



Diversidad de diatomeas bentónicas marinas en un ambiente ligeramente enriquecido con elementos potencialmente tóxicos

Diversity of benthic marine diatoms in an environment lightly enriched with potentially toxic elements

David A. Siqueiros-Beltrones^{1✉}, Uri Argumedo-Hernández², Janette M. Murillo-Jiménez³ y Ana J. Marmolejo-Rodríguez³

¹Departamento de Plancton y Ecología Marina, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-Instituto Politécnico Nacional. Av. Instituto Politécnico Nacional s/n, Col. Playa Palo de Santa Rita, 23096 La Paz, Baja California Sur, México.

²Departamento de Economía, Universidad Autónoma de Baja California Sur. Km. 5.5, Carretera al Sur, 23091 La Paz, Baja California Sur, México.

³Departamento de Oceanología, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-Instituto Politécnico Nacional. Av. Instituto Politécnico Nacional s/n, Col. Playa Palo de Santa Rita, 23096 La Paz, Baja California Sur, México.

✉ dsiquei@ipn.mx

Resumen. Las diatomeas se consideran indicadores precisos de contaminación por metales pesados, cuyos efectos pueden alterar la estructura de asociaciones de diatomeas bentónicas. Playas de la costa sur de la bahía La Ventana, Baja California Sur, México son abastecidas con sedimentos enriquecidos con elementos potencialmente tóxicos derivados de actividad minera o naturalmente. Así, se hizo una evaluación de elementos traza en sedimentos del intermareal y se analizó la diversidad de diatomeas bentónicas de sedimentos del intermareal y de rocas del submareal para marzo, junio y septiembre de 2012. El análisis químico se hizo mediante digestión ácida con espectrometría de masas con fuente de plasma de acoplamiento inductivo (ICP-MS), se determinó la concentración de 17 elementos y se calculó su factor de enriquecimiento normalizado (FEN). Solamente las concentraciones de estroncio (Sr), antimonio (Sb) y bario (Ba) mostraron enriquecimiento de ligero a moderado. Mediante microscopía óptica se identificaron 182 taxa —especies y variedades— de diatomeas, incluyendo 30 nuevos registros para la región y 14 para México. Se calcularon valores de diversidad, equidad y dominancia (H' , J' , λ). Los valores de diversidad fueron altos y junto con la elevada riqueza de especies caracterizan asociaciones típicas de diatomeas bentónicas marinas.

Palabras clave: geoquímica, península de Baja California, riqueza de especies.

Abstract. Diatoms are well recognized as indicators of contamination by heavy metals whose effects may alter the structure of benthic diatom assemblages. The southern beaches of Bahía La Ventana, Baja California Sur, Mexico are supplied with sediments that are naturally or anthropogenically enriched with potentially toxic elements. Thus, we carried out a geochemical assessment for trace elements in the intertidal beach sediments and we measured diversity of benthic diatom assemblages found in the intertidal sediments and on subtidal rocks. Sampling was done in March, June and September 2012. Chemical analysis was performed using acid digestion using Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry (ICP-MS) for determining the concentration of 17 elements, and their Normalized Enrichment Factor values were estimated. Low to moderately degrees of enrichment for Strontium (Sr), Antimony (Sb) and Barium (Ba) were detected. Diatom taxa were identified using optic microscopy. Diversity values (species richness, dominance and evenness) were calculated. Diatom assemblages showed a high species richness with 182 taxa (species and varieties), including 30 new records for the region and 14 for Mexican waters. These, together with the high estimated values of diversity (H' , J' , λ) characterize a typical assemblage of benthic marine diatoms.

Key words: geochemistry, Baja California peninsula, species richness.

Introducción

Recientemente en Baja California Sur (BCS), México, resurgió el interés por evaluar los efectos de los desechos

mineros —metales y metaloides— que eventualmente llegan a las costas representando un riesgo para la biota marina. Y de ahí, el interés por conocer los niveles de fondo de elementos potencialmente tóxicos (EPT) en la zona costera de BCS, su enriquecimiento respecto a concentraciones locales y de la corteza terrestre, así

como niveles de acumulación con relación a niveles precivilización mediante el índice de geoacumulación (Igeo) (Müller, 1979, 1986). De esta manera, se ha observado que existe enriquecimiento natural de diversos elementos en ambientes de deposición, incluyendo playas, en donde se ha encontrado que tanto el cadmio como el arsénico representan riesgos para la biota marina (Posada-Ayala, 2011). Dichos riesgos serían observables en especies sensibles, que bien podrían ser utilizadas como indicadoras.

La utilidad de las diatomeas como indicadoras de contaminación e impacto ambiental es ampliamente reconocida. Sin embargo, para ello, es necesario contar con una base florística de diatomeas que sirva de referencia y que permita derivar conclusiones respecto de alguna contingencia. En una región con potencial minero es de esperarse que ciertos minerales y EPT muestren niveles elevados (enriquecidos) de manera natural. En el caso de la bahía La Ventana, se desconoce la relación entre las concentraciones de EPT y las características de las asociaciones de diatomeas bentónicas para la zona costera.

En diatomeas expuestas a metales pesados pueden ocurrir efectos teratológicos, citológicos y deformaciones de la frústula (Morin et al., 2012). En cuanto a la estructura de las asociaciones, experimentalmente Underwood y Paterson (1993) documentaron cambios en taxocenosis de diatomeas bentónicas ocasionados por biocidas aplicados *in situ*, registrando proliferaciones de especies oportunistas a 5 días del tratamiento. Asimismo, especies sensibles son sustituidas por especies tolerantes, alterando la composición de las taxocenosis (Morin et al., 2012).

De acuerdo con lo anterior, la premisa de estudio se refiere a efectos potenciales en la estructura de las asociaciones de diatomeas bentónicas y en la morfología de la frústula, en respuesta a la exposición a concentraciones elevadas de EPT, ya sea naturales o por influencia de la minería en la región de San Antonio, BCS.

Así, en este estudio se observó la morfología de la frústula y se analizó la estructura de las asociaciones de diatomeas bentónicas marinas expuestas a sedimentos de playa enriquecidos de forma natural por EPT (valores de fondo) provenientes de yacimientos minerales locales en playas de la bahía La Ventana, BCS. La hipótesis nula planteó que las asociaciones de diatomeas bentónicas en sedimentos y rocas con EPT del área de estudio no evidenciarían impacto por influencia de EPT, mostrando una estructura típica con alta diversidad de especies.

Materiales y métodos

En la playa occidental de la bahía La Ventana, BCS, se realizaron 3 muestreos durante el 2012, 2 en la temporada

de secas (marzo y junio) y 1 durante las lluvias —después de las precipitaciones de septiembre—. Las muestras se tomaron en 3 sitios con desembocadura de arroyos provenientes de la sierra aledaña (Fig. 1), en cada sitio se recolectaron 0.5 kg de sedimentos del intermareal expuesto y mediante buceo libre, 2 rocas de cerca de 2 kg, de la zona submareal a 2.5 m de profundidad, aproximadamente. En ambos casos las superficies disponibles para diatomeas fueron similares, alrededor de 400 cm².

Composición textural y mineralógica. Dada la constancia de estas características en la zona y con base en un estudio previo (Posada-Ayala, 2011), se procesó una muestra por sitio solamente de marzo. Se usó el método de tamizado, considerando los intervalos propuestos por Wentworth (1922). Se seleccionaron los tamices Tyler cada 1 ϕ (-2 a 4 ϕ). El peso de sedimento de cada intervalo se convirtió a porcentaje y se relacionó con el valor ϕ para cada muestra (Fig. 2). Se obtuvieron los parámetros estadísticos de media, desviación estándar y sesgo por el método de los momentos (Krumbein y Pettijohn, 1938), como se muestran en el Cuadro 2.

Para el análisis mineralógico se consideró el método de conteo propuesto por Glagolev (1934). Se identificaron 300 granos por muestra con una lupa estereoscópica y se obtuvieron los porcentajes de los minerales por muestra.

Análisis químico de los elementos mayores y traza en el sedimento. Las muestras se analizaron mediante pulverización del sedimento, digestión ácida incluyendo HF, HClO₄, HNO₃ y HCl. La determinación de los elementos Al, Ca, Fe, Li, As, Ba, Cd, Co, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, Sb, Sr, U y Zn, se hizo con un espectrómetro de masas inductivamente acoplado (ICP-MS, por sus siglas en inglés). Se utilizaron estándares de referencia certificados (PACS-2 y MESS-3) de sedimento marino para la validación de la técnica. Los resultados de la validación se presentan en la Cuadro 1.

Para calcular el factor de enriquecimiento normalizado (FEN) las concentraciones de los elementos se normalizaron con aluminio mediante la fórmula:

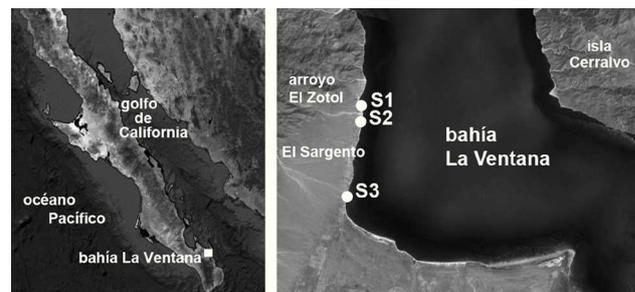


Figura 1. Sitios de muestreo en la playa occidental de la bahía La Ventana, BCS.

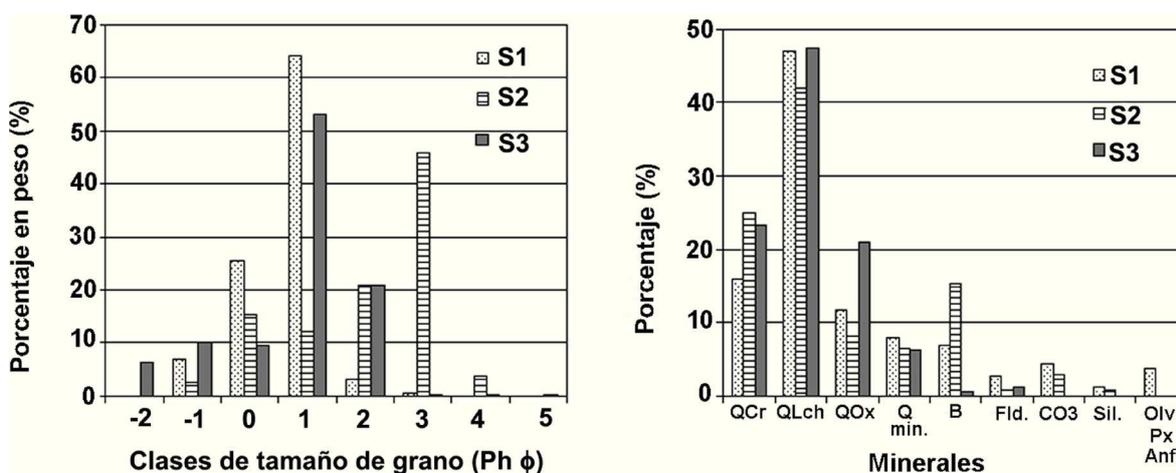


Figura 2. Distribución del tamaño de grano (%; izquierda) y composición mineralógica (%; derecha) de sedimentos de playa, en la costa occidental de la bahía La Ventana, BCS.

$$FEN_{ET} = (ET_{MUESTRA}/Al_{MUESTRA}) / (ET_{CTS}/Al_{CTS}),$$

donde ET es el elemento traza y CTS son los valores de la corteza terrestre superior (Wedepohl, 1995). La descripción se hizo considerando los resultados de todas las muestras recolectadas.

Cuadro 1. Validación de los métodos con estándares de referencia certificados de sedimento marino. El valor obtenido es el que se determinó en laboratorio. PACS-2 y MESS-3 son los estándares de referencia certificados

	PACS-2		MESS-3	
	Obtenido	Certificado	Obtenido	Certificado
Li (mg kg ⁻¹)	33.1	32.2±2	75.6	73.6±5.2
Al (%)	6.18	6.62±0.32	6.86	8.59±0.23
Ca (%)	2.04	1.96±0.18	1.3	1.47±0.06
Fe (%)	3.8	4.09±0.06	3.79	4.34±0.11
As (mg kg ⁻¹)	26.5	26.2±1.5	22.1	21.2±1.1
Ba (mg kg ⁻¹)	825	n. d.	881	n. d.
Cd (mg kg ⁻¹)	2	2.11±0.15	0.2	0.24±0.11
Co (mg kg ⁻¹)	11.8	11.5±0.3	13.2	14.4±2.0
Cr (mg kg ⁻¹)	74.7	90.7±4.6	93.2	105±4
Cu (mg kg ⁻¹)	326	310±12	32	33.9±1.6
Hg (µg kg ⁻¹)	1.9	3.04±0.2	0.03	0.091
Mn (mg kg ⁻¹)	386	440±19	283	324±12
Ni (mg kg ⁻¹)	42.4	39.5±2.3	46.2	46.9±2.2
Pb (mg kg ⁻¹)	161	183±8	20.7	21.1±0.7
Sb (mg kg ⁻¹)	10	11.3±2.6	1.1	1.02±0.09
Sr (mg kg ⁻¹)	251	276±30	115	129±11
U (mg kg ⁻¹)	2.2	3*	3.1	4*
V (mg kg ⁻¹)	126	133±5	216	243±10
Zn (mg kg ⁻¹)	380	364±23	150	159±8

n. d.= no determinado.

