspendida (Figura 37).



Figura 37. Evidencia de canales presentes en un afloramiento diferente cercano a la zona de estudio.

Además, se observó la presencia de zonas más cálcicas y silicificadas en algunos estratos con continuidad lateral. Se presentaron acñamientos con cambios de facies laterales como probable evidencia de antiguos lagos o cuerpos de agua que se desbordaron de la zona litoral por un corto periodo de tiempo, dando como resultado una llanura de inundación. Las

estructuras sedimentarias como lechos lenticulares, lentes de arcillas limosas en matrices arcillosas y rizaduras, nos permiten inferir un ambiente fluvial donde episodios de baja energía formaban estratos arcillo-limosos dentro la sucesión I (Figuras 21, 20, 38). Se encontraron evidencias de deslizamientos y fallas que ponen en contexto la actividad telúrica bajo la cual la zona pudo estar influenciada a lo largo de su formación (Figura 39).



Figura 38. Evidencias de rizaduras y ondulitas de corriente en estratos arcillosos cercanos a la zona de estudio. Escala 10 cm

En un contexto general, la zona tuvo una configuración de valle intramontañoso, en el cual existieron sistemas de drenaje transversales y axiales (Figura 41). El sistema transversal facilitó el transporte de agua, minerales y sedimentos ubicados en las partes de pie de monte, taludes y abanicos coluviales de las montañas circundantes hacia la llanura, dando como resultado un drenaje axial que discurría a lo largo de los márgenes del valle y pudo estar representado por extensos ríos asociados a lagos que se desarrollaron en el transcurso de su recorrido. Esto último pudo propiciar la distribución espacial de los fósiles de organismos que habitaban las zonas más bajas. El grado de intemperismo y la abrasión que presentaron los ejemplares nos indican que los restos permanecían por poco tiempo expuestos en la superficie y que sufrían poco transporte, por lo cual, aunado a la descripción paleoambiental, se infiere un sistema fluvial de poca energía y con capacidad de acumular los restos en diversas zonas a lo largo de la superficie, tal como un sistema meandriforme acumula material clástico en barras y diques.

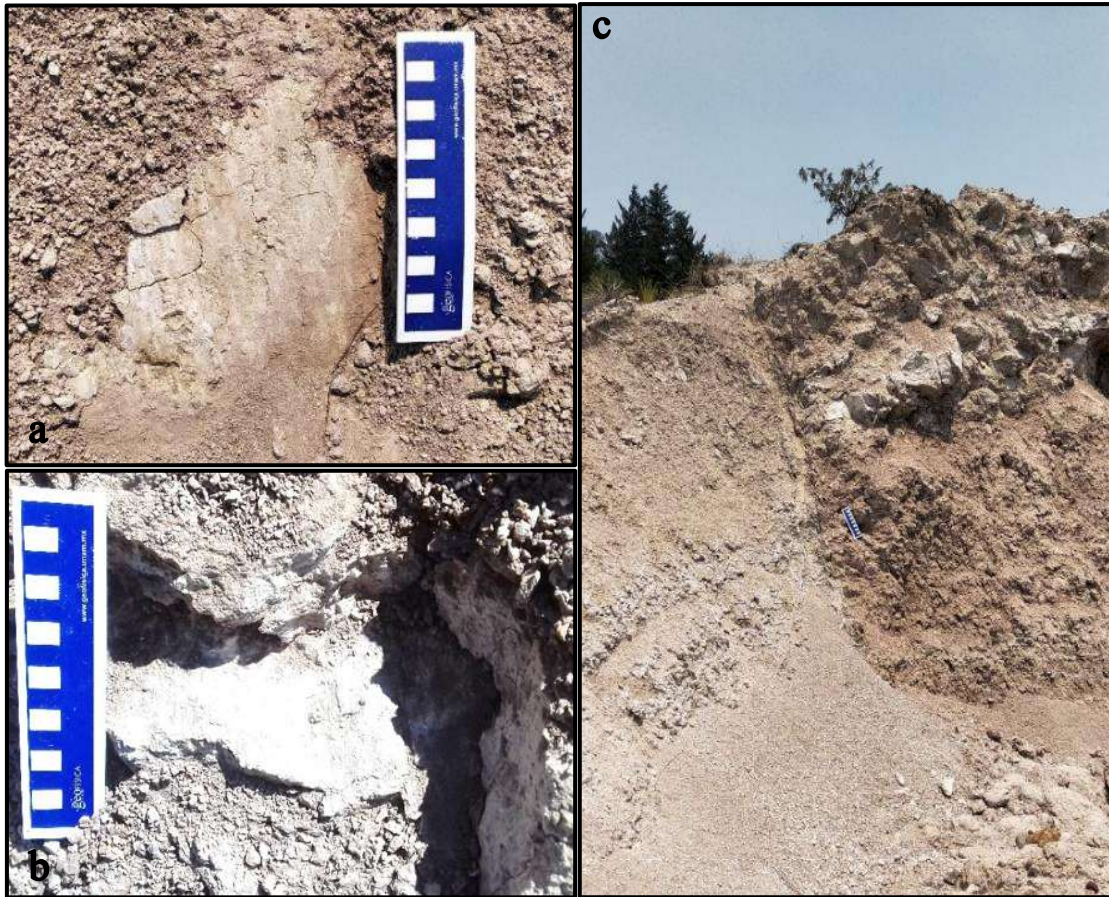


Figura 39. Evidencia de deslizamientos en el yacimiento Jesús Bones. Escala 10 cm.

