

GEOQUÍMICA DE LA CONCHA DE OSTRÁCODOS (*LIMNOCYTHERE STAPLINI*) UN MÉTODO DE REGRESIÓN MÚLTIPLE COMO INDICADOR PALEOCLIMÁTICO

Manuel R. Palacios-Fest

Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson, Az 85721

RESUMEN

Estudios recientes indican que la incorporación de Mg^{2+} y Sr^{2+} en las valvas de ostrácodos adultos sucede en equilibrio termodinámico con el agua huésped y las conchas de ostrácodos de aguas continentales pueden ser utilizadas como indicadores geoquímicos paleoambientales. Si las concentraciones de estos iones en el agua están a su vez asociadas a los cambios en evaporación y precipitación entonces podría establecerse una conexión entre la química de las conchas y el clima. En este estudio se presentan modelos de regresión múltiple independientes para Mg^{2+} y Sr^{2+} que resultan de modelos experimentales de simulación de los efectos ambientales de temperatura y salinidad sin involucrar procesos termodinámicos. La alternativa propuesta en este estudio es que, es posible calcular las paleotemperaturas y paleosalinidades de antiguos cuerpos de agua en un solo paso, a través de un modelo de regresión múltiple con un término interactivo que puede establecer constantes aplicadas directamente a las relaciones ${}^m(Mg/Ca)_v$ y ${}^m(Sr/Ca)_v$, obteniendo las concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Sr^{2+} en las conchas de ostrácodos mediante espectrometría de masas por plasma inducido (ICP-MS). En el presente estudio el suprafijo "m" sintetiza el término relación molar, y los sufijos "v" y "w", se aplican a las relaciones molares de los elementos traza contra calcio (expresadas por la ecuación Te/Ca , donde Te es Mg^{2+} o Sr^{2+}) en las valvas y el agua, respectivamente. Las constantes generadas en este estudio proceden de los análisis experimentales de 46 valvas de la especie *Limnocythere staplini*, un ostrácodo euritópico común en Norteamérica (desde Alaska hasta el centro de México).

Los resultados de este estudio demuestran que la captura de Mg^{2+} y Sr^{2+} por *Limnocythere staplini* guardan estrecha relación con las condiciones ambientales dominantes en el reservorio. La concentración de Mg^{2+} en las valvas indica que, como en casos anteriores, responde a la temperatura del agua en el momento de calcificación. Sin embargo, contrario a lo observado anteriormente, este estudio sugiere que la concentración de este ión en el agua no es un factor determinante en el proceso de adsorción por *Limnocythere staplini*, y por lo tanto la ecuación para obtener el coeficiente de partición $K_p [Mg] = (Mg/Ca)_v / (Mg^{2+}/Ca^{2+})_w$ no es aplicable. Por otra parte, la concentración de Sr^{2+} en las mismas valvas sugiere que su adsorción está en estrecha relación con la concentración del mismo en el agua, tal y como ha sido sugerido previamente. Sin embargo, en este trabajo se sugiere que la concentración de Sr^{2+} en las valvas de *Limnocythere staplini* indica la salinidad del agua sin necesidad de calcular el coeficiente de distribución del estroncio. El presente estudio propone el uso de constantes matemáticas generadas a través de modelos de regresión múltiple. Estas constantes fueron calibradas contra poblaciones naturales modernas del género *Limnocythere* (*L. staplini* y *L. ceriotuberosa*) procedentes de varias ciénagas en el Estado de Utah y de poblaciones subfósiles de canales de irrigación de los indios Hohokam en el valle de Phoenix, Arizona, ambas en los Estados Unidos de América.

ABSTRACT

Recent studies indicate that Mg^{2+} and Sr^{2+} uptake by adult ostracode valves occur in thermodynamic equilibrium between the host water and the valve. Thus, ostracode valves may be used as geochemical paleoenvironmental indicators. If the ionic concentrations of these elements in the water are related to evapotranspiration and precipitation, then it is possible to correlate ostracode valve chemistry to climate. This study presents independent multiple regression models for Mg^{2+} and Sr^{2+} developed from the experimental simulation of environmental effects of temperature and salinity regardless of thermodynamic processes. Here it is suggested that paleotemperature and paleosalinity of ancient water bodies may be calculated in a one-step strategy, by means of multiple regression models with an interactive term for temperature that have generated constants directly applicable to the ${}^m(Mg/Ca)_v$ and ${}^m(Sr/Ca)_v$ ratios; where, the superscript "m" is used to express molar ratio, and the subscripts "v" and "w" are applied to the molar ratios in the valve and water, respectively. The constants resulted from the geochemical analysis of 46 individual valves of *Limnocythere staplini*, an eurytopic and ubiquitous ostracode in North America (from Alaska to central Mexico).

The results obtained in this study demonstrate that Mg^{2+} and Sr^{2+} uptake by *Limnocythere staplini* is closely related to the environment. Mg^{2+} concentration in the valves suggested, as previously stated in other studies, that it occurs as a function of water temperature. However, in contrast to previous studies, this work suggests that this ion concentration

in water has little effect, if any, during its adsorption by *Limnocythere staplini*. Thus, the partition coefficient (Kp) equation commonly used to determine the mineral to water relationship: $Kp [Mg] = (Mg/Ca)_v / (Mg^{2+}/Ca^{2+})_w$ is not applicable. In addition, Sr^{2+} concentration in the valves shows that its adsorption is closely related to the ion's concentration in water, as suggested in previous studies. However, this study suggests that the Sr^{2+} concentration in *Limnocythere staplini* indicates the overall salinity and so, makes unnecessary to apply the distribution coefficient equation for Sr. This study proposes the use of mathematical constants derived from multiple regression models. The constants developed here were calibrated against natural modern population of the genus *Limnocythere* (*L. staplini* and *L. ceriotuberosa*) from several ponds in Utah and subfossil populations from irrigation canals built by the Hohokam Indians in the valley of Phoenix, Arizona, both in the United States of America.

