

## Modelos de regresión para calcular las temperaturas de calcificación de las valvas de los ostrácodos *Limnocythere staplini* y *Cypridopsis vidua*

MANUEL R. PALACIOS FEST\* Y DAVID L. DETTMAN\*\*

### RESUMEN

Experimentos de laboratorio y de campo fueron conducidos independientemente entre 1990 y 1994. La relación molar Mg/Ca en las valvas de ostrácodos de las especies *Limnocythere staplini* y *Cypridopsis vidua* fue medida de ejemplares vivos cultivados en el laboratorio (*L. staplini*) y colectados de un pequeño estanque en el norte de México (*C. vidua*). La especie *L. staplini* es euritópica y cosmopolita, se le encuentra en Norteamérica desde Alaska hasta el centro de México. Su ciclo de vida es de 30 días aproximadamente. Ésta fue colectada en un estanque al sur de Denver, Colorado a finales de la primavera de 1991, transportada al laboratorio y cultivada en acuarios a tres temperaturas diferentes (15, 20 y 25°C). Se intentaron temperaturas inferiores (5 y 10°C) sin éxito. La especie *C. vidua* fue colectada mensualmente de enero a diciembre de 1990. Al igual que la especie anterior su ciclo vital es de cerca de 30 días. En ambos casos se analizaron entre cuatro y diez ejemplares. Asimismo, se midieron las relaciones Mg/Ca de las aguas experimentales y naturales. En el primer caso (*L. staplini*) los valores fueron relativamente altos pero constantes (6.68-8.66), en el segundo (*C. vidua*) por el contrario fueron menores que la unidad pero también constantes (0.306-0.461). Por otra parte, los valores medios de las relaciones Mg/Ca en *L. staplini* oscilaron entre 0.010 y 0.018 y en *C. vidua* fluctuaron entre 0.018 y 0.032; en los dos casos estos valores se correlacionan con la temperatura del agua. Los estudios de laboratorio y campo demuestran que la incorporación de Mg<sup>2+</sup> a las valvas de ostrácodos es independiente de la relación Mg/Ca del agua, pero es fuertemente influenciada por la temperatura de la misma. En ambos casos se observa una gran variabilidad en los datos, por lo que se sugiere que éstos sean promediados para calibrar las temperaturas obtenidas. Nuestro estudio indica que es importante discriminar valvas adultas de juveniles para evitar conflictos interpretativos ya que durante los estadios juveniles los ostrácodos calcifican calcita alta en magnesio, mientras que en el estado adulto (última ecdisis) forman calcita baja en magnesio. Este estudio también concluye que la biología de los ostrácodos y la temperatura del agua juegan un papel preponderante en la composición química de las valvas, en tanto que la composición química del agua es un factor secundario.

**Palabras clave:** ostrácodos, geoquímica, relaciones Mg/Ca, paleotemperatura.

### ABSTRACT

Laboratory and field experiments were independently conducted between 1990 and 1994. The molar Mg/Ca ratios from ostracode valves of *Limnocythere staplini* and *Cypridopsis vidua* were measured from living organisms cultured in the laboratory (*L. staplini*) and from specimens collected monthly from a small pond in northern Mexico (*C. vidua*). *L. staplini* is a eurytopic, cosmopolitan species common in North America from Alaska to Mexico. Its life cycle is approximately of 30 days. The cultured specimens were collected from Antero Pond, South Park, Colorado, south of Denver in the late spring of 1991, transported to the laboratory and cultured at three temperatures (15, 20, and 25°C). Cultures at lower temperatures (5 and 10°C) failed. *C. vidua* was collected every month from January to December 1990. As the other species, this is eurytopic and cosmopolitan, with a life cycle of about 30 days. For both cases from four to ten specimens were analyzed. Also, we measured the Mg/Ca ratios of experimental and natural waters. In the first case (*L. staplini*) the water Mg/Ca ratios were relatively high but constant (6.68-8.66), in contrast, in the second case (*C. vidua*), these values were very low but again constant (0.306-0.461). On the other hand, the mean values of the Mg/Ca ratios in *L. staplini* ranged from 0.010 to 0.018 while in *C. vidua* fluctuated from 0.018 to 0.032, in both experiments these values correlate well with water temperature. Our laboratory and field experiments show that Mg<sup>2+</sup> uptake by ostracodes is independent from the host water Mg/Ca ratios, but strongly influenced by water temperature. The two experiments show that the data have great variability at a given temperature, therefore, we recommend to average the values to calibrate temperatures. This study points out the importance of screening adults from juveniles because the latter calcify high Mg calcite, whereas adults calcify low Mg calcite during the last ecdysis. This study also concludes that ostracode biology and water temperature play a significant role on the chemical composition of the valves, but water chemistry is only a secondary factor.

**Key words:** ostracoda, geochemistry, Mg/Ca ratios, paleotemperature.

\* Terra Nostra Earth Sciences Research, 3220 West Ina Road # 8105, Tucson, AZ, 85741, USA. terra\_nostra\_mx@yahoo.com.mx

\*\* Department of Geosciences, University of Arizona, Tucson Arizona, 85721, USA. dettman@geo.arizona.edu

## Introducción

En 1922 Clarke y Wheeler fueron los primeros en proponer que la incorporación de magnesio en los esqueletos calcícos de invertebrados está fuertemente influenciada por la temperatura ambiente. Esta observación fue, más tarde confirmada por los estudios de Chave (1954) y Dodd (1965). Sin embargo, este último en 1967 sostuvo que la composición química del agua y en especial la relación Mg/Ca de la misma juega un papel preponderante en la incorporación de magnesio a las conchas de invertebrados, por lo que el problema tenía que ser visto y resuelto dentro del modelo de equilibrio termodinámico como Urey (1947) propuso para isótopos estables. Este autor sugirió por primera vez la posibilidad de calcular la temperatura del agua a partir del equilibrio termodinámico entre los isótopos disueltos en el agua y aquellos capturados por el organismo. Esta idea fue considerada para el estudio de los elementos traza por Dodd (1967). Desde entonces numerosos investigadores han contribuido con su esfuerzo y conocimiento a la búsqueda de respuestas concretas a este postulado. Aunque se han obtenido progresos significativos a partir de los estudios de Emiliani (1955), Fritz (1975) y muchos otros en el campo de los isótopos estables, con respecto a los elementos traza la respuesta permanece elusiva. En las últimas dos décadas se ha reportado en algunas publicaciones el uso de elementos traza en la composición de valvas de ostrácodos como indicadores de condiciones paleoambientales.