Dentro de la secuencia estratigráfica de la zona, el nivel 1 en la sucesión II cuenta con el mayor número de fósiles registrados (91%) (Figura 42). Los demás niveles portadores de fósiles corresponden al nivel 3 y 4 en la sucesión III, y el nivel 7 en la sucesión IV. Las características (espesor, geometría y textura) para el nivel 1 en la sucesión II muestran que se acumuló durante miles de años, bajo las mismas condiciones de depósito. Estratos subyacentes a éste, indican evidencia fluvial meandriforme con la formación de posibles barras y diques (Figuras 20, 21). El nivel 1 es uniforme vertical y horizontalmente, por lo que a partir de los sistemas transversales se pudo depositar, por un evento de inundación que propició la acumulación de una cantidad significativa de sedimentos finos (Figura 41). La mayor abundancia de fósiles en este estrato pudo estar relacionada a que los eventos de depósito de sedimentos tuvieron una mayor duración y efecto a la de los demás estratos portadores.

Los niveles 3 y 4 muestran evidencia de un depósito en condiciones lacustres. El nivel 3 está compuesto por sedimentos arcillo limosos, presentan un color rosado (5YR 7/4) y un espesor de 2.2 metros. El nivel 4 tiene 10 cm de espesor y su composición es muy arcillosa con un color blanco, presenta continuidad lateral acuñada y en otras zonas se encuentra formando una calcreta de gran dureza (Figura 40). Estas características nos permiten deducir que en primer lugar ocurrió un evento que permitió la acumulación de los sedimentos finos del nivel 3 durante un periodo de tiempo amplio. Posteriormente, ocurrió la formación del nivel 4 por un evento de desecación, permitiendo la precipitación de la calcita por la evaporación de cuerpos de agua durante condiciones secas. Estos eventos tuvieron menor permanencia a la del nivel 1.



Figura 40. Zona de calcreta en el afloramiento. Escala (30 cm)

Por último, en el nivel 7 sólo se encontraron dos fósiles (Figura 42). Este estrato estaba afectado por bioturbación actual, por lo que realizar una interpretación de la formación del estrato podría producir interpretaciones erróneas. Presenta una textura arcillosa de color café y presencia de vetillas de color blanco producto de procesos pedogenéticos actuales.

Se infiere que la zona estuvo muy influenciada por sistemas fluviales y cambios de energía durante su formación en diversos periodos de tiempo. Éstos provocaron la formación de cada uno de los estratos bajo diferentes condiciones de depósito, y finalmente permitieron la

acumulación de los fósiles que sucesivamente fueron afectados por procesos diagenéticos. La descripción realizada indica que la zona pudo estar formada por un sistema fluvial dinámico que se fue construyendo por diversos tipos de sistemas fluviales a lo largo del tiempo. Las diferencias observadas tanto en la representatividad fosilífera como en las características sedimentarias para cada estrato, muestran la dinámica fluvial.

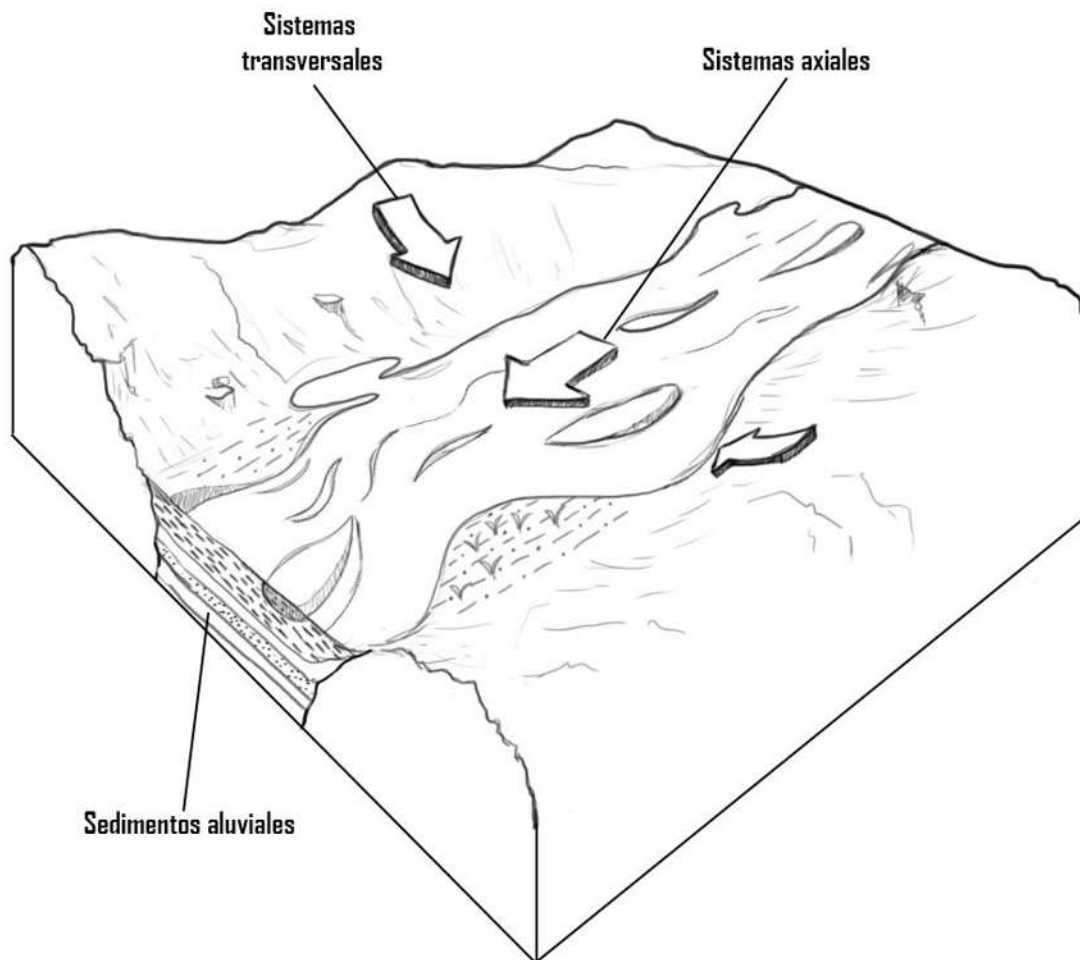


Figura 41. Sistemas transversales y axiales en un sistema intramontañoso.