INTRODUCCIÓN

En el ambiente continental, los sedimentos de cuencas lacustres cerradas proporcionan excelentes archivos del cambio climático a través del tiempo. Los ostrácodos se encuentran entre los fósiles continentales más comunes en depósitos lacustres.

Las conchas de ostrácodos compuestas de calcita baja en magnesio (únicamente) capturan principalmente Mg y Sr del agua huésped en forma de elementos traza durante la calcificación del nuevo caparazón que se produce después de la muda de la concha anterior. Estos elementos traza pueden ser utilizados como indicadores paleoambientales (Chivas et al., 1983, 1985, 1986a y b, 1993; Engstrom y Nelson, 1991; Holmes et al., 1992). Chivas et al. (1983, 1985, 1986a, 1986b, 1993) asumen que dicha incorporación de elementos traza sucede en equilibrio termodinámico entre el organismo y el agua. Por lo tanto, es necesario definir los coeficientes de partición (Kp) para Mg y Sr, respectivamente, con el objeto de obtener paleotemperaturas y paleosalinidades a partir de esos modelos.

En este trabajo se propone que la incorporación de elementos traza no sucede en estricto equilibrio termodinámico sino que resulta de mecanismos biocinéticos que a su vez responden a la temperatura ambiente y a la concentración de los sólidos disueltos totales en el agua. Aun cuando no existen a la fecha estudios documentados sobre la fisiología de ostrácodos, los experimentos realizados en este estudio sugieren que los ostrácodos controlan de alguna manera la incorporación de elementos traza, particularmente Mg. Turpen y Angell (1971) demuestran que los ostrácodos capturan iones disueltos en el agua para calcificar sus caparazones. Cadot y Kaesler (1977) señalan que al momento de iniciar la calcificación, el organismo produce células calcificadoras que van capturando minerales y precipitando calcita baja en magnesio directamente sobre la pared de quitina en pequeños mosaicos. En estados juveniles, cuando el proceso de calcificación ocurre rápidamente, el contenido de Mg es mayor y da lugar a la calcificación de calcita alta en magnesio, pero esta relación cambia gradualmente con la maduración del organismo hacia la formación de calcita baja en magnesio. Por lo tanto, en este estudio se sugiere que la incorporación de elementos traza en las valvas de *Limnocythere staplini* no es un

mecanismo simple entre cuerpos inertes (mineral/agua) sino el resultado de un proceso biológico en el que cinéticamente el ostrácodo dispone de sus recursos ambientales para calcificar su caparazón. Este argumento requiere comprobación experimental para determinar la naturaleza precisa en que el organismo controla la captura de iones.

En consecuencia, en el presente estudio se parte del concepto de que la captura de elementos traza por *Limnocythere staplini* puede calcularse independientemente del equilibrio termodinámico, mediante la conversión directa de las relaciones ${}^m(Mg/Ca)_v$ y ${}^m(Sr/Ca)_v$ en valores de temperatura y salinidad, respectivamente, a partir de modelos de regresión múltiple. Se presentan dos modelos de regresión múltiple con un término interactivo para temperatura que permite usar la relación ${}^m(Mg/Ca)_v$ como paleotermómetro y la relación ${}^m(Sr/Ca)_v$ como paleosalinómetro sin depender de la relación ${}^m(Mg^{2+}/Ca^{2+})_w$ y ${}^m(Sr^{2+}/Ca^{2+})_w$ con las valvas. El suprafijo "m" se usa en este estudio para sintetizar la expresión "relación molar", y los sufijos "v" y "w" se utilizan para diferenciar las relaciones molares de elementos traza contra calcio (expresadas por la ecuación Te/Ca , donde Te es Mg^{2+} o Sr^{2+}) en las valvas y el agua, respectivamente. También para distinguir entre los iones libres en solución y aquellos en la concha se incluye la carga en los primeros.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se colectaron muestras de agua y sedimentos conteniendo *Limnocythere staplini* de Antero Pond, South Park, Colorado, EEUU (Figura 1). *L. staplini* es un ostrácodo citeráceo euritópico, pequeño y cosmopolita. Los adultos de esta especie miden entre 600 y 800 μm de longitud y pesan entre 5 y 10 μg , viven en aguas ricas en Ca^{2+} pobres en HCO_3^- , no-alcálinas y dominadas por Na^+ , Mg^{2+} y Cl^- o SO_4^{2-} .

