



**Características geoquímicas y micropaleontológicas de las marismas
en el Estero de Urías, Golfo de California, México**

*Geochemical and micropalaeontological characteristics of saltmarshes
in the Estero de Urías coastal lagoon, Gulf of California, Mexico*

Cearreta, A. ⁽¹⁾; Machain-Castillo, M.L. ⁽²⁾; Ruiz-Fernández, A.C. ⁽³⁾; Sánchez-Cabeza, J.A. ⁽³⁾;
Serrato-De la Peña, J.L. ⁽³⁾; Flores-Verdugo, F. ⁽³⁾; Pérez-Bernal, L.H. ⁽³⁾

(1) Departamento de Geología, Facultad de Ciencia y Tecnología, Universidad del País Vasco UPV/EHU, Apartado 644,
48080 Bilbao, Spain. alejandro.cearreta@ehu.eus

(2) Unidad Académica de Procesos Oceánicos y Costeros, Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad
Nacional Autónoma de México, Circuito Exterior s/n, Ciudad Universitaria, 04510 Ciudad de México, D.F., México.

(3) Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Académica Mazatlán, Universidad Nacional
Autónoma de México, Calz. J. Montes Camarena s/n, Col. Playa Sur, 82040 Mazatlán, Sinaloa, México.

Resumen

Se analizaron la composición elemental de los sedimentos y la distribución y abundancia de microfósiles en dos zonas de marisma de la laguna costera Estero de Urías (Golfo de California, México) con el fin de determinar las características ambientales de este medio marino restringido. En los sedimentos se detectó un enriquecimiento por metales (en particular Cu, Ni, Pb y Zn) probablemente debido a la combustión de carburantes relacionada con las actividades del puerto y la estación termoeléctrica aledaña a la laguna. Los foraminíferos bentónicos y los ostrácodos mostraron una relación con la elevación topográfica sobre el nivel marino medio, con muy pocas especies constituyendo las asociaciones. No se observó una relación entre la contaminación de los sedimentos y la presencia o abundancia de individuos y caparazones en las muestras. Este enfoque combinado entre geoquímica y micropaleontología se considera adecuado para la identificación de posibles impactos humanos y variaciones en el nivel del mar a partir de secuencias sedimentarias históricas y holocenas en esta región costera.

Palabras clave: metales; microfósiles; marismas; laguna costera; Golfo de California.

Abstract

The elemental composition of sediments and the distribution and abundance of microfossils were analyzed in two saltmarsh areas of the Estero de Urías coastal lagoon (Gulf of California, Mexico) to determine the current



environmental characteristics of this restricted marine environment. Enrichment by metals (particularly Cu, Ni, Pb and Zn) was detected likely due to the combustion of fuels related to the harbour activities and the thermoelectric station adjacent to the coastal lagoon. Benthic foraminifera and ostracods showed a relationship with topographic elevation above mean sea level, with very few species constituting the assemblages. No relationship was observed between sediment pollution and the presence or abundance of individuals and tests. The combined approach between geochemistry and micropalaeontology is considered suitable for the identification of possible human impacts and sea-level variations from historical and Holocene sedimentary sequences of this coastal region.

Key words: metals; microfossils; saltmarshes; coastal lagoon; Gulf of California.

1. Introducción

En las regiones subtropicales, las marismas son el ecosistema costero más marginal sometido a la influencia marina y se localizan en la posición topográficamente más elevada posible bajo influencia mareal. Suelen ser de carácter hipersalino y pueden estar colonizadas por vegetación halófitas (Flores-Verdugo *et al.*, 2007).

Los sedimentos costeros son el resultado de la mezcla de materiales transportados desde el continente y desde el mar. Los materiales de origen terrígeno, suministrados por fuentes fluviales y eólicas, incluyen elementos metálicos que ocurren naturalmente en la corteza terrestre y que son movilizados por procesos naturales (p. ej., meteorización y erosión) o antropogénicos (p. ej., vertidos urbanos e industriales). En cambio, los sedimentos de origen marino contienen elementos abundantes en el agua de mar y que han sido depositados mediante precipitación de sales insolubles o adsorción sobre la superficie de las partículas suspendidas en la columna de agua. El estudio de la composición química de los sedimentos proporciona valiosa información acerca de las condiciones actuales en el ambiente de depósito (p. ej., grado de contaminación) y ayuda a identificar su procedencia. Elementos como Al, Li y Ti son utilizados como indicadores de origen detrítico y como elementos de referencia para normalizar las concentraciones de metales contaminantes (Loring y Rantala, 1992). Por otro lado, elementos como Cl, Na, Ca y Br son abundantes en el medio marino

(López-Buendía *et al.*, 1999; Leri y Myneni, 2011) y se emplean como indicadores de procedencia y de transición entre ambientes sedimentarios.

Estudios previos en el Estero de Urías han mostrado elevadas concentraciones de Cd, Pb, Zn y Cu (Soto-Jiménez y Páez-Osuna, 2001; Ruiz-Fernández *et al.*, 2019), así como de Hg (Jara-Marini *et al.*, 2008a y b; Ruiz-Fernández *et al.*, 2009; Raygoza-Viera *et al.*, 2014) que han sido asociados con vertidos puntuales de desechos urbanos e industriales, así como producto de la actividad portuaria.

Los foraminíferos son protistas que segregan o construyen un caparazón mineralizado capaz de preservarse en el registro sedimentario. Presentan una elevada sensibilidad a determinados parámetros ambientales (salinidad, temperatura, elevación topográfica o tipo de sustrato) y son utilizados como herramientas para caracterizar o reconstruir las condiciones ambientales presentes y pretéritas en medios marinos. Estudios previos en la costa pacífica mexicana han mostrado que determinadas asociaciones de foraminíferos caracterizan los diferentes ecosistemas costeros. Así, Walton (1955) analizó las asociaciones vivas y totales (foraminíferos vivos y muertos juntos) de la Bahía de Todos Santos y del Estero de Punta Banda (Baja California). Stewart (1958) estudió los sedimentos de la Laguna de San Miguel (Baja California) concluyendo que los ambientes de marisma apenas contienen foraminíferos. Más tarde, Bandy (1963) realizó una revisión de los foraminíferos presentes

en ambientes parálidos del Golfo de California señalando que las especies dominantes y restringidas a las marismas son exclusivamente de naturaleza aglutinante. En la Bahía de Topolobampo (Sinaloa), Phleger y Ayala-Castaños (1969) reportaron una abundancia muy variable de las asociaciones vivas entre puntos de muestreo. Alvarado-Zambrano (2012) estudió la posible incorporación de metales en los caparazones de *Ammonia tepida* (Cushman) en el Estero de Urías mezclando individuos vivos y caparazones muertos (asociación total) pero no obtuvo resultados determinantes. Finalmente, Ruiz-Fernández *et al.* (2016) encontraron muy pocos foraminíferos en el registro sedimentario reciente del Estero de Urías debido a la destrucción post-mortem de los caparazones aglutinantes.

Los ostrácodos son animales artrópodos acuáticos que segregan un caparazón bivalvo de carbonato de calcio. Son utilizados como indicadores ecológicos debido a su especificidad en relación a algunas variables ambientales, y la preservación de sus valvas en el registro sedimentario permite la reconstrucción del ambiente a través del tiempo. Su capacidad de habitar medios dulceacuícolas, salobres y marinos los hace particularmente útiles en estudios de ambientes costeros (Boomer y Eisenhauer, 2002). Los ostrácodos en el Pacífico mexicano han sido poco estudiados. Machain-Castillo y Gío-Argáez (1993) hicieron una revisión de este grupo reportando casi 350 especies (muchas de ellas en nomenclatura abierta). Las faunas estuarinas sólo fueron estudiadas por Benson (1959) en los esteros de Punta Banda y del río San Miguel, por Benson y Kaesler (1963) para el Estero de Tastiota y la laguna La Cruz (N del Golfo de California), y por McKenzie y Swain (1967) para el complejo de lagunas Scammon (Manuela, Guerrero Negro y Ojo de Liebre).

En este trabajo se evalúan las características geoquímicas y la distribución y abundancia de las especies de foraminíferos y ostrácodos presentes en los sedimentos superficiales de dos marismas del Estero de Urías (Fig. 1), en función de la contaminación antropogénica

presente y de su posición topográfica en este medio litoral parcialmente antropizado. Esta información será de utilidad en la interpretación paleoambiental del registro sedimentario y de los procesos naturales y antrópicos que han operado en esta zona costera durante el Holoceno. Hasta el momento no se ha publicado ningún trabajo previo detallado combinando micropaleontología y geoquímica en las marismas actuales de la costa del Pacífico de México.

2. Área de estudio

El Estero de Urías (23°11' N, 106°22' W) se sitúa en la costa suroriental del Golfo de California, México, adyacente a la ciudad de Mazatlán (~500.000 habitantes) (Fig. 1). Es una laguna costera de barrera arenosa formada durante el ascenso marino holoceno (Curry *et al.*, 1969) con una bocana permanentemente abierta al Océano Pacífico y que en la actualidad no recibe un aporte fluvial continuo de agua dulce. Su forma inicial es alargada y perpendicular a la costa doblando posteriormente hacia el sur con su eje mayor paralelo al litoral, tiene una longitud total de unos 17 km (Jara-Marini *et al.*, 2008a) y una anchura media inferior a 1 km. Su lámina de agua presenta 800 ha de superficie en pleamar con profundidades de <1 m a 12 m en el canal de navegación que se draga cada 2 años (Montaño-Ley *et al.*, 2008) y está gobernado por las mareas que son semidiurnas, con máximas de 1,8 m y mínimas de 0,3 m.