Los ostrácodos son microcrustáceos (0.3 a 3 mm) que producen y mudan nueve caparazones durante su ciclo vital. Los caparazones consisten de dos valvas calcícas (bajas en magnesio) similares a las conchas de bivalvos pero que no son el resultado del crecimiento de capas agregadas sino de procesos de calcificación "instantánea" que se lleva a cabo en unas cuantas horas. Las relaciones de Sr y Mg contra Ca han sido el principal centro de atención. Nuestro trabajo se enfoca a la relación Mg/Ca solamente, por lo tanto nuestra discusión se limitará al comportamiento del Mg en *Limnocythere staplini* y *Cypridopsis vidua*. Estas dos especies comparten algunas características en común: ambas son cosmopolitas (abundantes en Norteamérica, de Alaska a México), euritópicas y con ciclos de vida cortos (ca. 30 días).

Varios investigadores encabezados por Chivas *et al.* (1983 y 1986) y Engstrom y Nelson (1991) estudiaron la relación Mg/Ca en las valvas de ostrácodos en función de

la temperatura, salinidad y disponibilidad de magnesio. Engstrom y Nelson (1991) propusieron que la composición química de las valvas de la especie *Candona rawsoni* cultivada en el laboratorio puede ser explicada usando el coeficiente de partición (Kp) para la relación Mg/Ca que aumenta con la temperatura. Xia *et al.* (1997) trabajando también con *C. rawsoni*, obtuvieron coeficientes de partición (Kp) muy diferentes a los obtenidos por Engstrom y Nelson (1991) y sugirieron que los coeficientes de partición del Mg decrecen cuando la relación Mg/Ca aumenta en el agua, lo que indudablemente complica la aplicación del Kp en las reconstrucciones ambientales.

Otros investigadores han demostrado que el Kp varía con la especie y que inclusive puede variar significativamente dentro del mismo género y, como en el caso anterior, dentro de diferentes poblaciones de la misma especie (Wansard, 1996; Wansard *et al.*, 1998; De Deckker *et al.*, 1999).

Palacios Fest (1996) cultivó la especie *Limnocythere staplini* dentro de un gradiente limitado de composición iónica (Mg/Ca de 6 a 8) y encontró que la temperatura fue el factor dominante que controla la relación Mg/Ca en las valvas de la especie. Generó un modelo de regresión que no requiere del uso de coeficientes de partición (Kp) para el Mg. El modelo generó las constantes y coeficientes que han podido ser usados en varios casos geológicos (Palacios-Fest, 1997; Cohen *et al.*, 2000; Palacios-Fest *et al.*, 2002). El modelo de regresión propuesto por Palacios Fest (1996) evita el uso del modelo termodinámico puesto que éste introduce una incógnita adicional (composición química del agua) cuando se intenta aplicar el coeficiente de partición (Kp) al registro geológico.

La preocupación sobre los efectos artificiales de los ambientes de cultivo nos motivaron a investigar los efectos de la temperatura en ambientes naturales y así comparar el aumento de temperatura estacional (mensual) con la química de las valvas de *Cypridopsis vidua* y el agua. Los ejemplares utilizados fueron colectados durante un año completo en un estanque pequeño en las afueras de Magdalena de Kino, Sonora (Palacios-Fest y Dettman, 2001). El presente trabajo tiene por objeto evaluar las características de los modelos de regresión para las dos especies, compararlos con los modelos termodinámicos propuestos por otros autores y compararlos entre sí dado que uno de ellos fue generado en el laboratorio y el otro es natural.

### Materiales y métodos

Los ejemplares de *L. staplini* (un ciferáceo pequeño: 0.6-0.8 mm) fueron colectados a finales de la primavera de 1991 en Antero Pond, South Park, Colorado, EUA (fig. 1a). La temperatura óptima de reproducción para esta especie es mayor a los 13°C, pero es capaz de reproducirse y vivir a temperaturas inferiores y superiores a ésta (<2 a >30°C). Esta especie puede tolerar un amplio rango de condiciones ambientales en sistemas acuáticos efímeros y permanentes. Tiene preferencia por aguas ricas en  $\text{Ca}^{2+}$ , pobres en  $\text{HCO}_3^-$ , no-alcálinas y dominadas por  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Cl}^-$  o  $\text{SO}_4^{2-}$ . Tolerancia salinidad entre los 500 y 75,000  $\text{mg L}^{-1}$ . En el laboratorio se prepararon cinco acuarios para cultivar esta especie a intervalos de 5°C (5-25°C). Los experimentos a 5 y 10°C no tuvieron éxito, los organismos murieron antes de iniciar la ecdisis. Los tres experimentos restantes tuvieron por objeto entender los mecanismos de control en la incorporación de Mg por *L. staplini*. Palacios-Fest (1996) describe los detalles metodológicos seguidos en estos experimentos.

Los ejemplares de *C. vidua* (un cipridáceo pequeño: 0.7-1 mm) fueron colectados mensualmente entre enero y diciembre de 1990 de un pequeño estanque en las afueras de Magdalena de Kino, Sonora (fig. 1b). *C. vidua* se caracteriza por reproducirse preferentemente a temperaturas superiores a los 13°C pero también puede hacerlo dentro

de un amplio rango térmico (<2 a >32°C) (Taylor, 1992). Al igual que *L. staplini* esta especie tolera un amplio espectro ambiental en sistemas acuáticos permanentes o efímeros, pero en contraste con ésta su tolerancia a la salinidad está restringida a valores entre 10 y 10 000  $\text{mg L}^{-1}$  (Delorme, 1989). En el campo se colectaron además de ejemplares vivos de esta especie, sedimentos y agua. Asimismo, se obtuvieron los parámetros físicos y químicos del agua en el campo. Palacios-Fest y Dettman (2001) describen los procedimientos de campo y características generales de la región.