8.2. Análisis tafonómico

El grado de meteorización que presentaron los especímenes nos indica que se conservaron con sus características originales y no sufrieron pérdidas significativas de material óseo, al menos no lo suficiente para perder la forma original del hueso. En su mayoría, los especímenes presentan el grado 1 (Sin alteración) (50.24 %), y grado 2 (pérdida superficial de material óseo) (45.29%). Estos valores nos permiten deducir que los fósiles estuvieron expuestos al intemperismo por poco tiempo después de la muerte del individuo, previo al enterramiento final del espécimen. En algunas investigaciones se ha evidenciado que el intemperismo se produce como primer paso después de la muerte, por lo que un grado escaso puede significar poco tiempo de exposición al ambiente y de esta manera las características morfológicas originales de un hueso se conservan (Tomassini et al., 2017).

La integridad del conjunto de fósiles estudiados fue mala, ya que de los 404 fósiles analizados sólo el 7.4% se encontraban completos. Sin embargo, la preservación que se pudo observar fue buena en todos los ejemplares debido a la escasa meteorización y abrasión que presentaron. Esto indica que los fósiles, aunque se preservaban, se fracturaban durante su transporte o diagénesis. Las fracturas observadas con mayor frecuencia fueron fracturas transversales (84%) y diagonales (9%), en elementos esqueléticos largos (fémur, húmero, ulna y tibia). Estos tipos de fracturas son propios del movimiento diagenético y debido a la compresión de los sedimentos cuando ocurre el enterramiento del fósil. La ausencia de fracturas longitudinales indica que los fósiles se enterraban a poca profundidad por lo cual, la carga litostática tuvo poco efecto durante etapas posteriores a la permineralización del hueso, ya que la mayoría de los especímenes se encontraron incompletos, pero sin evidencia de deformación significativa.

La abrasión que presentaron los fósiles fue escasa. Los especímenes presentaron baja o ninguna alteración para esta variable tafonómica, por lo que es posible que tuvieran poco transporte o si fue así, este se realizó por distancias relativamente cortas (metros). Los huesos de microvertebrados son fácilmente transportados y dispersados por corrientes de baja velocidad (<35 cm/s) (Tomassini et al., 2017). Ello explicaría por qué la mayoría de ejemplares se encontraron aislados (64.85%) y a su vez, implicaría que la abrasión se realizó con menor intensidad debido a la baja velocidad del medio que los transportó.

La abrasión, al observarla en fracturas, indica que éstas se produjeron previo a la diagénesis. La mayoría de fracturas registradas carecen de evidencia de abrasión significativa, por lo cual se produjeron posterior al enterramiento o durante su extracción de los sedimentos. Bajo condiciones de poca profundidad, el crecimiento de cristales de calcita pudo haber provocado las fracturas en los ejemplares durante la permineralización (Holz y Schultz, 2007).

La articulación entre los elementos se presentó en pocos casos (9.4%), sin embargo, en los que se pudieron registrar, la meteorización fue de grado 1 y 2. En segunda instancia se encontraron los fósiles desarticulados pero asociados (25.74%). Los ejemplares presentados en la Figura 27 se encontraron totalmente articulados y forman parte del 9.4% de ejemplares con esta característica. Ello implica que existió un medio por el cual, en estos casos, los elementos del organismo se mantenían articulados al momento de la muerte y se enterraron de manera rápida. No obstante, lo que más se registraron para este estudio fueron especímenes aislados (64.85%). En los casos que se encontró el material articulado, se infiere que los roedores murieron fuera de sus madrigueras y las partes esqueléticas más susceptibles a la desarticulación (pelvis, vértebras torácicas y caudales) eran las primeras en ser transportadas por la acción de corrientes (Dodson, 1973). Dando lugar a que las partes que permanecían articuladas (incisivos, mandíbula, ulna, radio, húmero, calcáneo, fémur, cráneo y tibia) pudieran preservarse. Las madrigueras pudieron haber funcionado como trampas para la acumulación de estos restos.

Otras características analizadas como la coloración y manchas en los especímenes, han constatado que se trata de evidencias de enterramiento rápido, exposición a factores ambientales y humedad. Para sistemas fluviales, el agua suele desteñir a los huesos tornando un color pálido o amarillento. Para el caso de las manchas café y negras que se registraron en muchos de los especímenes, puede deberse a la cantidad de materia orgánica en los sedimentos que los contenían o con la presencia de cristales de manganeso propios de condiciones húmedas (Fernández-Jalvo y Andrews, 2016).

Existe una selección diferencial de los especímenes de acuerdo a su representatividad en toda la muestra analizada. Para fósiles de roedores hay una selección de las partes esqueléticas más susceptibles a ser arrastradas por corrientes de acuerdo al orden de desarticulación de estas. En primer lugar, las partes que enseguida se separan después de la muerte del individuo

son las vértebras torácicas, la pelvis y las vértebras caudales. Posteriormente, en orden de mayor a menor susceptibilidad de dispersión le siguen: vértebras cervicales, tibia-fíbula, cráneo, calcáneo, húmero, radio, ulna, mandíbula e incisivos (Dodson, 1973). Esto explicaría en parte la mayor presencia de algunos elementos esqueléticos. Por tanto, los fósiles con mayor disposición a ser conservados fueron aquellos con menor susceptibilidad al transporte. En la figura 22 podemos observar que los elementos esqueléticos más abundantes corresponden a aquellos elementos con menor susceptibilidad a la dispersión.