El clima del área es de tipo subtropical subhúmedo cálido (García, 1973) con una temperatura media mensual de 25°C (máxima de 29,7°C y mínima de 18,8°C), una marcada temporada de lluvias desde finales de junio hasta octubre, asociada a tormentas tropicales y huracanes, y una temporada de estiío desde noviembre a junio. La precipitación media anual es de 800 mm y la tasa de evaporación media anual de 1.100 mm.

La salinidad media ha sido estimada en 34 ups, con un máximo durante la estación

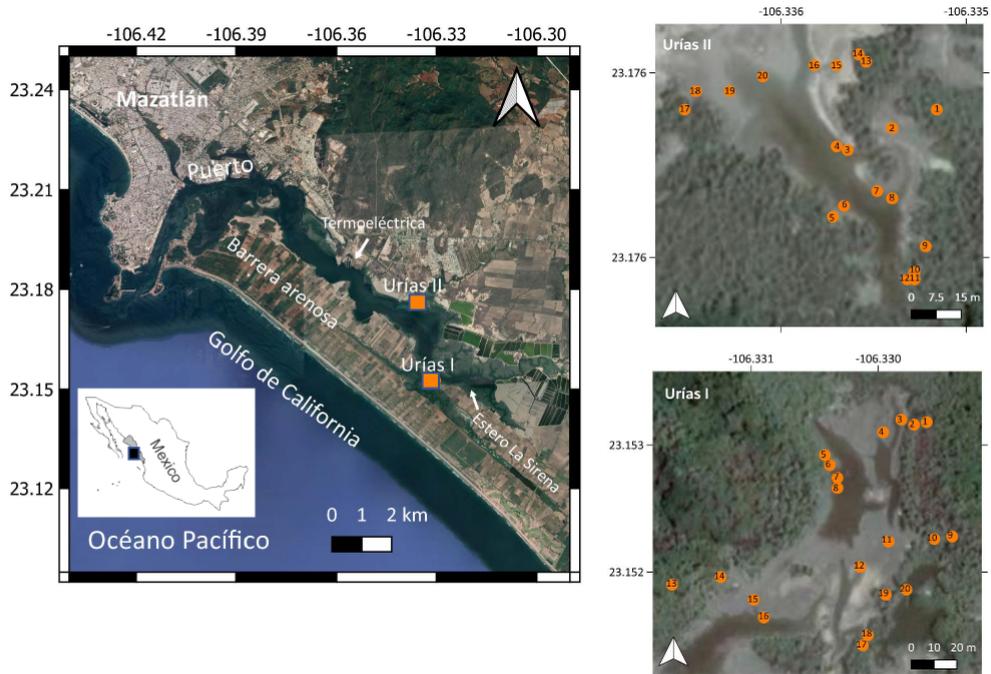


Figura 1: Localización geográfica de la laguna costera Estero de Urías (Golfo de California, México), las marismas seleccionadas (cuadrados naranjas) y las muestras superficiales recogidas en cada marisma (círculos naranjas).

Figure 1: Geographical location of the Estero de Urías coastal lagoon (Gulf of California, Mexico), selected saltmarshes (orange squares) and surface samples collected from each saltmarsh (orange circles).

seca (39 ups) y un mínimo durante la estación lluviosa (31 ups) (Cardoso-Mohedano *et al.*, 2015). La parte más interna de esta laguna costera está bordeada por una franja de manglares con tres especies (*Rhizophora mangle* o mangle rojo, *Laguncularia racemosa* o mangle blanco y *Avicennia germinans* o mangle negro) distribuidas sucesivamente en una estrecha franja con alturas inferiores a los 7 m y cubriendo una superficie total de 627,4 ha. Tierra adentro aparece secundado por manglares tipo matorral de *A. germinans* inferiores a 1,5 m de altura debido al estrés salino, en una extensión total de 700 ha. Estos manglares son seguidos topográficamente por una estrecha marisma hipersalina (hasta >80 ups) de 370 ha sin vegetación o con escasa vegetación halófila de *Salicornia* spp. y *Batis maritima*, hasta bordear con los ambientes terrestres caracterizados por relictos de selva secundaria baja caducifolia o cultivos de palma de coco y mango. En el extremo sur (Estero La Sirena) se localizan los manglares

mejor desarrollados en estructura y densidad con alturas superiores a los 10 m distribuidos en canales mareales (Flores-Verdugo *et al.*, 2007; Páez-Osuna *et al.*, 2016).

Dentro del sistema lagunar se ubica una importante flota pesquera de camarón y atún junto con una infraestructura industrial portuaria y una estación termoeléctrica (Fig. 1). El sistema recibe las aguas domésticas no tratadas de asentamientos humanos irregulares, actividades agrícolas, así como de la industria pesquera y estanques camaronícolas. Todo ello ha provocado su transformación física con estructuras urbanas, industriales y portuarias (Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, 2003; Aldana-Gutiérrez *et al.*, 2021), una severa reducción de las superficies de manglar (Ruiz-Luna y Berlanga-Robles, 2003) y el enriquecimiento de sus aguas, sedimentos y biota con metales pesados (Soto-Jiménez y Páez-Osuna, 2001; Jara-Marini *et al.*, 2008a, 2012; Ruiz-Fernández *et al.*, 2018) y contaminantes

orgánicos (Jaward *et al.*, 2012; Raygoza-Viera *et al.*, 2014), particularmente desde los años 1980s (Ontiveros-Cuadras *et al.*, 2019).

3. Metodología

3.1. Muestreo de campo

En mayo 2012 se estudiaron dos marismas (Urías I y II) ubicadas en la sección más interna de la laguna costera y rodeadas por vastas extensiones de manglar. Los puntos de muestreo fueron elegidos en función de su accesibilidad y localización topográfica, alejados de caminos para evitar una previa perturbación física del medio (Fig. 1).

Se recogieron 40 muestras de sedimento superficial (20 en cada marisma, 2 réplicas por muestra) con espátulas de plástico en el interior de un aro de PVC de 10 cm de diámetro y 1 cm de profundidad (total ~80 cm³ de sedimento). Las muestras para el análisis micropaleontológico fueron vertidas en un recipiente con etanol para preservar el protoplasma de los individuos vivos. Las réplicas para los análisis geoquímicos se introdujeron en bolsas de plástico con cierre hermético. Se determinó la posición de cada punto de muestreo mediante una estación total Topcon GTS-105N-1, con una resolución de 1 mm. La elevación de los puntos de muestreo está referida al nivel 0 m del puerto de Mazatlán.

3.2. Análisis de laboratorio

Las muestras de sedimento utilizadas para los estudios geoquímicos se congelaron, secaron por liofilización (equipo Freezone Labconco 7754042) y se molieron en morteros de porcelana (excepto las alícuotas para la determinación del tamaño de grano). Para el análisis de composición elemental, se colocaron alícuotas de 4 g de sedimento molido en celdas de polietileno con fondo de película Prolene®. Las muestras se compactaron manualmente utilizando una barra redondeada de teflón. El análisis se realizó mediante espectrometría

por fluorescencia de rayos X (XRF, sus siglas en inglés) con un sistema Spectro® Xepos-3. La distribución del tamaño de grano se determinó por el método de dispersión de rayos láser con un analizador Malvern® Mastersizer en muestras de sedimento previamente tratadas con H₂O₂ al 30% para eliminar la materia orgánica. Las concentraciones de materia orgánica fácilmente oxidable (MO) y de carbonatos (como CaCO₃) se determinaron por métodos volumétricos, de acuerdo con Loring y Rantala (1992) y Stuardo y Villarroel (1976), respectivamente. El control de calidad incluyó la determinación de blancos analíticos y la evaluación de la exactitud y reproducibilidad de los métodos mediante el análisis de réplicas de materiales de referencia (n=6; IAEA-158, IAEA-405 y IAEA-433 para XRF; Malvern QAS3002 para tamaño de grano). Los resultados se encontraron dentro del intervalo de valores certificados correspondientes ($\pm 2 \sigma$). Los coeficientes de variación obtenidos fueron: <8% para los análisis de XRF, MO y CaCO₃, y <5% para el tamaño de grano.

Se realizó un análisis de varianza (ANOVA) de una vía (Tukey HSD test; $p < 0,05$) para evaluar posibles diferencias en los parámetros geoquímicos entre las estaciones de muestreo; un análisis de correlación de Pearson ($p < 0,05$) para determinar el grado de asociación entre variables; y un análisis de factores (AF) para identificar los grupos de variables geoquímicas que mejor explican la distribución de las muestras y su agrupación. Los análisis estadísticos se realizaron con el software Estadística 10 de StatsSoft Inc.

En el análisis micropaleontológico se utilizaron dos tamices con apertura de malla 2 mm (para recoger los fragmentos vegetales más grandes) y 63 micras, y cada muestra fue lavada con agua corriente para eliminar la fracción fina. El contenido arenoso fue vertido en un cuenco de porcelana al que se añadió una solución de Rosa de Bengala (Walton, 1952). Posteriormente la muestra fue concentrada en foraminíferos usando la técnica de flotación con tricloroetileno (Murray, 1979). Todos los caparazones presentes fueron recogidos y

estudiados con un microscopio binocular de luz reflejada Nikon SMZ 1500. En total, fueron estudiados unos 12.000 foraminíferos (más de 6.600 caparazones muertos y casi 5.300 individuos vivos) y se identificaron 9 especies. La presencia, abundancia y dominancia de las diferentes especies se usaron para la interpretación ambiental. Cuando fue posible, se extrajeron los caparazones e individuos presentes en cada muestra hasta obtener una cantidad superior a 300 ejemplares por cada asociación (muerta y viva). Cuando los foraminíferos fueron escasos, se extrajeron todos los caparazones e individuos disponibles en las muestras. Únicamente las asociaciones con más de 100 individuos o caparazones fueron consideradas como representativas y utilizadas para realizar análisis estadísticos (Murray, 2006).