En el laboratorio se prepararon cinco acuarios para cultivar esta especie a cinco concentraciones (10,000; 15,000; 20,000; 25,000 y 30,000 mMhos/cm) y tres temperaturas (15°, 20° y 25°C). Se diseñaron tres experimentos (uno para cada temperatura) para entender los mecanismos de control en la captura de elementos traza por *L. staplini*. En cada acuario se colocaron aproximadamente 300 g de sedimentos del lago y a ellos se les agregó 1 litro de agua (del lago) previamente diluida en decrementos de 5,000 mMhos/cm. Durante los experimentos se mantuvo el volumen y la concentración de

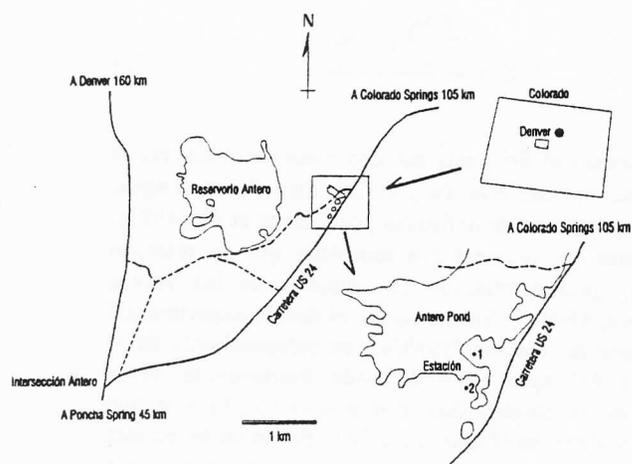


Figura 1. Mapa de localización de muestras en Antero Pond, South Park, Colorado, EEUU.

los acuarios agregando agua diluida a la concentración correspondiente. Otros dos experimentos a 5 y 10°C se intentaron infructuosamente. Después de un período de adaptación y maduración de cuatro semanas, 20 ejemplares adultos y 1 ml de agua de cada acuario fueron extraídos para su análisis espectrométrico.

Se obtuvieron un promedio de 15 análisis químicos y de temperatura en 15 ejemplares por cada experimento. No se obtuvieron las concentraciones de 10,000 y 15,000 mMhos/cm durante el experimento a 15°C ya que los ostrácodos murieron antes de mudar sus exoesqueletos.

Las valvas fueron separadas mecánicamente con instrumental microquirúrgico bajo un microscopio estereoscópico. Los residuos quitinosos y otras adherencias fueron eliminadas sumergiendo las valvas en una solución de peróxido de hidrógeno al 5%, a temperatura ambiente durante 30 minutos. Las valvas fueron enjuagadas cuatro veces en agua milliQ <18 μ Ohm. Entonces, se pesó cada concha usando una balanza electrónica Cahn 29 (± 0.002 mg) y se disolvió en 3 ml de una solución de HCl destilado al 2% (0.12N).

Las concentraciones de Ca^{2+} , Mg^{2+} y Sr^{2+} fueron determinadas por espectrometría de plasma inducido (ICP-MS), tanto de las aguas, como de las conchas. Los límites de detección del espectrómetro para Mg^{2+} y Sr^{2+} fueron 0.1 ppb y 10 ppb para Ca^{2+} ; 2s arriba de la base. Todos los análisis se hicieron usando estándares de elementos múltiples preparados con soluciones estándares de Spex. Las relaciones $m(Te/Ca)_v$ fueron utilizadas para determinar los modelos de regresión múltiple para Mg^{2+} y Sr^{2+} para determinar la temperatura y salinidad del agua en los experimentos. Para propósitos estadísticos se utilizó como cota estándar de significancia $\alpha = 0.05$.

Para verificar la viabilidad de las constantes generadas mediante los modelos de regresión múltiple, se realizaron

dos calibraciones independientes, una en poblaciones naturales de dos especies del género *Limnocythere* (*L. staplini* y *L. ceriotuberosa*) procedentes de varias ciénagas en el Estado de Utah, EEUU. Las calibraciones generadas a partir de estas poblaciones fueron comparadas con las mediciones de campo obtenidas durante el verano de 1995 por el autor y sus colegas (Andrew S. Cohen, David Dettman and Simone Alin). La otra calibración se obtuvo a partir de poblaciones subfósiles colectadas en canales de irrigación construidos por los Indios Hohokam (entre los años 700 y 1450 D.C.) en el valle de Phoenix, Arizona, EEUU. Las calibraciones de esta última localidad fueron comparadas con los registros climatológicos y de química del agua del Río Salt publicados por el Departamento de Agricultura entre 1876 y 1995 (National Climatic Data Center y United States Water Supply Department).

RESULTADOS

La constante y coeficientes generados en este estudio fueron obtenidos a partir de las tres relaciones empíricas e independientes entre el agua y los cocientes $m(Mg/Ca)_v$ de las valvas adultas de *L. staplini*, para la temperatura (temperaturas experimentales). La constante y coeficientes generados para las salinidad fueron obtenidos a partir de las cinco relaciones empíricas e independientes (salinidades experimentales) entre el agua y los cocientes $m(Sr/Ca)_v$ de las mismas valvas. La relación lineal establecida usando los tres puntos proporciona la correlación entre la temperatura y salinidad del agua y las relaciones $m(Mg/Ca)_v$ y $m(Sr/Ca)_v$, respectivamente (Tabla I y Figura 2). Estos resultados son similares a los obtenidos por Wansard (1996) para otra especie eurihalina de Europa (*Cyprideis torosa*).

Tabla 1. Datos geoquímicos obtenidos de las valvas de *Limnocythere staplini*. Se incluyen las temperaturas (°C) y salinidades (ppm de SDT) experimentales, procedencia del ejemplar (No. de muestra), réplica, peso de la valva en μ g, contenido en μ g de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} y Sr^{2+} en la valva, concentración de Mg^{2+} y Sr^{2+} en ppm de $CaCO_3$, relaciones $m(Te/Ca)_v$ y valores estimados de temperatura y salinidad usando los modelos de regresión múltiple diseñados en este trabajo.