La presencia de mayor número de fósiles en un solo nivel portador (nivel 1) demuestra la aptitud de éstos para ser enterrados por condiciones de baja energía y con poco daño tafonómico durante un periodo de tiempo amplio. En la figura 42 podemos observar la diferencia en fósiles de los diferentes niveles portadores. El nivel 1 muestra la mayor cantidad de fósiles preservados. El nivel 1 se formó bajo condiciones de acumulación por un tiempo amplio que estuvo influenciado por los efectos fluviales de la zona. Por tanto, para la zona de estudio existe una relación directa entre menor daño tafonómico y la menor energía de los efectos fluviales bajo los cuales los fósiles se preservaron. En el caso del segundo y tercer nivel portador (nivel 3 y 4) esta relación permanece, pero el tiempo de formación para estos estratos fue menor y bajo condiciones diferentes al nivel 1. Su formación se asocia a la presencia de un lago (nivel 3) que posteriormente se secó por evaporación (nivel 4). La menor presencia de fósiles en los niveles 3 y 4, está relacionada a la poca duración de sus condiciones formadoras. Por último, el nivel 7 al estar bajo efectos de bioturbación actuales, no se puede inferir una posible formación, ni acumulación para los fósiles que se encontraron en éste.

En general, los fósiles del sitio presentaron una buena preservación. Las variables tafonómicas analizadas mostraron valores que permiten deducir que la zona no presentó fenómenos que provocaran una alteración significativa o en su lugar, promovió el enterramiento rápido de los especímenes. La mayoría de los fósiles sufrieron dispersión previa al enterramiento, pero esta no fue de tal magnitud que provocara un desgaste significativo. Los fósiles estuvieron bajo condiciones de poco intemperismo o un enterramiento rápido, con influencia de un escaso transporte previo, bajo condiciones de baja energía.

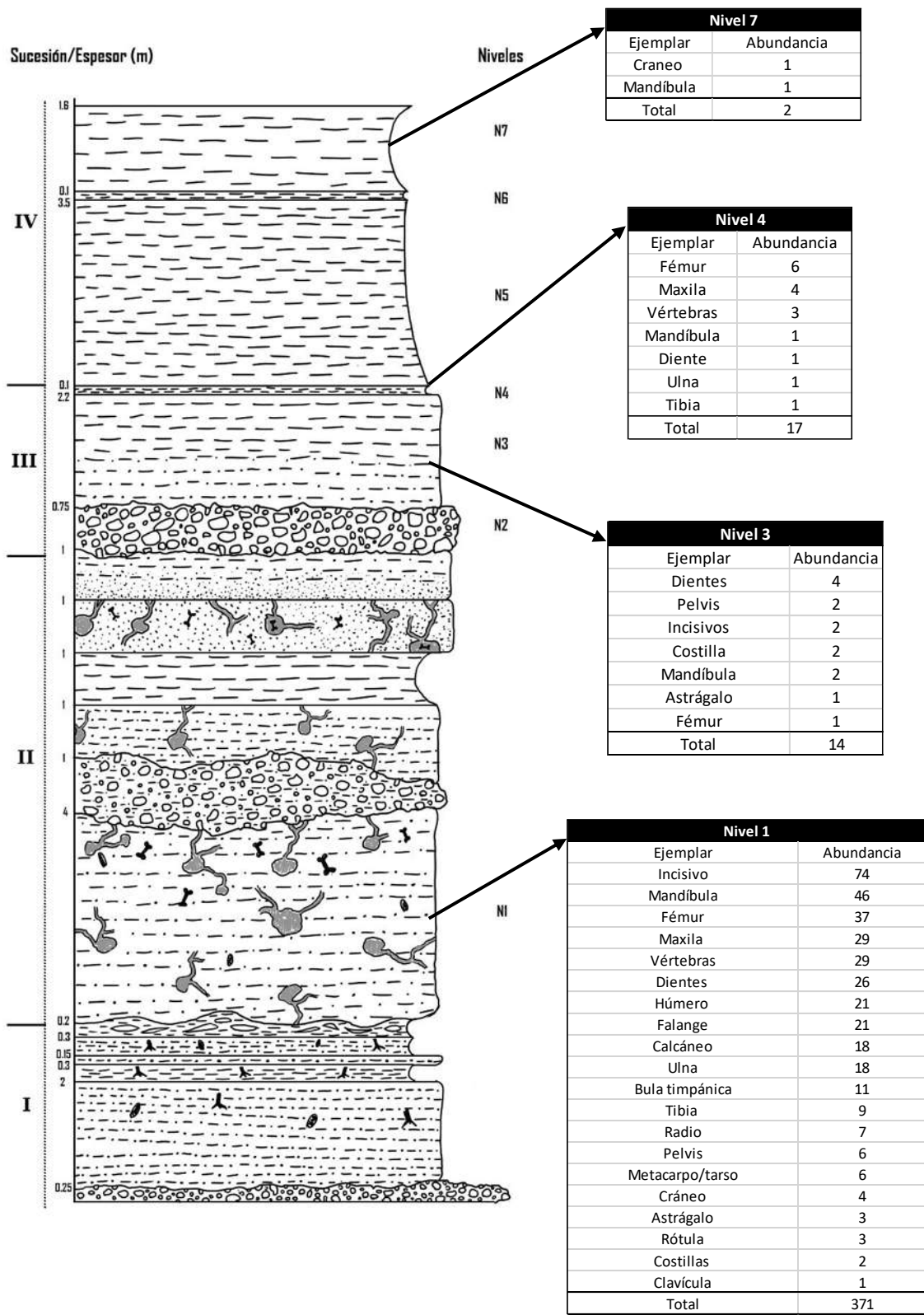


Figura 42. Diagrama de abundancia de fósiles en los estratos de la zona.