Una submuestra de 7 g de sedimento seco para el análisis de los ostrácodos fue lavada con agua corriente a través de un tamiz de malla de 63 micras. El residuo seco se revisó al microscopio estereoscópico y se extrajeron todos los caparazones y valvas presentes en la muestra. Debido al pequeño número de ostrácodos presentes, no se distinguió entre individuos vivos y muertos por lo que los resultados obtenidos corresponden a la asociación total.

4. Resultados

4.1. Caracterización geoquímica de los sedimentos

La composición elemental, distribución de tamaño de grano y altura topográfica de las muestras se presentan en la Tabla 1, la Figura 2 y la Tabla 1S (material suplementario). De acuerdo al análisis de ANOVA ($p < 0,05$), no existen diferencias significativas entre las marismas Urías I y Urías II respecto a las concentraciones de Al, Ti, Rb, Na, Ca, Sr, P, As, Co, Cr, Ni y V, y el porcentaje de arcillas. Sin embargo, Urías I presentó los valores más altos de porcentajes de limos, C_{org} y $CaCO_3$, así como

de Br, Cl, Cu, Fe, Mn, Pb y Zn. En Urías II se encontraron los valores más elevados de altitud, porcentaje de arenas y concentraciones de K, Si y Zr.

Se realizó un análisis de factores (AF) con los datos geoquímicos de las muestras de ambas marismas, y dos factores explican el 69% de su variabilidad (Tabla 1). Las variables significativas del factor 1 (procedencia) explican el 38% de la variabilidad e incluyen las concentraciones de Al, Ti, K, Si, Rb, P y Cr con signo positivo (indicadores de procedencia terrestre) y de Na, Br y Cl con signo negativo (indicadores de procedencia o contenido en agua marina). El factor 2 (contaminación) explica el 31% de la variabilidad e incluye las concentraciones de Ni, Cu, Pb, Zn, Mn y Fe con signo positivo, así como el porcentaje de arenas y la concentración de Zr con signo negativo (efecto del tamaño de grano). Los metales tienden a acumularse en los sedimentos finos (Loring y Rantala, 1992) y, por tanto, sus concentraciones se reducen con el aumento de arenas, en las cuales se encuentra el mineral pesado zircón (Salminen, 2005). La altitud no es una variable significativa en ninguno de los dos factores descritos y sólo se correlacionó positiva y significativamente con las concentraciones de As y V en la marisma Urías I, así como con Zr en Urías II, lo cual indica que una parte de estos elementos ha sido transportada desde el continente.

La disposición de los puntos de muestreo en el plano cartesiano (Fig. 2a y b), como consecuencia de su enriquecimiento en determinados elementos químicos, indica que las muestras de Urías I (muestras 1-20, ubicadas mayoritariamente en el cuadrante superior izquierdo) tienen un carácter más marino que las de Urías II (muestras 21-40, predominantemente situadas en los cuadrantes superior e inferior derecho) que presentan características más terrígenas.

El factor de enriquecimiento (FE) permite comparar las concentraciones de metales en las muestras superficiales con sus concentraciones naturales (CN) en cada marisma. Ambas concentraciones se normalizaron por

Tabla 1: Resultados del análisis de factores (AF) de la composición elemental de los sedimentos superficiales de las marismas de la laguna costera Estero de Urías (Golfo de California, México).

Table 1: Results of the elemental composition factor analysis (FA) of surface sediments from the saltmarshes of the Estero de Urías coastal lagoon (Gulf of California, Mexico).

Variable	Cargas de factores (rotación Varimax) (Las variables significativas tienen cargas >0,65)		
	Factor 1	Factor 2	Comunalidad
Ti	0,94	0,08	0,89
Si	0,93	-0,29	0,95
K	0,93	-0,14	0,88
Cl	-0,91	0,03	0,83
Rb	0,86	0,20	0,78
P	0,86	-0,02	0,74
Al	0,86	0,23	0,79
Na	-0,81	-0,08	0,67
Br	-0,74	0,42	0,72
Cr	0,73	0,49	0,77
Co	0,52	0,22	0,32
Zn	0,09	0,93	0,87
Cu	-0,22	0,91	0,88
Pb	0,16	0,86	0,76
Fe	0,35	0,84	0,83
Mn	0,31	0,75	0,66
Ni	0,01	0,73	0,53
Arena	0,26	-0,69	0,55
Zr	0,62	-0,67	0,84
CO ₃	-0,47	0,63	0,62
C _{org}	-0,53	0,61	0,65
As	0,08	0,58	0,34
V	0,15	0,47	0,24
Altitud	0,42	-0,47	0,39
Varianza	9,13	7,35	16,48
% Var	0,38	0,31	0,69

la concentración de Al para compensar la influencia de cambios en la mineralogía y tamaño de grano de las muestras (Loring y Rantala, 1992). Las CN fueron determinadas a partir del promedio de las concentraciones de metales en sedimentos antiguos (>100 años) obtenidas de un testigo sedimentario recolectado en cada una de las zonas de muestreo y fechado mediante ²¹⁰Pb (Ruiz-Fernández *et al.*, 2016). Las CN de los elementos analizados son

generalmente más altas en la marisma Urías I, excepto para los elementos detríticos Al, Si y Rb que son más elevadas en Urías II (marisma con mayor altitud e influencia terrígena). De acuerdo a los criterios de Sutherland (2000), los sedimentos en Urías I muestran signos de contaminación moderada (2<FE<5) por V y Ni; en tanto que Urías II presentó contaminación significativa (5<FE<20) por Ni y moderada por Co, Cu, Pb, V y Zn.

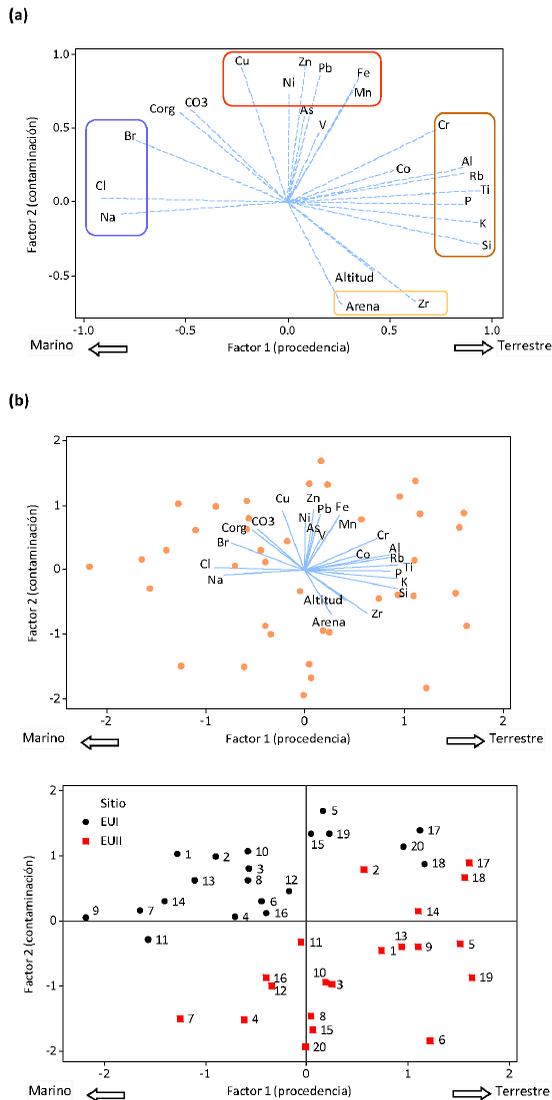


Figura 2: (a) Gráfico de cargas del análisis de factores de la composición elemental en sedimentos superficiales de las marismas del Estero de Urías (Golfo de California, México); (b) Gráficos de doble proyección de la distribución de las muestras superficiales del Estero de Urías con base a su composición elemental.

Figure 2: (a) Plot of the loadings from the factor analysis for the elemental composition in surface sediments of the saltmarshes from the Estero de Urías coastal lagoon (Gulf of California, Mexico); (b) Biplots of the distribution of surface samples in the Estero de Urías coastal lagoon based on their elemental composition.