La calidad del sedimento se evaluó con base en la guía propuesta por Long et al. (1995) que define 2 niveles: efectos de rango bajo (ERL) y con los FEN. De acuerdo con los autores, los rangos de referencia permiten aproximarse a los posibles efectos negativos de los metales sobre la biota y concluir sobre los metales contaminantes presentes.

Asociaciones de diatomeas bentónicas. Tanto las muestras de sedimentos como de roca se observaron en campo para constatar que las asociaciones estaban constituidas por diatomeas vivas. En el laboratorio, de cada roca recolectada se cepilló un área aproximada de 100 cm² con un cepillo de dientes, mientras se agregaba agua purificada; el concentrado de diatomeas y materia orgánica se vació en un tubo de ensayo de 60 ml. Para desprender las frústulas de los sedimentos, en un vaso de precipitados de 250 ml se colocó una muestra de sedimentos hasta la línea de 150 ml, posteriormente, se agregó agua purificada hasta los 250 ml y se colocó en una cubeta de ultrasonido durante un minuto. Los sedimentos gruesos fueron eliminados por decantación y el concentrado de diatomeas y materia orgánica se colocó en un tubo de ensayo de 60 ml. Las muestras una vez en los tubos de ensayo tanto de sedimentos como de rocas, se dejaron sedimentar durante 2 h para eliminar el exceso de agua en la muestra. Seguido, se eliminó la materia orgánica dentro y fuera de las frústulas mediante oxidación. Para ello, la muestra se mezcló con etanol comercial y ácido nítrico en una proporción de 1:1:2; esto varió según la cantidad de materia orgánica en la muestra (Siqueiros-Beltrones, 2002). Después de la oxidación se hicieron lavados repetidos con agua purificada hasta obtener un pH > 6 y se montaron 2 laminillas permanentes por muestra con resina sintética (Pleurax, IR= 1.7).

Cuadro 2. Cálculo de parámetros estadísticos de la composición textural de sedimentos de playa de la costa occidental de la bahía La Ventana, BCS. Muestras de marzo

Muestra	Media	Desviación estándar	Sesgo
S1	Arena gruesa (0.65)	Moderadamente bien seleccionada (0.68)	Fuerte sesgo a los gruesos (-0.6)
S2	Arena fina (2.03)	Pobremente seleccionada (1.25)	Fuerte sesgo a los gruesos (-0.71)
S3	Arena gruesa (0.73)	Pobremente seleccionada (1,1)	Fuerte sesgo a los gruesos (-1.02)

Las diatomeas fueron identificadas bajo un microscopio compuesto —con óptica planapocromática y contraste de fases— y con base en Hernández-Almeida y Siqueiros-Beltrones (2008, 2012); Hustedt (1959, 1961-1966); López-Fuerte et al. (2010); Moreno et al. (1996); Peragallo y Peragallo (1908); Round et al. (1990); Schmidt et al. (1874-1959); Siqueiros-Beltrones (2002, 2006); Siqueiros-Beltrones y Hernández-Almeida (2006); Witkowski et al. (2000). Para la elaboración del catálogo iconográfico de referencia se tomaron fotografías utilizando un ocular fotográfico CMOS, Konus, digital.

Se determinaron las abundancias relativas de los taxa sobre la base de un conteo mínimo de 100 valvas, siempre y cuando después de que en los primeros conteos de más de 300 valvas la dominancia de un taxón rebasaba el 50% de la abundancia total (Siqueiros-Beltrones, 2002). Con base en éstas, se calcularon los índices que junto con la riqueza de especies (S) describen la estructura de las asociaciones: equidad de Pielou (J'), diversidad de Shannon (H'), dominancia (λ) y diversidad de Simpson ($1-\lambda$). También, se calculó la similitud entre muestras, mediante presencia y ausencia de especies (Jaccard), e incluyendo sus abundancias relativas (Bray-Curtis) (Brower et al., 1984).

Resultados

Composición textural y mineralógica. En los sedimentos de los sitios S1 y S3 el tamaño medio son arenas gruesas, mientras que en sitio S2 son arenas finas. El sitio S1 presenta selección moderadamente buena y los sitios S2 y S3 presentan pobre selección. En los 3 sitios los sedimentos presentan distribuciones de tamaño sesgadas a los tamaños gruesos (Cuadro 2; Fig. 2).

Los minerales presentes en los 3 sitios son cuarzo cristalino (Q Cr), cuarzo lechoso (Q Lch), cuarzo oxidado (Q Ox), cuarzo con fragmentos de otros minerales (Q min), biotita (B), feldespatos (Fld.), carbonatos biogénicos (CO_3), silicatos (Sil.) y otros minerales como olivino (Oliv.), piroxenos (Px) y anfíboles (Anf.) (Fig. 2). En los 3 sitios el mineral más abundante es cuarzo (80 a 95%). El mineral de biotita es abundante en el sitio S2 (15%), seguido del sitio S1 (5%) y escaso en el sitio S3

(1%). Feldespatos, carbonatos biogénicos y silicatos se presentan en concentraciones menores a 5%. Minerales como olivino, anfíbol y piroxeno se pueden encontrar en el sitio S1 (3.5%).

Geoquímica de los elementos mayores y traza en sedimentos. La validación de la técnica utilizada (Cuadro 1) muestra buena precisión para casi todos los elementos, excepto para Ba, Hg y Cd. El bario no está considerado en el certificado y para el mercurio su coeficiente de variación resultó muy amplio, sobre todo, con el estándar de referencia MESS-3. Sin embargo, los resultados obtenidos son menores a la corteza terrestre y coinciden con concentraciones en sedimentos de playa estimados por Posada-Ayala (2011); por ello, fueron incluidos en este trabajo. Por su parte, los valores de Cd fueron menores al límite de detección ($\text{Cd} < 0.1 \text{ mg kg}^{-1}$) en todas las muestras, sin embargo, este elemento sí fue bien validado (Cuadro 1). Estos sedimentos provienen de zonas aledañas a los 3 sitios examinados de la bahía La Ventana y para las 3 fechas de muestreo.

Los resultados del análisis de elementos mayoritarios y traza en los sedimentos se muestran en el Cuadro 3. Para efectos de comparación se incluyen los valores promedio de la corteza terrestre (Wedepohl, 1995) y los valores calculados para efectos de rango bajo (ERL) según Long et al. (1995). Únicamente se consideraron los ERL, debido a que los resultados obtenidos no sobrepasan este valor (Cuadro 3) y los de rango medio (ERM) son más concentrados, hasta en un orden de magnitud.

Los FEN en sedimentos de playa para los 3 sitios muestran enriquecimiento ligero para Ba, Sr y moderado para Sb. Para Li, Ca, Fe, Cd, Co, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Pb, U, V y Zn, se observaron valores de $\text{FEN} < 1$; sólo una muestra mostró valor del $\text{FEN} > 1$ para As, pero se necesita que sea mayor de 3 para considerar un enriquecimiento moderado (Fig. 3).

De acuerdo con los promedios de los FEN calculados, los elementos más enriquecidos fueron en este orden $\text{Sr} > \text{Sb} > \text{Ba}$. El resto: Cd, As, Pb, Li, Cr, Zn, V, Hg, Cu, Fe, Ni, Mn, U y Co, se consideran no enriquecidos, en orden de mayor a menor (Fig. 3). Sin embargo, los valores de Cd y de Hg se deben interpretar con precaución, puesto que, aunque, en general, los resultados de la validación de Cd son buenos, estos fueron $< 0.1 \text{ mg kg}^{-1}$ en todas las

Cuadro 3. Concentraciones de Al, Ca y Fe (%); de Li, As, Ba, Cd, Co, Cu, Mn, Ni, Pb, Sb, Sr, U, y Zn (mg kg^{-1}) y Hg ($\mu\text{g kg}^{-1}$) en muestras de sedimentos de playa de la bahía La Ventana, BCS. S= sitio de muestreo; m= marzo, j= junio, s= septiembre. CTS= valor promedio en la corteza terrestre superior (Wedepohl, 1995). ERL= efectos de rango bajo (Long et al., 1995)

	<i>S1-m</i>	<i>S1-j</i>	<i>S1-s</i>	<i>S2-m</i>	<i>S2-j</i>	<i>S2-s</i>	<i>S3-m</i>	<i>S3-j</i>	<i>S3-s</i>	CTS	ERL
Li	10.3	12.7	12.3	17.7	11.9	14.1	13.4	14.2	13.7	22	-
Al	8.59	8.46	8.61	8.47	8.41	8.98	9.12	9.19	9.26	7.74	-
Ca	2.62	2.48	2.5	3.15	2.6	2.44	2.23	2.37	2.24	2.94	-
Fe	0.35	0.41	0.4	0.68	0.44	0.53	0.32	0.4	0.39	3.08	-
As	1.8	1.5	2	2.6	1.9	1.8	1.8	2.1	2	2	8.2
Ba	1 250	1 260	1 240	1 090	1 140	1 160	1 050	1 020	1 010	668	-
Cd	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.1	1.2
Co	0.9	1.1	0.8	1.9	1	1	0.7	0.7	0.6	11.6	-
Cr	33.3	6.1	14.3	21.7	5.9	6.5	4.5	7.1	5.8	35	81
Cu	1.7	6.6	4.5	0.6	1	1.1	3.2	1	1.2	14.3	34
Hg	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	< 10	56	150
Mn	54	63	47	119	70	69	35	42	34	527	-
Ni	1.7	3.5	2.1	3	1.9	1.8	2.8	1.8	1.5	18.6	20.9
Pb	15.7	15.5	15.5	14.4	14.8	13.7	13	13.5	13	17	46.7
Sb	0.3	0.4	0.4	0.9	0.5	1	0.9	0.9	0.8	0.31	-
Sr	779	794	791	818	793	798	807	813	832	316	-
U	0.3	0.4	0.3	0.3	0.4	0.2	0.2	0.2	0.2	2.5	-
V	9	11	10	16	11	13	8	10	10	53	-
Zn	10.5	15.2	14.3	26.3	13.6	13.3	20	12.9	10.5	52	150

muestras, es decir, menor que el límite de detección del equipo. Aun así, la validación de la técnica admite que las concentraciones de Cd en el sedimento son correctas, i. e., Cd no está enriquecido. El Hg no mostró buena validación

de la técnica como el Cd (Cuadro 1); pero los valores de Hg fueron menores al límite de detección.

Considerando los criterios de calidad del sedimento de acuerdo con Long et al. (1995), es decir, los efectos

Figura 3. Factores de enriquecimiento normalizado (FEN) calculado para las muestras de sedimento de la playa occidental de la bahía La Ventana, BCS. S= sitio de muestreo; m= marzo, j= junio, s= septiembre.

de rango bajo (ERL), todos los contenidos de dichos elementos en los sedimentos de playa son menores a la referencia incluida en el Cuadro 3.

Asociaciones de diatomeas bentónicas. El inventario florístico de diatomeas bentónicas tanto de sedimentos como de rocas redituó 182 taxa entre especies y variedades (Cuadro 4; Figs. 6-207). Los géneros mejor representados fueron: *Amphora* con 19 taxa, *Navicula* 19, *Cocconeis* 14, *Mastogloia* 14 y *Diploneis* 11. Se incluyen 30 nuevos registros para la península de Baja California, así como 14 para todo el país. En sedimentos *Diploneis papula* fue abundante (> 40%) y *Amphora wisei*, *Cocconeis guttata* y *Navicula* sp. fueron comunes (20-30%). Mientras que en el sustrato rocoso los taxa comunes fueron *Mastogloia crucicula*, *Cocconeis krammeri* y *C. sublitoralis* (20-30%) y los poco comunes: *Actinocyclus curvatulus*, *Seminavis* cf. *obtusiuscula*, *A. angusta*, *Caloneis* sp. 1, *Cocconeis dirupta*, *C. convexa*, *Grammatophora oceanica*, *Navicula pennata*, *Nitzschia frustulum* var. *perminuta* y *Rhopalodia pacifica*.