Temperatura y salinidad experimentales		Temperatura Empírica $m(Mg/Ca)$		Salinidad Empírica $m(Sr/Ca)$	
(C°)	SDT (ppm)	Media	Media \pm 2s	Media	Media \pm 2s
25°	9100	0.0183	26.1 \pm 4.8	0.0023	11200 \pm 1000
	13650			0.0028	13700
	18200			0.0030	14800 \pm 1500
	22750			0.0029	13900 \pm 300
	27300			0.0030	14700 \pm 500
20°	8900	0.0140	20.2 \pm 2.3	0.0019	9300 \pm 1200
	13400			0.0023	10900 \pm 1100
	17950			0.0024	11800 \pm 500
	22500			0.0028	13600 \pm 1300
	27000			0.0030	
15°	18550	0.0114	16.5 \pm 1	0.0018	8500 \pm 400
	23000			0.0023	11200 \pm 400
	27650			0.0028	13500 \pm 400

Los resultados de este estudio muestran que los cocientes $m(Mg^{2+}/Ca^{2+})_w$ no guardan relación con los

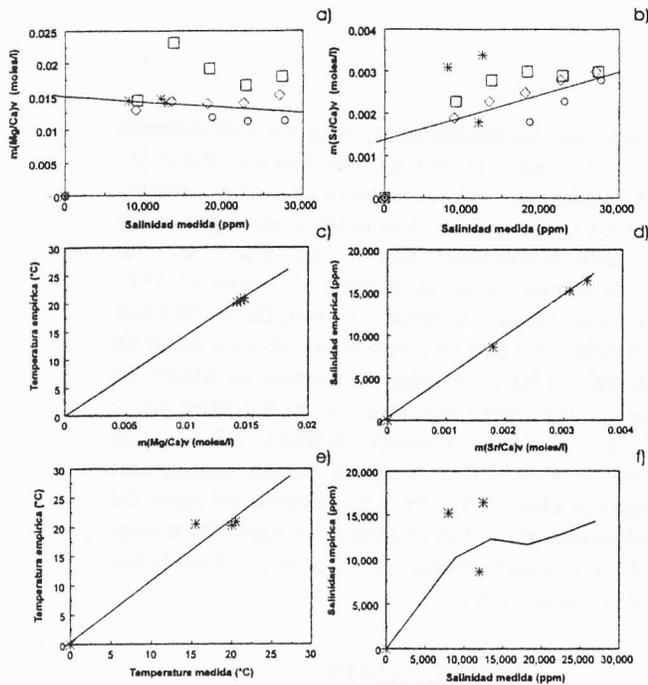


Figura 2. Diagramas de distribución de las relaciones $m(\text{Te}/\text{Ca})_v$ ($\text{Te} = \text{Mg}$ o Sr) en función de la salinidad, en partes por millón (ppm) de sólidos disueltos totales (SDT) y las temperaturas y salinidades estimadas usando los modelos de regresión múltiple descritos en el texto; a) $m(\text{Mg}/\text{Ca})_v$ contra SDT, en la que $\beta_0 = \text{constante}$, $\beta_1 = \text{coeficiente para salinidad}$ y $\beta_2 = \text{coeficiente para el término interactivo (temperatura)}$; b) $m(\text{Sr}/\text{Ca})_v$ contra SDT, en la que $\beta_0 = \text{constante}$, $\beta_1 = \text{coeficiente para salinidad}$ y $\beta_2 = \text{coeficiente para el término interactivo (temperatura)}$; c) temperaturas estimadas contra $m(\text{Mg}/\text{Ca})_v$; d) salinidades estimadas contra $m(\text{Sr}/\text{Ca})_v$; e) comparación de temperaturas medidas contra estimadas; y f) comparación de salinidades medidas y estimadas. (Simbología para las figuras (a) y (b): Cuadros = datos experimentales a 25°C; rombos = datos experimentales a 20°C; círculos = datos experimentales a 15°C. Simbología para las figuras de la (c) a la (f): círculos cerrados = experimentos y estrellas negras = calibraciones con poblaciones naturales de ciénagas de Utah, EEUU.)

cocientes de las valvas (Palacios-Fest, 1994a). Además, el diseño experimental demuestra que la relación $m(\text{Mg}/\text{Ca})_v$ es independiente de la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) en el agua, pero depende fuertemente de la temperatura a la que ocurre la calcificación (Figura 2a y 2c). Por lo tanto, en esta investigación se propone un modelo de regresión múltiple entre $m(\text{Mg}/\text{Ca})_v$ y la salinidad, con un término interactivo para la temperatura, ecuación (1):

$$m\left(\frac{\text{Mg}}{\text{Ca}}\right)_v = \alpha_0 + \alpha_1 \times \text{SDT} + \alpha_2 \times T(^{\circ}\text{C}) \quad (1)$$

donde la constante $\alpha_0 = -0.00083$ parte muy cerca del origen, el coeficiente $\alpha_1 = 2 \times 10^{-7}$ no es significativamente diferente de cero (índice de probabilidad: $p > 0.05$), pero el coeficiente $\alpha_2 = 0.00074$ es significativamente diferente de cero ($p < 0.001$).