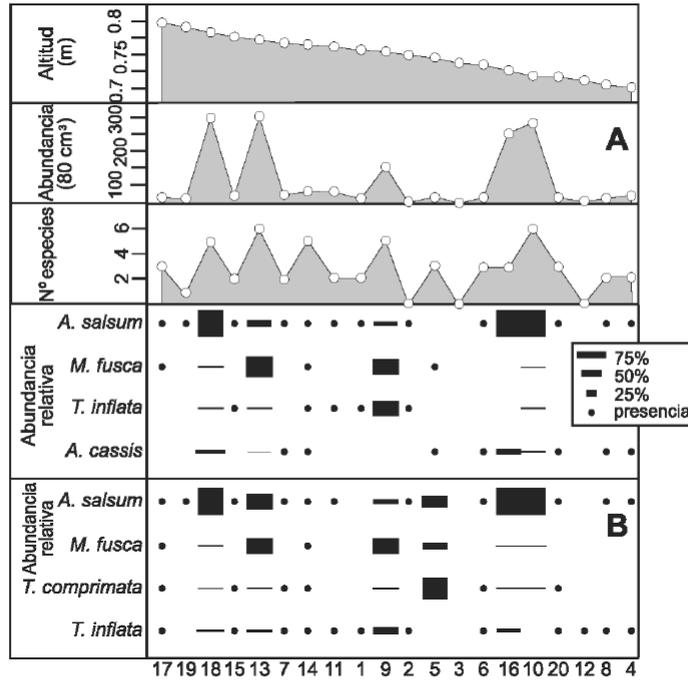
4.2. Contenido micropaleontológico

La abundancia de las asociaciones vivas de foraminíferos fue muy variable entre las estaciones de muestreo (rango 0-476 individuos/80 cm³, media 132) (Tabla 2, Fig. 3). Los individuos vivos fueron mucho más abundantes en Urías II (media 189), que presenta una posición topográfica algo más elevada sobre el nivel marino que Urías I. Se encontraron 8 especies vivas, aunque el máximo número de especies en cada punto de muestreo fue 6, con una menor diversidad específica en Urías II (media 2). Las formas más abundantes en las asociaciones vivas de Urías I fueron *Ammotium salsum* (Cushman y Brönnimann) (59%), *Miliammina fusca* (Brady) (22%), *Trochammina inflata* (Montagu) (9%) y *Ammotium cassis* (Parker) (5%), mientras que las asociaciones vivas de Urías II estaban dominadas sólo por *A. salsum* (90%) y *A. cassis* (9%). Estas asociaciones vivas estuvieron exclusivamente compuestas por especies de caparazón aglutinante.

En las asociaciones muertas se encontraron asimismo 8 especies. La forma *Entzia macrescens* (Brady) apareció muy esporádicamente sólo en Urías I, así como las especies calcáreas *A. tepida* y *Criboelphidium gunteri* (Cole) cuya escasa presencia sugiere su carácter alóctono en este ambiente de marisma (Tabla 2). Las asociaciones muertas también estuvieron exclusivamente dominadas por especies aglutinantes, cuyas formas mayoritarias fueron *A. salsum* (59%), *M. fusca* (20%), *Tiphotrecha comprimata* (Cushman y Brönnimann) (12%) y *T. inflata* (6%) en la marisma Urías I. En Urías II, en cambio, las especies mayoritarias fueron *A. salsum* (72%), *M. fusca* (21%) y *A. cassis* (5%).

Las asociaciones vivas y muertas fueron muy similares entre sí en las dos marismas. La comparación de ambas asociaciones para cada muestra utilizando el índice de Rogers (1976) indica una elevada similitud en Urías I y Urías II (83% en ambos casos). Las principales diferencias fueron la presencia más abundante de *A. cassis* en las asociaciones vivas que en

Urias I marisma



Urias II marisma

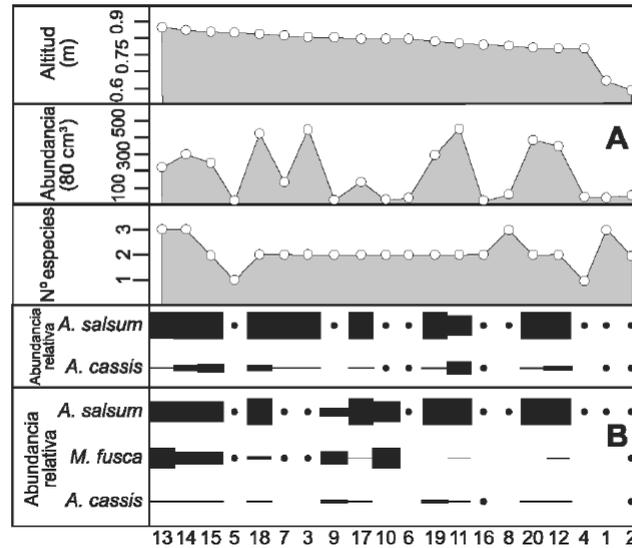


Figura 3: Abundancia absoluta (80 cm³), número de especies, y distribución y abundancia relativa de las especies dominantes de foraminíferos bentónicos (A: asociaciones vivas, B: asociaciones muertas) en relación a la posición topográfica de las muestras superficiales en las marismas de la laguna costera Estero de Urias (Golfo de California, México). El círculo negro indica la presencia de esa especie en una asociación de foraminíferos con <100 individuos o caparazones.

Figure 3: Absolute abundance (80 cm³), number of species, and distribution and relative abundance of the dominant species of benthic foraminifera (A: living assemblages, B: dead assemblages) in relation to the topographic position of surface samples from the saltmarshes of the Estero de Urias coastal lagoon (Gulf of California, Mexico). The black circle indicates the presence of this species in a foraminiferal assemblage with <100 individuals or tests.

Tabla 2: Abundancia relativa (%) de las especies de foraminíferos bentónicos, resultados del análisis micropaleontológico de sus asociaciones vivas y muertas, y abundancia absoluta de la especie *C. castus* (asociación total de ostrácodos) en las muestras superficiales recogidas en las marismas de la laguna costera Estero de Urías (Golfo de California, México). El asterisco indica la presencia de la especie en una asociación de foraminíferos con <100 individuos o caparazones.

Muestra	<i>Ammonia tepida</i>	<i>Ammotium cassisi</i>	<i>Ammotium salsum</i>	<i>Arenoparrella mexicana</i>	<i>Criboelphidium gunteri</i>	<i>Entzia macrescens</i>	<i>Miliammina fusca</i>	<i>Tiphotocha con-primata</i>	<i>Trochammina inflata</i>	Nº individuos/caparazones	Nº especies	% aglutinantes	% hialinos	%Similitud V/M	<i>Cyprideis castus</i>
Asociaciones vivas Urías I															
1			*					*	4	2	-	-			
2									0	0	-	-			
3									0	0	-	-			
4		*	*						33	2	-	-			
5		*		*			*		16	3	-	-			
6		*	*	*					15	3	-	-			
7		*	*						24	2	-	-			
8		*	*						12	2	-	-			
9			9,2	9,2			40,8	4,6	36,2	152	5	100	0		
10		3,9	86,4	1,1			1,4	3,6	3,6	279	6	100	0		
11			*					*	43	2	-	-			
12									0	0	-	-			
13		1,0	22,3	2,0			64,9	3,3	6,6	305	6	100	0		
14		*	*				*	*	*	57	5	-	-		
15			*					*	16	2	-	-			
16		11,7	87,9		0,4				240	3	99,6	0,4			
17			*	*			*		10	3	-	-			
18		8,5	89,5	0,7			1,0		0,3	295	5	100	0		
19			*						7	1	-	-			
20	*	*	*						15	3	-	-			
Total									1523						
Asociaciones muertas Urías I															
1								*	10	1	-	-	-		
2			*	*				*	11	3	-	-	-		
3									0	0	-	-	-		2
4		*	*					*	31	3	-	-	-		1
5		0,5	31,4	1,0			17,1	50,0		210	5	100	0	-	
6			*					*	*	61	3	-	-	-	
7		*	*					*	*	62	4	-	-	-	3
8			*					*	*	38	2	-	-	-	12
9			13,3	1,2		0,3	58,7	7,2	19,4	346	6	100	0	75,2	
10		1,3	92,1	1,3			0,5	3,2		316	5	100	0	92,5	
11			*					*	*	63	2	-	-	-	
12						*		*	*	2	2	-	-	-	4
13		3,8	44,4	0,6			41,4	5,9	3,9	338	6	100	0	72,5	
14			*	*			*	*	*	56	5	-	-	-	
15		*	*					*	*	90	4	-	-	-	
16		2,4	79,0	0,3			0,6	6,0	11,7	333	6	100	0	81,4	14
17			*			*	*	*	*	28	5	-	-	-	
18		2,8	92,8				0,3	0,9	3,1	318	5	100	0	92,9	
19			*					*	*	9	1	-	-	-	
20	*		*					*	*	22	4	-	-	-	
Total									2344						36

Table 2: Relative abundance (%) of benthic foraminiferal species, results of the micropalaeontological analysis of their live and dead assemblages, and absolute abundance of the species *C. castus* (total assemblage of ostracods) in surface samples collected from the saltmarshes of the Estero de Urias coastal lagoon (Gulf of California, Mexico). The asterisk indicates the presence of the species in a foraminiferal assemblage with <100 individuals or tests.

