

## II. ANTECEDENTES

### II.1 ESTUDIOS PREVIOS

La reconstrucción paleoecológica del desierto de Chihuahua durante el Cuaternario Tardío ha sido con base en estudios de indicadores biológicos como polen, diatomeas y ostrácodos presentes en los depósitos lacustres de Babícora y Encinillas (Metcalf *et al.*, 1997, 2002; Palacios-Fest *et al.*, 2002). Los ostrácodos se encuentran presentes en las secuencias sedimentarias de los lagos o paleolagos. Estos crustáceos bivalvos son extremadamente sensibles a las condiciones climáticas y por ello proveen información paleoclimática importante (Holmes, 1992). En las últimas décadas los estudios de reconstrucción paleoclimática continental se basan en sedimentos lacustres. Forester (1983) demostró que a pesar de la salinidad y el pH de *Limnocythere staplini* Staplin y *L. sappaensis* Staplin, que pueden ser similares, la composición de los solutos en el agua es el factor decisivo para determinar su presencia, ya que mientras *L. sappaensis* habita en aguas ricas en  $\text{HCO}_3^-$ , *L. staplini* prefiere aguas dominadas por  $\text{Ca}^{2+}$  y enriquecida en  $\text{SO}_4^{2-}$ . Debido a esto, la presencia de una especie excluye a la otra, excepto en el caso en el cual exista un equilibrio en el agua de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{CO}_3$ . Forester (1985) al describir una nueva especie para México (*Limnocythere bradburyi*), determina los requerimientos y rangos de tolerancia en los que esta especie se desarrolla; Curry (1999) describe un índice de tolerancia debida a cambios en factores físicos y químicos para 10 especies de ostrácodos recientes; Palacios-Fest y Dettman (2001) determinaron la relación que existe entre la temperatura y la relación Mg/Ca que hay en las valvas de especímenes recientes de *Cypridopsis vidua* de un lago de Sonora.

Para la zona norte de México y sur de los Estados Unidos de América, se han realizado diversas reconstrucciones paleoclimáticas holocénicas basadas en registros de ocupación humana y niveles lacustres (Antevs, 1948 y 1955), estratigrafía y vegetación (Van Devender y Spaulding, 1979;

Waters y Hanes, 2001; Nordt, 2003; Menking y Anderson, 2003), sedimentología (Allen y Anderson, 1993), modelos astronómicos (Davis, 1984; Clement *et al.*, 2000), contenidos vegetales en nidos de *Neotoma* sp. (Van Devender, 1990a y b), polen y diatomeas (Metcalf *et al.*, 1997 y 2002) y geoquímica (Roy *et al.*, 2010, 2011).

Ortega-Ramírez (1995) reconstruyó las condiciones paleoambientales de la Laguna de Babícora de los últimos 10,000 años A.P. con base en análisis sedimentológicos, estadísticos y estratigráficos de 8 perfiles, concluyendo que durante el Holoceno Temprano el nivel del agua de la laguna era bajo; para el Holoceno Medio los ambientes palustres dominaron en la laguna, con precipitaciones temporales abundantes; y en el Holoceno Tardío hubo un fuerte periodo de erosión, seguido del establecimiento de las condiciones actuales de aridez.

Complementando los resultados anteriores, Ortega-Ramírez *et al.* (2000) reconstruyen las condiciones de la laguna para los últimos 18,000 años A.P. con base en análisis sedimentarios y estratigráficos de tres perfiles lacustres e infirieren condiciones con mayor humedad que la actual durante el Wisconsiniano tardío (18,000-10,000 años A.P.), y por lo tanto el cuerpo de agua era extenso. Durante 11,000 a 8,900 años A.P. (Holoceno Temprano), sugieren que las condiciones de humedad disminuyeron ligeramente por lo que el lago se mantiene somero y permanente, e interpretan un lago en condiciones de pantano con un aumento en la aridez y con el nivel del agua disminuyendo durante el Holoceno Medio (8,900-4,000 años A.P.) y finalmente caracterizan el Holoceno Tardío (4,000 años A.P.-presente) como condiciones climáticas que en la actualidad imperan en la zona; es decir, ambientes semiáridos.

