

## **FITOPLANCTON, TAXONOMÍA**

Responsable: Dr. Rubén Lara Lara, CICESE

Participantes: Carmen Bazán Guzmán, Guadalupe Cabrales Talavera, Citlalli Sánchez Robles, Edwin Morales Torres, CICESE

### **Antecedentes y justificación del trabajo:**

En el GM (GM) existen muy pocos trabajos sobre estudios taxonómicos del fitoplancton, por lo que hasta el momento no existe un catálogo de organismos de la comunidad, particularmente para las aguas oceánicas. Se han reportado más estudios en la zona costera sur del GM, existen por ejemplo, algunas bases de datos de los grupos de dinoflagelados y diatomeas desarrolladas por Moreno-Ruiz *et al.* (1993), Licea (1994,2004, 2006), Moreno y Licea (1994) y Hernández-Becerril y Flores (1998), así como los estudios realizados por Hernández-Becerril *et al.* (2008) sobre la estructura del nanoplancton, Aldeco *et al.* (2009) sobre especies de dinoflagelados en el Cañon de Campeche y el realizado por Muciño *et al.* (2011) en la Laguna de Sontecomapan en Veracruz, que es sobre especies formadoras de florecimientos algales nocivos (FAN).

Los estudios del programa XIXIMI son los primeros en aportar información sobre los géneros y especies de la parte oceánica del GM en aguas mexicanas, por lo que no nos permite realizar comparaciones entre el pasado y el presente, sobre todo para evaluar las posibles consecuencias (cambios en las abundancias y riqueza de especies, por ejemplo) que haya podido producir el derrame de petróleo que ocurrió en abril 2010. México, al ser un país con un alto grado de desarrollo en la industria y explotación de sus recursos petroleros, es susceptible a eventos con baja probabilidad, pero de alto riesgo, como lo es un derrame de gran escala. Ha sido señalado que el impacto de los derrames en el mar es muy variable, y que la zona costera, por su gran productividad, es la más severamente dañada durante estos eventos. La caracterización de las comunidades fitoplanctónicas de la zona de aguas profundas del GM proveen de una base contra la cual hacer comparaciones futuras de impactos antropogénicos y el contribuir el entendimiento de la variabilidad natural.

### **Objetivo general:**

Describir la composición específica, distribución y abundancia de grupos del fitoplancton y del microzooplancton, con excepción de los coccolitofóridos, en las 40 estaciones de la zona de aguas profundas del GM cubiertas durante la campaña oceanográfica XIXIMI-2 efectuada del 2-17 julio del 2011.

### **Objetivos particulares:**

Caracterizar la composición específica de los grupos fitoplanctónicos (diatomeas, dinoflagelados y silicoflagelados), así como de los grupos del microzooplancton tales como ciliados y tintinidos, y otros componentes como cianofitas, nanoflagelados y euglenoides, presentes en la comunidad.

Cuantificar la abundancia y distribución espacial de las poblaciones del fitoplancton en el área de estudio del GM.

Elaborar una base de datos con los registros haciendo énfasis en los grupos de dinoflagelados y diatomeas.

Realizar mapas de distribución espacial de los grupos más abundantes dentro de la comunidad.

### **Metodología**

#### Recolección de muestras:

Se tomaron muestras en 40 estaciones a diferentes profundidades estándar. Como la recolección de las muestras no fue similar en todas las estaciones, en la Tabla 12 se presenta la relación de estaciones y profundidades a las cuales fueron tomadas las muestras.

En total se recolectaron un total de 186 muestras con una roseta de botellas Niskin y GoFlo de 10 L. Adicionalmente, se tomaron alícuotas de 250 ml en botellas de plástico oscuras Nalgene llenándolas solo hasta el hombro, para permitir la homogeneización posterior de la muestra. Estas alícuotas fueron fijadas con solución concentrada de Lugol-acetato (en la norma CEN/ TC230/WG2/TG3) (Willén, 1962), la cual proporciona un pH adecuado para la fijación de las células (Thronsen, 1978). Todas las muestras fueron etiquetadas con un código que indicaba procedencia (localización), fecha de recolección, fijador utilizado y la persona o entidad a cargo de su recolección. Las muestras se mantuvieron a

temperatura ambiente y en oscuridad hasta su análisis en el laboratorio de biogeoquímica del CICESE en Ensenada, B.C.

Tabla 12. Relación de estaciones y profundidades muestreadas para cuantificar el fitoplancton y el microzooplancton durante el crucero XIXIMI-II (2-17 de julio del 2012).

PROFUNDIDAD (m)	ESTACIONES
5	3,3B,8,10,11,15,17,18,19,20,22,23,24,25,27,30,31,32,33,35,36,37,39,40, 41,42,44,45,46,47
10	1,2,3,3B,4,5,7,8,10,11,12,15,16,17,18,19,20,21,22,24,25,27,30,31,33,35,36, 37, 38,39,40,41,42,43,44,46,47
20	2,5,11,27,32,35,37,39,41,42,45,46,47
50	2,3,3B,4,7,8,10,11,12,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,27,30,31,32,33,35, 36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47
75	1,2,5,7,11,27,32,35,37,39,41,42,45,46
100	1,2,5,7,11,27,32,35,37,39,41,42,45,46,47
150	1,2,3,3B,4,5,8,10,11,12,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,27,30,31,32,33,35, 36,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47

## Métodos de laboratorio

### *Homogeneización de la muestra*

La homogeneización de la muestra fue realizada por la re-suspensión y separación de las partículas. Esto se hizo manualmente, y la manipulación la realizó una sola persona, combinando giros suaves de la botella, horizontales y verticales durante 1 a 3 minutos.

### *Preparación de submuestras*

Se llenó la cámara de sedimentación con la muestra. El volumen de muestra dependió de la densidad del fitoplancton. En este caso, se utilizaron cámaras de sedimentación de 50 ml de capacidad. Se tapó la cámara con una pieza cuadrada o circular de cristal, evitando la formación de burbujas de aire. Se mantuvieron las cámaras de sedimentación durante 1-2 días en un lugar sin luz solar directa, a temperatura ambiente constante y evitando vibraciones. La muestra se colocó sobre una superficie bien nivelada para que la sedimentación se produzca de forma homogénea sobre toda la placa. El tiempo de sedimentación fue de 1-4 horas por centímetro de columna de sedimentación para las muestras fijadas con Lugol (Margalef, 1969), como se describe en la Tabla 13.

Tabla 13. Recomendaciones para el tiempo de sedimentación para las muestras preservadas con lugol (Edler, 1979).

Volumen de la cámara (ml)	Altura de la cámara (cm)	Tiempo de sedimentación (hr)
2	1	3
10	2	8
25	5	16
50	10	24

La cámara de sedimentación se limpió entre usos con agua y detergente y al final se realizaron enjuagues con agua destilada.

### *Análisis cuantitativo del fitoplancton, Método Utermöhl*

El análisis cuantitativo de la comunidad fitoplanctónica se realizó siguiendo el método de Utermöhl (1958) y usando un microscopio invertido Olympus CK-2. Este análisis se realizó con la cuantificación de las células en toda la cámara inferior, usando un nivel de aumento bajo. Para lograr una comparación adecuada entre muestras, en este caso se empezó el conteo con el objetivo 10x y luego se aumentó al objetivo 20x. Esto ayudó a dar una visión completa de la densidad y distribución del fitoplancton.

El método consistió en ir moviendo la cámara de arriba-abajo e izquierda-derecha, y viceversa. Se cuentan los individuos que queden entre las orillas del campo ocular si este incluye más del 50% de la célula. En este trabajo, se observó una baja densidad de fitoplancton. Con el fin de obtener un resultado estadísticamente robusto del análisis cuantitativo, es necesario contar con un número determinado de células, por lo que en este caso se contó toda la cámara.

Es importante mencionar que algunas especies son fáciles de identificar, como el dinoflagelado *Ceratium furca*. Sin embargo, las especies más pequeñas se deben de cuantificar con objetivos de mayor magnificación como se señala en la Tabla 14 (1000x).

Tabla 14. Recomendaciones del objetivo que se debe usar para cuantificar clases de fitoplancton de diferentes medidas (Edler 1979)

Medida de la clase	Magnificación
0.2 – 2.0 µm (picoplancton)	1000 x
2.0 – 20.0 µm (nanoplancton)	100 – 400 x
>20.0 µm (microplancton)	100 x

Por su tamaño, las células pequeñas (< 2 µm) no se pueden cuantificar usando el método de Utermöhl, por lo cual el picoplancton fue analizado por medio de citometría de flujo. Es importante considerar al grupo del picoplancton, debido a que tiene una gran importancia ecológica y funcional en los ecosistemas acuáticos, particularmente en sistemas oligotróficos.

#### Cálculo de la densidad de fitoplancton

A partir del número de células, se calculó la concentración (número por unidad de volumen) de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$N = X \cdot [(A \cdot d) / (a \cdot v)]$$

Donde:

N= número de células en la muestra (células/ml)

X=número total de células por campo (o número total de células de la cámara)

A= área de la cámara

v= volumen de la muestra sedimentada en la cámara

a= área del campo óptico

d=factor de dilución o de concentración (en caso de que se halla diluido o concentrado según la densidad de algas)

En este estudio se realizó el conteo de células considerando todo el fondo de la cámara, por lo que solo fue necesario dividir el número de células por

muestra entre el volumen sedimentado (50ml) y multiplicarlas por 1000 para poder expresar la abundancia en células L<sup>-1</sup>.