La distribución más homogénea entre los taxa se observó en las asociaciones epilíticas y se reflejó en los valores altos de diversidad ($H' > 4$) y de equidad (J') (Cuadro 5). Por otro lado, los valores de diversidad calculados son heterogéneos y resultan de varias combinaciones entre el

Cuadro 4. Valores de los índices que describen la estructura de asociaciones de diatomeas bentónicas en 3 sitios de la playa occidental de la bahía La Ventana, BCS. Tamaño de muestra (N), riqueza de especies (S), equidad de Pielou (J'), diversidad de Shannon (H'), dominancia de Simpson (λ), diversidad de Simpson ($1-\lambda$). R= roca; Se= sedimentos

Muestra	N	S	J'	H'	λ	$1-\lambda$
Marzo R1	260	35	0.80	4.11	0.100	0.900
Marzo R2	154	28	0.75	3.62	0.144	0.856
Marzo R3	144	24	0.71	3.28	0.167	0.833
Junio R1	159	43	0.87	4.70	0.052	0.947
Junio R2	152	31	0.80	3.98	0.097	0.903
Junio R3	135	29	0.73	3.55	0.158	0.841
Sep. R1	295	41	0.78	4.18	0.088	0.912
Sep. R2	152	16	0.80	3.20	0.122	0.878
Sep. R3	128	18	0.61	2.53	0.279	0.721
Marzo Se1	315	36	0.70	3.64	0.144	0.856
Marzo Se2	101	23	0.78	3.52	0.171	0.829
Marzo Se3	115	19	0.77	3.26	0.159	0.841
Junio Se1	119	13	0.31	1.15	0.707	0.293
Junio Se2	147	30	0.55	2.71	0.379	0.621
Junio Se3	137	25	0.57	2.67	0.350	0.650
Sep. Se1	108	19	0.60	2.55	0.330	0.670
Sep. Se2	116	29	0.69	3.35	0.209	0.790
Sep. Se3	105	14	0.59	2.24	0.358	0.642

número de taxa en cada muestra y de cómo se distribuyen sus abundancias, i. e., el balance entre equidad y riqueza.

La diversidad fue menor en sedimentos ($H= 1.1-3.6$) que en rocas ($H= 2.5-4.7$), debido tanto a la menor riqueza de especies como a una equidad más baja, lo que se refleja en los valores del índice de Simpson. Sin embargo, de manera general, en ambos sustratos los valores calculados describen asociaciones típicas de diatomeas bentónicas marinas en las que las abundancias relativas de los taxa se distribuyen de manera desigual, con pocos taxa muy abundantes y muchos taxa poco comunes y raros (Siqueiros-Beltrones, 2005). Dado que las superficies de muestreo fueron muy aproximadas para rocas y sedimentos, es poco probable que ello haya influido en dichas diferencias.

De acuerdo con la similitud medida con base en presencia/ausencia de especies (Jaccard) no se muestran agrupaciones debido a valores bajos de similitud (Fig. 4). Sin embargo, se aprecia una separación clara entre sustratos. Esto denota una asociación distinta de especies en cada muestra con pocos taxa en común entre ellas. Asimismo, al considerar la abundancia relativa de cada taxón (Bray-Curtis) también se observa una agrupación por sustrato, salvo por 2 muestras de roca de septiembre (Fig. 5). Los valores altos de similitud entre las muestras de sedimento de junio y septiembre se deben a que comparten taxa con abundancias relativas similares y a que comparten *D. papula*, un taxón muy abundante y a *A. wisei* que fue común; dicho valor de similitud es alto y comúnmente observado entre submuestras de una misma muestra. Sin embargo, la disimilitud en el resto del análisis indica que no existe patrón de distribución de acuerdo con el sitio o temporada y coincide con la distribución en parches comúnmente descrita para taxocenosis de diatomeas bentónicas (Siqueiros-Beltrones, 2002). Las diferencias en las asociaciones de diatomeas bentónicas, cuyas variaciones muestran patrón de segregación solamente en cuanto al tipo de sustrato, resultan independientes de las

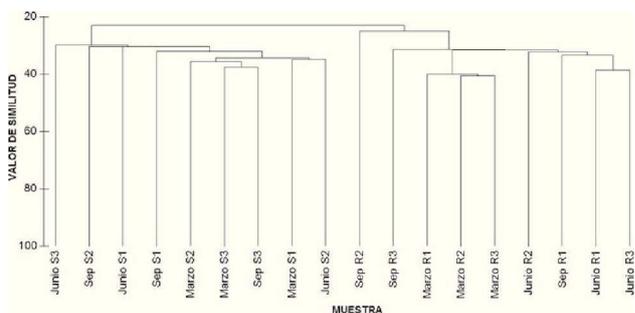


Figura 4. Similitud medida con el índice de Jaccard entre muestras de diatomeas en roca (R) y sedimentos (S), recolectadas en la playa occidental de la bahía La Ventana, BCS.

Cuadro 5. Diatomeas epilíticas del submareal y de sedimentos del intermareal de la playa de la bahía La Ventana, BCS. *Nuevos registros (30) para la península de BC y para México** (14)

<i>Achnanthes brevipes</i> var. <i>intermedia</i> (Kützing) Cleve	<i>Denticula elegans</i> Kützing
<i>Achnanthes hauckiana</i> Grunow	<i>Diatomella</i> sp.
<i>Achnanthes longipes</i> Agardh	<i>Diploneis bombus</i> Ehrenberg
<i>Achnanthes manifera</i> Brun	<i>Diploneis</i> cf. <i>vacillans</i> (A. Schmidt) Cleve
<i>Achnanthes</i> sp. 1	<i>Diploneis crabro</i> Ehrenberg
<i>Achnanthes yaquiniensis</i> Hendey	<i>Diploneis didyma</i> Ehrenberg
<i>Actinocyclus curvatus</i> Janish in A. Schmidt*	<i>Diploneis droopii</i> Witkowski, Beleggratis y Economu-Amillii**
<i>Amphicoconeis disculoides</i> (Hustedt) Stefano y Marino	<i>Diploneis littoralis</i> (Donkin) Cleve
<i>Amphora angulosa</i> Grunow**	<i>Diploneis littoralis</i> var. <i>clathrata</i> Østrupp*
<i>Amphora angusta</i> Gregory	<i>Diploneis papula</i> (A. Schmidt) Cleve
<i>Amphora angustissima</i> Heiden in Heiden y Kolbe**	<i>Diploneis smithii</i> (Brébisson) Cleve
<i>Amphora bigibba</i> Grunow	<i>Diploneis</i> sp.1
<i>Amphora kolbei</i> Aleem*	<i>Diploneis</i> sp. 2 (cf. <i>Navicula limitanea</i> A. Schmidt.)
<i>Amphora</i> cf. <i>profusa</i> Giffen**	<i>Diploneis splendida</i> (Gregory) Cleve*
<i>Amphora contracta</i> Grunow**	<i>Diploneis subcincta</i> (A. Schmidt) Cleve
<i>Amphora crassa</i> Gregory**	<i>Diploneis suborbicularis</i> (Gregory) Cleve
<i>Amphora holsaticoides</i> Naguno y Kobayashi	<i>Fallacia bioculata</i> Grunow**
<i>Amphora immarginata</i> Naguno	<i>Fallacia florinae</i> (Möeller) Witkowski
<i>Amphora proteus</i> Gregory	<i>Fallacia forcipata</i> (Greville) Stickle y D. G. Mann
<i>Amphora proteus</i> var. <i>contigua</i> Cleve	<i>Fallacia vittata</i> (Cleve) D. G. Mann
<i>Amphora</i> sp. 1	<i>Fragilariopsis doliolus</i> (Walich) Medlin y Sims
<i>Amphora</i> sp. 2	<i>Glyphodesmis</i> sp.
<i>Amphora spectabilis</i> Gregory	<i>Gomphonemopsis pseudexigua</i> (Simonsen) Medlin
<i>Amphora terroris</i> Ehrenberg	<i>Grammatophora marina</i> (Lyngbye) Kützing
<i>Amphora wisei</i> (Salah) Simonsen	<i>Grammatophora marina</i> var. <i>subundulata</i> Grunow*
<i>Biddulphia biddulphiana</i> (J. E. Smith) Boyer	<i>Grammatophora oceanica</i> (Ehrenberg pro parte) Grunow
<i>Biddulphia tridens</i> (Ehrenberg) Ehrenberg	<i>Grammatophora</i> sp.1
<i>Caloneis liber</i> (Cleve) Smith	<i>Grammatophora undulata</i> Ehrenberg
<i>Caloneis linearis</i> (Grunow) Boyer	<i>Halamphora acutiuscula</i> (Kützing) Levkov
<i>Caloneis maxima</i> var. <i>excentrica</i> Grunow*	<i>Halamphora clara</i> (A. Schmidt) Levkov*
<i>Caloneis</i> sp. 1	<i>Halamphora</i> cf. <i>interrupta</i> (Heiden) Levkov*
<i>Caloneis</i> sp. 2	<i>Halamphora coffeaeformis</i> (C. Agardh) Levkov
<i>Campylodiscus simulans</i> Gregory	<i>Halamphora costata</i> (W. Smith) Levkov
<i>Campylopyxis garkeana</i> (Grunow) Medlin	<i>Halamphora turgida</i> (Gregory) Levkov
<i>Cocconeis convexa</i> Giffen	<i>Licmophora communis</i> (Heiberg) Grunow
<i>Cocconeis</i> cf. <i>hauniensis</i> Witkowski emend. Witkowski	<i>Lyrella abrupta</i> (Gregory) D. G. Mann
<i>Cocconeis</i> cf. <i>pelta</i> A. Schmidt**	<i>Lyrella hennedyi</i> (W. Smith) Stickle y D. G. Mann
<i>Cocconeis diminuta</i> Pantocsek	<i>Lyrella irrorata</i> (Greville) D. G. Mann
<i>Cocconeis dirupta</i> Gregory	<i>Lyrella irroratoides</i> (Hustedt) D. G. Mann**
<i>Cocconeis dirupta</i> var. <i>flexella</i> (Janish y Rabenhorst) Grunow	<i>Mastogloia acutiuscula</i> var. <i>elliptica</i> Hustedt
<i>Cocconeis distans</i> Gregory	<i>Mastogloia angusta</i> Hustedt**
<i>Cocconeis krammeri</i> Lange-Bertalot y Metzeltin*	<i>Mastogloia asperuloides</i> Hustedt**
<i>Cocconeis peltooides</i> Hustedt	<i>Mastogloia</i> cf. <i>decepiens</i> Hustedt
<i>Cocconeis placentula</i> Ehrenberg	<i>Mastogloia</i> cf. <i>horvathiana</i> Grunow
<i>Cocconeis</i> sp. 1	<i>Mastogloia citrus</i> Cleve
<i>Cocconeis</i> sp. 2	<i>Mastogloia crucicula</i> (Grunow) Cleve
<i>Cocconeis speciosa</i> Gregory	<i>Mastogloia crucicula</i> var. <i>alternans</i> Zanon
<i>Cocconeis sublitoralis</i> Hendey	<i>Mastogloia fimbriata</i> (Brightwell) Cleve
<i>Cocconeopsis fraudulenta</i> (A. Schmidt) Witkowski, Lange-Bertalot y Metzeltin	<i>Mastogloia grunowi</i> A. Schmidt
<i>Cocconeopsis patrickae</i> (Hustedt) Witkowski, Lange-Bertalot y Metzeltin	<i>Mastogloia inaequalis</i> Cleve
<i>Cymbellonitzschia</i> cf. <i>minima</i> Hustedt*	<i>Mastogloia ovulum</i> Hustedt*
<i>Delphineis surirella</i> (Ehrenberg) Andrews	<i>Mastogloia ovum paschale</i> (A. Schmidt) Mann**
	<i>Mastogloia pusilla</i> var. <i>subcapitata</i> Hustedt
	<i>Mastogloia</i> sp. 1