### Procedimientos analíticos

Los ejemplares de ambas especies fueron sumergidos en una solución de  $\text{H}_2\text{O}_2$  al 5% para disolver los tejidos suaves por espacio de 30 minutos a temperatura ambiente. Los tejidos orgánicos y las valvas fueron separados mecánicamente usando instrumental microquirúrgico y un pincel fino (000) bajo el microscopio estereoscópico. Las valvas separadas se enjuagaron tres veces en agua destilada (18M $\Omega$ ). Cuando fue posible, se utilizaron diez especímenes por experimento o muestra mensual para el análisis de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Para este estudio se utilizaron las valvas derechas únicamente, las que fueron pesadas mediante una balanza electrónica Cahn 29 capaz de leer en microgramos (con

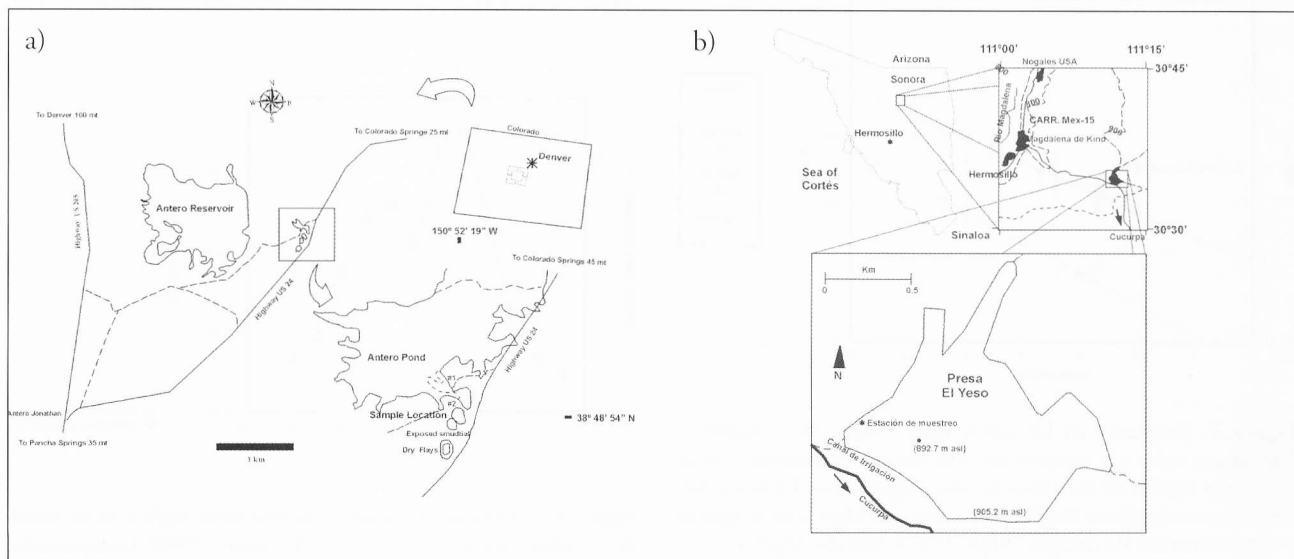


Figura 1. Mapas de localización de los estanques de donde provienen las especies utilizadas en este estudio: a) Antero Pond, South Park, Colorado, EUA; b) Presa El Yeso, Magdalena de Kino, Sonora, México.

límite de detección de  $\pm 0.002 \mu\text{g}$ ). Las valvas fueron disueltas en 3 ml de HCl al 2% (destilado) para el análisis espectrométrico de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  mediante un espectrómetro de masas por inducción de plasma (ICP-MS) Turner TS Sola. El límite de detección para el  $\text{Mg}^{2+}$  fue de  $0.001 \mu\text{g L}^{-1}$  y de  $10 \mu\text{g L}^{-1}$  para el  $\text{Ca}^{2+}$  ( $2\sigma$  arriba de la base). Todos los análisis fueron corridos contra estándares multielementales preparados a partir de soluciones Spex™. Con el propósito de obtener conteos estadísticamente significativos se realizaron cuatro análisis por muestra (valva individual), que incluyeron cuatro pases por análisis, lo que consumió toda la muestra. La precisión obtenida para la señal del  $\text{Mg}^{2+}$  fue de 3% en tanto que para el  $\text{Ca}^{2+}$  fue de 6% ( $2\sigma$ ).

## Resultados

Cuarenta y cinco ejemplares adultos de *L. staplini* y 102 de *C. vidua* fueron analizados por espectrometría de masas. Las relaciones molares de Mg/Ca para *L. staplini* fluctuaron entre 0.0089 y 0.0254, en tanto que las mismas relaciones para *C. vidua* oscilaron entre 0.010 y 0.048. La clara diferencia de las relaciones Mg/Ca entre ambas especies indica la fuerte influencia biológica que estos organismos ejercen en la captura de Mg durante la

ecdisis. Significativamente, tanto en el experimento de laboratorio como en el natural, las relaciones Mg/Ca aumentan conforme aumenta la temperatura lo cual indica el fuerte efecto de la misma en el metabolismo de los ostrácodos. Cabe señalar que la variabilidad también es mayor a mayor temperatura en ambos casos (fig. 2).

Las constantes y coeficientes generados por los experimentos de laboratorio y de campo fueron obtenidos a partir de las relaciones empíricas e independientes entre el agua y las relaciones Mg/Ca de las valvas de *L. staplini* y *C. vidua* para la temperatura. La relación lineal establecida usando los puntos experimentales y mensuales proporciona las correlaciones entre la temperatura y las relaciones Mg/Ca de cada especie (fig. 2). Los valores numéricos para cada especie se presentan en el apéndice A (Palacios Fest, 1994), la tabla 1 (Palacios Fest, 1996) y la tabla 3 (Palacios Fest y Dettman, 2001) de nuestros trabajos previos. (Por su longitud y por haber sido previamente publicadas remitimos al lector a las citas bibliográficas referidas arriba, pero las ponemos a su disposición a solicitud expresa al primer autor de este trabajo.) Estos resultados son similares a los obtenidos por Wansard (1996) y Wansard y Mezquita (2001) para otras especies de ostrácodos de aguas continentales y marino-marginales de Europa (*Cyprideis torosa*, *Herpetocypris intermedia*).