Entre los trabajos que emplean *proxy* biológicos, Palacios-Fest *et al.* (2002) reconstruyen la historia paleoambiental estudiando tres perfiles sedimentarios de la Laguna de Babícora (anteriormente estudiada por Ortega-Ramírez *et al.*, 2000) para los últimos 25,000 años A.P. basándose en la paleoecología de 7 especies de ostrácodos y la geoquímica (Mg/Ca) en las conchas de *Limnocythere ceriotuberosa* y *L. platyforma*. De acuerdo con estos autores, el lago tuvo variaciones en salinidad de oligo a mesohalino y con temperaturas de 5.3 a 21.3° C. Los autores infieren que del Pleistoceno Tardío al Holoceno Temprano (hasta ca. 11,000 años A.P.) los aportes

fluviales decrecieron; estando la zona oeste de la laguna dominada por ambientes palustres, mientras que la zona sur por depósitos lacustres. De acuerdo con los índices de temperatura obtenidos de la relación Mg/Ca de las valvas, las temperaturas de un perfil varían de 6.6-7.6 ° C y en otro perfil de 8.2 a 21.3° C. Durante el Holoceno Medio (8,900-4,000 años A. P.), la temperatura del agua fue muy variable y la humedad efectiva decreció, con temperaturas de 21.3° C calculadas a partir del Mg/Ca de las valvas. Por último para el Holoceno Tardío (4,000 años A. P.-presente), hay un declive brusco de la temperatura con temperaturas cercanas a los 8.3° C, aunque la humedad efectiva aumentó, probablemente debido a los inviernos fríos, lo cual también explica el descenso en la temperatura.

## II.2 OSTRÁCODOS

### II.2.1 Biología

Los ostrácodos son crustáceos pequeños, cuya longitud varía de 0.5 a 3 mm cuando son adultos. Su cuerpo blando y apéndices (generalmente de 5 a 8, están relacionados con diversas funciones como alimentación, movimiento y reproducción entre otras). Están cubiertos por 2 valvas unidas por la parte dorsal formando la concha o caparazón. Las valvas están compuestas por carbonato de calcio en forma de calcita baja en magnesio (Turpen y Angell, 1971).

La reproducción es un aspecto importante en su diversificación y adaptación, pues de acuerdo con la especie y las condiciones ambientales, puede ser sexual, partenogenética o mixta (Holmes, 2001). La mayoría de los ostrácodos de agua dulce utiliza la reproducción partenogenética. El dimorfismo sexual es marcado en la forma de la valva, aunque en algunos casos, el sexo sólo puede ser determinado mediante el estudio de los órganos reproductivos. Los ostrácodos ponen huevos, raras veces son retenidos y empollados dentro de las hembras en una cámara de incubación. Comúnmente como en otros artrópodos, el crecimiento de los ostrácodos se efectúa por ecdisis (mudas) de 8 a 9 veces en su ciclo de vida, siendo A-9 el estadio más joven y el adulto A (Holmes, 2001). Es hasta el último estadio donde las características morfológicas de cada especie quedan bien definidas, por lo que la identificación de las mismas se hace con base en individuos

adultos. El ciclo de vida de los ostrácodos de agua dulce se completa entre tres a cinco semanas, o en más de un año (Holmes, 1992).

### II.2.2 Taxonomía

Moore (1961), Hartmann y Puri (1974), Maddocks (1982), entre otros, consideran OSTRACODA como subclase de la clase CRUSTACEA. La subclase está dividida en seis órdenes, en el que sólo uno, el PODOCOPIDA, incluye todas las especies de agua dulce. Todos los podocópidos vivientes caen en el suborden PODOCOPINA, que está compuesto por cinco superfamilias. Todos los ostrácodos que son de agua dulce y salada están clasificados en tres de estas superfamilias, CYPRIDACEA, CYTHERACEA y DARWINULACEA. Aunque la nomenclatura zoológica moderna recomienda la terminación –oidea para los nombres de las superfamilias, la terminación –acea es común en toda la literatura paleontológica y persiste dentro de la taxonomía de los ostrácodos (Holmes, 1992).

La mayoría de los ostrácodos de agua dulce vivientes pertenecen a la superfamilia CYPRIDACEA. La identificación a tal nivel frecuentemente se basa en las características morfológicas del caparazón como tamaño, forma, ornamentación, cicatrices musculares y charnela. Para los ostrácodos fósiles, ésta es la única opción ya que el cuerpo y apéndices raramente son preservados. Para los ostrácodos recientes, bastante información se puede obtener por medio de la observación de la anatomía de los apéndices, aunque los diagnósticos de las especies extintas se basan sólo en la morfología del caparazón.