Muestra	<i>Ammonia tepida</i>	<i>Ammotium cassisi</i>	<i>Ammotium salsum</i>	<i>Arenoparrella mexicana</i>	<i>Criboelphidium gunteri</i>	<i>Entzia macrescens</i>	<i>Miliammina fusca</i>	<i>Tiphotrecha con-primata</i>	<i>Trochammina inflata</i>	Nº individuos/caprazones	Nº especies	% aglutinantes	% hialinos	%Similitud V/M	<i>Cyprideis castus</i>
Asociaciones vivas Urias II															
1		*	*				*			26	3	-	-		
2		*	*							39	2	-	-		
3		2,6	97,4							462	2	100	0		
4			*							35	1	-	-		
5			*							15	1	-	-		
6		*	*							38	2	-	-		
7		0,7	90,3							155	2	100	0		
8			*		*				*	71	3	-	-		
9			*				*			38	2	-	-		
10		*	*							24	2	-	-		
11		31,5	68,5							476	2	100	0		
12		12,9	87,1							350	2	100	0		
13		4,4	86,7				8,9			225	3	100	0		
14		6,0	91,7				2,3			300	3	100	0		
15		12,1	87,9							256	2	100	0		
16		*	*							17	2	-	-		
17		3,8	96,2							156	2	100	0		
18		5,8	94,2							428	2	100	0		
19		7,4	92,6							297	2	100	0		
20		7,6	92,4							368	2	100	0		
Total										3776					
Asociaciones muertas Urias II															
1			*		*		*	*		47	4	-	-	-	
2		*	*				*	*		50	4	-	-	-	
3			*		*		*			78	3	-	-	-	10
4	*		*							11	2	-	-	-	225
5			*				*			26	2	-	-	-	
6			*							32	1	-	-	-	
7			*				*			21	2	-	-	-	19
8			*							18	1	-	-	-	50
9		11,7	26,7	0,8			48,3	12,5		120	5	100	0	-	
10			40,6				56,9	2,5		202	3	100	0	-	
11		3,2	96,4				0,4			467	3	100	0	71,7	
12		6,7	91,3				2,0			357	3	100	0	93,8	4
13		3,0	45,6				50,6	0,8		395	4	100	0	57,5	
14		4,3	64,6				31,2			489	3	100	0	71,2	
15		3,9	67,9		0,3		26,5	1,5		389	5	99,7	0,3	71,8	21
16		*	*	*	*			*		33	5	-	-	-	
17		3,5	94,6				1,9			370	3	100	0	98,1	
18		2,4	86,4				10,8	0,3		369	4	100	0	88,8	
19	0,2	10,4	89,4							414	3	99,8	0,2	96,8	21
20	0,5	7,3	91,1		0,7			0,5		425	5	98,8	1,2	98,4	94
Total										4313					444

las muertas de Urías I y, alternativamente, de las especies *T. comprimata* en Urías I y *M. fusca* y *T. inflata* en Urías II cuya presencia es importante en las asociaciones muertas y muy escasa en las asociaciones vivas (Tabla 2).

Por otra parte, se encontraron ostrácodos en 6 muestras de Urías I y en 8 muestras de Urías II, siendo su abundancia mayor en la segunda marisma (Tabla 2). Se recuperaron un total de 480 valvas, variando entre 1 y 225 valvas por estación de muestreo. Todas las valvas pertenecen exclusivamente a la especie *Cyprideis castus* Benson e incluyen individuos adultos y juveniles. La marisma Urías II muestra mejores condiciones para la presencia de ostrácodos, al igual que ocurría para los foraminíferos.

5. Discusión

Los intervalos de concentración de los elementos indicadores de influencia terrígena (Al, K, Si, Ti, Rb) son similares en las dos marismas, indicando que ambas reciben el mismo tipo de material detrítico siliciclástico, lo que sugiere la misma procedencia. K, Si y Al son los elementos principales asociados a la fracción de los aluminosilicatos y están presentes en silicatos primarios como los feldespatos y en minerales secundarios como las arcillas (López *et al.*, 2006). Pese a la similitud de los intervalos, las concentraciones de K y Si son significativamente ($p < 0,05$) menores en Urías I que en Urías II. Las concentraciones de Si y K mostraron correlaciones positivas con la altitud, lo que sugiere que en esta última marisma existe una mayor influencia terrígena debido a su mayor altura con respecto al nivel medio del mar (Fig. 2).

No hay diferencia significativa en las concentraciones de As, Co, Cr, Ni y V entre las dos marismas muestreadas. De acuerdo al AF, estos metales están asociados al suministro de material terrígeno (Fig. 2) y el enriquecimiento por Ni y V en ambos lugares y por Co en Urías II tiene su origen en el transporte por escorrentía. El enriquecimiento por Cu,

Pb y Zn en Urías II probablemente se debe a precipitación atmosférica, independiente del aporte terrígeno o marino (Fig. 2). Estudios previos han reportado contaminación por metales en el Estero de Urías (Soto Jiménez y Páez-Osuna, 2001; Ruiz-Fernández *et al.*, 2009) que pudiera estar relacionada con la combustión de carburantes (p. ej., embarcaciones, estación termoeléctrica) o la incineración de desechos (p. ej., relleno sanitario) que liberan vapores contaminantes a la atmósfera. La agrupación de Cu, Pb y Zn con Fe y Mn (Fig. 2) está relacionada con la adsorción de los metales traza en oxihidróxidos de Fe y Mn, fenómeno común en sedimentos marinos (Calvert, 1976).

Ambas marismas mostraron un notable enriquecimiento por Na, Cl, Br con respecto a sus concentraciones naturales en los testigos sedimentarios perforados por Ruiz-Fernández *et al.* (2016), y sugiere un aumento de la influencia marina en estas zonas probablemente relacionada con el reciente incremento en el nivel del mar que se observa en el registro histórico del mareógrafo del puerto de Mazatlán (Servicio Mareográfico Nacional de México, www.mareografico.unam.mx).

Los foraminíferos de las marismas actuales han sido estudiados desde la década de 1950 (Phleger y Walton, 1950). Las especies que ahí viven son capaces de soportar un amplio rango de cambios diarios y estacionales (p. ej., exposición subaérea e inundación mareal, temperaturas variables, dilución de la salinidad por la lluvia o concentración hipersalina por evaporación) (Murray, 1971) y, como resultado, pocas especies pueden ser consideradas endémicas de estos ambientes (Phleger, 1965a). Las asociaciones de zonas elevadas de las marismas son muy similares en todo el planeta (Phleger, 1970; Scott, 1976b) y son generalmente formas aglutinantes (Phleger, 1965b). En el Estero de Urías, las escasas especies encontradas presentaron una fuerte dominancia de *A. salsum* y *M. fusca* que, en conjunto, representan entre 81-90 % de las asociaciones vivas y 81-93 % de las asociaciones muertas. Las especies secunda-

rias son *A. cassis*, *T. inflata* y *T. comprimata*, estas dos últimas particularmente presentes en Urías I (Fig. 3). Las asociaciones vivas y muertas fueron muy similares entre sí en las dos marismas. Sin embargo, las principales diferencias observadas en la composición específica de las asociaciones (abundancia de *A. cassis* en las asociaciones vivas de Urías I, y de *T. comprimata* (Urías I) y *M. fusca* y *T. inflata* (Urías II) en las asociaciones muertas) parece deberse a los ciclos reproductivos estacionales de estas especies y al carácter acumulativo de las asociaciones muertas a lo largo del tiempo (Tabla 2).

Las asociaciones de foraminíferos en marismas presentan, asimismo, una abundancia de caparazones muy elevada pero variable, que no muestra un patrón consistente ni incluso dentro de la misma marisma (Phleger, 1965a). Estas características han sido atribuidas a la naturaleza muy cambiante de este ambiente (p. ej., variaciones extremas de salinidad, exposición subaérea en cada ciclo mareal, cambios estacionales de temperatura) y a los numerosos factores locales (p. ej., disponibilidad de alimento, tipo (sexual o asexual) y periodo (estacional o continuo) de reproducción) que influyen sobre la composición de estas asociaciones (Murray, 1971). En el Estero de Urías, las asociaciones de foraminíferos (vivas y muertas) mostraron una abundancia de caparazones desigual entre las distintas estaciones con numerosos puntos que presentaron un número muy bajo (<100 individuos/80 cm³) e incluso una ausencia completa de caparazones (Tabla 2). Este hecho no está relacionado con ninguno de los parámetros ambientales medidos en este trabajo y responde a la característica distribución espacial en parches de estos organismos (Murray, 2006).

La distribución de los foraminíferos en las marismas está controlada por la elevación topográfica sobre el nivel marino (que determina la duración de su exposición subaérea mareal) y por la salinidad media (Murray, 2006). La existencia de una zonación vertical fue observada inicialmente por Phleger (1965a) y

documentada por Scott (1976a) y ha sido reconocida en todo el planeta (Cearreta *et al.*, 2002). Las marismas del Estero de Urías presentan una variación topográfica muy reducida de 0,177 m (desde 0,679 hasta 0,856 m), no muestran una variación significativa en la composición específica de sus asociaciones, y definen de modo muy robusto la distribución y abundancia de las especies de foraminíferos características de estos ambientes mareales extremos. En consecuencia, si la preservación de estos microfósiles fuese adecuada en el registro sedimentario holoceno, sería posible identificar antiguas posiciones del nivel marino en estas secuencias con una gran precisión. Sin embargo, Perry *et al.* (2008) ya observaron que en ambientes intermareales tropicales las asociaciones actuales dominadas por caparazones aglutinantes presentan una preservación muy pobre en el registro sedimentario. Del mismo modo, Ruiz-Fernández *et al.* (2016) detectaron muy pocos caparazones aglutinantes en testigos sedimentarios perforados en las marismas del Estero de Urías debido a su destrucción post-mortem durante el enterramiento, mientras que los escasos caparazones de naturaleza calcárea estaban bien preservados.

En cuanto a los ostrácodos, la única especie que aparece en estas marismas (*C. castus*) se encuentra ampliamente distribuida en las costas del Pacífico mexicano en condiciones de salobres a hipersalinas (Machain-Castillo y Gío-Argáez, 1993). La presencia de poblaciones abundantes compuestas de juveniles, adultos y caparazones completos incluyendo en su interior partes blandas implica un origen autóctono y una baja energía en el medio.

En este trabajo no se ha observado relación alguna entre la contaminación de los sedimentos y la presencia o abundancia de los individuos y caparazones presentes en las distintas muestras. A pesar de que el factor de enriquecimiento mostró una mayor contaminación por metales en Urías II, esta marisma presenta las mayores abundancias tanto de foraminíferos como de ostrácodos.