Cuadro 5. Continúa

<i>Mastogloia</i> sp. 2	<i>Opephora pacifica</i> (Grunow) Petit
<i>Mastogloia splendida</i> (Gregory) Cleve*	<i>Paralia sulcata</i> (Ehrenberg) Cleve
<i>Melosira nummuloides</i> (Dillwyn) Agardh	<i>Paralia sulcata</i> var. <i>crenulata</i> Grunow
<i>Navicula cancellata</i> Donkin	<i>Plagiogramma pulchellum</i> var. <i>pygmaea</i> (Greville) Peragallo
<i>Navicula carinifera</i> Grunow	<i>Plagiogrammopsis vanheurckii</i> (Grunow) Hasle, von Stosch y Syvertsen
<i>Navicula</i> cf. <i>agnita</i> Hustedt	<i>Plagiotropis vitrea</i> var. <i>genuina</i> A. Cleve
<i>Navicula</i> cf. <i>flebilis</i> Cholnoky**	<i>Pleurosigma salinarum</i> Grunow
<i>Navicula</i> cf. <i>radiosa</i> Kützing*	<i>Psammodyction coarctata</i> (Grunow) D. G. Mann
<i>Navicula</i> cf. <i>salinarum</i> Grunow	<i>Psammodyction</i> sp. 1
<i>Navicula cincta</i> (Ehrenberg) Ralfs y Pritchard	<i>Psammodiscus nitidus</i> (Gregory) Round y Mann
<i>Navicula cryptocephala</i> var. <i>subsalina</i> Hustedt	<i>Raphoneis amphiceros</i> (Ehrenberg) Ehrenberg
<i>Navicula digitoradiata</i> (Gregory) Ralfs in Pritchard	<i>Raphoneisnitida</i> (Gregory) Grunow
<i>Navicula directa</i> (W. Smith) Ralfs	<i>Rhopalodia pacifica</i> Krammer*
<i>Navicula disserta</i> Hustedt	<i>Seminavis</i> cf. <i>obtusiuscula</i> (Grunow) Danieledis y D. G. Mann
<i>Navicula diversistriata</i> Hustedt	<i>Seminavis ventricosa</i> (Gregory) García-Baptista
<i>Navicula johanrosii</i> Giffen**	<i>Shionodiscus oestrupii</i> (Ostenfeld) A. J. Alverson, S. H. Kang y E. C. Theriot
<i>Navicula longa</i> Gregory	<i>Surirella hybrida</i> var. <i>contracta</i> Peragallo*
<i>Navicula longa</i> var. <i>irregularis</i> Hustedt	<i>Surirella fastuosa</i> (Ehrenberg) Kützing
<i>Navicula platyventris</i> Meister	<i>Surirella fastuosa</i> var. <i>cuneata</i> A. Schmidt
<i>Navicula</i> sp. 1	<i>Surirella fastuosa</i> var. <i>suborbicularis</i> Grunow
<i>Navicula</i> sp. 3	<i>Surirella reniformis</i> Grunow
<i>Navicula</i> sp. 4	<i>Synedra commutata</i> Grunow in Cleve y Round
<i>Navicula zostereti</i> Grunow	<i>Synedra crystallina</i> (C. Agardh) Kützing
<i>Nitzschia constricta</i> (Kützing) Ralfs	<i>Tabularia fasciculata</i> (C. Agardh) D. M. Williams y Round
<i>Nitzschia distans</i> Gregory	<i>Tabularia gaillonii</i> (Bory de Saint-Vincent) Bukhtiyarova
<i>Nitzschia filiformis</i> (W. Smith) Hustedt	<i>Thalassiosira eccentrica</i> (Ehrenberg) Cleve
<i>Nitzschia frustulum</i> var. <i>perminuta</i> Grunow	<i>Thalassiosira lineata</i> Jousé
<i>Nitzschia gracilis</i> (Hantzsch) Grunow	<i>Thalassiosira</i> sp 1.
<i>Nitzschia</i> cf. <i>kützingiana</i> Hilse	<i>Toxarium undulatum</i> Bailey
<i>Nitzschia longissima</i> var. <i>costata</i> Hustedt in Schmidt et al.	<i>Trachyneis aspera</i> (Ehrenberg) Cleve
<i>Nitzschia panduriformis</i> var. <i>minor</i> W. Gregory	<i>Trachyneis velata</i> A. Schmidt
<i>Nitzschia punctata</i> var. <i>coarctata</i> (Grunow) Hustedt	<i>Triceratium dubium</i> Brightwell
<i>Nitzschia sigmaformis</i> Hustedt	<i>Tryblionella apiculata</i> Gregory
<i>Nupela</i> cf. <i>lesothenis</i> (Schoeman) Lange-Bertalot**	<i>Tryblionella marginulata</i> var. <i>didyma</i> (Grunow) D. G. Mann
<i>Odontella aurita</i> Greville	<i>Vikingea</i> sp.
<i>Oestrupia powelii</i> (Lewis) Heiden in A. Schmidt	
<i>Opephora</i> cf. <i>gemma</i> (Grunow) Hustedt	

temporadas de secas y de lluvias, o de las concentraciones de los EPT.

Discusión

Composición textural y mineralógica. Las mayores concentraciones de Li, Ca, Fe, As, Co, Cr, Mn, V y Zn, se encuentran en el sitio S2; ahí se presenta un mayor porcentaje de arena fina (45%) en comparación con los sitios S1 y S3 (0.4%, 0.25%), lo cual se asocia al aporte de estos elementos por el arroyo El Zotol que descarga directamente en esta playa. Por otra parte, se infiere que la concentración está relacionada a la resistencia de los minerales, ya que los menos resistentes se van acumulando en fracciones más finas como sería el caso de la biotita,

misma que se presenta con mayor abundancia en esta muestra.

El sitio de muestreo (S1) localizado al norte del arroyo el Zotol presenta mejor selección que los sitios al sur, lo cual puede estar relacionado tanto a un menor aporte de arenas finas como al proceso de selección, que se lleva a cabo en la costa por la energía de oleaje que en este sitio es mayor, removiéndolo, así, los tamaños finos. Los 3 sitios muestran un fuerte sesgo hacia los tamaños gruesos, lo cual confirma (Posada-Ayala, 2011) que es una costa dinámica que no permite la acumulación de arenas muy finas, limos y arcillas. Ello inclinaría la selección hacia diatomeas epipsámicas muy pequeñas (> 10µm) que viven adheridas a los granos gruesos de arena, e. g., ciertas especies de *Cocconeis* y de *Opephora*, mismas que no

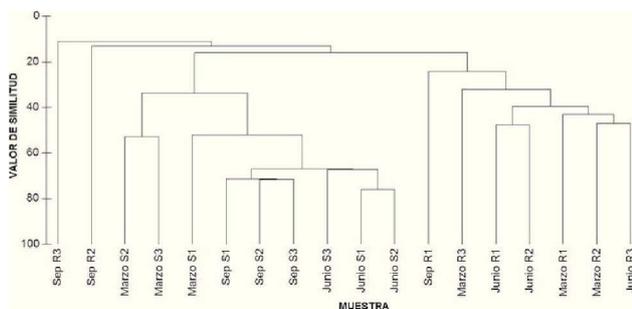


Figura 5. Similitud medida con el índice de Bray Curtis entre muestras de diatomeas en roca (R) y sedimentos (S), recolectadas en la playa occidental de la bahía La Ventana, BCS.

fueron frecuentes. Mientras que las formas grandes fueron comunes. Empero, una discriminación precisa requiere de un diseño de estudio *ex profeso*.

Geoquímica de elementos mayores y traza en los sedimentos. La costa occidental de la bahía La Ventana tiene una orientación norte-sur asociada a la presencia de la falla geológica activa denominada El Sargento. En esta zona se han detectado emanaciones de agua caliente que pudiera estar enriquecida con minerales debido a la lixiviación natural de las rocas en contacto con esa agua, enriqueciendo, así, con EPT —metales y metaloides— los materiales de la playa de forma natural, dada la presencia de rocas locales que contienen estos elementos. Por otro lado, la costa sur de la bahía recibe materiales producto de la lixiviación natural de rocas de la cuenca hidrográfica de San Juan de los Planes (SJLP), BCS y recibe, además, materiales producto del acarreo fluvial de los desechos mineros enriquecidos con EPT (Posada-Ayala, 2011). No obstante, no se detectó alteración en los sedimentos estudiados y los enriquecimientos de Sr, Sb y Ba entran en el intervalo de 1-3 y de acuerdo con Cobelo-García y Prego (2004) los promedios de los FEN de 1-2 son sedimentos con enriquecimiento nulo o bajo, como es el caso del Ba (Promedio FEN Ba= 1.5), del Sb= 1.9 y del Sr= 2.2); sin embargo, considerando el tamaño de grano del sedimento que es grueso, esto puede indicar que están constituyendo los minerales de los sedimentos examinados. Debido a que la zona costera es dinámica por la presencia de oleaje y corrientes litorales, el sedimento fino que pudiera estar llegando de la cuenca terrestre (SJLP) al ambiente marino es transportado a la plataforma más profunda como se observa en la costa sur de la bahía (Posada-Ayala, 2011), en donde el canal submarino, ubicado en la zona de descarga fluvial (La Bocana), presenta los valores mayores de As en sedimentos del fondo de la bahía.

Por otra parte, el Sb tiene características toxicológicas similares al arsénico. El ligero enriquecimiento de Sb

se ha observado previamente en sedimentos marinos de la bahía de La Paz y laguna de La Paz (0.9 mg kg^{-1} ; Rodríguez-Meza, 1999). Aunque no representan riesgo los valores encontrados en este estudio, debe tomarse en cuenta que en la parte centro-sur de la bahía cerca a la desembocadura de los arroyos de la cuenca de San Juan de Los Planes, los valores están entre 1.7 mg kg^{-1} y en La Bocana 12.4 mg kg^{-1} . Esto puede deberse a las actividades mineras, ya que en los desechos del distrito minero San Antonio se tienen valores de $6\,800 \text{ mg kg}^{-1}$ (Posada-Ayala, 2011). Por el contrario, Sr y Ba no tienen origen en los desechos mineros y sus concentraciones en este estudio no los ubican como elementos potencialmente tóxicos. El origen del ligero enriquecimiento de Sr puede ser por sedimentos carbonatados y el ligero aumento de las concentraciones de bario puede estar asociado a descargas torrenciales de agua de lluvia y también a aguas altamente productivas; esto se ha observado mediante la fijación y adsorción de Ba en diatomeas (Sternberg et al., 2005). Así, de acuerdo con los criterios de calidad de los sedimentos, i. e., efectos de rango bajo (ERL) según Long et al. (1995), los contenidos de dichos elementos en los sedimentos de playa son menores a la referencia incluida en el Cuadro 3. Sin embargo, los elementos ligeramente enriquecidos (Sr, Sb y Ba) no están incluidos en estos criterios de Long et al. (1995).

Asociaciones de diatomeas bentónicas. Las diatomeas se consideran indicadores precisos de la toxicidad de metales pesados y a nivel de asociaciones se pueden observar cambios en la estructura que reflejan los efectos de diversos contaminantes (Genter, 1996; Pérès, 1996; Ivorra et al., 1999). No obstante, dada la manera en que las diatomeas pueden responder a corto y largo plazos a tales contingencias, nuestra hipótesis *a priori* fue que no se observaría impacto (Ho) en la costa occidental de bahía La Ventana. Así, el objetivo propuesto en esta investigación fue el de generar una base florística para la costa occidental de la bahía, asumiendo que ésta no mostraría efectos deletéreos por elementos potencialmente tóxicos que se hallaran enriquecidos de manera natural. Esto en contraparte de la costa sur de la bahía en donde la contaminación antropogénica por minería ha sido detectada con base en las concentraciones de EPT que alcanzan niveles de riesgo medio y alto (Posada-Ayala, 2011), no obstante, ningún impacto en la biota marina ha sido explorado hasta ahora.

Las asociaciones de diatomeas de la playa occidental de bahía La Ventana mostraron una estructura típica de ambientes rocosos y de sedimentos con pocas taxa abundantes y comunes, muchas especies poco comunes y raras (Siqueiros-Beltrones, 2005), así como una riqueza de especies elevada, repartida heterogéneamente

entre las muestras. Ello se reflejó en valores bajos de similitud relacionados con la distribución en parches de las asociaciones de diatomeas bentónicas (Siqueiros-Beltrones, 2002).

El caso de la muestra con valor mínimo de diversidad en donde *D. papula* dominó en abundancia evoca el estudio de Underwood y Paterson (1993) quienes registraron proliferaciones de especies oportunistas tras un impacto por aplicación experimental de un biocida. Sin embargo, los valores de diversidad calculados son, en general, altos y caen dentro de los intervalos considerados como indicadores de condiciones naturales, i. e., $1 < H' < 5$ con valores comunes de 4 o más y frecuentemente de 5, propios de asociaciones típicas de diatomeas bentónicas (Siqueiros-Beltrones, 2005; Siqueiros-Beltrones y Argumedo-Hernández, 2012). Por ello, suponemos que la abundancia de *D. papula* reflejó una proliferación espacio/temporal como las que suceden frecuentemente en taxocenosis de diatomeas bentónicas de sedimentos, mismas que definen los parches característicos (Siqueiros-Beltrones, 2002), cuyas causas no han sido precisadas. Igualmente probable sería que dichas proliferaciones reflejen periodos de baja dinámica en la playa, mientras que una remoción constante de sedimentos tendería a homogeneizar la distribución de los taxa. Habría que definir la escala espacial en la que dichos cambios en distribución serían significativos para que eventualmente pudiera referenciarse el efecto de algún agente que afectara dicha distribución, como el caso de EPT.