### Materiales de referencia para la identificación de grupos de fitoplancton

Como se describió anteriormente, no se contó un microscopio con suficiente aumento para identificar especies de fitoplancton pequeñas, por lo que solo se reporta la presencia del grupo de diatomeas y dinoflagelados, así como algunos grupos de plancton de gran tamaño presentes en la comunidad. La identificación de estas células se hizo hasta nivel de género y en algunos casos hasta especie siguiendo las guías taxonómicas de Cupp (1938), Yamaji (1980), Tomas (1997), y las guías de identificación de diatomeas y dinoflagelados para la región sur del GM de Licea (2006). Es importante comprobar las descripciones escritas de las especies (no sólo comparar con dibujos o fotos) y tener en cuenta la información ecológica (distribución, hábitat, requerimientos); esta información se revisó con el apoyo de la guía de taxonómica de Tomas (1997).

## Resultados

Se reportan los resultados de abundancia de géneros y especies de las diatomeas y dinoflagelados, así como la abundancia de los grupos de nanoflagelados y ciliados. La tabla de especies identificadas se presenta en el Anexo 3 de este informe. Se presentan mapas de distribución de la abundancia del fitoplancton total y de los grupos más abundantes del fitoplancton (diatomeas y dinoflagelados), nanoflagelados y ciliados. No se presentan los mapas de distribución de los grupos de cianofitas, euglenoides, copépodos, silicoflagelados, tintinidos y radiolarios debido a su muy baja abundancia.

### Identificación de taxones

La comunidad del fitoplancton estuvo compuesta principalmente por células de diámetro menores a 20 µm, y estuvo conformada por 50 géneros de dinoflagelados que incluyen 204 taxones principalmente de dinoflagelados desnudos, así como por 46 géneros de diatomeas que abarcan 91 taxones. Entre los principales géneros de dinoflagelados, destacaron *Oxytoxum* con 20 especies, *Gymnodinium* con 19 especies, *Protoperidinium* con 18 especies, *Ceratium* con 14 especies, *Gyrodinium* con 12 especies y *Heterocapsa* con 5 especies. De estos géneros, los que presentaron las mayores abundancias fueron las especies de los géneros de *Gymnodinium* y *Gyrodinium*. Algunas de las especies registradas se

consideran formadoras de florecimientos algales, como *Alexandrium tomarense*, *Akasiwo sanguineum*, especies del género *Gonyaulax*, *Prorocentrum gracile* y *P. compressum*, y también se identificaron especies productoras de toxinas como *Ceratium furca*, *C. fusus*, *Prorocentrum mínimum* *P. micans*, *Noctiluca scintillan*, *Karenia brevis*, y *Gymnodinium catenatum*. Estas dos últimas especies se han considerado con alto potencial tóxico. Asimismo, algunas de estas especies son consideradas mixotróficas como *Gyrodinium spirale* y especies del género *Gymnodinium* (Anexo 3).

Por otro lado, la mayor parte de la abundancia del grupo de las diatomeas estuvo dada principalmente por diatomeas penales, entre los que destaca los géneros *Nitzchia* (5 especies) y *Navicula* (4 especies). Sin embargo, la mayor diversidad fue de diatomeas centrales de los géneros *Chaetoceros* (6 especies) y *Rizosolenia* (7 especies). De las especies de diatomeas, algunas se consideran formadoras de florecimientos algales, como algunas especies del género *Chaetoceros* y *Cylindrotheca closterium*, *Nitzchia logissima* y *Probocia alata* (Anexo 3). La mayor diversidad de especies de todos los grupos se encontró entre 10 y 50 metros de profundidad, principalmente en las estaciones del paralelo 25.

La comunidad de microzooplancton estuvo conformada en su mayoría de ciliados, seguidos por tintinidos, euglenas y copépodos. También se registró la presencia de la cianobacteria *Trichodesmium* como filamentos aislados y en colonias con forma morfológica de puff y tuft.

Distribución espacial y vertical de los grupos fitoplanctónicos y algunos componentes del microzooplancton

La abundancia total del fitoplancton (diatomeas + dinoflagelados + silicoflagelados) presentó una marcada variación espacial (Figura 88), dividiéndose en tres grandes regiones. Las mayores abundancias se encontraron en la región suroeste (19 a 24°N y 91 a 96°O) asociada a las estaciones dentro de la Sonda de Campeche. La abundancia más baja se encontró en la zona noreste, y en la parte central de la zona de estudio. Asimismo, en términos generales, se encontró la mayor abundancia total a 10 m y las menores a 150 m de profundidad. Se registraron las mayores abundancias en la región sur, principalmente a los 10 y 150 m (E40, 4200 células L<sup>-1</sup>), y las menores en las estaciones más oceánicas, localizadas en el paralelo 25°N (aprox. 200 células L<sup>-1</sup>) en todas las profundidades (Figura 88d).

La máxima abundancia del fitoplancton total fue de 10,535 células L<sup>-1</sup> a 20m de profundidad en la estación E37 (Figura 88a y b). Las mayores abundancias de fitoplancton total estuvieron conformadas principalmente por especies con talla < 20 µm del grupo de los dinoflagelados, en su mayoría de los géneros *Gyrodinium* (i.e., *Gyrodinium spirale* y *Gymnodinium* spp). Por otro lado,

en cuanto al grupo de las diatomeas, estas presentaron una abundancia máxima de 2520 células  $L^{-1}$ , y este grupo estuvo compuesto principalmente por los géneros de *Navícula* y *Nitzchia*. Los Silicoflagelados se encontraron en muy baja abundancia, pero la especie que más frecuentemente se observaron fueron del género *Dictyocha*.

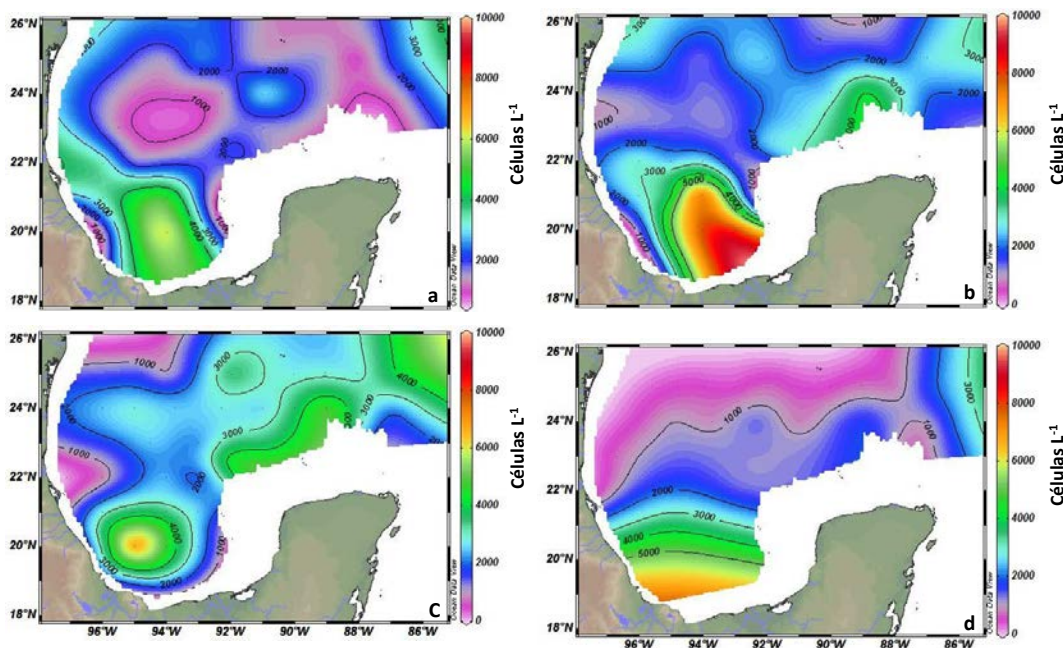


Figura 88. Distribución espacial de la abundancia de fitoplancton total (células  $L^{-1}$ ) en el GM durante el crucero XIXIMI-II realizado en julio del 2011; a) superficie, b) 10 m, c) 50 m y d) 150 m.

## Dinoflagelados

Los dinoflagelados presentaron sus abundancias máximas entre las profundidades de 10 y 50 m (Figura 89b y c) y los menores valores a 150m de profundidad (Figura 89d). La distribución espacial de los dinoflagelados recolectados a 10 y 50 metros de profundidad presentó un patrón similar, ya que las mayores abundancias fueron registradas en la región suroeste del GM y las menores en la zona al norte de la Península de Yucatán (Figura 89a y c).

A 20 metros de profundidad, las mayores abundancias se registraron en las estaciones E37 y E42 (Figura 89b); estas abundancias estuvieron principalmente asociadas a los dinoflagelados desnudos  $< 20\mu m$  (aprox. 2440 células  $L^{-1}$ ),



principalmente de la especie *Gyrodinium spirale* < 20µm (aprox. 2800 células L<sup>-1</sup>). Sin embargo, en la parte superficial se mostró una mayor abundancia en la región suroeste de la zona de estudio. Por otro lado, en las estaciones del paralelo 25 LN se registraron las menores abundancias (aprox. 2000 células L<sup>-1</sup>).

En la mayoría de las estaciones se registraron las abundancias más altas a 10m de profundidad. Sin embargo, fue en la estación E42 y a 20 metros de profundidad donde se registró la máxima abundancia de dinoflagelados (9,780 células L<sup>-1</sup>) de todas las muestras recolectadas. La mayoría fueron dinoflagelados desnudos con tallas menores a 20 µm. Este mismo patrón se observó a profundidad de 10 metros en todas las estaciones (Figura 89b), en donde la mayor abundancia estuvo representada por los mismos géneros (2800 células L<sup>-1</sup> en la E42 a 20 m de *Gyrodinium spirale*).