### II.2.3 Ecología

Los ostrácodos son animales que han logrado una gran diversificación y adaptación a diversas condiciones ambientales, pues se les encuentra en una amplia variedad de cuerpos de agua, como el océano (a diversas profundidades), lagos, estuarios, lagunas, pantanos e incluso en el medio terrestre. A pesar de ser tan diversos en cuanto a hábitats, existen ciertos factores relacionados con su medio a los que son muy sensibles y que determinan su presencia, distribución,

diversidad y abundancia. Estos factores están relacionados con la temperatura, salinidad, pH, composición iónica, sólidos totales disueltos y contenido de oxígeno, tipo de sustrato, profundidad, permanencia del cuerpo de agua, intensidad de las corrientes, presencia y tipo de vegetación, disponibilidad de alimento y depredación (Holmes, 1992).

No obstante de que están limitados por estos factores, existen especies que toleran una amplia variación química del agua, denominadas euríticas, al contrario de aquellas que están limitadas a ciertas condiciones físico-químicas del agua y que se definen como estenotópicas (Palacios-Fest, 1994).

Al ser organismos muy sensibles a cambios físicos y químicos de los cuerpos de agua donde habitan, se les ha considerado una herramienta eficaz para la reconstrucción de ambientes pasados con base en distintas características, como la abundancia y diversidad de las especies y la estructura de las poblaciones (De Deckker, 1988; Carreño, 1990; Forester, 1991; Palacios-Fest *et al.*, 1993; Ruiz *et al.*, 2003). Danielopol *et al.* (2002) señalan que el cálculo de la densidad relativa a lo largo de un periodo ofrece un indicador de cambios ambientales, bajo el supuesto de que al irse modificando las condiciones del ambiente, las especies que encuentren estas nuevas condiciones favorables reemplazarán a aquellas que estén menos adaptadas. Boomer *et al.* (2003) ilustran de manera muy clara la utilidad de las asociaciones para la reconstrucción de los paleoambientes con base en las abundancias relativa y absoluta, las relaciones adultos/juveniles, hembras/machos y valvas/caparazones para determinar aspectos físico-químicos del agua, las asociaciones de vida y los procesos tafonómicos. De Deckker y Forester (1988) señalan que en aguas dominadas por  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$  (pero no saturadas en  $\text{CO}_3^{2-}$ ), existe una diversidad de especies menor a cinco y con poca abundancia; cuando el agua se satura con respecto a la calcita, el número de especies aumenta de 20 a 30; y cuando el  $\text{Ca}^{2+}$  o el  $\text{HCO}_3^-$  han sido eliminados, la salinidad aumenta y entonces se presenta una disminución de la diversidad (de cinco a diez especies). Un ejemplo de variación morfológica se puede ver con *Limnocythere ceriotuberosa* Delorme, que habita en aguas alcalinas eurihalinas, pero cuando se encuentra en condiciones de agua dulce desarrolla un ala en la parte ventral posterior, identificándosele como *Limnocythere platyforma* (Palacios-Fest *et al.*, 1994).

Cuando los ostrácodos calcifican su caparazón, incorporan otros elementos del ambiente además del carbonato de calcio, como el magnesio y el estroncio, los cuales quedan como elementos traza en las valvas de los ostrácodos adultos (Palacios-Fest, 1996). Chivas *et al.* (1983, 1986a) realizaron experimentos con cultivos de algunas especies de los géneros *Mytilocypris* y *Australocypris*, encontrando que a mayor temperatura y salinidad del agua, la relación Mg/Ca de las valvas es mayor, y que con temperaturas y salinidad bajas, el contenido de Mg en las valvas también disminuye.

Como complemento, el análisis del  $^{18}\text{O}$  de las valvas también está relacionado con temperatura y salinidad, de manera que a menor temperatura, menor cantidad de  $^{18}\text{O}$  en valvas y a mayor salinidad, mayor cantidad de  $^{18}\text{O}$  en valvas y viceversa. Con estos resultados los autores proponen que con base en el coeficiente de distribución ( $K_D$ ) del Mg y la cantidad de  $^{18}\text{O}$  de las valvas se pueden hacer inferencias acerca de las salinidades y temperaturas pasadas. El contenido de estroncio en las valvas también puede ser utilizado como un indicador de ciertas condiciones pasadas, como la salinidad (Chivas *et al.*, 1985). Estos autores proponen que el Sr que se encuentra en las valvas de los ostrácodos está en proporción con el contenido de Sr del agua, y que si se conoce bien la relación entre la salinidad y el contenido del mismo en el agua de un lago hidrológicamente sencillo, entonces a partir de valvas de ostrácodos fósiles se puede inferir la salinidad. Trabajando con otras especies, Chivas *et al.* (1986b) encuentran la misma relación entre el  $K_D$  del Mg y la temperatura y el  $K_D$  del Sr con la salinidad del agua.