Comparando la estructura de las asociaciones de diatomeas bentónicas estudiadas en la península de Baja California (Siqueiros-Beltrones, 2002), la lista de especies de diatomeas bentónicas de la bahía de La Ventana muestra una riqueza moderadamente alta con muchos géneros representados. A diferencia de otras asociaciones, destaca el menor número de especies de *Nitzschia* y las numerosas especies de *Mastogloia* y *Diploneis* que indican influencia de sistemas de manglar (López-Fuerte et al., 2010), sobre todo, en el sustrato rocoso, aun cuando estos taxa son más comunes en sedimentos.

Las diferencias de diversidad y composición de especies como las observadas, en general, son comunes en asociaciones de diatomeas bentónicas. Estudios posteriores habrán de considerar dicha distribución para tratar de delimitar su extensión, así como el área de influencia de los EPT medidos. De acuerdo con lo anterior, se confirma que las asociaciones de diatomeas muestran una estructura típica de condiciones naturales no perturbadas, a la vez que las frústulas de las diatomeas mostraron una apariencia sana, sin deformaciones. Por lo tanto, no existen evidencias para rechazar la hipótesis de que las asociaciones de diatomeas bentónicas descritas

no exhiben algún impacto debido a influencia de EPT presentes en las playas de la bahía La Ventana.

Por otra parte, el análisis de similitud indicó que no existe patrón de distribución de acuerdo con el sitio o temporada y, aunque se manifestó una discriminación entre las muestras según el sustrato, la marcada disimilitud entre los sitios de recolecta sugiere que ambas asociaciones discriminadas bien pueden estar constituidas por parches cuyas estructuras reflejan valores distintos de diversidad, equidad y dominancia. Así, la agrupación de las muestras de diatomeas de junio y septiembre (Bray-Curtis) atribuidas a *D. papula* y a *A. wisei* sugiere la formación de parches similares en épocas distintas, debido a especies de larga permanencia. Este valor de similitud es comparativamente alto y se observa frecuentemente entre submuestras de una misma muestra. De acuerdo con esto, se deben considerar la extensión y permanencia de las asociaciones de diatomeas bentónicas tanto en tiempo como en espacio en estudios futuros, ya sean taxonómicos o ecológicos.

Los 30 taxa que representan nuevos registros para la región son indicadores de lo limitado de los inventarios con los que se cuenta actualmente para las costas de la península, lo que dificulta el uso de diatomeas como indicadores de este tipo de impacto ambiental. Aunado a esto, la caracterización de ambientes utilizando diatomeas como especies indicadoras requiere de estudios más complejos que comprendan otras variables ambientales, así como técnicas numéricas que detecten relaciones entre dichas variables, y una base estadística que permita establecer su significancia. No obstante, consideramos necesario partir de una base florística confiable y, por lo tanto, válido tomar como referencia una taxocenosis típicamente estructurada ante una determinada contingencia. Consecuentemente, estos resultados servirán como referencia para estudios futuros que busquen determinar si existe algún tipo de impacto en asociaciones de diatomeas bentónicas debido al enriquecimiento de este tipo de elementos, ya sea por causas naturales o debido a la práctica minera.

Agradecimientos

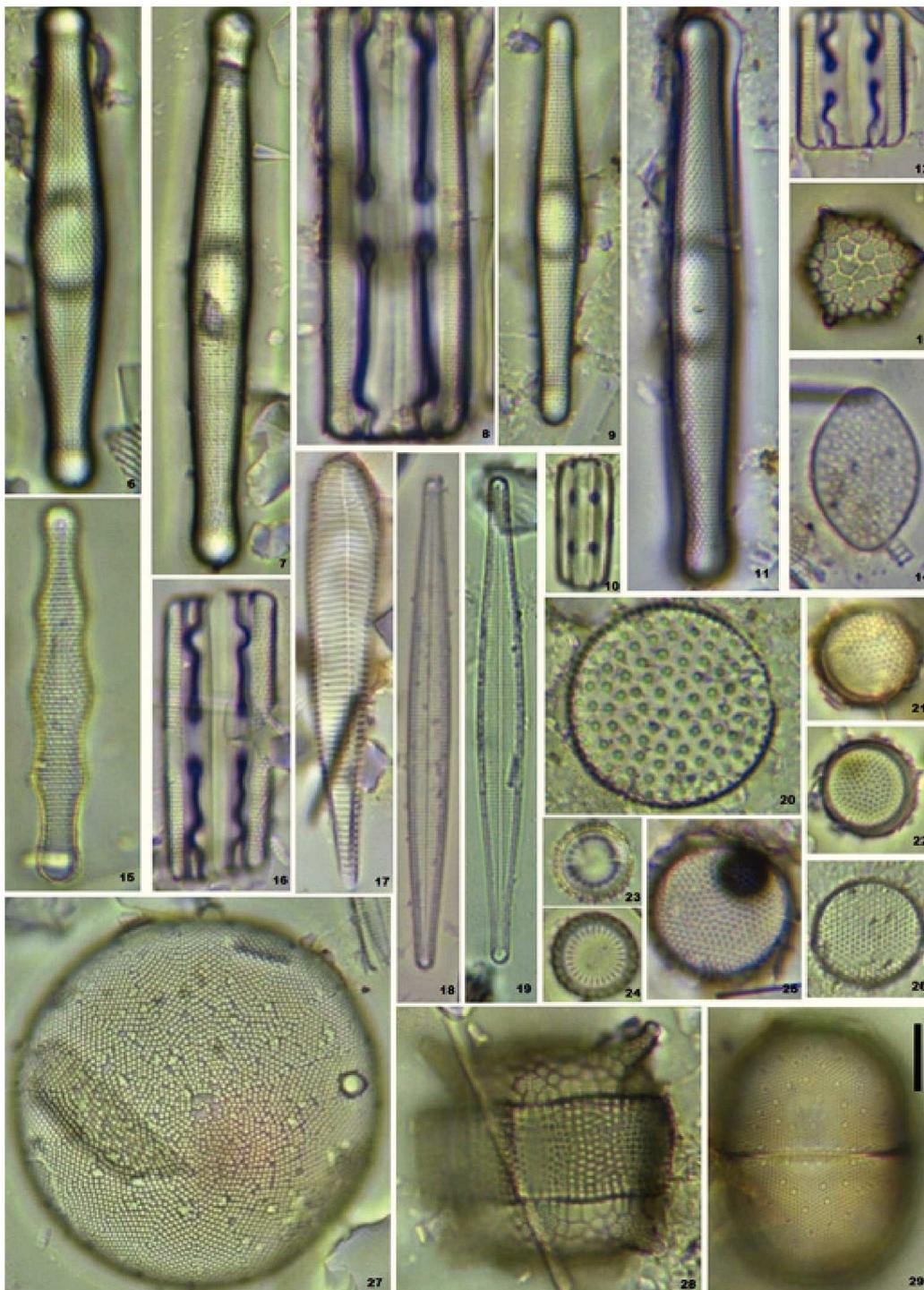
La determinación química de los elementos se hizo en Activation Laboratories en Canadá. Este trabajo fue financiado por los proyectos SIP: 20120834, SIP: 20101323 y 20131030 del Instituto Politécnico Nacional, así como por el proyecto Conacyt 98710. Ana Patricia Ruiz-Beltrán brindó apoyo técnico. Agradecemos a Domenico Voltolina la revisión de un manuscrito anterior, a Francisco O. López-Fuerte la actualización taxonómica final de la lista florística, así como a los revisores anónimos, cuyas atinadas

observaciones coadyuvaron en mejorar este manuscrito. DASB, JMMJ y AJMR agradecen su apoyo a COFAA y EDI del IPN.