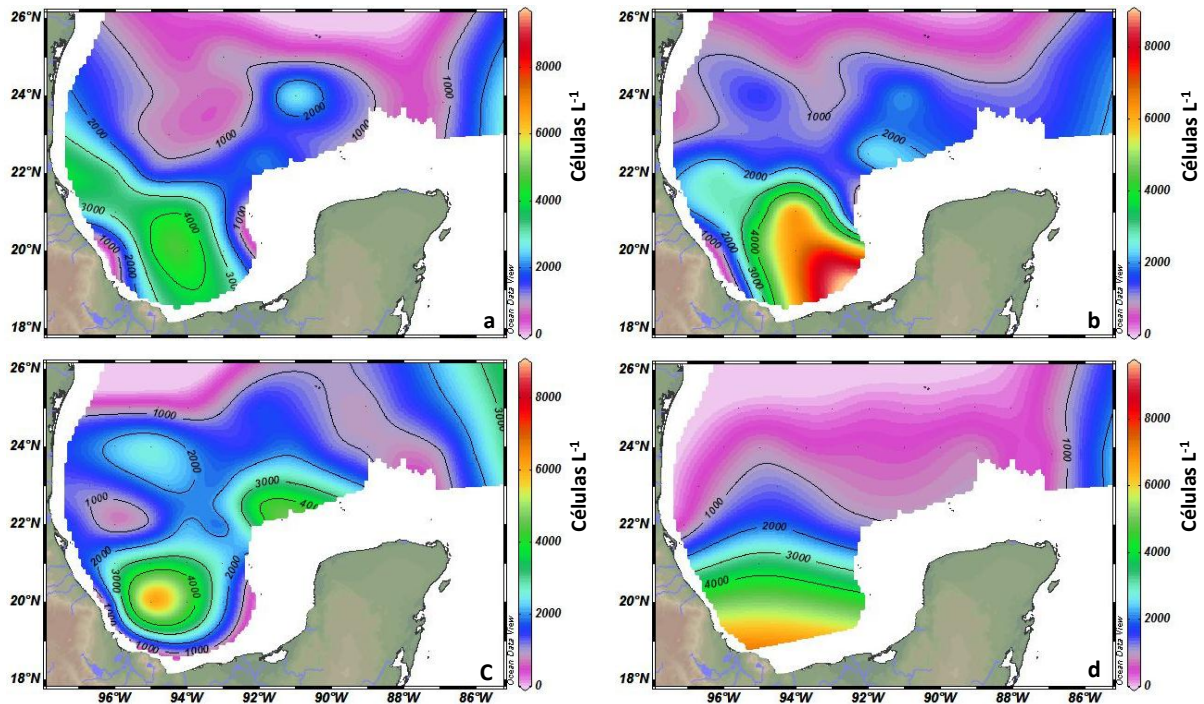


Figura 89. Distribución espacial de la abundancia de dinoflagelados (células L<sup>-1</sup>) en el GM durante el crucero XIXIMI-II realizado en julio del 2011; a) en superficie, b) a 10m, c) a 50m y d) 150m.

## Diatomeas

El rango de abundancia de las diatomeas varió entre los 20 y 4640 células  $L^{-1}$ . A diferencia de los dinoflagelados, sus mayores abundancias fueron encontradas en las estaciones del paralelo 25°N. Los máximos se registraron en las estaciones E30 y E31, ubicadas en la región noroeste en aguas oceánicas frente a la Península de Yucatán, entre las coordenadas 89-90°O y 23-25°N, y las menores abundancias se presentaron en la región central y extendiéndose a la región sur del GM, entre las coordenadas 19-24°N y 96 y 91°O que abarca las aguas oceánicas frente a Veracruz y Campeche. En cuanto a su distribución vertical, presentaron sus máximas abundancias entre las profundidades de 10 y 50 m (Figura 90b y c) y mínimas en la profundidad de 150 m, al igual que los otros grupos estudiados (Figura 90d).

La composición taxonómica de las diatomeas estuvo compuesta principalmente por géneros y/o especies del grupo de diatomeas pennales de tallas < a 20  $\mu m$ , incluyendo los géneros *Navicula*, *Nitzchia* y *Thalassionema*. También se encontraron, aunque en menor abundancia géneros de diatomeas centrales relativamente grandes como *Rizosolenia*.

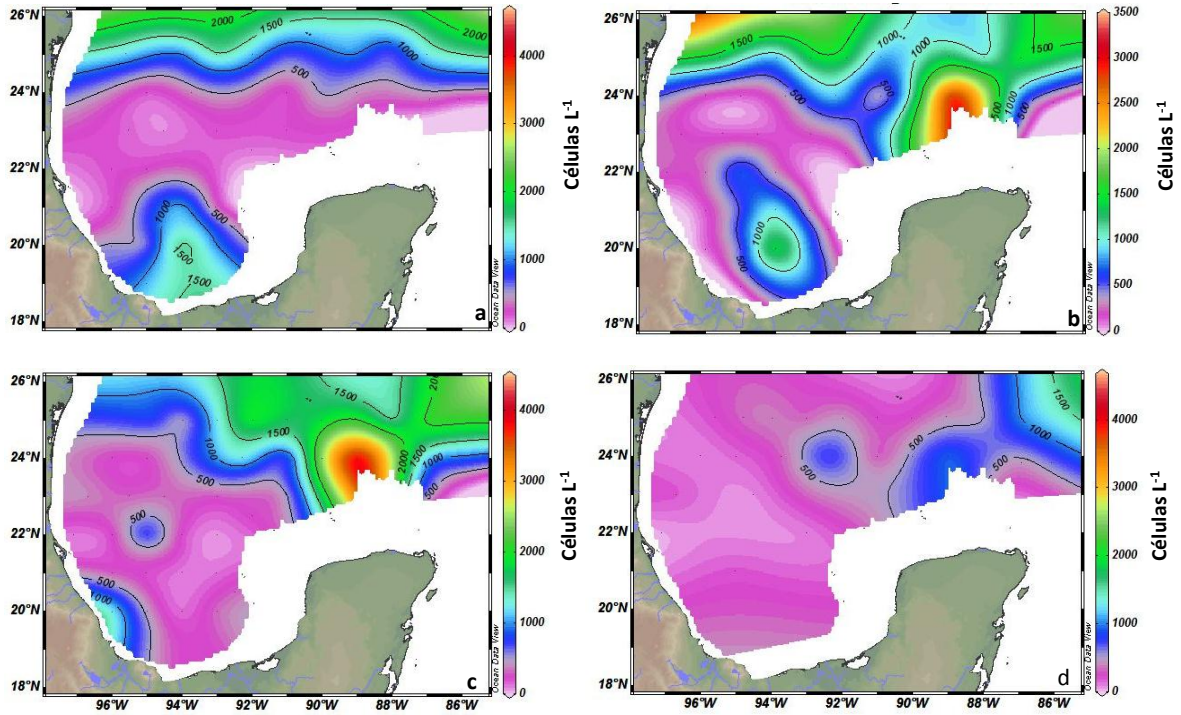


Figura 90. Distribución espacial de la abundancia de diatomeas (células  $L^{-1}$ ) recolectadas en el GM durante el crucero XIXIMI-2 realizado en julio del 2011.: a) en superficie, b) a 10 m, c) a 50 m y a d) 150 m

### Nanoflagelados

Las abundancias de los nanoflagelados presentaron un rango entre 20 y 5360 células  $L^{-1}$ . Su distribución espacial fue diferente al de los otros grupos, ya que aunque su abundancia en general fue baja, se presentaron núcleos aislados de alta abundancia en algunas estaciones de la región noroeste y sureste. En cuanto a su distribución vertical, se observó su máxima abundancia entre los 10 y 50 metros de profundidad (Figura 91b y c), al igual que en el caso de los otros componentes del fitoplancton.

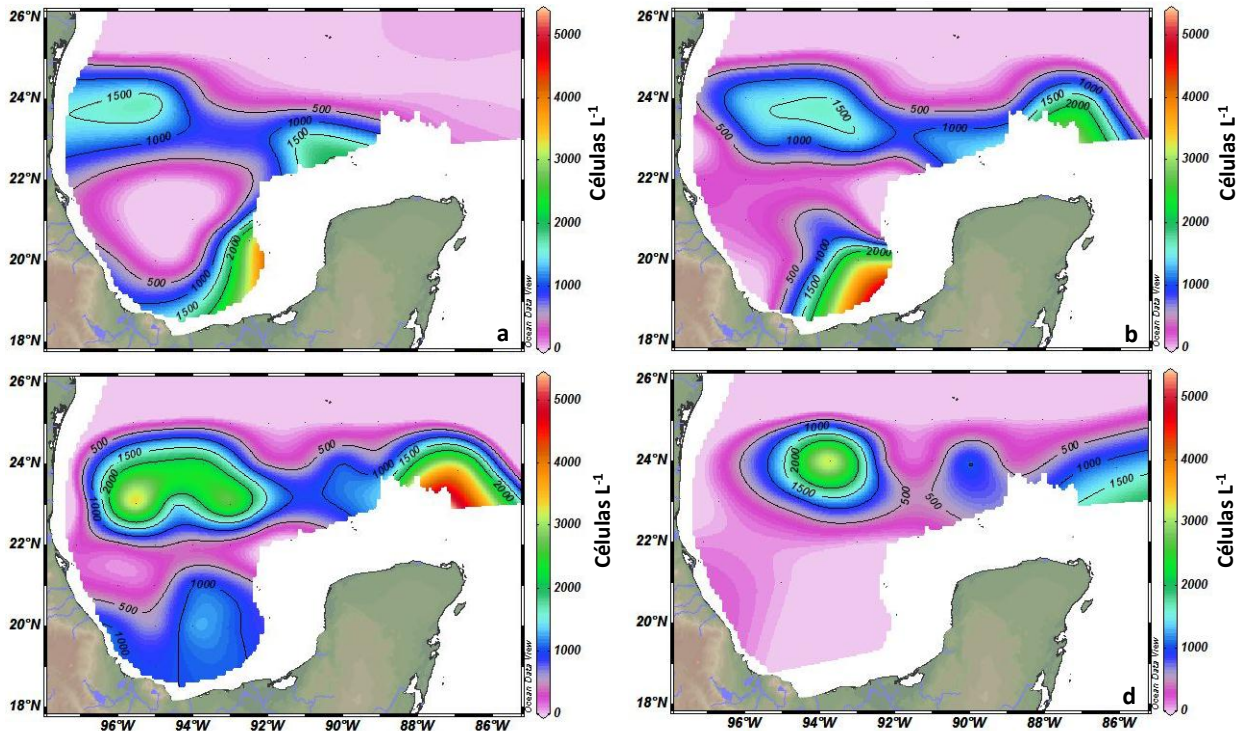


Figura 91. Distribución espacial de la abundancia de nanoflagelados (células  $L^{-1}$ ) recolectados en el GM durante el crucero XIXIMI-2 realizado en julio del 2011: a) en superficie, b) a 10 m, c) a 50 m y a d) 150 m.