8.3. Mineralogía y permineralización

El análisis de los componentes minerales reveló una composición similar entre los fósiles y los sedimentos que los contenían. Se pudo registrar la presencia de minerales del grupo de los aluminosilicatos, zeolitas, plagioclasas y carbonatos, como la calcita (Tabla 2). Estos minerales son comunes como producto de procesos diagenéticos y su presencia en cavidades vasculares de huesos ha sido registrada bajo ambientes sedimentarios lacustres y fluvio-lacustres (Casal et al., 2017). Dentro de los grupos minerales mencionados, las zeolitas son el grupo de mayor abundancia. Las zeolitas han sido registradas en mayor medida en depósitos que incluyen tobas volcánicas y su presencia indica zonas sedimentarias ideales para el intercambio molecular y de iones, gracias a su estructura cristalina que forma cavidades capaces de almacenar diversos tipos de iones y moléculas (Virta, 2014; Tumenbayar et al., 2019). En los alrededores de la zona estudiada se ha registrado evidencia de actividad volcánica y presencia de tobas (Santamaría-Díaz et al., 2008; Jiménez-Hidalgo et al., 2017). Las zeolitas favorecerían la permineralización *in situ* de los fósiles y que los especímenes presenten evidencia de poco transporte y retrabajamiento.

Por otra parte, los cristales de calcita y cuarzo en las cavidades medulares de algunos fósiles son evidencia de un enterramiento poco profundo (Holz y Schultz, 2007). Éstos se formaron después de la permineralización de la parte ósea externa, a partir de los sedimentos de relleno que actuaron como medio para su precipitación (Casal et al., 2017).

De esta manera, basado en la información mineralógica obtenida, tanto los fósiles como los sedimentos que los contenían son propios de la zona, por lo cual la permineralización se llevó a cabo en el mismo sitio donde se enterraron los especímenes.

8.4. Análisis geoestadístico

Los análisis realizados mostraron que los fósiles tienen un patrón de agrupamiento en distancias de 10 a 50 metros. Este agrupamiento se observa en mayor medida para la zona NE del afloramiento. En esta zona abundan galerías expuestas y sedimentos del nivel 1. Lo anterior pudo haber influenciado en los resultados obtenidos. Por tanto, considerando las características tafonómicas descritas y el contexto fluvial de formación al que se asocia el

sitio, se infiere que esta zona constituía una trampa donde se acumulaban los huesos por el transporte y posteriormente se daba lugar a la diagénesis fósil. Con esto se aclara porque, en otras zonas con las mismas características sedimentarias, no se han encontrado fósiles ni evidencias de madrigueras. Estas últimas puede que hayan tenido gran relevancia para dicha acumulación.

8.5. Reconstrucción paleoambiental y modelo de enterramiento

La reconstrucción realizada describe el aspecto del sistema fluvial meándrico que se formó durante el periodo del Oligoceno temprano en la zona de Santiago Yolomécatl (Figura 35). Sin embargo, considerando las diferentes condiciones formadoras que muestran los estratos a lo largo de la columna, la ilustración presentada puede solo reflejar uno de los muchos paisajes que adoptó la zona durante un periodo de tiempo corto o por ciertas temporadas con cambios climáticos abruptos. Por tanto, la ilustración constituye un escenario posible construido a partir de las características tafonómicas que se han descrito para los sedimentos y fósiles que se utilizaron en el presente trabajo.

El modelo de enterramiento se realizó de acuerdo a los resultados del análisis tafonómico y de las evidencias sedimentológicas en la columna estratigráfica de la zona. Representa un modelo de enterramiento general bajo el cual se conservaron la mayoría de los fósiles, sin embargo, no es el único que se pudo haber presentado.

IX. CONCLUSIONES

La zona estuvo influenciada por diversidad de eventos fluviales que propiciaron la acumulación de sedimentos a lo largo de esta actual llanura intermontana. Así mismo, la acumulación de los restos de vertebrados y en especial de mamíferos pequeños, fue favorecida por la dinámica fluvial y fluvio lacustre que se ha registrado en la zona desde al menos 30 millones de años. Los análisis tafonómicos indicaron que los fósiles fueron propios de la zona (autóctonos) y que si bien, sufrieron de transporte, este no fue tan significativo como para promover efectos de mezcla temporal o espacial.

La columna estratigráfica que se realizó, aportó información sedimentológica para entender el contexto de formación del sitio. Principalmente, los sedimentos de la zona se acumularon

por fenómenos fluviales que causaban erosión y arrastraban detritos desde las zonas montañosas circundantes hacia la llanura. Se identificaron pulsos de conglomerados de afinidad volcánica, que se formaron por eventos fluviales de alta energía que ocurrían esporádicamente. Las estructuras sedimentarias que se encontraron (Lechos lenticulares, lentes de arcillas limosas y rizaduras) nos permitieron inferir un posible sistema fluvial meandriforme. No obstante, este paisaje solo se infiere para el estrato superior en la sucesión I de la columna. Cada uno de los estratos que albergaron fósiles fueron formados por eventos distintos y a causa de esto, la abundancia de fósiles difirió (Figura 42). El estrato Nivel 1 fue en el que se encontró mayor número de fósiles y la formación de éste se asoció a una acumulación de sedimentos por un largo periodo de tiempo, posiblemente un sistema lacustre.

El análisis tafonómico permitió identificar que la mayoría de los fósiles presentaron meteorización y abrasión de grado 1 (Sin alteración e intacto respectivamente). Además, se observó que la integridad fue incompleta en casi todos los especímenes. El tipo de fracturas más abundante corresponde a las fracturas transversales. Estas características, permitieron inferir que los fósiles permanecían por poco tiempo en la superficie del suelo, para posteriormente sepultarse no muy lejos de la zona de la muerte del organismo. El transporte fue propiciado por eventos fluviales, que arrastraban a los elementos hacia zonas de acumulación. Los elementos que se encontraron articulados tuvieron escaso o nulo movimiento sucesivo a la muerte del individuo. El color y manchas identificadas en la superficie de los fósiles, se asocian a la exposición a condiciones húmedas del medio en el que se enterraban.