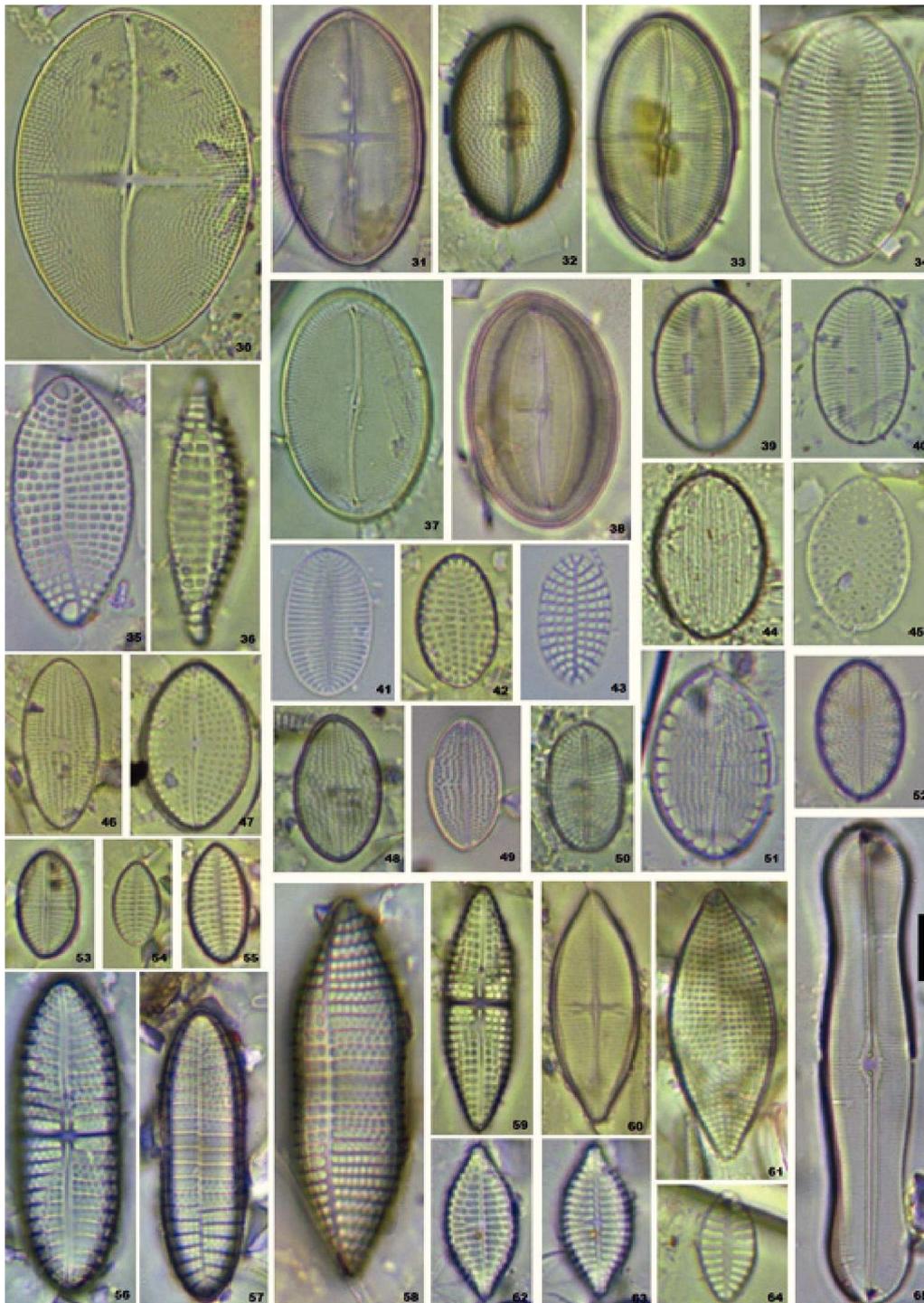
Literatura citada

- Brower, J. E., J. H. Zar y K. N. Von Ende. 1984. Field and laboratory methods for general ecology. WCB/McGraw-Hill. Boston, Massachusetts. 273 p.
- Genter, R. B. 1996. Ecotoxicology of inorganic chemical stress to algae. *In* Algal ecology, R. J. Stevenson, M. L. Bothwell y R. L. Lowe (eds.). Academic Press Inc, Londres. P. 403-468.
- Glagolev, A. A. 1934. Quantitative analysis with the microscope by the point method. *Engineering & Mining Journal* 135:399.
- Hernández-Almeida, O. U. y D. A. Siqueiros-Beltrones. 2008. Variaciones en asociaciones de diatomeas epifitas de macroalgas en una zona subtropical. *Hidrobiológica* 18:51-61.
- Hernández-Almeida, O. U. y D. A. Siqueiros-Beltrones. 2012. Substrate dependent differences in the structure of epiphytic vs. epilithic diatom assemblages from the southwestern coast of the Gulf of California. *Botanica Marina* 55:149-159.
- Hustedt, F. 1959. Die kieselalgen Deutschlands, Österreichs and der Schweiz. *In* Kryptogamen-Flora. VII Band, II Teil, L. Rabenhorst (ed.). Koeltz Scientific Book (Reimp. 1991). Leipzig. 845 p.
- Hustedt, F. 1961-1966. Die kieselalgen Deutschlands, Österreichs and der Schweiz. *In* Kryptogamen-Flora. VII Band, III Teil, L. Rabenhorst (ed.). Koeltz Scientific Book (Reimp. 1991). Leipzig. 916 p.
- Ivorra, N., J. Hettelaar, G. M. J. Tubbing, M. H. S. Kraak, S. Sabater y W. Admiraal. 1999. Translocation of microbenthic algal assemblages used for in situ analysis of metal pollution in rivers. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* 37:19-28.
- Krumbein, W. C. y Pettijohn, F. J. 1938. Manual of sedimentary petrology, Appleton, Century, and Crofts, New York. 549 p.
- Long, E. R., D. D. Macdonald, S. L. Smith y F. D. Calder, 1995. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management* 19:81-97.
- López-Fuerte, F. O., D. A. Siqueiros-Beltrones y J. N. Navarro. 2010. Benthic diatoms associated with mangrove environments in the northwest region of Mexico. *Conabio-UABCS-IPN, La Paz*. 206 p.
- Moreno, J., S. Licea y H. Santoyo. 1996. Diatomeas del golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California Sur-SEP-FOMES-PROMARCO, México, D. F. 273 p.
- Morin, S., A. Cordonier, I. Lavoie, A. Arini, S. Blanco, T. Thuy-Duong, E. Torne's, B. Bonet, N. Corcoll, L. Faggiano, M. Laviale, F. Pérès, E. Becares, M. Coste, A. Feurtet-Mazel, C. Fortin, H. Guasch y S. Sabater. 2012. Consistency in diatom response to metal-contaminated environments. *In* Emerging and Priority Pollutants in Rivers, H. Guaschet al. (eds.). Handbook of Environmental Chemistry. DOI 10.1007/978-3-642-25722-3_5, # Springer-Verlag Berlin Heidelberg 19:117-146
- Müller, G. 1979. Shwermetalle in den sedimenten des Rheins-Veränderungen seit 1971. *Unschau*. 79:778.
- Müller, G. 1986. Schadstoffe in sedimenten-sedimente als schadstoffe. *Mitt, Österreichische Geologische Gesellschaft* 79:107-126.
- Peragallo, H. y M. Peragallo. 1908. Diatomees marines de France et des districts marines voisins. *Grez-sur-Loing*. p. 1-491.
- Pérès, F. 1996. Étude des effets de quatre contaminants-herbicide (isoproturon), dérivés du mercure (mercure iorganique,méthyl-mercure), cadmium-sur les communautés de diatomées périphytiques au sein de microcosmes d'eau douce. Thesis, Université Toulouse, Toulouse. 176 p.
- Posada-Ayala, I. H. 2011. Geoquímica ambiental del distrito minero San Antonio, sedimentos de los arroyos de la cuenca de San Juan de Los Planes y plataforma continental de bahía de La Ventana, BCS, México. Tesis maestría, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-Instituto Politécnico Nacional, La Paz. 210 p.
- Rodríguez-Meza, D. G. 1999. Elementos mayores y traza en los sedimentos superficiales de la laguna de La Paz, BCS, México. Tesis maestría, Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-Instituto Politécnico Nacional, La Paz. 163 p.
- Round, F. E., R. M. Crawford y D. G. Mann. 1990. The diatoms. Cambridge University Press, Cambridge. 747 p.
- Schmidt, A., M. Schmidt, F. Fricke, H. Heiden, O. Muller y F. Hustedt. 1874-1959. Atlas der diatomaceenkunde. Heft 1-120, Tafeln 1-460. Reiland, Leipzig. 208 p.
- Siqueiros-Beltrones, D. A. 2002. Diatomeas bentónicas de la península de Baja California; diversidad y potencial ecológico. *Oceánides/Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-Instituto Politécnico Nacional-Universidad Autónoma de Baja California Sur, México, D. F.* 102 p.
- Siqueiros-Beltrones, D. A. 2005. Una paradoja sobre uniformidad vs. orden y estabilidad en la medida de la diversidad de especies según la teoría de la información. *Ludus Vitalis* 13:1-10.
- Siqueiros-Beltrones, D. A. 2006. Diatomeas bentónicas asociadas a trombolitos recientes registrados por primera vez en México. *Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-Oceánides* 21:113-143.
- Siqueiros-Beltrones, D. A. y U. Argumedo-Hernández. 2012. Diversidad de diatomeas en la dieta *in situ* de *Chiton virgulatus* Sowerby, 1840 (Mollusca: Polyplacophora) de Baja California Sur. *Hidrobiológica* 22:267-281.
- Siqueiros-Beltrones, D. A. y O. U. Hernández-Almeida. 2006. Florística de diatomeas epifitas en macroalgas de un manchón subtropical. *Centro Interdisciplinario de Ciencias Marinas-Oceánides* 21:11-61.
- Sternberg, E., D. Tang, T. Y. Ho, C. Jeandel y F. M. M. Morel. 2005. Barium uptake and adsorption in diatoms. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 69:2745-2752.
- Underwood, G. J. C. y D. M. Paterson. 1993. Recovery of intertidal benthic diatoms after biocide treatment and

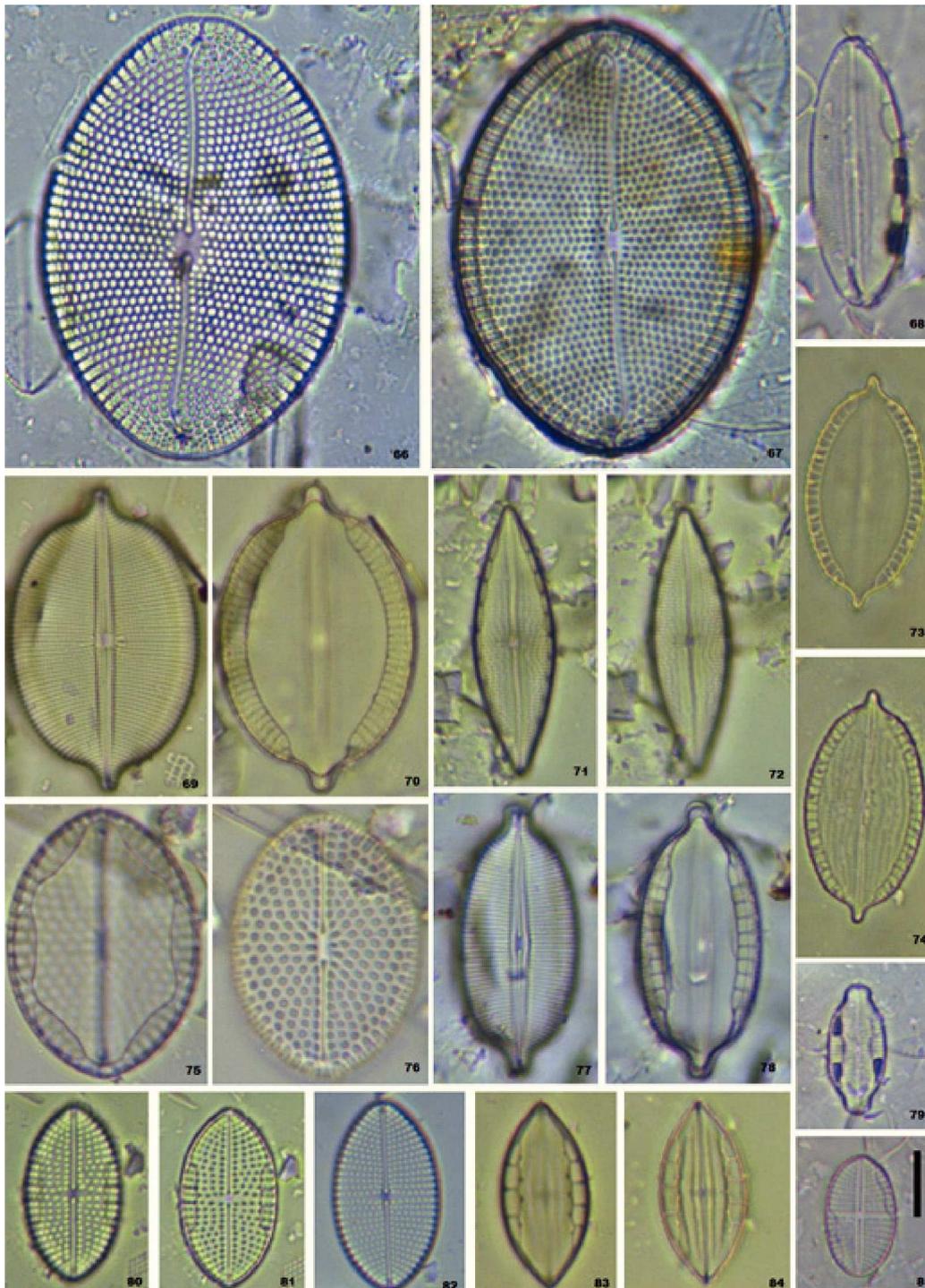
- associated sediment dynamics. *Journal of the Marine Biology Association of the United Kingdom* 73:25-45.
- Wedepohl, Kh. 1995. The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59:1217-1232.
- Witkowski, A., H. Lange-Bertalot y D. Metzeltin. 2000. Diatom flora of Marine coasts I. *In* *Iconographia Diatomologica*, Vol.7, H. Lange-Bertalot(ed.). A.R.G. Gantner Verlag K.G., Ruggell, Alemania. 925 p.
- Wentworth, C. K. 1922. A scale of grade and class terms for clastic sediments. *Journal Geology* 30:377-392.



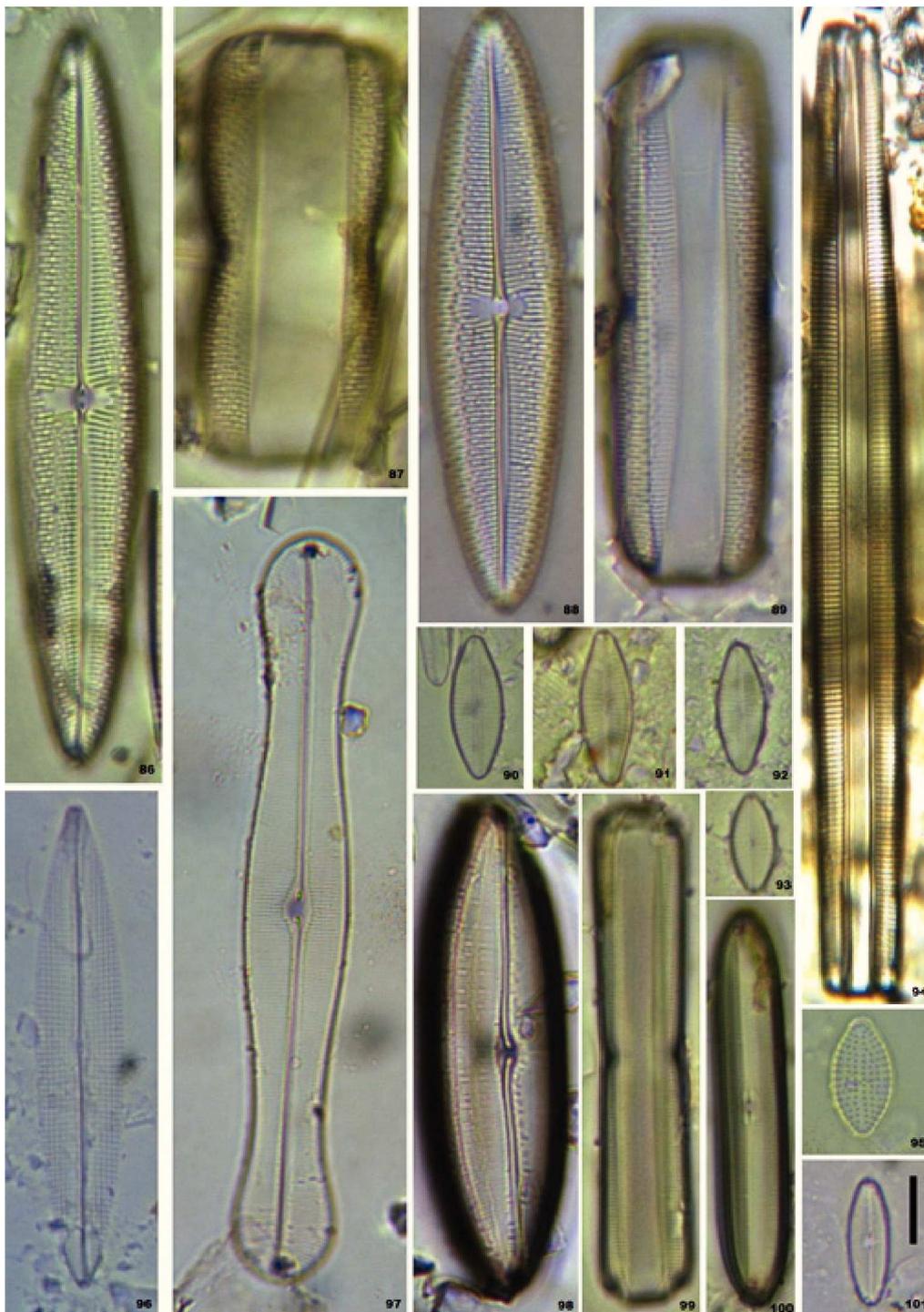
Figuras 6-29. 6) *Grammatophora marina* var. *subundulata*; 7) *Grammatophora* sp. 1; 8, 9) *G. oceanica*; 10) *Diatomella* sp.; 11, 12) *G. marina*; 13) *Triceratium dubium*; 14) *Delphineis surirella*; 15, 16) *G. undulata*; 17) *Licmophora communis*; 18, 19) *Tabularia gaillonii*; 20) *Psammodiscus nitidus*; 21) *Shionodiscus oestrupii*; 22) *Thalassiosira eccentrica*; 23) *Paralia sulcata*; 24) *Paralia sulcata* var. *crenulata*; 25) *Thalassiosira* sp. 1; 26) *T. lineata*; 27) *Actinocyclus curvatulus*; 28) *Odontella aurita*; 29) *Melosira nummuloides*. Barra= 10µm.