## Ciliados

Los ciliados presentaron un rango de abundancia entre los 20 y 1260 organismos  $L^{-1}$ . Los valores mayores fueron encontrados en la región sur, entre las coordenadas 19 y 22°N y 92 y 96°LO, en la zona oceánica frente a Veracruz y Campeche. Asimismo, presentaron una menor abundancia hacia la región norte, notándose sus menores abundancias en las estaciones del paralelo 25°N, como se puede observar en la Figura 92, así como en el fitoplancton y nanoplancton. En cuanto a su distribución vertical, sus máximas abundancias fueron encontradas entre los 10 y 50 metros de profundidad (Figura 92b y c), y las menores abundancias a 150 metros de profundidad (Figura 92d).

La comunidad de ciliados estuvo conformada principalmente por la especie *Mesodinium rubra* e individuos de la talla del nanoplancton (<20  $\mu m$ ), con más del 50% en cada muestra.

También se cuantificaron tricomas (cadenas de células de cianobacterias) del género *Tricodesmium* en abundancia entre 0 a 140 tricomas  $L^{-1}$ , registrándose sus mayores abundancias en la región sur del GM.

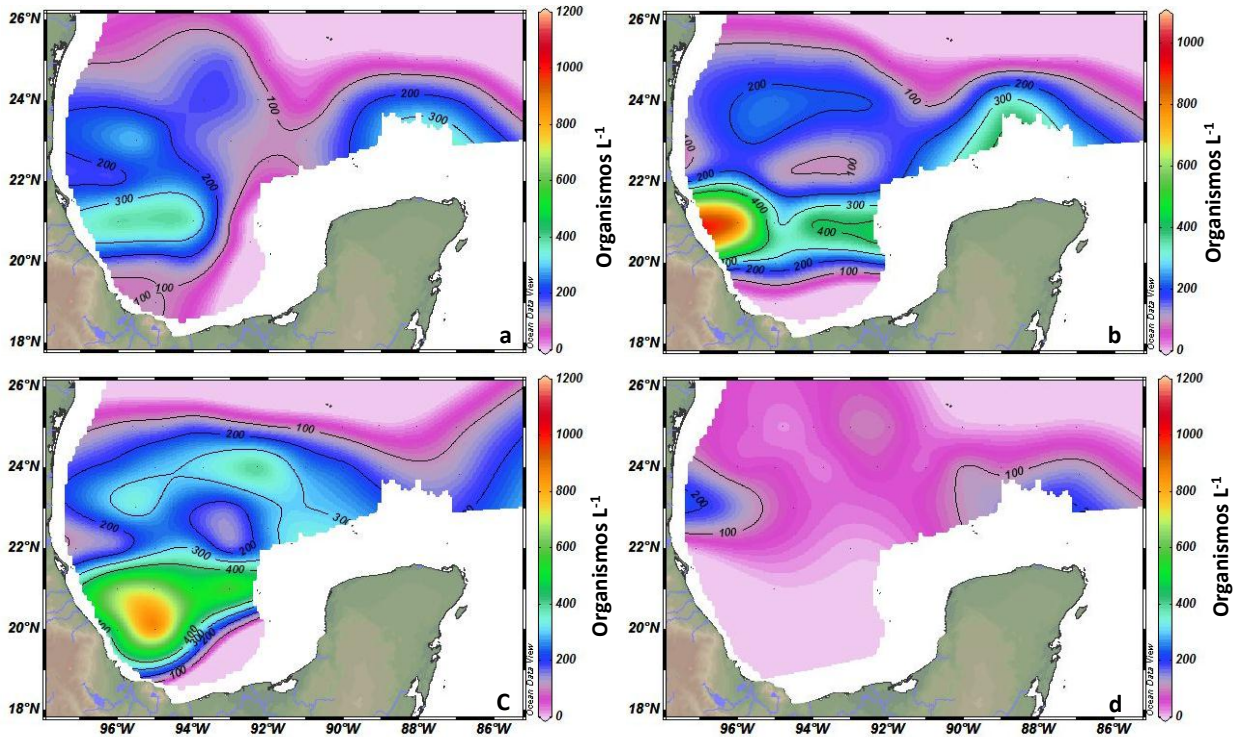


Figura 92. Distribución espacial de la abundancia de ciliados (organismos  $L^{-1}$ ) recolectados en el GM durante el crucero XIXIMI-2 realizado en julio del 2011: a) superficie, b) a 10 m, c) a 50 m y d) 150 m.

## Citometría (Anexo 11)

## Discusión

De acuerdo a la distribución espacial de los componentes del plancton que se evaluaron, la zona de estudio puede dividirse en tres regiones diferentes: la región noroeste (23-25°N y 90-99°O) frente a las aguas oceánicas de la Península de Yucatán, y las regiones central y la sur (19-24°N y 91-96°O). En la zona noroeste y sur se presentaron las mayores abundancias de los grupos fitoplanctónicos contabilizados, así como la de los grupos del microzooplancton. En general, su abundancias fue mayor a los 10 y 50m de profundidad que a 150 m. Suponemos que esto se debió a la presencia de los giros superficiales y frentes que se forman en la región del cañón de Campeche y el cañón de Soto (Escobar-Briones *et al.*, 2008), los cuales son procesos hidrodinámicos que pueden concentrar el plancton mediante los efectos físicos de acumulación, retención y dispersión en la región (Franks, 1992).

En relación al nanoplancton, las abundancias mayores se encontraron en las estaciones frente a la plataforma de Yucatán, posiblemente debido al aporte de aguas caribeña. Como ha sido señalado en estudios anteriores, el caribe occidental tiene una mayor estratificación a lo largo del año que dificulta la mezcla vertical y entrada de nutrientes a la zona eufótica, por lo que presenta una comunidad planctónica pobre con pocas variaciones estacionales (Okolodkov, 2003). Estas condiciones causan baja productividad biológica en la región (Margalef, 1969), lo que puede favorecer la dominancia de organismos de tallas pequeñas.

Por otro lado, la comunidad estuvo conformada principalmente por especies del grupo de los dinoflagelados, lo que ha sido reportado como característico de aguas oceánicas tropicales (Steidinger y Tangen 1997). Este grupo presenta características fisiológicas que le permiten crecer en aguas oligotróficas, ya que tienen bajos requerimientos de nutrientes y sus óptimos de temperatura e iluminación son altos. Las regiones oceánicas del GM han sido consideradas como oligotróficas por diversos autores y se registraron valores bajos de clorofila (Licea y Santoyo, 1991; Biggs, 1992; Melo *et al.*, 2000). Estas son condiciones favorables para el desarrollo de los dinoflagelados, ya que dentro de este grupo hay especies que pueden adoptar diferentes formas de nutrición (autótrofa, heterótrofa y mixotrófica) dependiendo de las características que se presenten en el medio (Gamboa Márquez *et al.*, 1994). Algunas de las especies registradas han sido reportadas anteriormente para el mar Caribe (Wood, 1971), como por ejemplo *Hemiaulus haucki*, *Cerataulina spp.*, *Chaetoceros affinis*, *Ceratium fusus*, *Ceratium pentagonum*, *Ceratium teres* y *Podolampas bipes*.

Por otro lado, en este estudio se registró la presencia 27 especies consideradas como formadoras de florecimientos algales nocivos en el GM. Algunas son consideradas como muy tóxicas, ya que provocan mortandad de peces y delfines e intoxicación en humanos, como por ejemplo *Karenia brevis* que ha sido reportada en el área de Veracruz y Tamaulipas (Terán-Suárez *et al.* 2006), *Cylindrotheca closterium* en Yucatán (Ramírez-Camarena *et al.* 2006; Terán-Suárez *et al.* 2006) y *Scrippsiella trochoidea* en la región de Yucatán (Herrera-Silveira y Morales-Ojeda 2009), así como especies de los géneros de *Ceratium* y *Dinophysis*, que han sido registradas en la región sur del Golfo (Herrera-Silveira *et al.*, 2010), así como *Prorocentrum*, e incluso el ciliado *Myrionecta rubrum* (*Mesodinium rubrum*).

En este estudio se observaron tricomas de cianobacterias del género *Trichodesmium*, que se consideran comunes en aguas tropicales y que son fijadoras de nitrógeno atmosférico (Westberry y Siegel, 2006). Las especies de este género habita principalmente en aguas superficiales de mares tropicales pobres en nutrientes, y se han registrado abundancias de hasta 1000 tricomas L<sup>-1</sup>

(Carpenter, 1983). Este valor máximo es similar a la registrada en este estudio, ya que la máxima abundancia fue de 1040 tricomas L<sup>-1</sup>.

Los resultados del análisis de las muestras recolectada durante XIXIMI-2 mostraron una distribución espacial y vertical similar a la encontrada en el crucero de noviembre del 2010. En comparación con el crucero XIXIMI-1, realizado en noviembre del 2010, el grupo que contribuyó más a la abundancia total del fitoplancton fue el de las diatomeas (hasta 3240 células L<sup>-1</sup>). En comparación, durante el crucero realizado en julio del 2011, los dinoflagelados fueron el grupo que contribuyo más a la abundancia total del fitoplancton, contrario al de noviembre del 2010 que fue el grupo de las diatomeas, (Tabla 15). Sin embargo, en términos absolutos la abundancia de las diatomeas fue menor a la registrada en el crucero realizado en julio del 2011, durante el cual se midieron hasta 4640 células L<sup>-1</sup>.