La preservación de los restos fósiles fue promovida por la poca abrasión y meteorización que sufrieron los restos antes de permineralizarse. Las características sedimentarias también fueron de gran relevancia en este aspecto, ya que como se observó la mayoría corresponden a sedimentos finos (Arcillas, limos y arenas finas). Además, los resultados de los análisis mineralógicos indicaron que los sedimentos son abundantes en zeolitas, minerales que pudieron haber permitido una rápida permineralización, debido a que facilitaron el intercambio de iones y moléculas entre estos y los sedimentos ricos en calcita que los contenían.

El análisis geoestadístico como herramienta, añadió información importante sobre la distribución que tuvieron los fósiles en el pasado y poder reconocer posibles patrones de acumulación. Las zonas en las que abundan los fósiles fueron algún tipo de trampa natural donde se acumulaban los restos que eran transportados por corrientes fluviales. Se observó que no todos los sedimentos similares albergaban fósiles.

La reconstrucción artística permitió representar el paisaje de la zona de hace 29 millones de años. Con estas imágenes, se lograron entender con más aproximación las implicaciones que representan realizar las descripciones de los sedimentos en conjunto con las características tafonómicas que se encontraron en los fósiles en un contexto visual. El modelo de enterramiento ilustrado fue importante para comprender como los organismos después de su muerte interactuaron con los factores ambientales de la zona y en última instancia como facilitaron el enterramiento y su diagénesis dentro de los sedimentos.

BIBLIOGRAFÍA

- Allison, Peter A. y David J. Bottjer. 2011. *Taphonomy*. Vol. 32. editado por P. A. Allison y D. J. Bottjer. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Andrews, Peter. 2006. "Taphonomic effects of faunal impoverishment and faunal mixing". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 241(3–4):572–89.
- Arroyo-Cabrales, Joaquín. 1994. "Taphonomy and paleoecology of San Josecito Cave, Nuevo Leon, Mexico". (1):1–217.
- Aslan, Andres y Anna K. Behrensmeyer. 1996. "Taphonomy and Time Resolution of Bone Assemblages in a Contemporary Fluvial System: The East Fork River, Wyoming". *Palaios* 11(5):411.
- Avila-Serrano, G. 2000. "Taphonomic processes in recent thanatocenoses at playa el pelicano, baja california". *Ciencias Marinas* 26(4):677–94.
- Badgley, Catherine. 1986. "Counting Individuals in Mammalian Fossil Assemblages from Fluvial Environments". *PALAIOS* 1(3):328.
- Berreteaga, A., A. Badiola, H. Astibia, Xabier Pereda Suberbiola, Javier Elorza, N. Etxebarria, y A. Alvarez. 2004. "Estudio geoquímico de fósiles de vertebrados de varias localidades del Cretácico Superior y Paleógeno de los Pirineos occidentales".
- Brett, Carlton E. y Gordon C. Baird. 1986. "Comparative Taphonomy: A Key to Paleoenvironmental Interpretation Based on Fossil". *PALAIOS* 1(3):207–27.
- Carrizo, Luz V y Mónica Díaz. 2011. "Descripción del postcráneo de *Rhipidomys austrinus* y *Graomys griseoflavus* (Rodentia, Cricetidae, Sigmodontinae)". *Iheringia. Série Zoologia* 101(3):207–19.
- Casal, Gabriel A., Adriana M. Nillni, Mauro N. Valle, Ezequiel González Svoboda, y Celina Tiedemann. 2017. "Permineralización en restos de dinosaurios preservados en depósitos de desbordamiento de la Formación Bajo Barreal (Cretácico Superior), Patagonia central, Argentina." *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 34(1):12.
- Cevallos-Ferriz, S., E. A. González-Torres, y L. Calvillo-Canadell. 2012. "Perspectiva paleobotánica y geológica de la biodiversidad de México". *Acta Botanica Mexicana* (100):317–50.
- Cuenca-Bescós, Gloria, Lawrence G. Straus, Manuel R. González Morales, y Juan C. García Pimienta. 2009. "The reconstruction of past environments through small mammals: from the Mousterian to the Bronze Age in El Mirón Cave (Cantabria, Spain)". *Journal of Archaeological Science* 36(4):947–55.
- Demirel, Arzu, Peter Andrews, Işin Yalçinkaya, y Ayhan Ersoy. 2011. "The taphonomy and palaeoenvironmental implications of the small mammals from Karain Cave, Turkey".

Journal of Archaeological Science 38(11):3048–59.