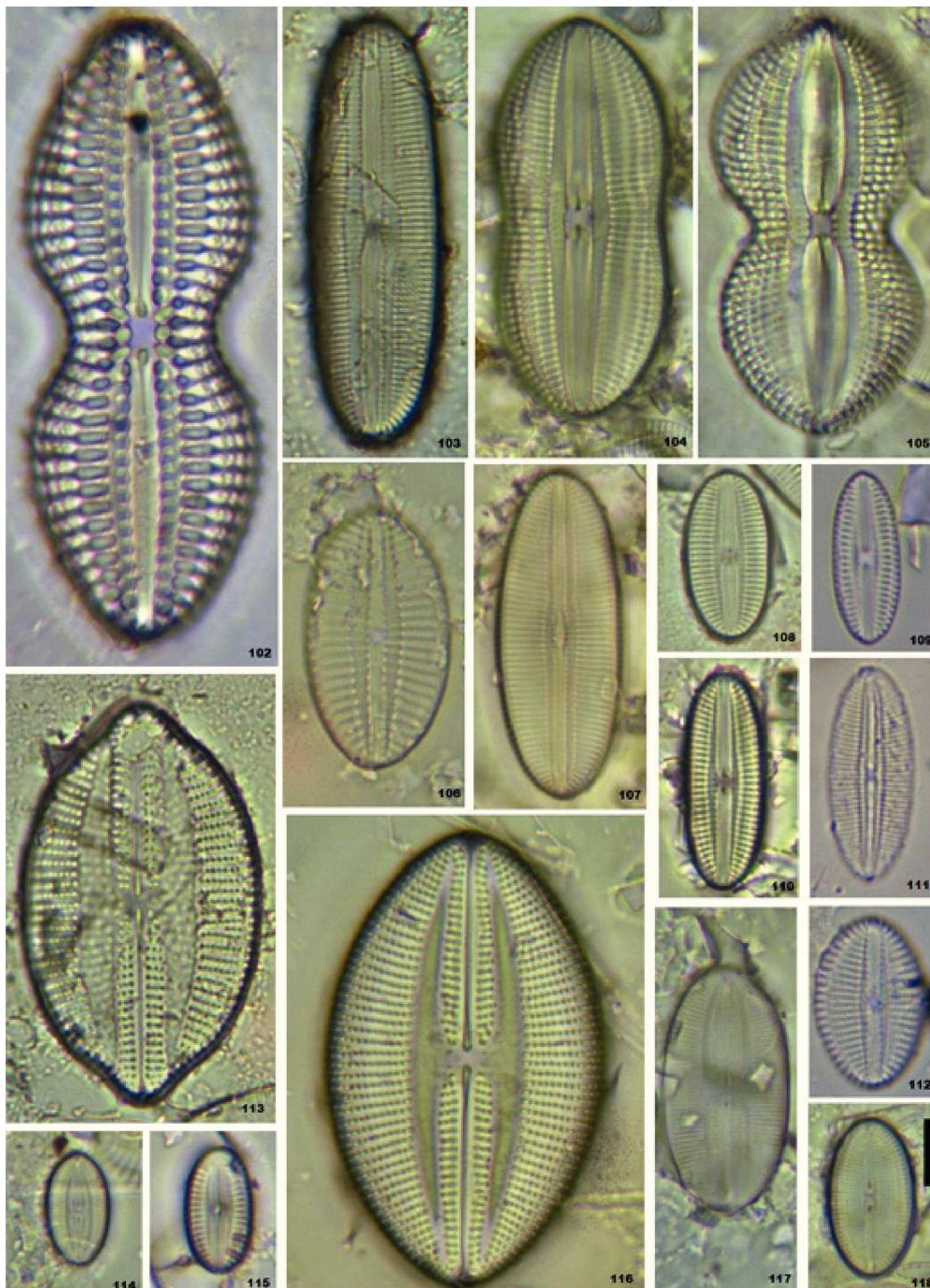
Figuras 30-65. 30-33) *Cocconeis dirupta*; 34) *Cocconeis* cf. *hauniensis*; 35, 47) *C. sublitoralis*; 36) *Vikingea* sp.; 37, 38) *C. krammeri*; 39, 40) *Cocconeis* cf. *pelta*; 41) *Cocconeis* sp. 1; 42) *Amphicocconeis disculoides*; 43) *C. speciosa*; 44) *C. convexa*; 45) *Cocconeis guttata*; 46) *Cocconeopsis fraudulenta*; 48, 49, 51, 52) *Cocconeis* sp. 2; 50) *Cocconeopsis patrickae*; 53) *Mastogloia crucicula*; 54, 55) *C. distans*; 56, 57) *Achnanthes longipes*; 58, 59) *A. yaquiniensis*; 60, 61) *A. manifera*; 62, 63) *Achnanthes* sp. 1; 64) *A. hauckiana*; 65) *Caloneis* sp. 2. Barra= 10µm.



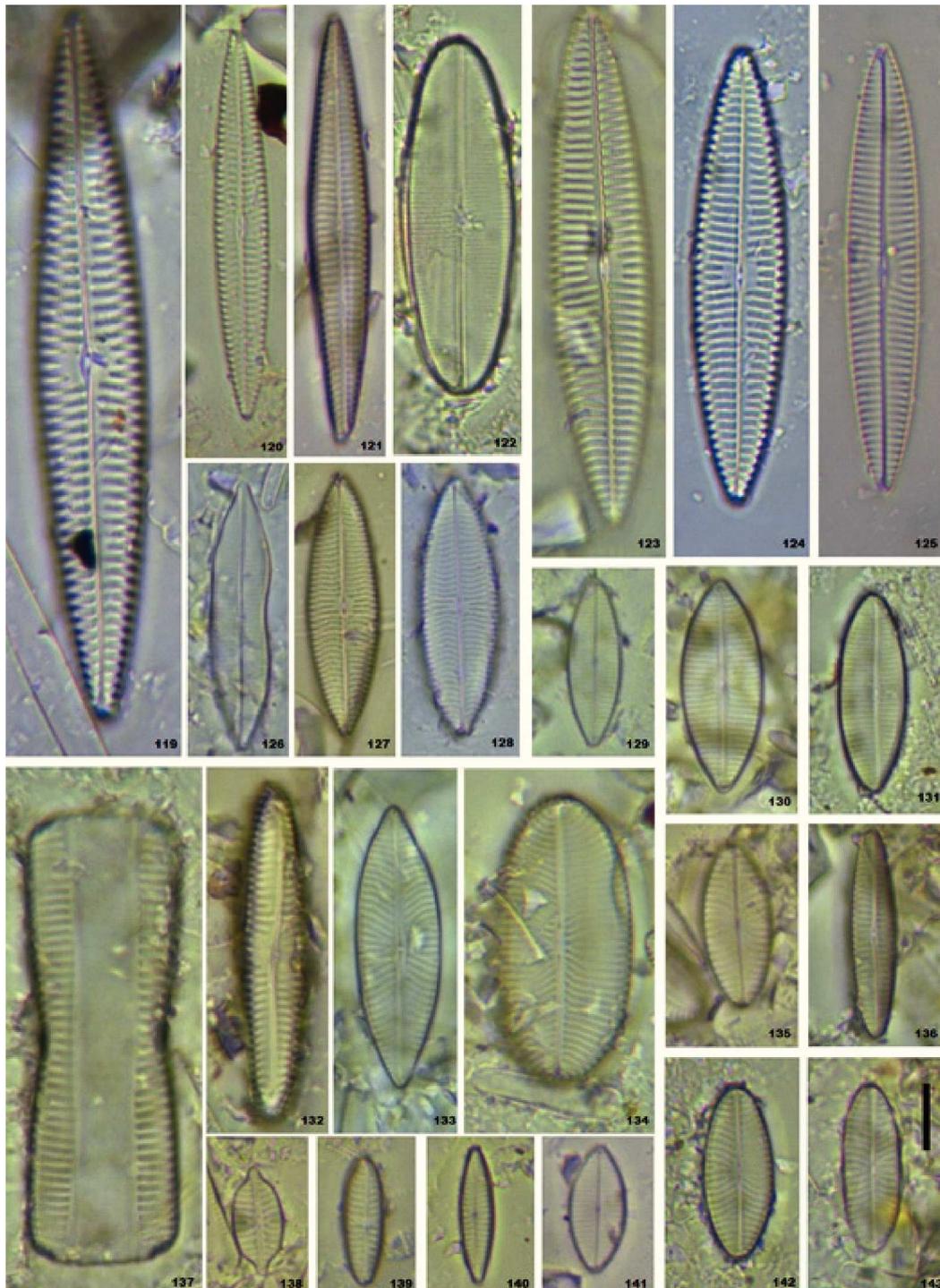
Figuras 66-85. 66, 67) *Mastogloia splendida*; 68) *Mastogloia* sp. 1; 69, 70) *M. citrus*; 71, 72) *M. angusta*; 73, 74) *Mastogloia* sp. 2; 75, 76) *M. fimbriata*; 77, 78) *M. acutiuscula* var. *elliptica*; 79) *M. pusilla* var. *subcapitata*; 80-82) *M. crucicula*; 83, 84) *M. grunowi*; 85) *M. crucicula* var. *alternans*. Barra= 10µm.



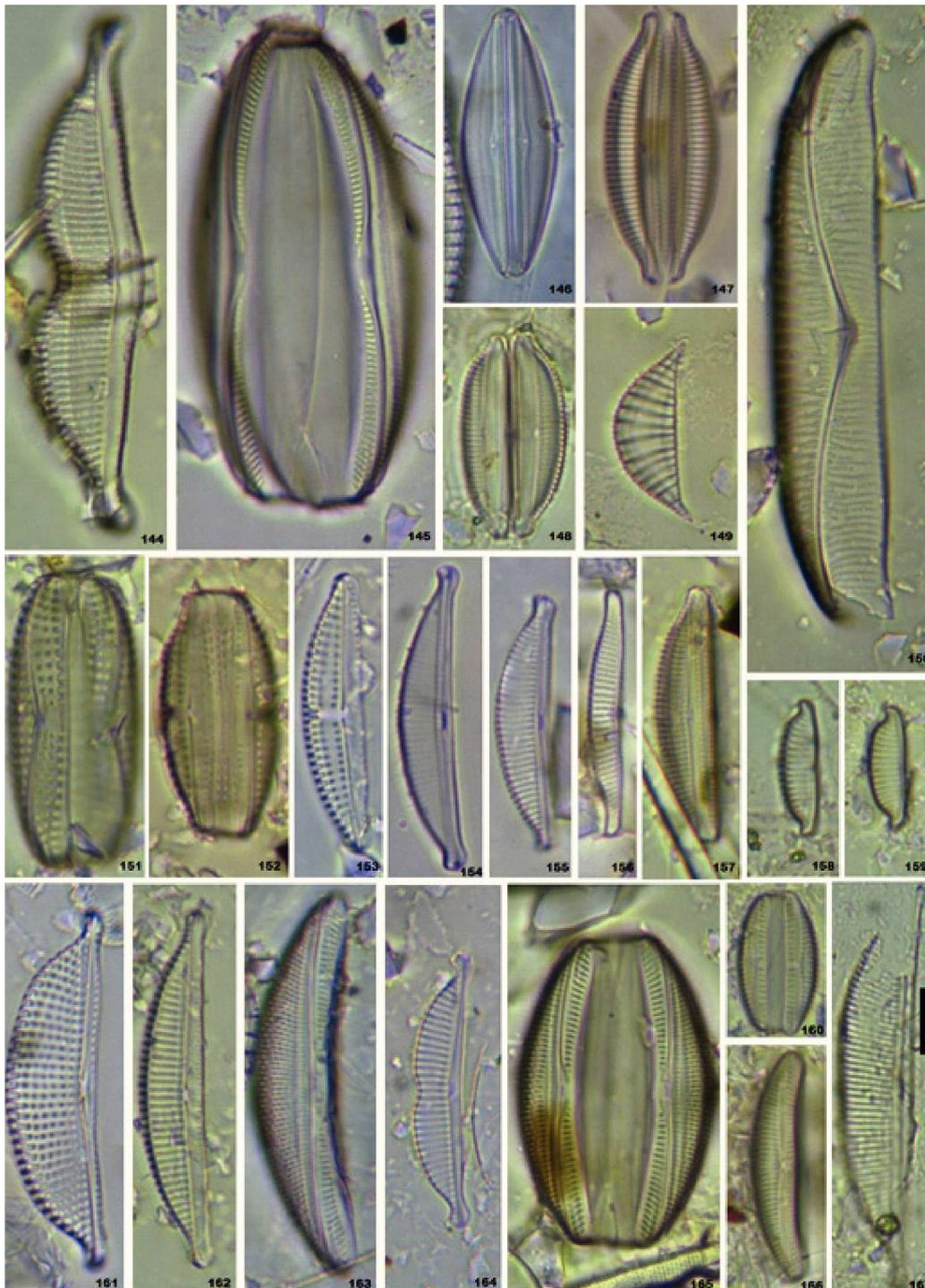
Figuras 86-100. 86, 87) *Trachyneis aspera*; 88, 89) *T. velata*; 90, 91, 92) *Nupela* cf. *lesothensis*; 93) *Navicula* sp. 3; 94) *Ardissonia crystallina*; 95) *Raphoneis amphiceros*; 96) *Haslea nautica*; 97) *Caloneis* sp. 2; 98) *Caloneis maxima* var. *excentrica*; 99) *C. liber*; 100) *C. linearis*; 101) *Caloneis* sp. 1. Barra= 10µm.