Como se mencionó anteriormente, en noviembre del 2010 la comunidad del fitoplancton estuvo dominada por el grupo de las diatomeas, mientras que en julio del 2011 los dinoflagelados contribuyeron en mayor proporción a la abundancia total. Esto es similar que lo registrado por Licea y Luna (1999), quienes reportaron que la mayor abundancia de dinoflagelados se presenta durante la época de lluvias (julio-agosto), y los valores más bajos en invierno (noviembre-diciembre), al igual que lo registrado por Hernández-Becerril (2008). El grupo de los dinoflagelados fue más diverso que el de las diatomeas durante los dos cruceros. La abundancia de los dinoflagelados fue más alta hasta en un 70% que lo reportado para las muestras recolectada en noviembre del 2010 (hasta 9,780 células L<sup>-1</sup> y 1320 células L<sup>-1</sup>, respectivamente) (Tabla 15). La comunidad de dinoflagelados que se muestrearon durante el crucero se caracterizó por presentar una alta abundancia de especies mixotróficas como *Gyrodinium spirale*, que fue la especie más abundante de todas las registradas en este estudio.

Tabla 15. Comparativa de los rangos de abundancia de fitoplancton (células L<sup>-1</sup>) reportados para los cruceros XIXIMI-I (Noviembre del 2010) y XIXIMI-II (Julio del 2011).

	CRUCERO XIXIMI-I		CRUCERO XIXIMI-II	
	GRUPOS		GRUPOS	
	DINOFLAGELADOS	DIATOMEAS	DINOFLAGELADOS	DIATOMEAS
<b>RANGO</b>	40-2080	40-3240	40-9780	0-4640
<b>NUMERO DE GÉNEROS</b>	23	18	50	46
<b>GÉNERO</b>	<i>Gymnodinium</i>	<i>Navícula</i>	<i>Gyrodinium</i>	<i>Navícula</i>

<b>DOMINANTE</b>		
<b>TOTAL DE MUESTRAS ANALIZADAS</b>	112	186

En el crucero de noviembre del 2010 solo se identificó en algunas ocasiones hasta especie al fitoplancton, los otros componentes del plancton se categorizaron en un solo grupo, por lo que se comparan rangos de abundancias que se registraron en el crucero de invierno del 2010 y verano 2011 (Tabla 16).

Tabla 16. Rangos y abundancias totales de los organismos del plancton cuantificados en muestras obtenidas durante los cruceros XIXIMI-I (Noviembre del 2010) y XIXIMI-II (Julio del 2011).

	<b>CRUCERO XIXIMI-I</b>	<b>CRUCERO XIXIMI-II</b>	<b>CRUCERO XIXIMI-I</b>	<b>CRUCERO XIXIMI-II</b>
<b>GRUPOS</b>	<b>RANGO</b>	<b>RANGO</b>	<b>MEDIA</b>	<b>MEDIA</b>
<b>DINOFLAGELADOS (células L<sup>-1</sup>)</b>	40-2080	40-9780	498.8	1692.47
<b>DIATOMEAS (células L<sup>-1</sup>)</b>	40-3240	0-4640	609.8	584
<b>CILIADOS (Org. L<sup>-1</sup>)</b>	40-120	20-1260	--	181.5
<b>TINTINIDOS (Org. L-1)</b>	40-80	20-100	--	11.6
<b>NANOFLAGELADOS (células L<sup>-1</sup>)</b>	-	20-5300	--	663.5
<b>CIANOFITA (Trichodesmium) (Tricomas L<sup>-1</sup>)</b>	0-40	20-1040	--	26.5
<b>SILICOFLAGELADOS (células L<sup>-1</sup>)</b>	40-160	0-100	--	5.8
<b>EUGLENAS (Org. L<sup>-1</sup>)</b>	40-160	0-160	--	36.36



## Conclusiones

Durante el verano del 2011, la estructura de la comunidad del fitoplancton en las aguas oceánicas del GM se caracterizó por la dominancia de especies del grupo de dinoflagelados de tallas menores a 20  $\mu\text{m}$ .

Comparando los cruceros XIXIMI-I (noviembre del 2010) y XIXIMI-II (julio del 2011), la abundancia de las diatomeas fue casi un 50% menor que en noviembre del 2010.

En general, la mayor abundancia del fitoplancton se presentó a los 10 y 50 m de profundidad, en la Sonda de Campeche (96-91°O y 19-24°N) y en aguas oceánicas frente a la Península de Yucatán (90-99°O y 23-25°N) alrededor del paralelo 25°N. La mayor abundancia total se registró en la Sonda de Campeche.

En el crucero de julio del 2011 los dinoflagelados fueron el grupo más abundante, principalmente a 10 y a 50 m de profundidad, y estuvieron dominados por los géneros *Gyrodinium* y *Gymnodinium*, y en especial por la especie *Gyrodinium spirale*.

El género *Oxytoxum* fue el que presentó la mayor cantidad de especies (20 especies identificadas). Sin embargo, en general la abundancia de individuos de este género fue baja.

Se registraron especies con el potencial de producir florecimientos algales nocivos y especies reportadas como potencialmente tóxicas, como *Karenia brevis* (260 células  $\text{L}^{-1}$ ), *Gymnodinium catenatum* (80 células  $\text{L}^{-1}$ ), *Alexandrium tamarense* (40 células  $\text{L}^{-1}$ ), y *Pseudonitzschia* spp. (3780 células  $\text{L}^{-1}$ ). Sin embargo, en general estas especies se presentaron en muy bajas abundancias.

Se observó la presencia de la cianobacteria *Trichodesmium*, aunque con abundancia baja con la excepción de E27, donde se registró un máximo de 1040 tricomas  $\text{L}^{-1}$ . *Trichodesmium* fue más abundante durante el crucero de julio del 2011 que durante el que se llevó a cabo en noviembre del 2010. En el 2011, esta especie se observó en muchas de las estaciones de muestreo, mientras que en noviembre del 2010 nada más se registró en dos muestras.

Se observó que la comunidad de ciliados estuvo conformada principalmente por la especie *Messodinium rubrum* y ciliados de la talla del nanoplacton <20 $\mu\text{m}$ .

Se cuantificaron células de nanoflagelados. Sin embargo, se puede haber subestimado su abundancia debido a sus tamaño (2 a 20µm), ya que las células más pequeñas necesitan de un aumento mayor de 40 a 100x para ser cuantificadas, y no usamos este nivel de magnificación en este estudio.

## Recomendaciones

Se presentaron altas abundancias de células en las muestras que se analizaron de 20, 100 y 75 metros de profundidad, por lo que se recomienda que estas profundidades también se consideren estándar para las próximas campañas.

Asimismo, debido a la baja abundancia de fitoplancton que se presentó en las muestras, se recomienda sedimentar 100 ml en vez de 50 ml, para tener una mejor distribución de organismos en el fondo de la cámara y poder hacer una evaluación aún más representativa de la comunidad.

## Referencias

- Aldeco J, Monreal-Gómez MA, Signoret M, Salas-de León DA y Hernández-Becerril DU, 2009 Occurrence of a subsurface anticyclonic eddy, fronts, and *Trichodesmium* spp. *Ciencias Marinas*. 35(4): 333–344.
- Biggs DC 1992 Nutrients, plankton and productivity in a warm core ring in the Western Gulf of Mexico. *Journal of Geophysical Research*. 97(C2): 2143-2154.
- Carpenter EJ 1983 Nitrogen fixation by marine *Oscillatoria* (*Trichodesmium*) in the world's ocean. In: Carpenter EJ, Capone DG (eds.), *Nitrogen in the Marine Environment*. Academic Press, New York. pp. 65–103.
- Cupp EE y Allen WE 1938 Plankton diatoms of the Gulf of California obtained by the G.Allan Hancock Pacific expedition of 1937. *University of Southern California Publications*. 3(5): 61-100.
- Edler L 1979 Recommendations on methods for marine biological studies in the Baltic Sea. *Phytoplankton and Chlorophyll*. *Baltic Marine Biologists Publication No. 5*. 38p.

- Escobar-Briones E, Estrada-Santillán EL y Legendre P 2008 Macrofaunal density and biomass in the Campeche Canyon, southwestern Gulf of Mexico. *Tropical Studies in Oceanography. Tropical Studies in Oceanography. Ciencias Marinas. The Deep Gulf of Mexico Benthos Program. Deep-Sea Res. II.* 55(24–26): 2679–2685.
- Franks PJS 1992 Sink or swim: Accumulation of biomass at fronts. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 82: 1–12.
- Gamboa – Márquez JF, Sánchez–Suárez IG y La Barbera–Sánchez A 1994 Dinoflagelados (Pyrrophyta) del Archipiélago Los Roques (Venezuela): Familias Procentraceae y Ostreopsidaceae. *Acta Cient. Venezolana. Biol. Mar.* 45: 140 – 152.
- Hernández-Becerril DU, García-Reséndiz JA, Salas-de León DA, Monreal-Gómez MA, Signoret-Poillon M y Aldeco-Ramírez J 2008 Nanoplankton fraction in the phytoplankton structure in the southern Gulf of Mexico (April 2000). *Ciencias Marinas.* 34(1): 77–90.
- Hernández-Becerril DU y Flores C 1998 Species of the diatom genus *Chaetoceros* (Bacillariophyceae) in the plankton from the southern Gulf of Mexico. *Bot. Mar.* 41: 505–519.
- Herrera-Silveira JA y Morales-Ojeda SM 2009 Evaluation of the health status of coastal ecosystem in southeast Mexico: Assessment of water quality, phytoplankton and submerged aquatic vegetation. *Marine Pollution Bulletin.* 59: 72-86.
- Herrera-Silveira J, Álvarez-Góngora C, Virgilio-Marino F y Aguilar-Trujillo A 2010 Mareas rojas en las costas de Yucatán. *Biodiversidad y desarrollo humano en Yucatán, amenazas a la biodiversidad.* México. Nota científica.
- Licea S 1994 *Thalassiosira* species from the southern Gulf of Mexico. *Proc. 11th Int. Diatom Symp. Mem. California Acad. Sci.* 17: 311–335.
- Licea S y Santoyo H 1991 Algunas características ecológicas del fitoplancton de la región central de la Bahía de Campeche. *Anales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México.* 18 (2): 157-167.