6. Conclusiones

Las marismas actuales del Estero de Urías están caracterizadas geoquímicamente por un enriquecimiento moderado en metales con respecto a sus concentraciones naturales, posiblemente como consecuencia de la combustión de carburantes relacionada con las intensas actividades portuarias y de producción de electricidad que se desarrollan alrededor de esta laguna costera. Desde un punto de vista micropaleontológico, estas zonas topográficamente elevadas y localizadas en el límite superior de la influencia mareal, muestran la presencia de un número muy pequeño de especies tolerantes a su extrema variabilidad ambiental que se desarrollan dentro de un rango altitudinal muy reducido. Estos resultados pueden considerarse como una línea base para la valoración de los impactos antrópicos y los procesos de ascenso del nivel marino en esta región costera. La metodología iniciada con este trabajo, que involucra la utilización combinada de indicadores geoquímicos y microfósiles, puede ser utilizada con éxito para la interpretación de las variaciones naturales y los cambios de origen antrópico en secuencias sedimentarias que revelen la historia ambiental de estos ecosistemas a lo largo del tiempo.

Agradecimientos

Investigación financiada por los proyectos CONACyT-153492, CONACYT SEMARNAT-2016-01-278634, MINECO (RTI2018-095678-B-C21, MCIU/AEI/FEDER, UE) y UNAM PAPIIT IN103721. Alfredo Galaviz y Vladislav Carnero apoyaron en el trabajo de campo, Humberto Bojórquez en el trabajo analítico, y Germán Ramírez en la elaboración de figuras. La posición topográfica de las muestras fue determinada por Mario Vargas Cárdenas (Ingeniería Civil de Sinaloa). Los foraminíferos fueron extraídos por Haizea Quintas-Mendizabal y los ostrácodos por Alejandro Rodríguez-Ramírez y X. Antonio Nava-Fernández. El Dr. Manu Monge-Ganuzas y un revisor anónimo ayudaron a mejorar el ma-

nuscrito original con sus comentarios y sugerencias constructivas. Contribución nº 20 de la Unidad de Investigación Geo-Q Zentroa (Laboratorio Joaquín Gómez de Llarena).

Bibliografía

- Aldana-Gutiérrez, G., Ruiz-Fernández, A.C., Pérez-Bernal, L.H., Flores-Verdugo, F., Cuellar-Martínez, T., Sánchez-Cabeza, J.A. (2021). Flujos e inventarios de carbono azul en manglares asociados a una laguna costera antropizada. *Geofísica Internacional*, 60, 13-30. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2021.60.1.2011>
- Alvarado-Zambrano, D. (2012). Incorporación de metales en testas de foraminíferos desde los sedimentos y agua asociados en la laguna costera Estero de Urías, Sinaloa, México. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 114 pp.
- Bandy, O.L. (1963). Dominant paralic foraminifera of southern California and the Gulf of California. *Contributions of the Cushman Foundation for Foraminiferal Research*, 14, 127-134.
- Benson, R.H. (1959). Ecology of recent ostracodes of the Todos Santos Bay region, Baja California, México. *The University of Kansas Paleontological Contributions, Arthropoda*, 1, 1-80.
- Benson, R.H., Kaesler, R.L. (1963). Recent marine and lagoonal ostracodes from the Estero de Tastiota region, Sonora, México (northeastern Gulf of California). *The University of Kansas Paleontological Contributions, Arthropoda*, 3, 1-34.
- Boomer, I., Eisenhauer, G. (2002). Ostracod faunas as palaeoenvironmental indicators in marginal marine environments. En: J. Holmes, A. Chivas (Eds.), *The Ostracoda: Applications in Quaternary Research*. American Geophysical Union, Washington D.C., 131, pp. 135-149. <https://doi.org/10.1029/131GM07>
- Calvert, S.E. (1976). The mineralogy and geochemistry of near-shore sediments. En: J.P. Riley, R. Chester (Eds.), *Chemical Oceanography*. Academic Press, New York, 410 pp. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-588606-2.50014-X>
- Cardoso-Mohedano, J.G., Bernardello, R., Sánchez-Cabeza, J.A., Molino-Minero-Re, E., Ruiz-Fernández, A.C., Cruzado, A. (2015). Accumulation of conservative substances in a sub-tropical coastal lagoon. *Estuarine Coas-*

- tal and Shelf Science, 164, 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2015.06.022>
- Cearreta, A., Irabien, M.J., Ulibarri, I., Yusta, I., Croudace, I.W., Cundy, A.B. (2002). Recent salt marsh development and natural regeneration of reclaimed areas in the Plentzia estuary, N. Spain. *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 54, 863-886. <https://doi.org/10.1006/ecss.2001.0862>
- Curry, J.R., Emmel, F.J., Crampton, P.J.S. (1969). Holocene history of a strand plain, Lagoonal coast, Nayarit, Mexico. En: A. Ayala-Castañares, F.B. Phleger (Eds.), *Lagunas Costeras, Un Simposio. Memorias del Simposio Internacional Lagunas Costeras*. UNAM-UNESCO, Nov. 28-30, 1967. México D.F., pp. 63-100.
- Flores Verdugo, F.J., Agraz Hernández, C., Benítez Pardo, D. (2007). Ecosistemas acuáticos costeros: importancia, retos y prioridades para su conservación. En: O. Sánchez *et al.* (Eds.), *Perspectivas sobre conservación de ecosistemas acuáticos en México*. INE-SEMARNAT, 294 pp.
- García, E. (1973). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (para adaptarlo a las condiciones de la República Mexicana). *Offset Larrios*, México D.F., 246 pp.
- Jara-Marini, M.E., Soto-Jiménez, M.F., Páez-Osuna, F. (2008a). Trace metals accumulation patterns in a mangrove lagoon ecosystem, Mazatlán Harbor, southeast Gulf of California. *Journal of Environmental Science and Health, Part A*, 43, 995-1005. <https://doi.org/10.1080/10934520802059797>
- Jara-Marini, M.E., Soto-Jiménez, M.F., Páez-Osuna, F. (2008b). Bulk and bioavailable heavy metals (Cd, Cu, Pb, and Zn) in surface sediments from Mazatlán Harbor (SE Gulf of California). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 80, 150-153. <https://doi.org/10.1007/s00128-007-9334-0>
- Jara-Marini, M.E., Soto-Jiménez, M.F., Páez-Osuna, F. (2012). Mercury transfer in a subtropical coastal lagoon food web (SE Gulf of California) under two contrasting climatic conditions. *Environmental Toxicology*, 27, 526-536. <https://doi.org/10.1002/tox.20670>
- Jaward, F.M., Alegria, H.A., Galindo Reyes, J.G., Hoare, A. (2012). Levels of PAHs in the waters, sediments, and shrimps of Estero de Urias, an estuary in Mexico, and their toxicological effects. *The Scientific World Journal*, 2012, 1-9. <https://doi.org/10.1100/2012/687034>
- Leri, A.C., Myneni, S.C. (2011). Natural organobromine in terrestrial ecosystems. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 77, 1-10. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.11.012>
- López, P., Navarro, E., Marce, R., Ordoñez, J., Caputo, L., Armengol, J. (2006). Elemental ratios in sediments as indicators of ecological processes in Spanish reservoirs. *Limnetica*, 25, 499-512.
- López-Buendía, A.M., Bastida, J., Querol, X., Whateley, M.K.G. (1999). Geochemical data as indicators of paleosalinity in coastal organic-rich sediments. *Chemical Geology*, 157, 235-254. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(98\)00207-1](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(98)00207-1)
- Loring, D.H., Rantala, R.T. (1992). Manual for the geochemical analysis of marine sediments and suspended particulated matter. *Earth Science Reviews*, 32, 235-283. [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(92\)90001-A](https://doi.org/10.1016/0012-8252(92)90001-A)
- Machain-Castillo, M.L., Gío-Argáez, F.R. (1993). La diversidad de los ostrácodos de los mares mexicanos. *Revista de la Sociedad Mexicana de Historia Natural*, 44, 251-266.
- McKenzie, K.C., Swain, F.M. (1967). Recent Ostracoda from Scammon Lagoon, Baja California. *Journal of Paleontology*, 41, 281-305.
- Montaño-Ley, Y., Peraza-Vizcarra, R., Páez-Osuna, F. (2008). Tidal hydrodynamics and their implications for the dispersion of effluents in Mazatlán Harbor: An urbanized shallow coastal lagoon. *Water, Air & Soil Pollution*, 194, 343-357. <https://doi.org/10.1007/s11270-008-9721-0>
- Murray, J.W. (1971). Living foraminiferids of tidal marshes: A review. *Journal of Foraminiferal Research*, 1, 153-161. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.1.4.153>
- Murray, J.W. (1979). *British Nearshore Foraminiferids. Synopsis of the British Fauna (New Series) 16*. Academic Press, London, 68 pp.
- Murray, J.W. (2006). *Ecology and Applications of Benthic Foraminifera*. Cambridge University Press, Cambridge, 426 pp. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511535529>
- Ontiveros-Cuadras, J.F., Ruiz-Fernández, A.C., Pérez-Bernal, L.H., Serrato de la Peña, J.L., Sánchez-Cabeza, J.-A. (2019). Recent trace metal enrichment and sediment quality assessment in an anthropized coastal lagoon (SE Gulf of California) from 210Pb-dated sediment cores. *Marine Pollution Bulletin*, 149, 110653. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110653>
- Páez-Osuna, F., Sánchez-Cabeza, J.A., Ruiz-Fernández, A.C., Alonso-Rodríguez, R., Piñón-Gimate, A., Cardoso-Mohedano, J.G., Flores-Verdugo,