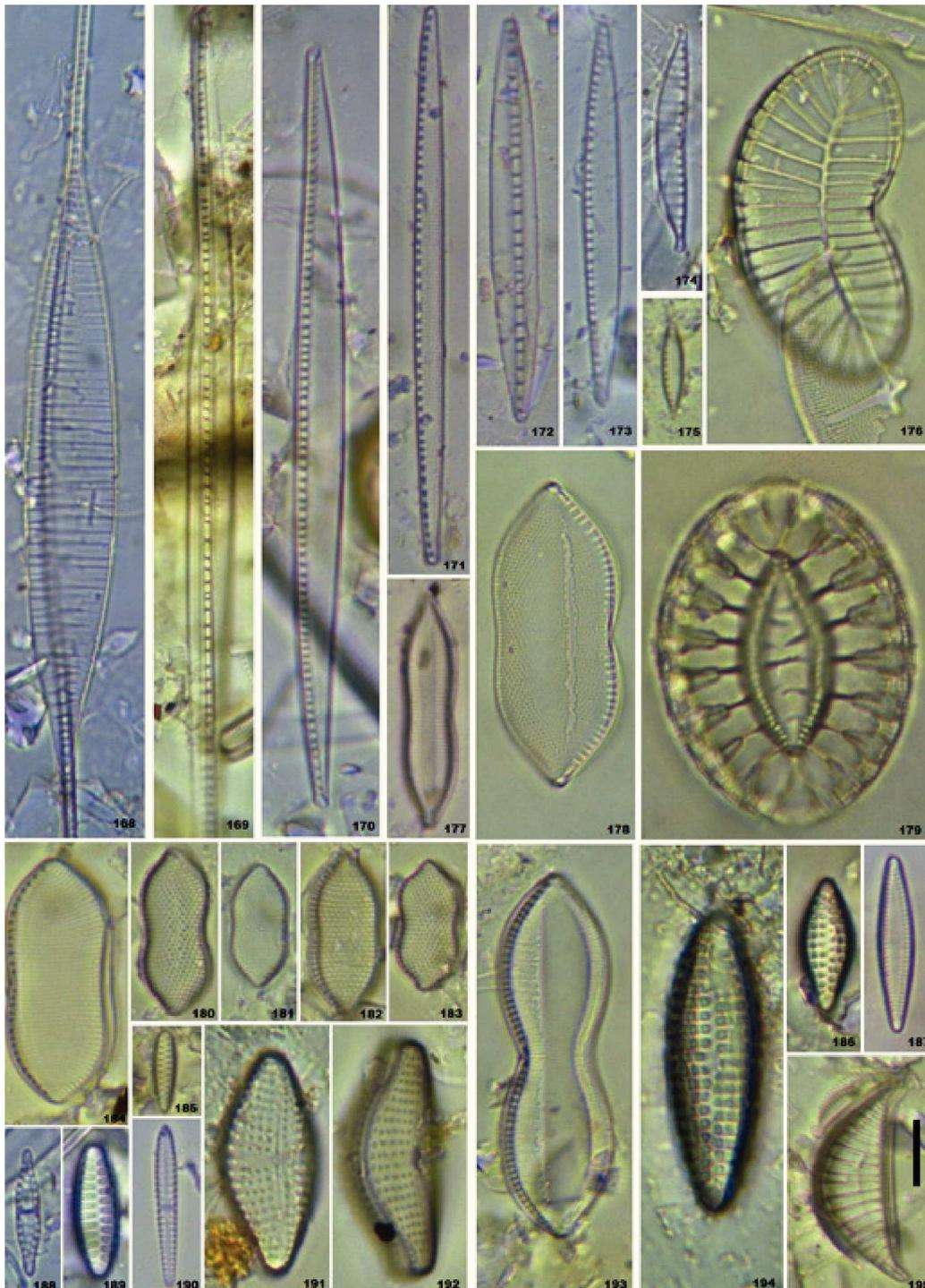
Figuras 102-118. 102) *Diploneis crabro*; 103, 111) *D. littoralis*; 104) *D. didyma*; 105) *D. bombus*; 106) *D. droopii*; 107) *D. littoralis* var. *clathrata*; 108-110) *D. papula*; 112) *D. smithii*; 113) *Lyrella irroratoides*; 114) *Fallacia florinae*; 115) *Diploneis* sp. 1; 116) *L. hennedyi*; 117) *F. forcipata*; 118) *F. bioculata*. Barra= 10µm.



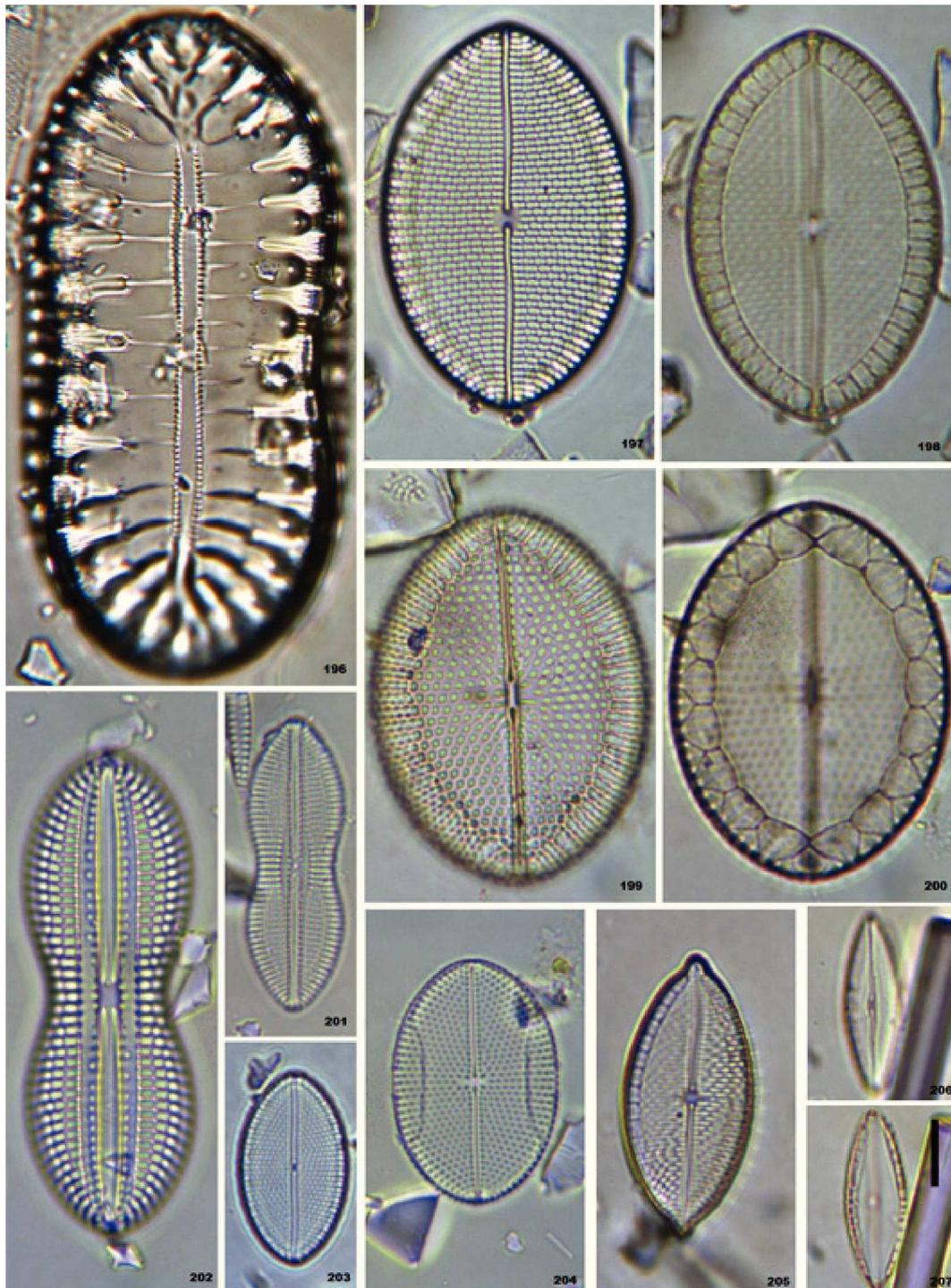
Figuras 119-143. 119, 120) *Navicula longa*; 121) *Navicula directa*; 122) *Navicula* sp. 4; 123,124) *N. longa* var. *irregularis*; 125) *Navicula* cf. *radiosa*; 126) *Navicula* sp. 1; 127, 128) *N. johanrosii*; 129, 141) *Navicula* sp. 3; 130) *N. diversistriata*; 131) *Navicula* cf. *flebilis*; 132, 137) *N. cancellata*; 133) *Navicula* cf. *salinarum*; 134, 142) *N. digitoradiata*; 135, 143) *N. cincta*; 136) *Navicula* cf. *agnita*; 138) *N. platyventris*; 139, 140) *N. disserta*. Barra= 10µm.



Figuras 144-167. 144) *Amphora contracta*; 145) *A. immarginata*; 146) *A. angusta*; 147, 157) *A. terroris*; 148) *Halamphora turgida*; 149) *Rhopalodia pacifica*; 150) *A. spectabilis*; 151) *A. crassa*; 152, 153) *Halamphora* cf. *interrupta*; 154, 155) *Halamphora coffeaeformis*; 156) *A. angustissima*; 158, 159) *A. wisei*; 160, 165, 166) *A. proteus* var. *contigua*; 161) *Halamphora costata*; 162) *A. holsaticoides*; 163) *A. proteus*; 164) *A. angulosa*; 167) *Amphora* sp. 1. Barra= 10µm.



Figuras 168-195. 168) *Nitzschia longissima* var. *costata*; 169) *N. martiana*; 170) *N. sigma*; 171) *N. gracilis*; 172) *N. distans*; 173) *N. sigmaformis*; 174) *Hantzschia virgata*; 175) *N. frustulum* var. *perminuta*; 176) *Surirella reniformis*; 177) *Tryblionella apiculata*; 178) *Nitzschia panduriformis* var. *minor*; 179) *Surirella fastuosa* var. *cuneata*; 180, 183) *Psammodyction* sp.1; 181) *Nitzschia constricta*; 182) *N. punctata* var. *coarctata*; 184) *P. coarctata*; 185) *Opephora pacifica*; 186, 191, 192) *Vikingea* sp.; 187) *Tabularia fasciculata*; 188) *Plagiogrammopsis vanheurckii*; 189) *Opephora* cf. *gemmata*; 190) *Gomphonemopsis pseudexigua*; 193) *Tryblionella marginulata* var. *didyma*; 194) *Glyphodesmis* sp.; 195) *Rhopalodia pacifica*. Barra= 10µm.



Figuras 196-207. 196) *Surirella hybrida* var. *contracta*; 197, 198) *Mastogloia ovum* var. *paschale*; 199, 200) *M. fimbriata*; 201) *Diploneis* sp. 2; 202) *Diploneis bombus* var. *gemina*; 203) *M. ovulum*; 204) *M. binotata*; 205) *M. asperuloides*; 206, 207) *M. inaequalis*. Barra= 10µm.