Engstrom y Nelson (1991) proponen con base en cultivos de *Candona rawsoni* Tressler con variaciones de temperatura, salinidad y Mg en el agua, que la captura se da en un equilibrio termodinámico y que la relación Mg/Ca de las valvas puede proporcionar la temperatura bajo la cual se efectúa la calcificación mediante un coeficiente de partición que se incrementa con la temperatura. Sin embargo, Xia *et al.* (1997) obtienen resultados distintos en cultivos de la misma especie, encontrando que el coeficiente de partición del Mg disminuye mientras la relación Mg/Ca aumenta en el agua. Palacios-Fest (1996) desarrolló un método de regresión múltiple para *Limnocythere staplini* Gutentag y Benson, con el cual, de acuerdo con las relaciones Mg/Ca y Sr/Ca de las valvas, es posible calcular la paleotemperatura y paleosalinidad respectivamente,

proponiendo que para obtener estos cálculos no es necesario el coeficiente de partición, pues la asimilación de estos elementos del agua hacia las valvas está determinada por factores biocinéticos del organismo y no necesariamente ocurre en un equilibrio termodinámico con el agua. Palacios-Fest y Dettman (2001) realizan experimentos de campo con *Cypridopsis vidua* y encuentran la relación que existe entre la temperatura del agua y la relación Mg/Ca en las valvas, proponiéndolo como un *proxie* indicador de temperatura, y reforzando la hipótesis de que la incorporación del Mg está en función de la biología del ostrácodo más que con la composición química del agua. Este método ha sido aplicado en una laguna del estado de Chihuahua en las especies *Limnocythere cerioluberosa* y *L. platyforma* (Palacios-Fest *et al.*, 2002) obteniendo temperaturas dentro de un intervalo aceptable. En un paleolago del estado de Hidalgo, Reyes-Torres y Vázquez-Rodríguez (2003) aplican también el método, empleando *L. bradburyi* Forester y *L. itasca* Cole, aunque los resultados obtenidos no son los esperados debido a que las valvas empleadas se encontraban recristalizadas.