- F.J., Carballo, J.L., Cisneros-Mata, M.A., Álvarez-Borrego, S. (2016). Environmental status of the Gulf of California: A review of responses to climate change and climate variability. *Earth-Science Reviews*, 162, 253-268. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.09.015>
- Perry, C.T., Berkeley, A., Smithers, S.G. (2008). Microfacies characteristics of a tropical, mangrove-fringed shoreline, Cleveland Bay, Queensland, Australia: Sedimentary and taphonomic controls on mangrove facies development. *Journal of Sedimentary Research*, 78, 77-97. <https://doi.org/10.2110/jsr.2008.015>
- Phleger, F.B. (1965a). Patterns of marsh foraminifera, Galveston Bay, Texas. *Limnology and Oceanography*, 10, 169-180. <https://doi.org/10.4319/lo.1965.10.suppl.2.r169>
- Phleger, F.B. (1965b). Living foraminifera from a coastal marsh, southwestern Florida. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 28, 45-60. <https://doi.org/10.18268/BSGM1965v28n1a2>
- Phleger, F.B. (1970). Foraminiferal populations and marine marsh processes. *Limnology and Oceanography*, 15, 522-534. <https://doi.org/10.4319/lo.1970.15.4.0522>
- Phleger, F.B., Ayala-Castañares, A. (1969). Marine Geology of Topolobampo Lagoons, Sinaloa, Mexico. En: A. Ayala-Castañares, F.B. Phleger (Eds.), *Lagunas Costeras, un Simposio, Memorias del Simposio Internacional Lagunas Costeras, UNAM-UNESCO, Nov 28-30, 1967. México D.F.*, pp. 101-136.
- Phleger, F.B., Walton, W.R. (1950). Ecology of marsh bay foraminifera, Barnstable, Massachusetts. *American Journal of Science*, 248, 274-294. <https://doi.org/10.2475/ajs.248.4.274>
- Raygoza-Viera, J.R., Ruiz-Fernández, A.C., Ruelas-Inzunza, J., Alonso-Hernández, C., Pérez-Bernal, L.H., Páez-Osuna, F. (2014). Accumulation and distribution of Hg and ²¹⁰Pb in superficial sediments from a coastal lagoon in the SE Gulf of California associated with urban-industrial and port activities. *Environmental Earth Sciences*, 72, 2729-2739. <https://doi.org/10.1007/s12665-014-3178-9>
- Rogers, M.J. (1976). An evaluation of an index of affinity for comparing assemblages, in particular of foraminifera. *Palaeontology*, 19, 503-515.
- Ruiz-Fernández, A.C., Frignani, M., Hillaire-Marcel, C., Ghaleb, B., Arvizu, M.D., Raygoza-Viera, J.R., Páez-Osuna, F. (2009). Trace metals (Cd, Cu, Hg, and Pb) accumulation recorded in the intertidal mudflat sediments of three coastal lagoons in the Gulf of California, Mexico. *Estuaries and Coasts*, 32, 551-564. <https://doi.org/10.1007/s12237-009-9150-3>
- Ruiz-Fernández, A.C., Sánchez-Cabeza, J.-A., Serrato de la Peña, J.L., Pérez-Bernal, L.H., Cearrreta, A., Flores-Verdugo, F., Machain-Castillo, M.L., Chamizo, E., García-Tenorio, R., Queralt, I., Dunbar, R., Mucciarone, D., Diaz-Asencio, M. (2016). Accretion rates in coastal wetlands of the southeastern Gulf of California and their relationship with sea-level rise. *The Holocene*, 26, 1126-1137. <https://doi.org/10.1177/0959683616632882>
- Ruiz-Fernández, A.C., Carnero-Bravo, V., Sánchez-Cabeza, J.A., Pérez-Bernal, L.H., Amaya-Monterrosa, O.A., Bojórquez-Sánchez, S., López-Mendoza, P.G., Cardoso-Mohedano, J.G., Dunbar, R.B., Mucciarone, D.A., Marmolejo-Rodríguez, A.J. (2018). Carbon burial and storage in tropical salt marshes under the influence of sea level rise. *Science of the Total Environment*, 630, 1628-1640. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.246>
- Ruiz-Fernández, A.C., Wu, R.S.S., Lau, T.-C., Pérez-Bernal, L.H., Sánchez-Cabeza, J.A., Chiu, J.M.Y. (2018). A comparative study on metal contamination in Estero de Urias lagoon, Gulf of California, using oysters, mussels and artificial mussels: Implications on pollution monitoring and public health risk. *Environmental Pollution*, 243, 197-205. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2018.08.047>
- Ruiz-Luna, A., Berlanga-Robles, C.A. (2003). Land use, land cover changes and coastal lagoon surface reduction associated with urban growth in northwest Mexico. *Landscape Ecology*, 18, 159-171. <https://doi.org/10.1023/A:1024461215456>
- Salminen, R. (2005). *Geochemical Atlas of Europe. Part 1: Background Information, Methodology and Maps. Association of the Geological Surveys of the European Union (EuroGeoSurveys)/The Geological Survey of Finland.* <http://www.gtk.fi/publ/foregsatlas/>
- Scott, D.B. (1976a). Quantitative studies of marsh foraminiferal patterns in southern California and their application to Holocene stratigraphic problems. En: C.T. Schafer, B.R. Pelletier (Eds.), *First International Symposium on Benthonic Foraminifera of Continental Margins. Maritime Sediments, spec. publ. 1*, 153-170.
- Scott, D.B. (1976b). Brackish-water foraminifera from southern California and description of *Polysaccamina ipohalina* n. gen., n. sp.

- Journal of Foraminiferal Research, 6, 312-321. <https://doi.org/10.2113/gsjfr.6.4.312>
- Soto-Jiménez, M.F., Páez-Osuna, F. (2001). Distribution and normalization of heavy metal concentrations in mangrove and lagoonal sediments from Mazatlan Harbor (SE Gulf of California). *Estuarine Coastal and Shelf Science*, 53, 259-274. <https://doi.org/10.1006/ecss.2000.0814>
- Stewart, H.B. Jr. (1958). Sedimentary reflections of depositional environment in San Miguel Lagoon, Baja California, Mexico. *Bulletin - American Association of Petroleum Geologists*, 42, 2567-2618. <https://doi.org/10.1306/0BDA5BFA-16BD-11D7-8645000102C1865D>
- Stuardo, J., Villarroel, M. (1976). Aspectos ecológicos y moluscos en las lagunas costeras de Guerrero, México. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología – UNAM*, 3, 1-180.
- Sutherland, R.A. (2000). Bed sediment-associated trace metals in an urban stream, Oahu, Hawaii. *Environmental Geology*, 39, 611-627. <https://doi.org/10.1007/s002540050473>
- Walton, W.R. (1952). Techniques for recognition of living foraminifera. *Contributions of the Cushman Foundation for Foraminiferal Research*, 3, 56-60.
- Walton, W.R. (1955). Ecology of living benthic foraminifera Todos Santos Bay, Baja California. *Journal of Paleontology*, 29, 952-1058.
- Recibido el 27 de abril de 2021*
Aceptado el 9 de junio de 2021