- Licea S, Zamudio ME, Luna R y Soto J 2004 Free-living dinoflagellates in the southern Gulf of Mexico: Report of data (1979–2002). *Phycol. Res.* 52: 419–428.
- Licea S y Luna R 1999 Spatio-temporal variations of phytoplankton on the continental margin in the SW Gulf of Mexico. *Rev. Soc. Mex. Hist. Nat.* 49: 83–99
- Licea S 2006 Diatomeas (Bacillariophyceae) y Dinoflageladas (Dinophyceae) planctónicas más frecuentes en la región sur del Golfo de México. Universidad Nacional Autónoma de México. Informe final SNIB-CONABIO proyecto AA012. México.
- Margalef R 1969 Counting. En: R.A. Vollenweider, J.F. Talling y D.F. Westlake (Eds.). *A manual on methods for measuring primary production in aquatic environments including a chapter on bacteria.* London International Biological Programme. (IBP Handbk 12), Blackwell Scient. Publ., Oxford. 7-14 pp.
- Margalef R 1980 *Perspectivas de la teoría ecológica.* Ed. Blume, Barcelona. 100 pp.
- Melo N, Müller-Karger F, Cerdeira S, Pérez R, Victoria I, Cárdenas P y Mitrani I 2000 Near-surface phytoplankton distribution in the western Intra-Americas Sea: The Influence of El Niño and weather events. *Journal of Geophysical Research.* 105 (6): 14029-14043
- Moreno-Ruiz JL, Soto JP, Zamudio ME, Hernández-Becerril DU y Licea S 1993 Morphology and taxonomy of *Chaetoceros diversus* Cleve (Bacillariophyceae), with reference to material from the Southern Gulf of Mexico. *Diat. Res.* 8: 419–428.
- Moreno JL, Licea S 1994 Morphology of three related *Coscinodiscus* Ehrenberg taxa from the southern Gulf of Mexico and coastal North Pacific of Mexico. *Proc. 11th Int. Diatom Symp. Mem. California Acad. Sci.* 17: 113–127.
- Muciño-Márquez RE, Figueroa-Torres MG y Gárate-Lizárraga I 2011 Especies fitoplanctónicas formadoras de proliferaciones algales nocivas en la boca de la laguna costera de Sontecomapan, Veracruz, México. *Cuadernos de Investigación UNED.* 3(2): 151-160.

- Ramírez-Camarena C, Hernández-Becerril DU, S. Barón-Campis y N. O. Juárez-Ruíz. 2006. Mareas rojas de *Karenia brevis* en costas mexicanas del Golfo de México: Revisión de 1996 a 2005. XII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología del Mar.
- Riverón-Enzástiga, M.L. 2008. Análisis de la variabilidad de las descargas de agua de los principales ríos de la cuenca del Golfo de México. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México. 86 pp.
- Steidinger, K.A. y K. Tangen. 1997. Dinoflagellates. In: Tomas CR (ed.), *Identifying Marine Phytoplankton*. Academic Press. pp. 387–584.
- Terán-Suárez, J. M., G. V. Castro, H. F. Mayor-Nucamendi y J. A. Brito- López. 2006. Florecimientos Algales en Tabasco. *Salud en Tabasco*. 12 (1): 414-422.
- Thronsen, J. 1978. Phytoplakton preservation and storage. En: A., Sournia. (Ed.). *Phytoplankton Manual*. UNESCO, Paris. 69-74 pp.
- Tomas, C.R. 1997. *Identifying Marine Phytoplankton*. Florida Department of Environmental Protection Florida Marine Research Institute. 857 pp.
- Utermöhl, H. 1958. Zur Vervollkmmoung der quantitiven phytoplankton-methodik. *Mitt.Internat. Verein. Limnol.* 9: 1-38.
- Westberry T.K. y D.A Siegel. 2006. Spatial and temporal distribution of *Trichodesmium* blooms in the world's oceans. *Global Biogeochem. Cycles* 20, GB4016. Doi: 10.1029/2005GB002673.
- Wood, E.J.F. 1971. Phytoplankton distribution in the Caribbean Region. In: UNESCO (ed.), *Coloquio sobre Investigaciones y Recursos del Mar Caribe y Regiones Adyacentes*. CICAR. pp. 399–410.
- Yamaji, I. 1980. *Illustrations of the marine plankton of japan*. Hoikusha publishing. 288 pp

## VARIABILIDAD BIO-ÓPTICA DEL FITOPLANCTON

Responsable: Dr. Eduardo Millán, CICESE  
Participante: MC. Mariana Macías Carballo

### Introducción

La estructura de la comunidad del fitoplancton y su producción primaria son parte fundamental del ecosistema pelágico del océano, por lo que es importante entender su variabilidad tanto a nivel regional como a nivel de mesoescala. El determinar y entender las causas de variación espacial y temporal del fitoplancton nos lleva al conocimiento de la fertilidad de los océanos, así como a detectar posibles efectos a corto y mediano plazo. Estudios del fitoplancton a nivel global han determinado que este representa hasta un ~2% de la biomasa del planeta, con una tasa de fijación de carbono del orden de 35 a 45 GT (Giga tonelada=  $10^{12}$  kg) (Falkowski et al. 1998). En la actualidad, por comodidad y costumbre la biomasa del fitoplancton se ha representado por el pigmento clorofila-*a*, sin embargo, se sabe que el fitoplancton de una determinada región geográfica está constituido por una gran diversidad de organismos (grupos, géneros, especies). Por lo tanto, su composición pigmentaria cambiará de acuerdo a la composición taxonómica, y se emplean nuevas técnicas de extracción de pigmentos para detectar un mayor tipo de pigmentos y poder entablar una relación con biomarcadores para ciertos grupos taxonómicos del fitoplancton. Recientemente, investigadores en ecología marina han desarrollado modelos bio-ópticos para calcular la productividad primaria a través de satélites. Para tal fin se utilizan datos relacionados con la fisiología del fitoplancton como la cosecha cuántica, la irradiancia, el contenido pigmentario, y el coeficiente de absorción. Con esta información se pueden detectar cambios en la estructura de la comunidad del fitoplancton (Falkowski et al. 1998; Bouman et al. 2000).

La absorción de luz por el fitoplancton y del material particulado no pigmentado (detritus), son los factores que más intervienen ó afectan el color del océano debido a que el material en suspensión forma parte de las propiedades ópticas inherentes de la columna de agua e intervienen en la absorción y esparcimiento de luz. El entendimiento de la óptica hidrológica de partículas marinas en suspensión mejora el conocimiento acerca del coeficiente de atenuación de la luz, la biomasa del fitoplancton y la productividad primaria. El coeficiente de absorción de luz en el océano ya ha sido previamente descrita por Morel y Bricaud (1981), Yentsch y Phinney (1989), Cleveland (1995), y Millán Núñez et al. (2004); estos autores coinciden en reportar una relación no lineal entre el coeficiente de absorción de luz por fitoplancton y la concentración de clorofila. En la década de 1980, se empezaron a desarrollar modelos mecánicos derivados de mediciones hechas con satélites para ayudar a predecir la

producción primaria en función de la capacidad de absorción en vivo de las células (Kiefer y Mitchell, 1983; Platt y Sathyendranath, 1988) (ecuación 1).

$$P_{(z)} = \Phi_{(z)} a_{ph(z)}^* B_{(z)} E_{0(z)} \quad (1)$$

dónde  $P_{(z)}$  es producción primaria a la profundidad  $z$  ( $\text{mg C m}^{-3} \text{ h}^{-1}$ ),  $\Phi_{(z)}$  es la eficiencia cuántica fotosintética del fitoplancton ( $\text{mol C } \mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $a_{ph(z)}^*$  es el coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton ( $\text{m}^2(\text{mg Chl-a})^{-1}$ ),  $B_{(z)}$  es la biomasa del fitoplancton por clorofila (Chl-a), y  $E_{0(z)}$  es irradiancia escalar ( $\mu\text{E m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ). En los algoritmos satelitales enfocados a la producción primaria se han utilizado valores in situ de irradiancia y concentración de clorofila captados por el Coastal Zone Color Scanner (CZCS). Sin embargo, en estos algoritmos el parámetro  $a_{ph}^*$  se utiliza como un valor promedio y constante a nivel mundial, lo cual implica la extrapolación a regiones que no pueden tener propiedades diferentes. Los resultados del coeficiente de absorción por fitoplancton obtenidos en este estudio, podrán ser utilizados en un futuro cercano como un valor promedio regional en la aplicación de algoritmos de productividad primaria para la zona de aguas profundas del GM.

## Área de estudio

El GM es un mar marginal profundo localizado entre  $18^\circ$  y  $30^\circ\text{N}$ , y  $81^\circ$  y  $98^\circ\text{W}$ ; está conectado con el mar Caribe a través del Canal de Yucatán y con el Atlántico norte a través del estrecho de Florida. El mecanismo forzante principal de la circulación del GM es el transporte asociado al flujo que entra por el Canal de Yucatán (Corriente de Lazo,  $\sim 44 \text{ cm s}^{-1}$ ) (Monreal-Gómez y Salas-De-León 1997). Esta corriente entra al golfo a través del Canal de Yucatán, forma la Corriente de Lazo que gira anticiclónicamente y posteriormente parte de esta agua sale a través del estrecho de Florida. El aumento de la clorofila-a satelital ( $\text{Chl-}a_{\text{sat}}$ ) a lo largo del margen de la Corriente de Lazo, atestigua la importancia de un incremento de nutrientes a través de un proceso advectivo oceanográfico (Müller-Karger et al. 1991).