Los ciclos de vida de *L. staplini* y de *C. vidua* son muy cortos, en el orden de 30 días (Kesling, 1951; Fo-

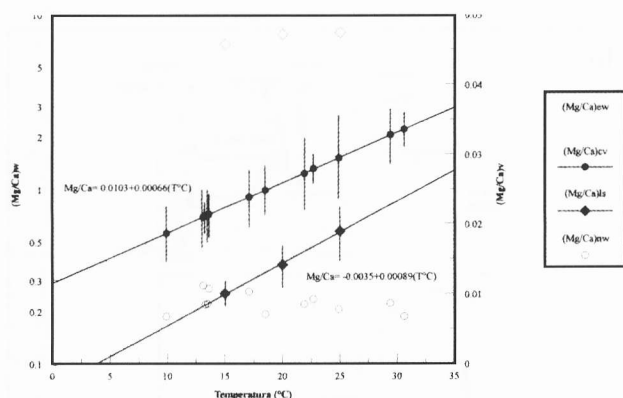


Figura 2. Respuesta de los ostrácodos *Limnocythere staplini* y *Cypridopsis vidua* a la temperatura y su estrecha correlación con las relaciones Mg/Ca de las valvas de estos organismos. En la leyenda los símbolos significan (Mg/Ca)nw = relación Mg/Ca en el agua de los experimentos de campo; (Mg/Ca)ev = relación Mg/Ca en las valvas de *C. vidua*; (Mg/Ca)ls = relación Mg/Ca en las valvas de *L. staplini* y (Mg/Ca)ew = relación Mg/Ca en el agua experimental.

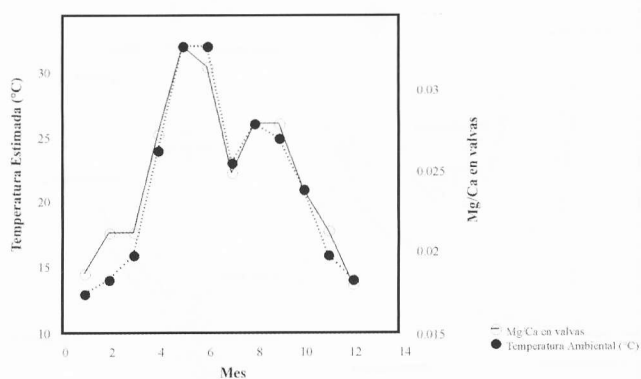


Figura 3. Correlación mensual de las relaciones Mg/Ca en las valvas de *C. vidua* durante el experimento de campo (1990). Comparación con las estimaciones de temperatura utilizando la regresión para esta especie discutida en el texto y mostrada en la figura 2.

Tabla 1. Química de las valvas de ostrácodos: *C. vidua*.

Especie	Mes	Temperatura Ambiental (°C)	Peso de la Valva (mg)	Ca en valva (µg)	Mg en valva (µg)	Mg/Ca (moles)	Media ± 2σ	Media ± 2σ	Temperatura Estimada (°C)	Media ± 2σ	Media ± 2σ
<i>Cypridopsis vidua</i>	Enero	13	8.9	3.58	0.0324	0.0149	0.0186	0.0039	7.0	12.6	5.9
			6.1	2.42	0.0281	0.0191			13.3		
			13.8	5.45	0.0584	0.0177			11.2		
			7.7	3.07	0.0313	0.0169			10.0		
			10.0	3.95	0.0346	0.0145			6.4		
			6.5	2.58	0.0281	0.0179			11.5		
			7.4	2.92	0.0452	0.0256			23.2		
			7.5	2.99	0.0296	0.0163			9.1		
			6.2	2.43	0.0372	0.0253			22.7		
			7.0	2.78	0.0303	0.0180			11.7		
	Febrero	14	6.5	2.57	0.0337	0.0217	0.0211	0.0021	17.3	16.3	3.2
			7.0	2.75	0.0320	0.0192			13.5		
			7.4	2.93	0.0362	0.0203			15.2		
			6.2	2.46	0.0371	0.0249			22.1		
			6.5	2.59	0.0315	0.0201			14.8		
			3.8	1.50	0.0225	0.0247			21.8		
			6.5	2.55	0.0313	0.0202			15.0		
			6.2	2.44	0.0289	0.0196			14.1		
			6.6	2.61	0.0304	0.0192			13.5		
			6.9	2.74	0.0348	0.0210			16.2		
	Marzo	16	4.6	1.82	0.0282	0.0255	0.0212	0.0030	23.0	16.5	4.5
			6.8	2.69	0.0338	0.0208			15.9		
			7.1	2.82	0.0337	0.0197			14.2		
			6.7	2.63	0.0316	0.0198			14.4		
			6.3	2.47	0.0347	0.0232			19.5		
			6.7	2.65	0.0363	0.0226			18.6		
			5.0	1.99	0.0270	0.0224			18.3		
			8.0	3.17	0.0299	0.0156			8.0		
	Abril	24	3.9	1.52	0.0266	0.0288	0.0272	0.0053	28.0	25.7	8.0
			4.3	1.69	0.0235	0.0229			19.1		
			7.2	2.87	0.0289	0.0166			9.5		
			4.1	1.62	0.0274	0.0279			26.7		
3.1			1.22	0.0237	0.0319			32.7			
3.6			1.39	0.0296	0.0350			37.4			
3.8			1.50	0.0267	0.0293			28.8			
4.2			1.64	0.0254	0.0256			23.2			
3.8			1.48	0.0276	0.0308			31.1			
4.4			1.75	0.0249	0.0236			20.2			
Mayo	32	4.9	1.91	0.0418	0.0361	0.0327	0.0040	39.1	33.9	6.1	
		4.2	1.66	0.0297	0.0296			29.2			
		3.8	1.50	0.0269	0.0296			29.2			
		4.6	1.79	0.0377	0.0346			36.8			
		3.5	1.36	0.0282	0.0343			36.4			
		5.1	2.02	0.0328	0.0268			25.0			
		2.3	0.89	0.0204	0.0377			41.5			
Junio	32	4.0	1.58	0.0372	0.0390	0.0314	0.0069	43.5	32.0	10.4	
		4.5	1.77	0.0411	0.0383			42.4			
		3.8	1.49	0.0267	0.0295			29.1			
		6.9	2.70	0.0419	0.0256			23.2			
		3.9	1.52	0.0226	0.0246			21.7			

Tabla 1. Química de las valvas de ostrácodos: *C. vidua*. (Continuación...)