Puesto que α_1 no es diferente de cero, entonces la ecuación (1) puede rearrreglarse para calcular temperaturas en la ecuación (2):

$$T(^{\circ}\text{C}) = \frac{m\left(\frac{\text{Mg}}{\text{Ca}}\right)_v - \alpha_0}{\alpha_2} \quad (2)$$

Con respecto al Sr^{2+} , este estudio pone en evidencia la estrecha relación entre este ión y el Ca^{2+} disuelto en el agua, condiciones previamente definidas por Chivas et al. (1983). Los resultados de este estudio muestran que la relación $m(\text{Sr}^{2+}/\text{Ca}^{2+})_w$ guarda relación con aquella de las valvas (Palacios-Fest, 1994a). Sin embargo, el diseño experimental demuestra que la relación $m(\text{Sr}/\text{Ca})_v$ es independiente de la temperatura del agua pero depende fuertemente de la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) a la que ocurre la calcificación (Figura 2b y 2d). Por lo tanto, en esta investigación se propone un modelo de regresión múltiple entre $m(\text{Sr}/\text{Ca})_v$ y la salinidad, con un término interactivo para la temperatura, ecuación (3):

$$m\left(\frac{\text{Sr}}{\text{Ca}}\right)_v = \beta_0 + \beta_1 \times \text{SDT} + \beta_2 \times T(^{\circ}\text{C}) \quad (3)$$

donde la constante $\beta_0 (= 7 \times 10^{-5})$, parte muy cerca del origen, el coeficiente $\beta_1 (= 2 \times 10^{-7})$ es significativamente diferente de cero ($p < 0.001$) pero el coeficiente $\beta_2 (= 7 \times 10^{-5})$ no lo es ($p > 0.05$). Puesto que β_2 no es diferente de cero, la ecuación (3) puede rearrreglarse para calcular salinidades (como SDT) en la ecuación (4):

$$\text{SDT} = \frac{m\left(\frac{\text{Sr}}{\text{Ca}}\right)_v - \beta_0}{\beta_1} \quad (4)$$

DISCUSIÓN

L. staplini demuestra ser una especie con potencial para la reconstrucción de las condiciones de temperatura y salinidad de los paleolagos en los que esta especie se haya preservado como fósil. En contraste con estudios previos (Chivas et al., 1983, 1985, 1986a y b, 1993; Engstrom y Nelson, 1991; Holmes et al., 1992) en los que la relación $m(\text{Te}^{2+}/\text{Ca}^{2+})_w$ es considerada un factor de control en la relación $m(\text{Te}/\text{Ca})_v$, en el presente estudio se considera que dicha relación no es necesariamente importante. Los coeficientes de partición K_p [Mg] generados en este trabajo para *Limnocythere staplini*, oscilaron entre 0.0007 (a 15°C) y 0.0018 (a 25°C). Al aplicarlos a las relaciones $m(\text{Mg}/\text{Ca})_v$ experimentales, generaron temperaturas medias entre 8 y 21°C, es decir de 4 a 7°C por abajo de las temperaturas experimentales. En tanto que, mediante los modelos de regresión múltiple, las temperaturas medias calculadas se apartaron de las experimentales entre

0.5 y 1.5°C. Este comportamiento implica que mientras que el $K_p [Mg]$ no sólo es dependiente de la temperatura sino también de la relación $m(Mg^{2+}/Ca^{2+})_w$ en el agua, la relación $m(Mg/Ca)_v$ en las valvas de ostrácodos, a temperatura constante, no es una relación lineal con el cociente $m(Mg^{2+}/Ca^{2+})_w$. Tal comportamiento ha sido también reportado por Wansard (1996) para *Cyprideis torosa*.

Con el aumento de la temperatura del agua aumenta la concentración de Mg^{2+} en las valvas de *L. staplini* (Figura 2c). La respuesta del Mg^{2+} en *L. staplini* a la temperatura hace de esta especie un paleotermómetro confiable para la reconstrucción de las paleotemperaturas de lagos en el registro geológico. Sin embargo, la variabilidad en el contenido de Mg^{2+} en los caparazones de *L. staplini* aumenta considerablemente con el incremento de la temperatura del agua (desde 5% a 15°C hasta 30% a 25°C). Esta creciente variabilidad sugiere que el organismo juega un papel importante en la captura de Mg^{2+} , por lo que se sugiere que se realicen nuevos estudios enfocados a este aspecto para establecer el significado del efecto biocinético en el proceso de calcificación de las valvas de *L. staplini*.

Con el aumento de la salinidad del agua aumenta la concentración de Sr^{2+} en las valvas de *L. staplini* (Figura 2d). La concentración de Sr^{2+} en las valvas de *L. staplini* también parece responder más claramente a la concentración total de sólidos disueltos en el agua huésped que a su relación directa con el Ca^{2+} , por lo que esta especie puede ser un potencial paleosalinómetro en la reconstrucción de paleosalinidades de lagos en el registro geológico, en la medida en que no haya efectos diagenéticos significativos en la calcita. Sin embargo, la captura de Sr^{2+} por estos ostrácodos enfrenta una limitación importante. Estos experimentos muestran que las valvas de *L. staplini* capturan Sr^{2+} progresivamente hasta una salinidad máxima de 15,000 ppm SDT. Por arriba de dicha concentración, la valva de calcita alcanza la saturación con respecto a Sr^{2+} y la incorporación de este ión se estabiliza o declina, incluso abruptamente. Por lo tanto, la aplicación de este paleosalinómetro no es recomendable si se sospecha que el paleolago alcanzó salinidades superiores a 15,000 ppm SDT.

Los resultados de estos experimentos generan una alternativa provocativa para el análisis de la química de valvas de ostrácodos y su aplicación a la reconstrucción de ambientes lacustres pasados. La generación de modelos de regresión múltiple independientes del modelo de equilibrio termodinámico, manejado hasta ahora como la única forma de usar a los ostrácodos, podría convertirse en un recurso poderoso para la reconstrucción ambiental.