- Dodson, Peter. 1973. “The significance of small bones in paleoecological interpretation”. *Rocky Mountain Geology* 12(1):15–19.
- Domínguez-Rodrigo, Manuel, Lucía Cobo-Sánchez, José Yravedra, David Uribelarrea, Carmen Arriaza, Elia Organista, y Enrique Baquedano. 2018. “Fluvial spatial taphonomy: a new method for the study of post-depositional processes”. *Archaeological and Anthropological Sciences* 10(7):1769–89.
- Einsele, Gerhard. 2000. *Sedimentary Basins*. Vol. 143. Second. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- ESRI. 2018. “Cómo funciona el Análisis cluster espacial de distancia múltiple (Función K de Ripley)”. Recuperado el 21 de agosto de 2020 (<https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/tools/spatial-statistics-toolbox/h-how-multi-distance-spatial-cluster-analysis-ripl.htm>).
- Fernandez-Jalvo, Yolanda. 1996. “Small mammal taphonomy and the Middle Pleistocene environments of Dolina, Northern Spain”. *Quaternary International* 33:21–34.
- Fernandez-Jalvo, Yolanda y Peter Andrews. 2016. *Atlas of Taphonomic Identifications*. Springer.
- Fernández-Jalvo, Yolanda y Peter Andrews. 2016. *Atlas of Taphonomic Identifications*. Dordrecht: Springer Netherlands.
- Fernandez, F. J., F. Ballejo, Germán J. Moreira, E. P. Tonni, y Luciano J. M. De Santis. 2011. “Roedores cricétidos de la Provincia de Mendoza: guía cráneo-dentaria orientada para su aplicación en estudios zooarqueológicos” editado por J. Sarmiento. (January):116.
- Fernández, Fernando J., Luis M. del Papa, Germán J. Moreira, Luciano Prates, y Luciano J. M. De Santis. 2011. “Small mammal remains recovered from two archaeological sites in the middle and lower Negro River valley (Late Holocene, Argentina): Taphonomic issues and paleoenvironmental implications”. *Quaternary International* 245(1):136–47.
- Ferrusquía-Villafranca, Ismael, José E. Ruiz-González, José Ramón Torres-Hernández, Thomas H. Anderson, Jaime Urrutia-Fucugauchi, Enrique Martínez-Hernández, y Felipe García-Villegas. 2016. “Cenozoic geology of the Yolomécatl-Tlaxiaco area, Northwestern Oaxaca, Southeastern Mexico: Stratigraphy, structure and regional significance”. *Journal of South American Earth Sciences* 72:191–226.
- García-Morato, Sara, María Dolores Marin-Monfort, y Yolanda Fernández-Jalvo. 2019. “Rolling bones: A preliminary study of micromammal abrasion on different initial taphonomic stages”. *Palaeontologia Electronica* (August).
- Giusti, Domenico, George E. Konidaris, Vangelis Turloukis, Mattia Marini, Matteo Maron, Andrea Zerboni, Nicholas Thompson, George D. Koufos, Dimitris S. Kostopoulos, y

- Katerina Harvati. 2019. "Recursive anisotropy: a spatial taphonomic study of the Early Pleistocene vertebrate assemblage of Tsiotra Vryssi, Mygdonia Basin, Greece". *Boreas* 48(3):713–30.
- Guerrero-Arenas, Rosalía, Eduardo Jiménez-Hidalgo, y Jorge F. Genise. 2017. "The Oldest Beetle and Bee Ichnofossils from Mexico and their Paleoenvironmental Implications". *Ichnos* 0940(December):1–5.
- Hedges, R. E. M. 2002. "Bone diagenesis: an overview of processes". *Archaeometry* 44(3):319–28.
- Hillson, Simon. 2005. *Teeth*. 2th Editio. editado por G. Barker. Cambridge: Cambridge University Press.
- Holz, Michael y Cesar Leandro Schultz. 2007. "Taphonomy of the south Brazilian Triassic herpetofauna: fossilization mode and implications for morphological studies". *Lethaia* 31(4):335–45.
- INEGI. 2005. "Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos Santiago Yolomécatl, Oaxaca". Recuperado el 4 de junio de 2019 (http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/20/20499.pdf).
- Jimenez-Hidalgo, E. y Rosalia Guerrero-Arenas. 2015. "La Fauna Local Iniyoo, el primer conjunto faunístico del Paleógeno continental en el sur de Mexico y Norteamérica". *Universidad Tecnológica de la Mixteca*.
- Jimenez-Hidalgo, E., B. Lander, y Rosalía Guerrero-Arenas. 2018. "A revised (Early Arikareean) age for the late paleogene Iniyoo local fauna of Oaxaca state, southern México".
- Jiménez-Hidalgo, Eduardo, Rosalía Guerrero-Arenas, y Krister T. Smith. 2017. "Gregorymys veloxikua, The Oldest Pocket Gopher (Rodentia: Geomyidae), and The Early Diversification of Geomyoidea". *Journal of Mammalian Evolution*.
- Jiménez-Hidalgo, Eduardo, Krister T. Smith, Rosalia Guerrero-Arenas, y Jesus Alvarado-Ortega. 2015. "The first Late Eocene continental faunal assemblage from tropical North America". *Journal of South American Earth Sciences* 57(1):39–48.
- Khajuria, C. K. y G. V. R. Prasad. 1998. "Taphonomy of a late Cretaceous mammal-bearing microvertebrate assemblage from the Deccan inter-trappean beds of Naskal, peninsular India". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 137(1–2):153–72.
- Korth, William W. 1979. "Taphonomy of microvertebrate fossil assemblages". *Annals of the Carnegie Museum* 48:235–85.
- Kowalewski, Michal. 2007. "Taphonomy of a Living Fossil: The Lingulide Brachiopod *Glottidia palmeri* Dall from Baja California, Mexico". *Palaios* 11(3):244.