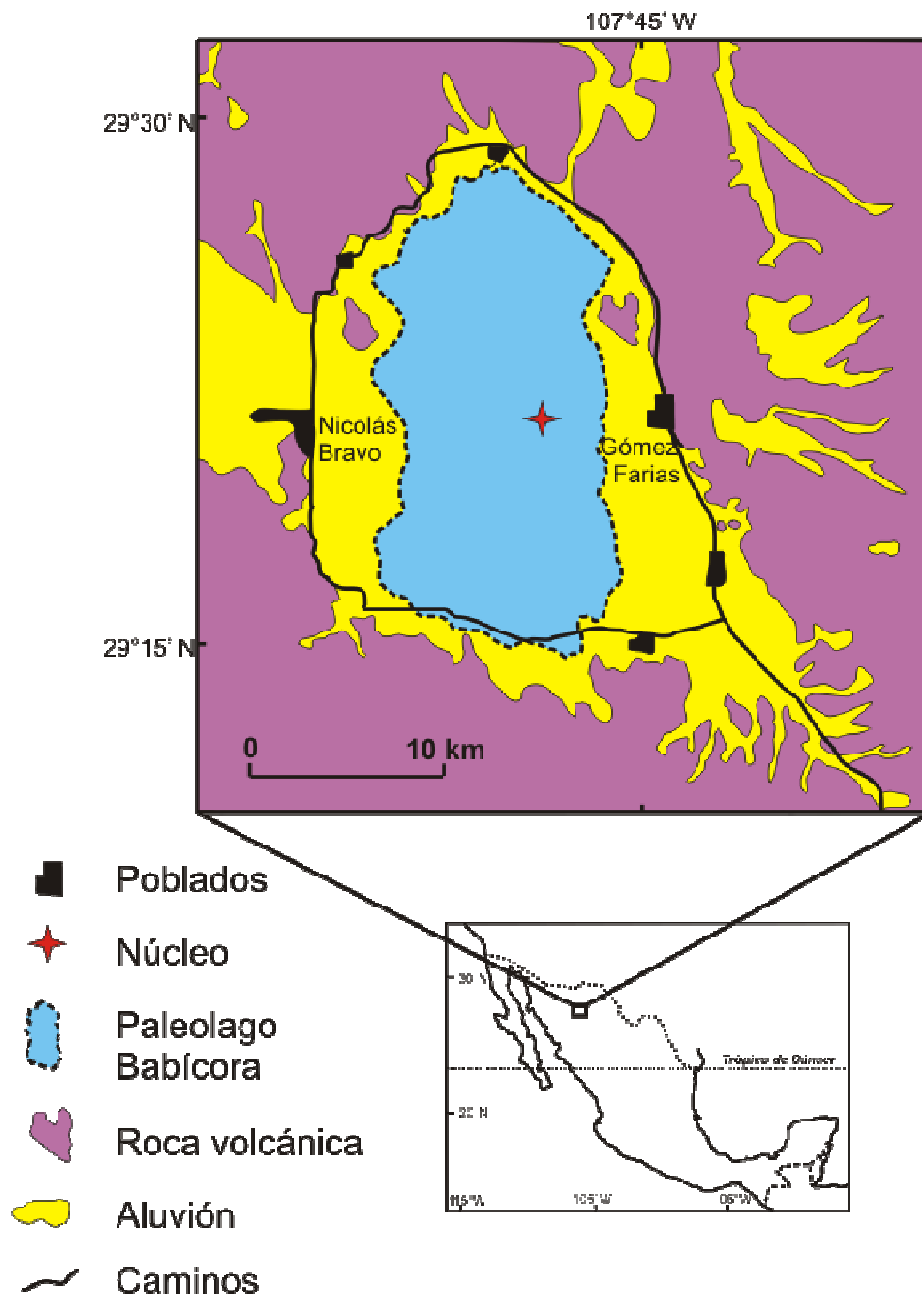
#### II.4 MARCO GEOLÓGICO

El paleo-lago Babícora (Figura1) está ubicado en una cuenca sedimentaria localizada en el estado de Chihuahua al norte de México (29°15' – 29°30' N, 107°40' – 180°00' O). Ésta cuenca se formó por procesos volcánicos y tectónicos durante el Terciario y Cuaternario y se encuentra situada al pie de las colinas de la Sierra Madre Occidental.

Hawley (1969) identifica el sector Babícora-Bustillos como la parte más alta de las cuencas y valles de la zona, donde los pisos de las cuencas varían entre 1,800 y 2,250 msnm, mientras que los rangos volcánicos alcanzan de 2,500 hasta 3,195 msnm. La cuenca está situada a una altitud aproximada de 2,100 msnm y se extiende sobre un área de 1,896 km<sup>2</sup>.

La base de la cuenca está conformada por riolita intercalada con andesita e ignimbrita con edades del Mioceno al Pleistoceno, cubierta por toba riolítica y flujos de lava basáltica con edades del Plioceno-Pleistoceno. La mayoría de las rocas cuaternarias son de origen lacustre o fluvial (Ortega-Ramírez *et al.*, 2000). La zona de estudio se encuentra entre dos de las más extensas

zonas áridas de México y que abarcan hasta el sur de los Estados Unidos de América, el desierto chihuahuense en el este y el desierto sonorense en el occidente.



**Figura 1.** Ubicación del paleolago Babicora, desierto de Chihuahua (modificado de Metcalfe *et al.*, 2002). El núcleo sedimentario se recolectó en la parte centro-oriental de la cuenca.



El clima de la región es el típico de la mayor parte de México, veranos con temporadas de lluvias en los meses de julio a octubre e inviernos secos. El promedio anual de precipitación, que cae mayormente en julio y agosto, es de 450 mm y su temperatura media anual es de 11.5° C (Ortega-Ramírez *et al.*, 1998).

Bajo condiciones normales, el agua superficial (usualmente < 1 m de profundidad) se llega a extender temporalmente. El área inundada ha sido calculada de 158 km<sup>2</sup>. El agua permanentemente estancada está situada en dos áreas pequeñas en la parte norte de la cuenca, sin embargo, las condiciones húmedas pueden causar extensas inundaciones (Urrutia-Fucugauchi *et al.*, 1997).