Tabla 1S Material Suplementario

Sitio	Altitud (m)	Acollita (%)	Limo (%)	Arena (%)	C _{org} (%)	CO ₃ (%)	Na (%)	Al (%)	Si (%)	P (%)	Cl (%)	K (%)	Ti (%)	V (µg g ⁻¹)	Sitio	Cr (µg g ⁻¹)	Mn (µg g ⁻¹)	Fe (%)	Co (µg g ⁻¹)	Ni (µg g ⁻¹)	Cu (µg g ⁻¹)	Zn (µg g ⁻¹)	As (µg g ⁻¹)	Br (µg g ⁻¹)	Rb (µg g ⁻¹)	Zr (µg g ⁻¹)	Pb (µg g ⁻¹)			
<i>Marisma EU1</i>																														
1	0,757	13,7	64,6	21,8	17,4	4,9	18,8	2,5	5,8	0,1	22,9	1,0	0,2	183,5	1	19,6	192,7	0,9	5,5	60,0	50,5	58,0	7,2	430,8	44,2	80,2	25,2			
2	0,752	12,5	82,8	4,7	14,8	4,4	17,7	2,6	6,3	0,1	23,8	1,1	0,2	138,1	2	19,6	161,3	1,0	5,1	55,2	48,1	64,7	7,9	419,5	55,4	87,9	31,3			
3	0,735	5,0	82,6	12,4	10,6	3,9	18,6	2,8	6,7	0,1	22,9	1,1	0,2	115,8	3	21,4	168,2	1,0	5,8	50,3	48,5	72,1	7,9	395,9	58,8	88,9	28,4			
4	0,701	2,8	67,7	29,5	10,6	2,9	18,7	2,7	6,7	0,1	26,0	1,1	0,2	105,2	4	19,1	162,6	0,9	7,5	43,9	42,0	56,7	5,1	411,2	56,1	92,8	27,3			
5	0,744	9,7	77,3	13,0	16,7	4,6	16,2	3,3	7,9	0,1	19,3	1,2	0,2	190,7	5	23,8	175,4	1,2	5,8	64,5	51,7	68,3	8,5	397,3	63,7	83,6	29,3			
6	0,733	15,3	75,2	9,6	13,5	4,4	18,9	3,4	7,7	0,1	22,9	1,2	0,2	127,5	6	22,4	144,6	0,9	6,0	40,0	37,5	53,6	7,3	441,2	58,1	72,5	24,2			
7	0,764	13,3	80,4	6,3	10,6	5,4	20,2	2,1	5,4	0,1	28,8	1,0	0,2	133,6	7	16,6	153,1	0,8	5,3	52,7	44,2	56,8	5,4	449,0	50,1	66,8	24,0			
8	0,706	22,0	69,9	8,1	8,9	4,9	18,9	3,0	7,4	0,1	25,2	1,2	0,2	130,3	8	20,0	193,1	1,0	6,3	52,2	42,1	64,8	3,7	409,8	61,2	78,9	27,1			
9	0,755	9,2	63,4	27,4	16,7	6,6	22,3	2,5	5,7	0,1	29,4	0,9	0,1	154,9	9	16,4	132,3	0,7	5,5	53,6	43,6	47,4	5,7	477,0	35,2	51,4	23,1			
10	0,719	14,9	72,7	12,5	14,3	5,1	19,5	3,2	7,8	0,1	24,0	1,1	0,2	139,6	10	19,8	166,7	0,9	8,1	54,2	51,5	64,5	6,2	441,7	53,9	79,3	29,8			
11	0,758	13,6	74,0	12,4	12,6	5,1	23,4	2,6	6,4	0,1	30,8	1,1	0,2	128,6	11	18,5	130,5	0,7	6,9	43,2	37,8	49,2	4,6	476,8	50,5	66,5	21,2			
12	0,708	22,5	72,5	5,0	9,1	4,2	15,8	3,6	8,3	0,1	21,3	1,3	0,2	118,1	12	21,7	187,6	1,2	5,3	42,4	37,7	58,3	1,7	483,8	51,6	61,4	26,5			
13	0,771	11,9	76,8	11,3	15,5	5,8	17,4	2,9	6,5	0,1	22,1	1,0	0,2	170,8	13	16,9	134,6	1,0	7,5	57,6	45,2	55,0	7,4	388,8	44,4	65,8	24,7			
14	0,762	13,1	67,9	19,0	14,1	3,6	22,0	2,9	6,7	0,1	29,1	1,0	0,2	182,0	14	17,3	135,4	0,8	4,4	50,0	45,1	59,4	6,3	462,9	49,5	84,0	26,6			
15	0,777	19,9	66,7	13,4	11,3	5,9	17,4	3,3	8,1	0,1	23,1	1,2	0,2	149,1	15	23,0	187,8	1,1	6,1	58,8	48,4	77,3	5,4	402,3	69,2	77,7	30,3			
16	0,726	11,5	73,7	14,8	9,7	3,3	19,7	3,3	8,1	0,1	25,5	1,3	0,2	100,4	16	19,9	174,6	0,9	6,6	39,2	41,3	58,8	2,6	449,8	60,6	82,8	27,4			
17	0,794	19,1	76,3	4,5	13,8	3,8	13,7	4,0	9,9	0,1	16,5	1,3	0,3	154,2	17	23,3	188,3	1,3	8,1	50,0	46,5	67,3	6,6	384,2	70,2	105,1	30,4			
18	0,779	19,3	76,3	4,4	11,4	5,6	13,3	3,9	9,2	0,1	15,6	1,4	0,3	129,2	18	25,3	188,8	1,1	5,3	42,9	40,6	63,1	7,0	324,9	81,3	141,0	25,1			
19	0,763	20,3	72,6	7,2	11,5	1,8	20,0	3,2	8,0	0,1	26,2	1,2	0,2	174,8	19	23,3	179,2	1,0	6,4	58,6	47,0	78,9	5,8	402,4	82,7	100,0	36,5			
20	0,718	22,5	74,3	3,2	11,0	3,3	14,6	4,2	10,2	0,1	17,8	1,4	0,2	104,8	20	23,9	205,1	1,5	8,2	41,4	42,4	69,1	3,7	431,3	62,6	78,8	28,3			
CN	-	-	-	-	-	-	9,8	3,9	9,0	0,1	11,7	1,4	0,3	79,5	CN	28,6	307,3	2,1	9,4	29,7	42,9	78,7	14,9	287,9	82,0	102,8	27,8			
<i>Marisma EU11</i>																														
1	0,713	9,9	75,2	14,8	10,2	0,5	15,4	3,6	10,5	0,1	18,0	1,3	0,3	152,7	1	21,4	147,9	0,8	7,8	48,4	34,3	40,7	5,1	366,0	69,6	215,3	19,8			
2	0,679	13,9	76,4	9,7	10,3	1,2	16,6	3,3	9,8	0,1	18,5	1,2	0,2	184,4	2	22,6	155,8	0,9	8,6	69,5	43,1	63,9	7,5	328,7	62,9	163,8	26,3			
3	0,831	11,0	74,7	14,4	10,6	1,3	16,3	3,2	9,2	0,1	18,9	1,2	0,3	132,3	3	19,6	139,9	0,7	6,6	34,7	32,4	38,2	5,8	366,6	58,8	232,5	20,1			
4	0,789	13,6	67,0	19,4	9,1	1,5	18,8	2,7	8,8	0,1	22,7	1,2	0,2	128,6	4	16,8	136,7	0,6	4,9	34,6	31,2	32,9	1,5	351,3	49,0	173,9	20,1			
5	0,843	9,3	45,6	45,1	8,4	1,5	15,4	3,8	11,3	0,1	16,6	1,4	0,3	136,0	5	26,4	160,0	0,9	9,8	45,3	37,2	48,0	4,8	328,5	72,6	247,5	24,0			
6	0,832	5,8	29,5	64,7	6,0	1,1	15,7	3,4	12,5	0,1	15,9	1,4	0,2	119,4	6	15,3	135,3	0,6	6,1	48,1	29,2	42,7	4,1	231,4	71,3	299,7	18,0			
7	0,832	10,1	41,6	48,4	10,2	2,0	20,8	2,3	7,0	0,1	28,4	1,1	0,2	146,0	7	15,3	111,2	0,5	6,1	48,1	34,4	37,7	3,7	382,3	45,2	199,0	19,9			
8	0,796	10,0	39,7	50,2	7,2	1,9	18,5	3,1	9,6	0,1	21,5	1,2	0,2	123,7	8	19,8	142,3	0,7	4,7	31,1	31,2	34,2	5,1	329,3	54,4	220,1	19,7			
9	0,829	10,5	52,2	37,4	10,4	1,5	15,2	3,6	10,8	0,1	17,3	1,3	0,3	173,9	9	20,5	155,4	0,8	9,3	48,9	37,4	45,0	6,1	304,6	70,2	259,4	23,6			
10	0,824	8,8	54,0	37,3	10,3	1,6	17,3	3,3	9,2	0,1	19,7	1,2	0,2	140,2	10	19,9	130,2	0,8	7,6	49,1	34,5	40,0	6,0	302,3	59,1	260,9	19,5			
11	0,805	11,8	46,8	41,5	8,9	1,8	18,9	3,1	8,7	0,1	21,4	1,2	0,2	142,1	11	19,7	159,4	0,9	3,5	54,2	42,7	57,3	4,6	321,8	59,9	173,8	24,1			
12	0,779	16,6	71,1	12,3	8,0	1,5	13,8	3,0	8,1	0,1	19,2	1,3	0,2	93,6	12	18,9	127,7	0,9	6,6	36,5	33,5	40,7	1,6	450,2	42,2	118,7	22,1			
13	0,856	12,8	66,9	20,3	11,0	2,1	16,2	3,5	10,5	0,1	18,0	1,3	0,3	160,8	13	21,5	146,9	0,8	9,4	52,5	37,7	42,9	4,4	301,0	67,8	249,4	23,4			
14	0,855	13,0	69,0	17,9	7,9	1,8	16,1	3,3	10,5	0,1	18,1	1,3	0,3	168,3	14	23,5	155,0	0,9	7,5	58,2	38,7	58,4	5,8	301,5	72,0	230,3	30,2			
15	0,845	9,6	47,1	43,3	8,3	1,5	17,6	2,9	9,1	0,1	21,0	1,2	0,2	119,2	15	18,5	139,9	0,7	5,4	37,0	31,8	32,3	5,4	286,6	60,4	337,9	16,9			
16	0,798	13,6	69,6	16,8	8,9	2,3	19,1	2,9	8,4	0,1	24,2	1,2	0,2	125,6	16	16,6	174,0	0,7	5,4	44,4	35,6	46,1	3,2	343,2	54,2	179,6	21,7			
17	0,828	10,8	55,7	33,5	8,4	5,0	15,7	3,6	11,5	0,1	16,0	1,4	0,3	175,9	17	26,3	140,5	1,0	8,8	63,6	42,1	70,1	7,1	255,5	77,0	220,9	32,0			
18	0,842	8,6	61,5	30,0	8,5	2,4	15,5	3,5	11,5	0,1	15,6	1,4	0,3	192,2	18	21,3	164,0	1,1	8,6	61,2	44,0	69,8	7,1	273,5	76,5	222,0	32,8			
19	0,811	9,0	38,6	52,2	5,1	1,6	14,9	3,7	12,8	0,1	14,9	1,5	0,3	145,5	19	19,9	164,0	0,9	6,0	42,6	36,0	46,7	4,6	238,3	75,4	263,3	23,7			
20	0,792	8,0	46,4	45,5	7,0	2,1	18,2	2,9	10,1	0,1	21,2	1,3	0,2	77,1	20	19,9	131,7	0,6	4,9	21,6	29,8	31,7	2,2	296,5	62,3	230,7	20,1			
CN	-	-	-	-	-	-	3,1	6,5	21,2	0,01	1,7	1,6	0,5	59,6	CN	28,7	236,3	1,8	5,7	14,8	25,5	40,0	8,8	47,1	92,3	361,8	25,2			

CN = concentración natural

Tabla 1S: Características geoquímicas de los sedimentos superficiales en las marismas de la Laguna costera Estero de Urias (Golfo de California, México).
Table 1S: Geochemical features of surface sediments from the saltmarshes of the Estero de Urias coastal lagoon (Gulf of California, Mexico).