El ecosistema del GM tiene un amplio espectro de productividad fitoplanctónica, desde aguas costeras eutróficas hasta condiciones oligotróficas en las aguas oceánicas profundas (Lohrenz et al. 1999). Unos de los procesos químicos y físicos que afectan la productividad primaria es la influencia de los sistema de ríos grandes con penetración altamente variable en el norte y este del GM (Wiseman y Sturges 1999). Datos recientes indican que el pico y nanofitoplancton contribuyen con más de dos tercios de la producción primaria de la zona de aguas del GM (Signoret et al. 2006, Sánchez-Iturbe et al. 2006,

Hernández-Becerril et al. 2008). Algunos estudios se han aplicado a los efectos de los flujos de ríos sobre la química y biología de la zona costera y oceánica (Lohrenz et al. 1990; McPherson et al. 1990). Sin embargo, existe poca información sobre los patrones sinópticos de variabilidad bio-óptica del material particulado en suspensión, así como factores que afectan la fisiología y ecología del fitoplancton del GM, particularmente en la zona de aguas profundas.

## Objetivo

Caracterizar la variabilidad espacial bio-óptica de la comunidad del fitoplancton a dos profundidades (superficie y 50 m) a partir de las curvas espectrales de absorción en el GM durante el verano 2012.

### Objetivos particulares

Análisis de identificación taxonómica de la comunidad del nano microfitoplancton ( $>5 \mu\text{m}$ ).

Análisis de los principales pigmentos y carotenoides del fitoplancton por el método del HPLC: clorofila-*a* (Chl*a*), zeaxantina (Zea), divinyl clorofila-*a* (DV chl-*a*), 19'-Hexanoyloxyfucoxantina (Hex-fuco).

Determinar el coeficiente de absorción de luz por fitoplancton ( $a_{\text{ph}}$ ), así como la forma espectral normalizada por el área bajo la curva ( $a_{\text{phn}}$ ) mediante diferenciación de pendientes en el intervalo del espectro de absorción de luz: 440-550 nm.

## Metodología

### Estrategia de muestreo

Se tomaron muestras de agua de mar en 47 estaciones a dos niveles de profundidad (superficie y 50 m) durante el crucero XIXIMI-2 a bordo del B/O Justo Sierra (Figura 1) Las muestras de superficie se tomaron con una botella Van Dorn de 5 litros, mientras que las de 50 m se tomaron con la botella Niskin de 10L montada en la roseta. En siete estaciones se tomaron muestras a seis niveles de profundidad (0, 10, 20, 50, 75, y 100 m). En la mayoría de las estaciones se



tomaron lecturas de disco de Secchi (durante el día) para estimar el coeficiente de atenuación de luz a la profundidad  $z$  ( $k_z$ ), y de esta manera calcular la profundidad de la zona eufótica ( $E_z$ ) utilizando la ecuación de Lambert-Beer (1% de la penetración de luz superficial,  $E_0$ ) (ecuación 2 y 3).

$$K_z = 1.7/\text{disco de Secchi (m)} \quad (2)$$

$$E_z = E_0 e^{-kz} \quad (3)$$

Métodos de laboratorio y análisis

#### *Cuantificación del nano-microfitoplancton >5 $\mu\text{m}$*

Para los análisis del fitoplancton se sedimentaron 50 ml de agua de mar durante 24 horas siguiendo la técnica de Utermöhl (1958), y se utilizó un microscopio invertido Carl Zeiss (160X, 400X). Se contaron 100 campos para cada muestra y se identificaron los organismos a nivel de género, y en algunos casos a nivel de especie. El análisis de las muestras del fitoplancton se realizó con la guía técnica propuesta por Hasle (1978) y su identificación taxonómica se basó principalmente en Cupp (1943), Hasle y Syvertsen (1996), Licea et al. (1996), Moreno et al. (1997), y Tomas (1997). Posteriormente se ordenaron los géneros de acuerdo a la ecuación de amplitud de nicho de Levins (1978), en donde se considera que los taxones de nicho más amplio tiene una mayor distribución espacial (ecuación 7).

$$B_i = \exp\left[\sum_{j=1}^k \left(\frac{P_{ij}}{R_j}\right) \ln\left(\frac{P_{ij}}{R_j}\right)\right] \quad (7)$$

donde  $R_j$  es la sumatoria de la proporción del género  $i$  en la muestra  $j$ ;  $P_{ij}$  es la proporción del género  $i$  en la muestra  $j$ ;  $R_j$  es la sumatoria de sus proporciones en cada punto o tiempo de muestreo, y  $k$  es el número de estaciones.

#### *Análisis de pigmentos fotosintéticos*

La determinación de la concentración de pigmentos ( $\text{mg m}^{-3}$ ), incluyendo la clorofila- $a$ , se realizó por cromatografía líquida de alta precisión (HPLC) utilizando

la técnica de Barlow et al. (1997). Para la extracción de los pigmentos, los filtros se colocaron en tubos de centrifuga con 5 ml de acetona al 100% con el estándar interno (trans  $\beta$ -caroteno). Los tubos de centrifuga fueron colocados en un sonicador por 30 segundos y se guardaron en un refrigerador (-20°C) por 24 horas. Una vez transcurrido el tiempo de extracción, las muestras se colocaron en una centrifuga a 3000 rpm por 15 minutos, el extracto se filtró a través de filtros de 0.2  $\mu$ m para eliminar partículas finas, y posteriormente se tomaron 300  $\mu$ l del extracto y se mezclaron con 300  $\mu$ l de acetato de amonio. Del extracto se inyectaron 200  $\mu$ l de la muestra a un HPLC marca Varian con una columna C<sub>8</sub> Spherisorb 150 x 4.6, 3.0  $\mu$ m. Se utilizaron dos solventes: Solvente A 70:30 (v/v) metanol 100%:1M acetato de amonio y Solvente B: metanol 100% a un flujo de 1ml por minuto. En este estudio, se incluyeron 18 pigmentos estándares en la columna (Figura 93). Sin embargo, solamente reportamos las concentraciones de los 4 pigmentos que representan los principales biomarcadores de grupos taxonómicos.

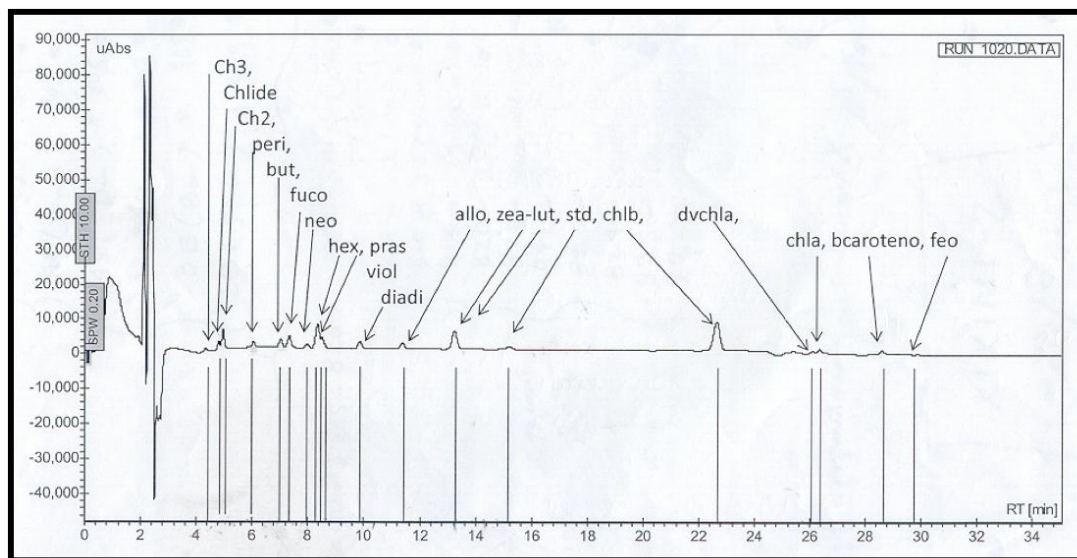


Figura 93. Variabilidad pigmentaria de los principales estándares del HPLCP que se utilizaron en XIXIMI-2 GM: Clorofila C<sub>3</sub> (chl-C<sub>3</sub>), clorofila C<sub>2</sub> (chl-C<sub>2</sub>), peridina (perid), 19'-butanoxifucoxantina (but-fuco), fucoxantina (fuco), neoxantina (neo), 19'-hexanoyloxyfucoxantina (hex-fuco), violaxantina (viola), diadinoxantina (diadino), alloxantina (allo), zeaxantina (zea), clorofila-b (chl-b), divinyl clorofila-a (dv chl-a), clorofila-a (chl-a), beta-caroteno ( $\beta$ -car).