Nuevos estudios sobre ésta y otras especies de ostrácodos son importantes para determinar la viabilidad de este procedimiento. Para verificar si las constantes derivadas de los modelos de regresión múltiple propuestos en este estudio son razonables, estas se calibraron contra poblaciones modernas naturales de dos especies del género

Limnocythere (*L. staplini* y *L. ceriotuberosa*) colectadas en varias ciénagas en el Estado de Utah, EEUU. Las constantes también se utilizaron en la reconstrucción ambiental de antiguos canales de irrigación construidos por la civilización Hohokam del suroeste de los Estados Unidos (Tempe, Arizona; Palacios-Fest, 1994a y b).

CALIBRACIÓN DE LOS MODELOS DE REGRESIÓN MÚLTIPLE A ESTUDIOS DE CAMPO

Las calibraciones preliminares sobre poblaciones modernas se hicieron con 20 ejemplares de *L. staplini* (estaciones 1 y 3) y 10 especímenes de *L. ceriotuberosa* (estación 2) colectados en tres estaciones a lo largo del Estado de Utah (Figura 3). Se analizaron 10 individuos de cada estación. La primera localidad ubicada en la Cuenca del Río Sevier, al sur del estado, está en la intersección Long Valley (~2200 m de altitud), entre la Meseta Paunsaugunt (al oeste) y la Meseta Markagunt (al este) en la parte sur del Bosque Nacional Dixie, que caracterizan el drenaje del río. Las estaciones 2 y 3 se encuentran dentro de la Cuenca del Great Salt Lake. La segunda localidad, las "Burrison Ponds" (1700 m de altitud), se encuentra a unos 45 km al sur de Provo cerca del Reservorio Mona abastecido por acuíferos que circundan el área. La tercera localidad está ubicada en el Refugio para Aves Migratorias del Río Bear (1500 m de altitud) a unos 25 km al noroeste de Ogden.

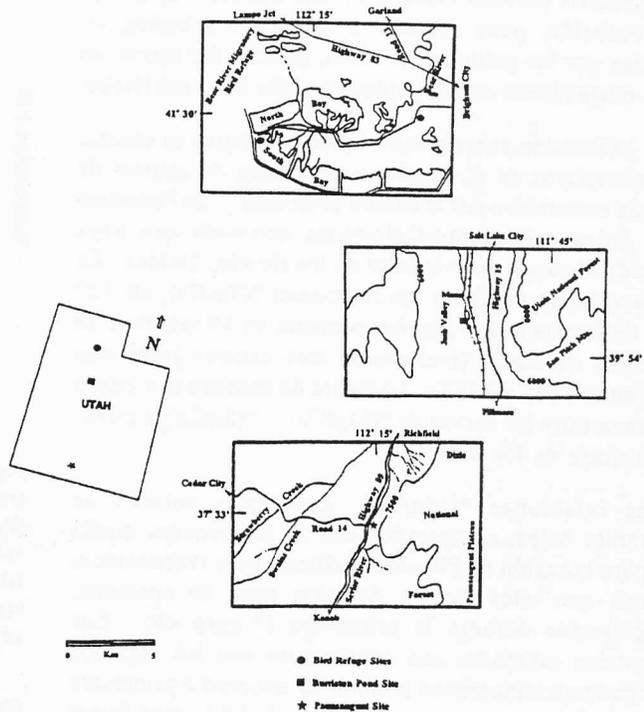


Figura 3. Mapa de localización de las estaciones de muestreo y procedencia de los ejemplares (de poblaciones naturales modernas) utilizados para la calibración preliminar de las constantes y coeficientes derivados de los modelos de regresión múltiple generados en este estudio.

En el campo se obtuvieron las temperaturas del agua y del aire, la conductividad, oxígeno disuelto, pH y elementos mayores del agua. La temperatura y la composición química del agua fueron utilizados para las calibraciones que se muestran en la Figura 2. Tanto *L. staplini* como *L. ceriotuberosa* generaron relaciones $m(\text{Mg}/\text{Ca})_v$ y $m(\text{Sr}/\text{Ca})_v$ altamente correlacionables con las relaciones obtenidas de los ejemplares experimentales (Figuras 2a y b). Al aplicar a las relaciones $m(\text{Mg}/\text{Ca})_v$ y $m(\text{Sr}/\text{Ca})_v$ de los ejemplares de campo, las constantes derivadas de los modelos de regresión múltiple diseñados en estos experimentos, se obtuvieron estimaciones de temperatura y salinidad afines a las medidas en el campo. Por ejemplo, las temperaturas estimadas a partir de las poblaciones naturales oscilaron entre 20 y 21°C en tanto que, las temperaturas obtenidas en el campo fluctuaron entre 15.5 y 20.5°C (Figura 2e). Salvo la población de la estación 1 que muestra una diferencia notable entre los valores inferidos y los medidos, las otras dos poblaciones, con un margen de error de 0.5°C, indican que las constantes son altamente confiables para su empleo como paleotermómetros en Norteamérica.

Por otra parte, las salinidades también mostraron un comportamiento afín entre las estimaciones de laboratorio, que variaron entre 8,000 y 16,000 ppm, y los valores de salinidad medidos en el campo que oscilaron entre 8,000 y 12,500 ppm (Figura 2f). En este caso, sin embargo, es evidente que el margen de error fué mayor (de 500 a 4,500 ppm) que en el caso de la temperatura, lo cual sugiere que el organismo puede ejercer un mayor control sobre la incorporación de estroncio que sobre el magnesio. Por ello, aún cuando las constantes derivadas de las relaciones $m(\text{Sr}/\text{Ca})_v$ experimentales parecen viables, es recomendable aplicarlas con precaución, pues además de los efectos biológicos mostrados por las poblaciones vivas, podrían agregarse los efectos diagenéticos en las poblaciones fósiles y subfósiles.