Especie	Mes	Temperatura Ambiental (°C)	Peso de la Valva (mg)	Ca en valva (µg)	Mg en valva (µg)	Mg/Ca (moles)	Media	Media $\pm 2\sigma$	Temperatura Estimada (°C)	Media	Media $\pm 2\sigma$
	Julio	23	5.6	2.21	0.0286	0.0213	0.0248	0.0035	16.7	22.0	5.3
			5.7	2.26	0.0295	0.0215			17.0		
			4.4	1.75	0.0292	0.0276			26.2		
			5.0	1.98	0.0295	0.0247			21.8		
			3.3	1.29	0.0240	0.0308			31.1		
			7.3	2.89	0.0388	0.0222			18.0		
			5.3	2.08	0.0325	0.0258			23.5		
	Agosto	26	5.8	2.29	0.0323	0.0233	0.0279	0.0040	19.7	26.6	6.0
			4.8	1.91	0.0299	0.0258			23.5		
			5.0	1.96	0.0301	0.0253			22.7		
			4.9	1.93	0.0307	0.0262			24.1		
			4.2	1.66	0.0264	0.0263			24.2		
			3.8	1.51	0.0261	0.0285			27.6		
			3.2	1.27	0.0217	0.0282			27.1		
			2.8	1.12	0.0205	0.0303			30.3		
2.6	1.00	0.0224	0.0369	40.3							
	Septiembre	25	5.5	2.16	0.0388	0.0296	0.0279	0.0022	29.2	26.6	3.4
			5.6	2.20	0.0351	0.0263			24.2		
			5.7	2.25	0.0350	0.0256			23.2		
			5.9	2.30	0.0418	0.0300			29.8		
	Octubre	21	7.4	2.92	0.0314	0.0177	0.0238	0.0042	11.2	20.5	6.3
			6.7	2.64	0.0342	0.0213			16.7		
			4.7	1.84	0.0269	0.0241			20.9		
			4.2	1.66	0.0319	0.0316			32.3		
			5.1	2.00	0.0335	0.0276			26.2		
			6.0	2.36	0.0297	0.0208			15.9		
			4.3	1.69	0.0284	0.0277			26.4		
			5.4	2.13	0.0280	0.0217			17.3		
			6.4	2.53	0.0380	0.0247			21.8		
			5.0	1.98	0.0252	0.0211			16.4		
	Noviembre	16	7.0	2.76	0.0291	0.0174	0.0213	0.0031	10.8	16.7	4.7
			7.1	2.81	0.0340	0.0200			14.7		
			7.4	2.94	0.0325	0.0182			12.0		
			4.9	1.92	0.0252	0.0217			17.3		
			6.3	2.49	0.0320	0.0212			16.5		
			7.0	2.78	0.0334	0.0198			14.4		
			4.9	1.94	0.0337	0.0287			27.9		
			5.6	2.21	0.0298	0.0223			18.2		
			6.4	2.51	0.0319	0.0209			16.1		
			5.2	2.07	0.0288	0.0230			19.2		
	Diciembre	14	5.4	2.14	0.0238	0.0184	0.0180	0.0048	12.3	11.6	7.3
			5.2	2.07	0.0279	0.0223			18.2		
			5.9	2.33	0.0261	0.0185			12.4		
			6.3	2.48	0.0323	0.0215			17.0		
			10.9	4.31	0.0296	0.0113			1.5		
			7.4	2.93	0.0293	0.0165			9.4		
			11.5	4.58	0.0289	0.0104			0.2		
			3.9	1.52	0.0231	0.0251			22.4		
			6.9	2.72	0.0292	0.0177			11.2		

rester, comunicación personal 1988; Anderson *et al.*, 1998), lo que permite que las valvas sean contemporáneas a las temperaturas medidas en el lago. En el caso de nuestro experimento natural esto explica las diferencias de mes a mes en las relaciones Mg/Ca de *C. vidua* y sugiere que las valvas responden a las condiciones ambientales estacionales. La figura 3 muestra la variación mensual de las relaciones Mg/Ca de las valvas e indican que éstas cambian rápidamente en respuesta a la temperatura, como lo muestra la anomalía de julio. El inicio de la temporada de lluvias (monzón americano) indujo un descenso en la temperatura del agua que fue registrado por las relaciones Mg/Ca de *C. vidua*. Otras anomalías como los valores altos en las relaciones Mg/Ca de esta especie se observaron en ejemplares que pesaron menos de 3  $\mu\text{g}$ , implicando que las valvas no calcificaron completamente por lo que no son incluidas en la regresión para *C. vidua*. En el experimento de laboratorio no se observaron estas anomalías, pero la variabilidad individual es más evidente conforme aumenta la temperatura.

## Discusión

Las relación entre el Mg/Ca en las valvas de ostrácodos y las temperaturas ha sido sistemáticamente modelada como una relación simple de coeficientes de partición ( $K_p$ ) dependientes de la temperatura y la composición química del agua dentro del modelo de equilibrio termodinámico (e. g., De Deckker *et al.* 1999; Engstrom y Nelson, 1991, Xia *et al.*, 1997). Los dos experimentos documentados aquí sugieren que esto no es apropiado. La determinación de los coeficientes de partición ( $K_p$ ) para el Mg en la calcita han demostrado ser suficientemente problemáticos en carbonatos naturales (Given y Wilkinson, 1985). Meticulosos estudios de laboratorio (bajo condiciones controladas) sobre la precipitación de calcita también han demostrado que éste es un sistema extremadamente complejo fuertemente influenciado por otros iones en la solución (Morse y Bender, 1990). Por lo tanto, es menester que se tomen las debidas precauciones al pretender utilizar este procedimiento en calcitas de origen biológico como las valvas de ostrácodos.