- Ley-Lara, Virginia Marisol, Daniel Iván Vela-Padilla, y Christopher M. Götz. 2016. “Dejando huella (Parte I): implicaciones tafonómicas y etnográficas sobre la relación entre el perro y ser humano en el norte del área maya”. *AMMVEPE* 26(6):157–67.
- Liebig, P. M., T. S. A. Taylor, y K. W. Flessa. 2003. “Bones on the Beach: Marine Mammal Taphonomy of the Colorado Delta, Mexico”. *Palaios* 18(2):168–75.
- López-Caballero, Iriliana, Federico Olóriz, y Ana Bertha Villaseñor. 2018. “Concentraciones fosilíferas del Kimmeridgiano Superior en Mazapil, Zacatecas, México: Tafonomía e interpretación paleoambiental”. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 70(1):241–80.
- Lyman, R. Lee. 1994. “Vertebrate Taphonomy”. *Vertebrate Taphonomy* 1–524.
- Martin, Ronald E. 1999. *Taphonomy: a process approach*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Martin, Ronald E., John F. Wehmiller, M. Scott Harris, y W. David Liddell. 1996. “Comparative taphonomy of bivalves and foraminifera from Holocene tidal flat sediments, Bahía la Choya, Sonora, Mexico (Northern Gulf of California): taphonomic grades and temporal resolution”. *Paleobiology* 22(1):80–90.
- Montellano-Ballesteros, M. y E. Jimenez-Hidalgo. 2006. “Mexican Fossil Mammals, Who, Where and When?” Pp. 249–69 en *Studies on Mexican Paleontology*. Vol. 24, *Topics in Geobiology*, editado por F. J. Vega, T. G. Nyborg, M. D. C. Perrilliat, Marisol Montellano-Ballesteros, S. R. S. Cevallos-Ferriz, y S. A. Quiroz-Barroso. Berlin/Heidelberg: Springer-Verlag.
- Montes-Cruz, Pedro. 2009. “Inventario de erosión acelerada de suelos en la Mixteca Alta de Oaxaca.” Universidad Autónoma de México.
- Montes-Cruz, Pedro y Jorge Lopez-Blanco. 2005. “CARTOGRAFÍA GEOMORFOLÓGICA ANALÍTICA DE LA PORCIÓN NORTE DE LA MIXTECA ALTA, OAXACA, MÉXICO.” en *Anais do X encontro de Geógrafos da America Latina*. Sao Paulo.
- Pérez-crespo, Víctor Adrián. 2011. “Estado actual del conocimiento de las plantas fósiles de Oaxaca”. 9(1):47–59.
- Pijoan Aguadé, Carmen Maria, Josefina Bautista Martinez, y David Volcanes. 2013. “Análisis tafonómico de cuatro máscaras-cráneo procedentes del recinto sagrado de México-Tenochtitlan”. *Estudios de Antropología Biológica* 10(2).
- Quiroz Barroso, S. A., A. R. Escalante Ruíz, Edith R. Mora Almazán, R. E. Zárate Villanueva, y M. I. Hernández Ocaña. 2010. “Análisis tafonómico de la Formación San Juan Raya, Cretácico Inferior en el estado de Puebla, México”.
- Santamaría-Díaz, Alfredo, Susana Alicia Añaniz-Álvarez, y Ángel Francisco Nieto-

- Samaniego. 2008. "Deformaciones cenozoicas en la cobertura de la falla Caltepec en la región de Tamazulapam, sur de México". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 25(3):494–516.
- Serrano-Brañas, Claudia Inés y Elena Centeno-García. 2014. "Paleoenvironmental interpretation using fossil record: San Juan Raya Formation, Zapotitlán basin, Puebla, Mexico". *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 31(1):1–13.
- Serrano-Brañas, Claudia Inés y Belinda Espinosa-Chávez. 2017. "Taphonomic history of a 'duck-bill' dinosaur (Dinosauria: Ornithopoda) from the Cerro del Pueblo Formation (Upper Cretaceous, Campanian) Coahuila, Mexico: Preservational and paleoecological implications". *Cretaceous Research* 74:165–74.
- Serrano-Brañas, Claudia Inés y Paola Carolina Reyes Luna. 2014. "Paleobotánica forense: Una aproximación a la tafonomía de plantas". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana* 66(1):25–39.
- Shotwell, J. Arnold. 1955. "An Approach to the Paleoecology of Mammals". *Ecology* 36(2):327–37.
- Tomassini, Rodrigo L., Claudia I. Montalvo, Teresa Manera, y Cristian Oliva. 2010. "Estudio tafonómico de los mamíferos pleistocenos del yacimiento de Playa del Barco (Pehuen Co), provincia de Buenos Aires, Argentina". *Ameghiniana* 47(2):137–52.
- Tomassini, Rodrigo Leandro, Claudia Inés Montalvo, Elisa Beilinson, Cecilia María Deschamps, Mariana Carolina Garrone, German Mariano Gasparini, Marcelo Arístides Zárate, Jorge Rabassa, Agustín Ruella, y Eduardo Pedro Tonni. 2017. "Microvertebrates preserved in mammal burrows from the Holocene of the Argentine Pampas: a taphonomic and paleoecological approach". *Historical Biology* 29(1):63–75.
- Tumenbayar, Baatar, Robin Grayson, Vera Petrova, y Rentsendorj Enkhsaikhan. 2019. "Natural zeolite formation in Mongolia". *Mongolian Geoscientist* (49):35–40.
- Valenzuela Jimenez, Gerardo, Carmen Maria Pijoan Aguadé, y J. Mansilla. 2005. "Alteraciones culturales en los restos esqueléticos localizados en el curso de las primeras excavaciones en Xochicalco, Morelos". *Estudios de Antropología Biológica* 811–22.
- Verhagen, Philip. 2018. *Digital Geoarchaeology*. editado por C. Siart, M. Forbriger, y O. Bubenzer. Cham: Springer International Publishing.
- Vigne, Jean-denis y Helène Valladas. 1996. "Small Mammal Fossil Assemblages as Indicators of Environmental Change in Northern Corsica during the Last 2500 Years". *Journal of Archaeological Science* 23:199–215.
- Virta, Robert. 2014. "Mineral Resource of the Month: Zeolites". Recuperado el 19 de abril de 2020 (<https://www.earthmagazine.org/article/mineral-resource-month-zeolites>).

- Voorhies, Michael R. 1969. *Taphonomy and Population Dynamics of an Early Pliocene Vertebrate Fauna, Knox County, Nebraska*. Laramie, WY: University of Wyoming.
- Wolff, Ronald G. 1973. "Hydrodynamic sorting and ecology of a Pleistocene mammalian assemblage from California (U.S.A.)". *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 13(2):91–101.
- Wood, James M., Richard G. Thomas, y John Visser. 1968. "Fluvial processes and vertebrate taphonomy: The Upper Cretaceous Judith River Formation, South-Central Dinosaur provincial park, Alberta Canada". *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 66:127–43.