La calibración sobre material paleoecológico se efectuó sobre ejemplares de *L. staplini* procedentes de canales de irrigación construidos por la cultura Hohokam. Los Hohokam son la única cultura pre-Colombina conocida que haya construido sistemas de irrigación en los Estados Unidos. En este ejemplo, se midieron las relaciones $m(\text{Te}/\text{Ca})_v$ en 129 valvas de *Limnocythere staplini* presente en 19 muestras de sedimentos de canal (incluyendo tres canales históricos usados entre 1885 y 1892). La figura 4a muestra una buena covarianza entre las curvas de $m(\text{Mg}/\text{Ca})_v$ y $m(\text{Sr}/\text{Ca})_v$ a través de la historia de los canales.

Las relaciones $m(\text{Mg}/\text{Ca})_v$ generaron valores de temperatura bajos, comparados con la temperatura media anual para la región de Phoenix, Arizona, pero razonables si se asume que estos canales debieron estar en operación principalmente durante la primavera (Figura 4b). Las temperaturas estimadas son consistentes con los registros de temperatura atmosférica mínima de invierno a primavera (finales de febrero a principios de mayo) del United States Water Supply Department (1876-1990). Dado que estos

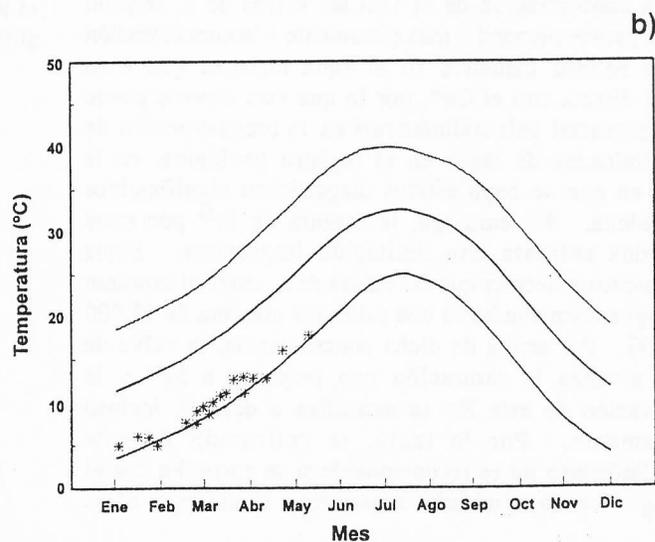
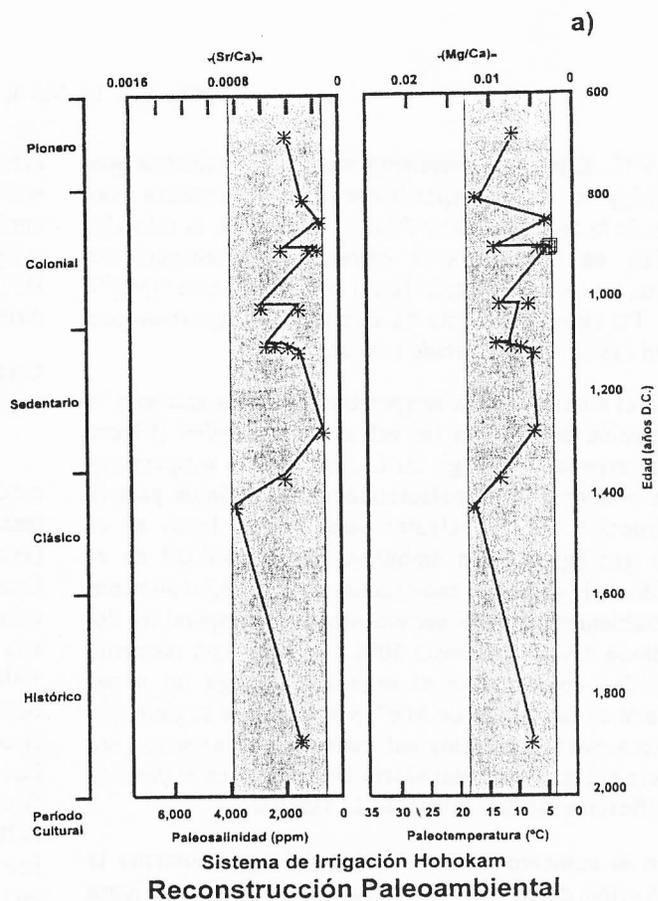


Figura 4. a) Reconstrucción paleoambiental del Sistema de Irrigación Hohokam en Las Acequias, Tempe, Arizona, EEUU (Palacios-Fest, 1994b), utilizando los modelos de regresión múltiple diseñados en este trabajo; y b) comparación de temperaturas estimadas contra los registros climatológicos de temperaturas mínimas para el área de Phoenix, Arizona entre 1876 y 1995.

canales son muy someros (<60 cm de profundidad), es razonable suponer que las temperaturas de las aguas de los

canales reflejen las del ambiente durante la noche y el amanecer (cuando los ostrácodos mudan sus exoesqueletos) en la Cuenca de Phoenix durante la ocupación Hohokam.