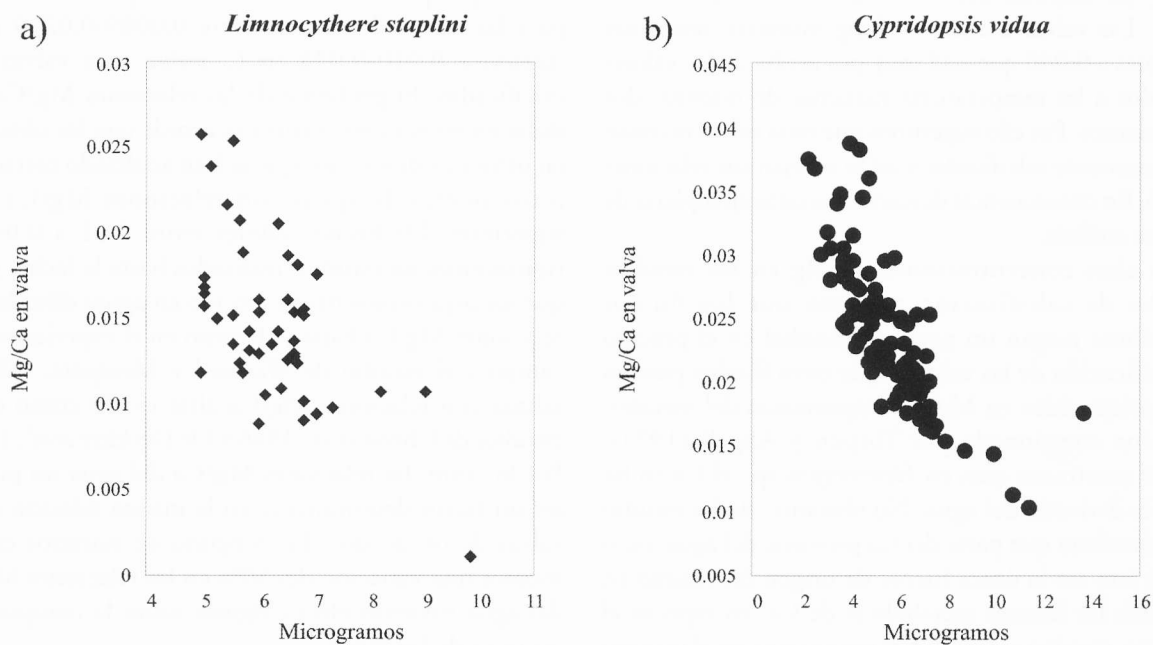


Figura 4. Correlación entre la masa de las valvas de a) *L. staplini* y b) *C. vidua* con las relaciones Mg/Ca.

La fuerte influencia de los procesos biológicos es evidente en las relaciones Mg/Ca de los carbonatos incipientemente formados a partir del exoesqueleto quitinoso de los ostrácodos al inicio de la ecdisis. Al inicio del proceso el organismo se encuentra muy próximo a precipitar magnesita pero conforme el proceso continúa la valva completamente calcificada se transforma en calcita con menos de 4 mol % de Mg. Chivas *et al.* (1986) reporta valores hasta de 400 000 y 152 000 mg L<sup>-1</sup> de Mg en valvas pobremente calcificadas cuyas relaciones Mg/Ca oscilan entre 1.64 y 1.32. Cadot *et al.* (1975) muestran amplios gradientes a través de valvas de ostrácodos marinos, con las más altas concentraciones de Mg en el interior de las valvas y decreciendo hacia el exterior. Nuestros datos experimentales (laboratorio y campo) muestran la fuerte influencia en el grado de calcificación (expresadas en µg de la masa de las valvas) sobre las relaciones Mg/Ca en ambas especies (fig. 4). Todas las valvas estudiadas en estos experimentos fueron organismos en estado adulto y de talla máxima para las poblaciones estudiadas. Sin embargo, observamos que las valvas ligeras contenían menor concentración de Ca total, dando lugar a relaciones Mg/Ca más altas de lo normal para cada especie (*L. staplini*: 0.0089-0.0259; *C. vidua*: 0.018-0.032). Las valvas menores a 3 µg muestran relaciones superiores a 0.040 que está muy por arriba de los valores obtenidos a las temperaturas máximas de nuestros dos experimentos. Por ello sugerimos que estas valvas no están completamente calcificadas y así lo reflejan sus relaciones Mg/Ca. En consecuencia descartamos estos ejemplares de nuestros análisis.

Las altas concentraciones de Mg en los estadios iniciales de calcificación sugieren que los fluidos metabólicos juegan un papel primordial en el proceso de calcificación de las valvas y que estos fluidos pueden estar enriquecidos en Mg. La importancia del metabolismo fue cuestionada por Turpen y Angell (1971), quienes mostraron que, en *Heterocypris* sp., el Ca en las valvas es derivado del agua. No obstante, dicho estudio sólo demuestra que parte del Ca proviene del agua, pero no que ésta sea la única fuente de origen del mismo en las valvas; las fuentes metabólicas de Ca, en especial el alimento, pueden ser un factor importante en el proceso de calcificación. Estos autores citan a Fassbinder (1912) quien demostró que *C. vidua* (parte de nuestro estudio) es capaz de producir un caparazón totalmente calcificado

en ausencia de Ca en el agua. En este caso el Ca metabólico debió ser la fuente de calcita en las valvas. Otros crustáceos tienen la habilidad de, virtualmente, descalcificar sus valvas y almacenar el Ca en gastrolitos y en el hemolinfa (donde se encuentran altas concentraciones de Ca) justo antes de la ecdisis (Mann y Pieplow, 1938). Al menos una especie de crustáceo, *Procambarus clarkii*, muestra la fuerte influencia de la temperatura en la concentración de Mg en los fluidos corporales de este langostino (De Legarra *et al.*, 1985). Por lo que proponemos que procesos similares pueden suceder en los ostrácodos dando lugar al enriquecimiento de Mg en las valvas con el incremento de temperatura.

Por último, observamos que las relaciones Mg/Ca mayores a 0.05 son extremadamente raras en las valvas de ostrácodos completamente calcificadas de cualquier especie. Aun así, estos organismos son capaces de sobrevivir en la mayoría de los ambientes acuáticos con relaciones Mg/Ca cuyos gradientes alcanzan tres órdenes de magnitud superiores a los registrados por los ostrácodos. En nuestros experimentos las relaciones Mg/Ca de las aguas oscilaron entre 6.68-8.66 (experimentos de laboratorio) para *L. staplini* y 0.30-0.46 (experimentos de campo) para *C. vidua*, en tanto que las relaciones para las valvas fluctuaron entre 0.0089-0.0259 en *L. staplini* y 0.010-0.038 en *C. vidua* para valvas bien calcificadas. El gradiente de las relaciones Mg/Ca medidas en estos experimentos es acorde con las obtenidas en otros estudios en los que se han analizado ostrácodos provenientes de aguas con relaciones Mg/Ca muy superiores. De hecho, valores entre 0.01 a 0.04 son típicos entre los estudios realizados hasta la fecha, ya sea que los organismos hayan crecido en aguas diluidas con relaciones Mg/Ca bajas (<1 como en el experimento de campo y el estudio de Wansard y Mezquita, 2001) o salinas con relaciones Mg/Ca altas (>305 como en los estudios de Chivas *et al.*, 1986 y De Deckker *et al.*, 1999). Por lo tanto, las relaciones Mg/Ca del agua no pueden ser un factor determinante en la misma relación en las valvas de ostrácodos. En ninguno de nuestros experimentos una variación del 50% en las relaciones Mg/Ca del agua tuvieron efecto alguno sobre la composición química de las valvas.

El modelo propuesto por Palacios Fest (1996) sugiere que el organismo ejerce un control metabólico significativo en la captura de elementos traza en función de



parámetros tales como la temperatura y la salinidad, sin importar la concentración de estos en el agua de donde los incorpora. Por lo que el equilibrio termodinámico no es un factor esencial para este cálculo. Xia *et al.* (1997) y De Deckker *et al.* (1999) han cuestionado la posibilidad de estimar temperaturas por otro medio que no sea el equilibrio termodinámico, sin embargo, sus esfuerzos no han generado resultados satisfactorios. El modelo de regresión que proponemos para los ostrácodos es (ecuación 1):

$$\text{Mg}/\text{Ca}_v = \beta_0 + \beta_1(T) \quad 1$$

donde  $\beta_0$  es la constante para la especie,  $\beta_1$  es el coeficiente para la temperatura a la que la especie responde y T es la temperatura en °C. Re-ordenando esta ecuación para resolver para temperatura, tenemos que la regresión toma la forma (ecuación 2):

$$T (\text{°C}) = (\text{Mg}/\text{Ca}_v - \beta_0)/\beta_1 \quad 2$$

en la que para *L. staplini*  $\beta_0 = -0.0035$  y  $\beta_1 = 0.00089$  que es significativamente diferente de cero ( $p < 0.001$ ) y para *C. vidua*  $\beta_0 = 0.0103$  y  $\beta_1 = 0.00066$  ( $p < 0.001$ ).

Palacios Fest (1996) y Palacios Fest y Dettman (2001) explican en detalle los procedimientos de las regresiones para *L. staplini* y *C. vidua*. En el presente documento queremos enfocarnos en la viabilidad del modelo propuesto como una alternativa para reconstruir los climas del pasado sin necesidad de apelar al modelo termodinámico que por añadidura inserta una variable adicional en el registro geológico. Es decir, dado que la composición química del agua de lagos hoy extintos es desconocida, los coeficientes de partición ( $K_p$ ) son inaplicables.

Algunos estudios de laboratorio sugieren la fuerte influencia de la relación Mg/Ca en el agua sobre las valvas de ostrácodos (Engstrom y Nelson, 1991; De Deckker *et al.*, 1999). Sin embargo, las condiciones extremas de cultivo en las que los organismos han sido sometidos a inanición y la eliminación de cualquier fuente no acuática de Mg puede haber contribuido a la respuesta de los organismos.

A la fecha se desconoce la respuesta que estos animales tienen ante el aprovisionamiento calibrado de fuentes de Mg ya sea por alimentos o agua. De Deckker *et al.*

(1999) sugieren que las valvas pueden responder a la composición química del agua de diferente manera dentro del amplio espectro del Mg/Ca de la misma. Estos autores sugieren que cuando las relaciones Mg/Ca son bajas las valvas se enriquecen en Mg por arriba del coeficiente de partición ( $K_p$ ) predecible, que cuando estas relaciones son altas el Mg es excluido, pero que en el gradiente intermedio (posiblemente entre 1 y 20) el Mg/Ca de las valvas sigue un  $K_p$  simple. Nuestra opinión difiere de la anterior por dos razones: 1) existen aún muchas preguntas acerca de la respuesta de los ostrácodos en sistemas naturales y es posible que los patrones observados por De Deckker *et al.* (1999) no sean aplicables a todas las especies de ostrácodos; 2) la biología puede también jugar un papel crítico en la forma en que diferentes especies responden a la química del agua. Rosenthal y Katz (1989) demostraron que dos especies de gasterópodos dulceacuícolas del género *Melanopsis* controlan las relaciones Mg/Ca en sus fluidos corporales independientemente de la composición química del agua. Por el contrario, la incorporación de Sr y Ba no fue controlada por el metabolismo y siguió un  $K_p$  simple. Muchos taxa de moluscos parecen ser capaces de controlar Ca y Mg en sus cuerpos (Wilbur y Saleuddin, 1983).

Por lo tanto, sugerimos que los modelos de regresión propuestos inicialmente por Palacios Fest (1996) y repetidos por Palacios Fest y Dettman (2001) son una alternativa viable para reconstruir paleoclimas utilizando las relaciones Mg/Ca de *L. staplini* y *C. vidua*, respectivamente. Nuestra sugerencia es que este termómetro sea utilizado en sistemas acuáticos similares a los de nuestros experimentos con amplios márgenes de composición química (aunque esto debe aún ser verificado).

## Conclusiones

1. La temperatura es el factor dominante en el control de las relaciones Mg/Ca en las valvas de los ostrácodos *L. staplini* y *C. vidua*. Estas relaciones pueden ser usadas como proxy (estimaciones aproximadas) térmicas en cuerpos de agua con un amplio espectro Mg/Ca como los observados en nuestros experimentos.
2. Debemos ser muy cautelosos al usar coeficientes de partición ( $K_p$ ) para Mg en calcitas de origen biomineral.

Esto es particularmente importante cuando los Kp para las relaciones Mg/Ca son casi dos órdenes de magnitud mayores que los observados en este estudio.

3. Se requiere un exhaustivo programa de investigación de laboratorio y de campo para determinar el significado de las relaciones Mg/Ca en las poblaciones de ostrácodos en ambientes naturales. Lo ideal será realizar simultáneamente experimentos de laboratorio y campo sobre la misma especie. En el primer caso se sugiere no someter a los organismos a condiciones estresantes que alterarían la respuesta de incorporación de Mg a las valvas.

### Agradecimientos

El presente trabajo es una contribución por invitación en homenaje al doctor Agustín Ayala-Castañares, el autor principal se siente muy honrado de haber contado con su apoyo durante los primeros años de su formación académica. Los experimentos de campo y laboratorio fueron conducidos en el Laboratorio de Paleolimnología del Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona y los análisis por espectrometría de masas se ejecutaron en el Laboratorio de Elementos Traza e Isótopos Estables del mismo.