Las relaciones $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, por su parte, también generaron valores de salinidad (ppm) consistentes con las salinidades medidas a principios de este siglo en el Río Salt en Tempe, Arizona (800-1200 ppm; Ackerly, 1989), surtidor de los canales históricos (llamados Peterson Ditch) incluidos en este reporte. Ackerly (1989) sugirió que la salinidad del río aumenta corriente abajo y por ello hacia las partes terminales de los canales de irrigación mismos. La bioestratigrafía de los ostrácodos (Palacios-Fest, 1994b) registró cambios en la química del agua que están de acuerdo con las estimaciones geoquímicas generadas en este estudio y que detectan tanto eventos climáticos como patrones de impacto humano durante la ocupación Hohokam.

En conclusión, como lo han demostrado estudios previos los elementos traza, Mg^{2+} y Sr^{2+} , responden a la temperatura y la salinidad, respectivamente. A diferencia de otros estudios, en este trabajo se sugiere que la incorporación de Mg^{2+} y Sr^{2+} en las valvas de ostrácodos no sucede en equilibrio termodinámico entre los organismos y el agua, sino posiblemente bajo el control biocinético de los individuos. Por lo tanto, es posible que los modelos de regresión múltiple en función directa de los parámetros de temperatura y salinidad tengan mayor aplicabilidad que los que requieren la obtención de los coeficientes de partición, K_p .

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mi sincera gratitud a Ana Luisa Carreño por incitarme a preparar este trabajo. Andrew S. Cohen, Richard M. Forester y Joaquín Ruíz hicieron comentarios, sugerencias y contribuciones importantes a la versión previa de este estudio. También estoy en deuda con mis arbitros J. Manuel Grajales y Arturo Martín B. por sus valiosas observaciones y sugerencias, y con Luis A. Delgado por su estímulo para la elaboración final del manuscrito.

BIBLIOGRAFÍA

- Ackerly, N.W. 1989. Changes in the study area during historic period; in: Ackerly, N.W. and T.K. Henderson (Eds.). *Prehistoric agricultural activities on the Lehi-Mesa Terrace: Perspectives on Hohokam irrigation cycles*, pp. 18-45. Flagstaff: Northland Research.
- Cadot, H. and Kaesler, R. 1977. Magnesium content of calcite in carapaces of benthic marine ostracodes. *Paleontological Contributions, University of Kansas*, 87: 1-23.
- Chivas, A.R., P. De Deckker, and J.M.G. Shelley. 1983. Magnesium, strontium and barium partitioning in nonmarine ostracode shells and their use in paleoenvironmental reconstructions: A preliminary study; in: Maddocks, R.F. (ed.). *Applications of Ostracoda*; Dept. of Geosciences, University of Houston, Houston, Texas, págs. 238-249.
- Chivas, A.R., P. De Deckker, and J.M.G. Shelley. 1985. Strontium content of ostracodes indicate lacustrine paleosalinity; *Nature*, 316: 251-253.
- Chivas, A.R., P. De Deckker, and J.M.G. Shelley. 1986a. Magnesium content of nonmarine ostracode shells: a new paleosalinometer and paleothermometer; *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 54: 43-61.
- Chivas, A.R., P. De Deckker, and J.M.G. Shelley. 1986b. Magnesium and strontium in nonmarine ostracode shells as indicators of paleosalinity and paleotemperature; *Hydrobiologia*, 143: 135-142.
- Chivas, A.R., P. De Deckker, J.A. Cali, A. Chapman, E. Kiss, and J.M.G. Shelley. 1993. Coupled stable-isotope and trace-element measurements of lacustrine carbonates as paleoclimatic indicators, Chapter 9; in: Swart, P.K., K.C. Lohman, J. McKenzie, and S. Savin (eds.). *Climate change in continental isotopic records*, American Geophysical Union, *Geophysical Monograph* 78: 113-121.
- Engrstrom, D. and S. Nelson. 1991. Paleosalinity from trace metals in fossil ostracodes compared with observational records at Devils Lake, North Dakota, USA; *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 83: 295-312.
- Holmes, J. A., P. E. Hales, and F. A. Street-Perrott. 1992. Trace-element chemistry of non-marine ostracods as a means of palaeolimnological reconstruction: An example from the Quaternary of Kashmir, northern India; *Chemical Geology*, 95: 177-186.
- National Climatic Data Center. 1876-1995. Local Climatological Data, Phoenix. National Oceanographic and Atmospheric Administration, Washington, D.C.: Department of Commerce.
- Palacios-Fest, M.R. 1994a. Trace element shell chemistry of continental ostracodes and the applicability of experimentally-derived multiple regression models to paleoenvironmental reconstructions in southwestern North America; *Ph. D. Dissertation, Department of Geosciences, University of Arizona*, 279 págs.
- Palacios-Fest, M.R. 1994b. Nonmarine ostracode shell chemistry from ancient Hohokam irrigation canals in Central Arizona: A paleohydrochemical tool for the interpretation of prehistoric human occupation in the North American Southwest; *Geoarchaeology: An International Journal*, 9: 1-29.
- Turpen, J.B. and Angell, R.W. 1971. Aspects of moulting and calcification in the ostracod *Heterocypris*. *Biological Bulletin*, 140: 331-338.
- United States Water Supply Department. 1876-1995. Phoenix Station weather reports; Microfiche/Library. Tucson: University of Arizona.
- Wansard, G. 1996. Quantification of paleotemperature changes during isotopic stage 2 in the La Draga continental sequence (NE Spain) based on the Mg/Ca ratio of freshwater ostracods. *Quaternary Science Review*, 15: 237-245.