### Referencias

- Anderson, D. H., S. Darring and A. C. Benke. 1998. Growth of crustacean meiofauna in a forested floodplain swamp: implications for biomass turnover. *Journal of North American Benthological Society*, vol. 17, p. 21-36.
- Cadot, H. M., R. L. Kaesler and W. R. Schmus. 1975. Applications of the electron microprobe analyzer to the study of the ostracode carapace, in Swain, F., ed. *Biology and Paleobiology of Ostracoda*. *Bulletin of American Paleontology*, vol. 65, no. 282, p. 577-585.
- Clarke, A. N. and W. C. Wheeler. 1922. The inorganic constituents of marine invertebrates, U.S. Geological Survey Professional Paper, vol. 124, p. 1-62.
- Chave, K. E. 1954. Aspects of the biogeochemistry of magnesium, Part I, Calcareous marine organisms. *Journal of Geology*, vol. 62, p. 266-283.
- Chivas, A. ., 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. E., ed. Applications of Ostracoda*, Houston, University of Houston, Geosciences, p. 238-249.
- Chivas, A. R., P. De Deckker and J. M. G. Shelley. 1986. Magnesium content of non-marine ostracod valves: a new paleosalinometer and paleothermometer. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 54, p. 43-61.
- Cohen, A. S., M. R. Palacios-Fest, R. M. Negrini, P. R. Wigand and D. B. Erbes. 2000. A paleoclimate record for the past 250,000 years from Summer Lake, Oregon, USA: II. Sedimentology, paleontology and geochemistry. *Journal of Paleolimnology*, vol. 24, p. 151-182.
- De Deckker, P., A. R. Chivas and J. M. G. Shelley. 1999. Uptake of Mg and Sr in the euryhaline ostracod *Cyprideis* determined from in vitro experiments. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 148, p. 105-116.
- De Legarra, I., E. S. Andreu-Moliner, R. Montoro and A. Núñez-Cachaza. 1985. Influence of ambient temperature on the concentrations of calcium, magnesium, sodium and potassium in the hemolymph and urine of *Procambarus clarkii*. *Revista Española de Fisiología*, vol. 41, no. 3, p. 325-330.
- Delorme, L. D. 1989. Methods in Quaternary ecology núm. 7: Freshwater ostracodes. *Geoscience Canada*, vol. 16, p. 85-90.
- Dodd, J. R. 1965. Environmental control of strontium and magnesium in *Mytilus*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 29, p. 385-398.
- Dodd, J. R. 1967. Magnesium and strontium in calcareous skeletons: A review. *Journal of Paleontology*, vol. 41, p. 1313-1329.
- Emiliani, C. 1955. Pleistocene temperatures. *Journal of Geology*, vol. 63, p. 538-578.
- Engstrom, D. R. and S. Nelson. 1991. Paleosalinity from trace metals in fossil ostracodes compared with observational records at Devils Lake, North Dakota, USA. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, vol. 83, p. 295-312.
- Fassbinder, K. 1912. Beiträge zur Kenntnis der Süsswaasserostrocoden. *Zool. Jahrb. Abt. Anat. Ont. Tiere.*, vol. 32, p. 533-576.
- Fritz, P., T. W. Anderson and C. F. M. Lewis. 1975. Late-Quaternary climatic trends and history of Lake Erie from stable isotope studies. *Science*, vol. 190, p. 267-269.
- Given, R. K. y B. H. Wilkinson. 1985. Kinetic control of morphology, composition and mineralogy of abiotic sedimentary carbonates. *Journal of Sedimentary Petrology*, vol. 55, no. 1, p. 109-119.
- Kesling, R. V. 1951. The morphology of ostracode moult stages. *Illinois Biological Monographs*, vol. 21, p. 1-324.

- Mann, H. and U. Pieplow. 1938. Der Kalkhaushalt bei der Hautung der Krebse. Sitzungsberichte der Gesellschaft Naturforschender Freunde der Berlin, Jahrgang, vol. 1, p. 1-17.
- Morse, J. W. and M. L. Bender. 1990. Partition coefficients in calcite: examination of factors influencing the validity of experimental results and their application to natural systems. *Chemical Geology*, vol. 82, p. 265-277.
- Palacios-Fest, M. R. 1997. Paleoenvironmental reconstruction of human activity in Central Arizona using valve chemistry of Hohokam canal ostracodes. *Geoarchaeology*, vol. 9, p. 1-29.
- Palacios Fest, M. R. 1996. Geoquímica de la concha de ostrácodos (*Limnocythere staplini*): Un método de regresión múltiple como indicador paleoclimático. *GEOS*, vol. 16, no. 3, p. 130-136.
- Palacios Fest, M. R. 1994. Trace element shell chemistry of continental ostracodes and the applicability of experimentally-derived multiple regression models to paleoenvironmental reconstructions in Southwestern North America, Tucson. University of Arizona, Department of Geosciences, disertación doctoral, 279 p. (inédita).
- Palacios Fest, M. R. y D. L. Dettman. 2001. Temperature controls monthly variation in ostracode valve Mg/Ca: *Cypridopsis vidua* from a small lake in Sonora, Mexico. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 65, no. 15, p. 2499-2507.
- Palacios Fest, M. R., A. L. Carreño, J. R. Ortega-Ramírez, and G. Alvarado-Valdez. 2002. A paleoenvironmental reconstruction of Laguna Babícora, Chihuahua, Mexico based on ostracode paleoecology and trace element valve chemistry. *Journal of Paleolimnology*, vol. 27, no. 2, p.185-206.
- Rosenthal, Y. and A. Katz. 1989. The applicability of trace elements in freshwater valves for paleochemical studies. *Chemical Geology*, vol. 78, p. 65-76.
- Taylor, L.C. 1992. The response of spring-dwelling ostracodes to intra-regional differences in groundwater chemistry associated with road salting in southern Ontario: A test using an urban-rural transect, Toronto. University of Toronto, tesis de maestría, 222 p.
- Turpen, J. B. and R. W. Angell. 1971. Aspects of molting and calcification in the ostracod *Heterocypris*. *Biological Bulletin*, vol. 140, p. 331-338.
- Urey, H. C. 1947. The thermodynamic properties of isotopic substances. *Journal of the Chemical Society*, vol. 152, p. 190-219.
- 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*, vol. 15, p. 237-245.
- Wansard, G., P. De Deckker and R. Juliá. 1998. Variability in ostracod partition coefficients D(Sr) and D(Mg): Implications for lacustrine paleoenvironmental reconstructions. *Chemical Geology*, vol. 146, p. 39-54.
- Wansard, G. and F. Mezquita. 2001. The response of ostracod shell chemistry to seasonal change in a Mediterranean freshwater spring environment. *Journal of Paleolimnology*, v. 25, p. 9-16.
- Wilbur, K. M. and A. S. M. Saleuddin. 1983. Valve formation, in Saleuddin, A. S. M. y Wilbur, K. M. eds. *The Mollusca-Physiology*, Part 1: New York, Academic Press, p. 235-287.
- Xia, J., E. Ito and D. R. Engstrom. 1997. Geochemistry of ostracode calcite. Part 2. The effects of water chemistry and seasonal temperature variation on *Candona rawsoni*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, v. 61, p. 383-391.