## Coeficiente de absorción de luz por fitoplancton

Las muestras de agua de mar para análisis del coeficiente de absorción se filtraron a través de filtros Whatman GF/F y se almacenaron en nitrógeno líquido. Los filtros con material particulado, así como los de referencia, fueron saturados con agua de mar filtrada (0.2  $\mu\text{m}$ ), y posteriormente se obtuvieron curvas espectrales con un espectrofotómetro Shimadzu UV-2401 PC siguiendo la guía de laboratorio descrita por Cleveland y Weideman (1993). El espectro de absorción se midió entre los 400 a 750 nm a 2 nm de resolución y una velocidad intermedia de 300 nm  $\text{min}^{-1}$ . Posteriormente, los filtros se enjuagaron con metanol siguiendo la técnica descrita por Kishino et al. (1985). El coeficiente de absorción por fitoplancton se determinó por diferencias de lecturas entre el material particulado y material no pigmentado (detritus), según la ecuación 4 (clorofila-a (Chl-a), zeaxantina (Zea), divinyl clorofila-a (DV chl-a), y 19'-Hexanoyloxyfucoxantina (Hex-fuco).

$$a_p(\lambda) = a_{ph}(\lambda) + a_d(\lambda) \quad (4)$$

dónde  $a_p(\lambda)$  es la absorción de luz por material particulado a cierta longitud de onda ( $\text{m}^{-1}$ ),  $a_{ph}(\lambda)$  es el coeficiente de absorción de luz por fitoplancton ( $\text{m}^{-1}$ ), y  $a_d(\lambda)$  es la absorción de luz por detritus ( $\text{m}^{-1}$ ). El coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton ( $a^*_{ph}$ ) ( $\text{m}^2(\text{mg Chl-a})^{-1}$ ) se obtuvo normalizando el coeficiente de absorción ( $\text{m}^{-1}$ ) por la concentración de clorofila-a ( $\text{mg m}^{-3}$ ). Los coeficientes de absorción se corrigieron por un factor ( $\beta$ ) que ajusta la densidad óptica de las muestra en filtros ( $\text{OD}_f(\lambda)$ ) y lo relaciona con la densidad óptica en muestras en suspensión ( $\text{OD}_s(\lambda)$ ) (ecuación 5).

$$\text{OD}_s = 0.3269 \text{OD}_f + 0.4773 (\text{OD}_f)^2 \quad (5)$$

## Forma espectral de absorción de luz por fitoplancton

La forma espectral de absorción de luz por fitoplancton es el reflejo de la composición de pigmentos fotosintéticos que están contenidos en las células del fitoplancton para cada estación de muestreo. Al analizar los espectros de absorción y comparar su variabilidad en su forma espectral ( $a_{ph}$ ) entre estaciones del GM, podremos deducir la estructura de la composición taxonómica del

fitoplancton. Primeramente se obtuvo el valor del área bajo la curva espectral del  $a_{ph}$  ( $m^{-1}$ ) entre los 400 y 750 nm (ecuación 6), y se normaliza la curva espectral empleando el valor bajo la curva. Posteriormente, se analizaron las pendientes de las curvas espectrales en el ancho de banda de 440 nm a 550 nm a través de un análisis estadístico que agrupa formas espectrales similares entre sí (Torrecilla et al. 2011).

$$a_{ph,n} = \frac{a_{ph}(\lambda)(m^{-1})}{\int_{400}^{750} a_{ph}(\lambda)(m^{-1})d\lambda(nm)} \quad (6)$$

## Resultados y discusión

Distribución espacial del nano-microfitoplancton total para superficie y 50 m de profundidad

### *Nano-microfitoplancton (>5 $\mu m$ )*

Durante el derrotero de navegación, el fitoplancton total >5  $\mu m$  en las muestras de la superficie mostró una tendencia a disminuir su abundancia en la parte central del GM, principalmente en las estaciones E3, E3b, E12, E15, E33, E35, E43, y E47 incrementando ligeramente su abundancia en los extremos este y oeste del área de estudio entre los 22° y 24° N. Sin embargo, las máximas abundancias superficiales se detectaron en las estaciones E37 y E41 (Figura 94a). La abundancia del fitoplancton total a 50 m de profundidad mostró un patrón similar al superficial, con la excepción de las estaciones E21, E22, E30, y E31, en las que se detectaron altos valores del número de células (Figura 94b).

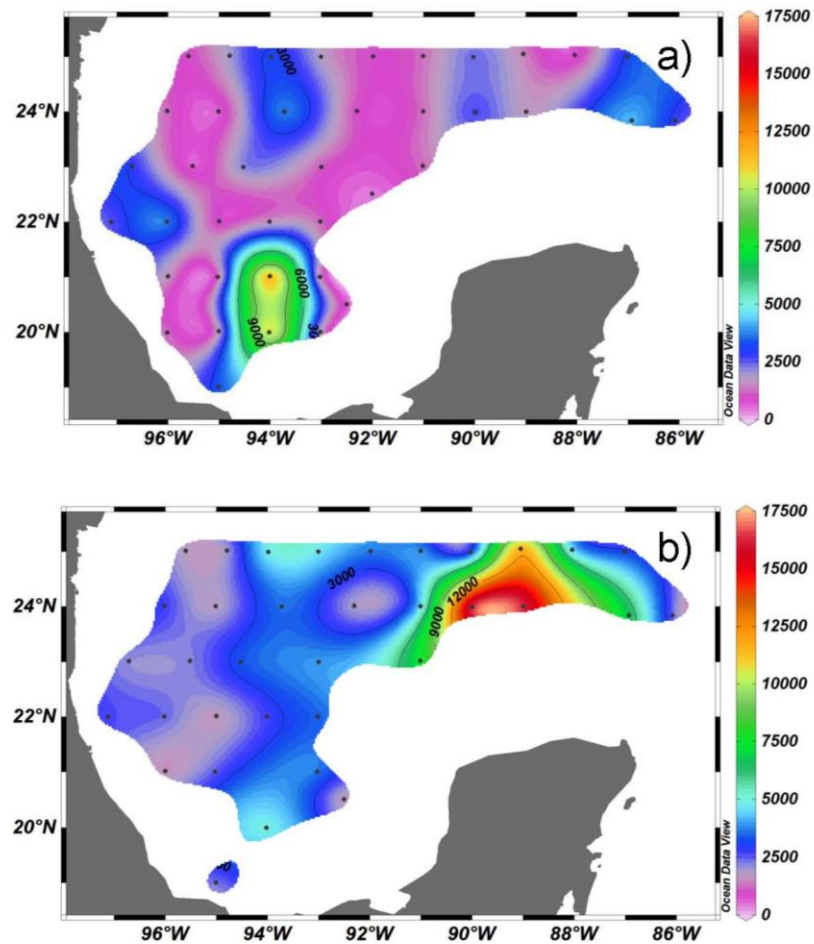


Figura 94. Abundancia del nano-microfitoplancton total (células L<sup>-1</sup>, >5 µm): a) superficie y b) 50 metros de profundidad.

La composición taxonómica del fitoplancton promedio en la columna de agua consistió de 13 géneros de diatomeas, 12 de dinoflagelados y 2 de silicoflagelados (Anexo 4, Anexo 5) Se jerarquizó la estructura de la composición taxonómica del fitoplancton aplicando para el estudio el índice de nicho ecológico propuesto por Levin (1978), donde un valor mayor del índice representa la persistencia de los organismos a lo largo del área de estudio. A continuación presentamos los 4 principales géneros detectados por grupo taxonómico: (*Nitzschia*, *Rhizosolenia*, *Chaetoceros*, *Cocconeis*, *Gymnodinium*, *Gyrodinium*, *Oxytoxum* y *Scrippsiella*). Se excluyeron los silicoflagelados por su escasa presencia.

La variabilidad espacial de las diatomeas  $>5\mu\text{m}$  en la superficie y a 50 m de profundidad mostraron un patrón de comportamiento muy similar al del fitoplancton total (Figura 95a y Figura 95b), mientras que el grupo taxonómico de los dinoflagelados mostró una baja abundancia tanto en superficie como a 50 m. En general, el grupo de los dinoflagelados mostró una distribución más homogénea en el área de estudio (Figura 96a y Figura 96b).

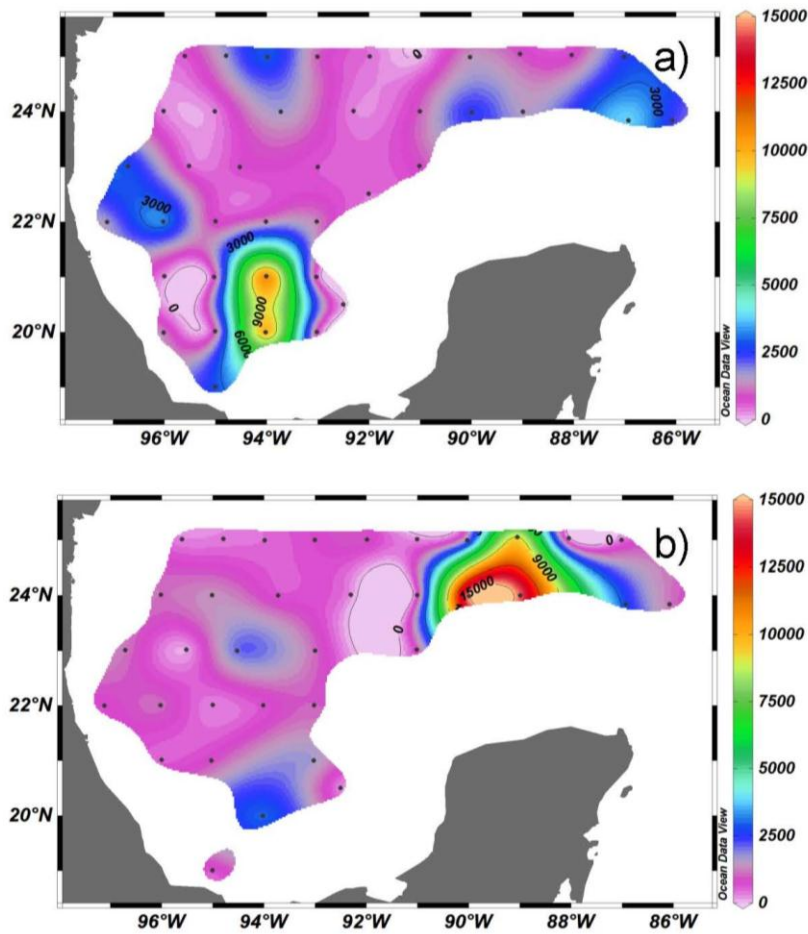


Figura 95. Abundancia de nano-microdiatomeas (células L<sup>-1</sup>,  $>5\mu\text{m}$ ): a) superficie y b) 50 metros de profundidad.

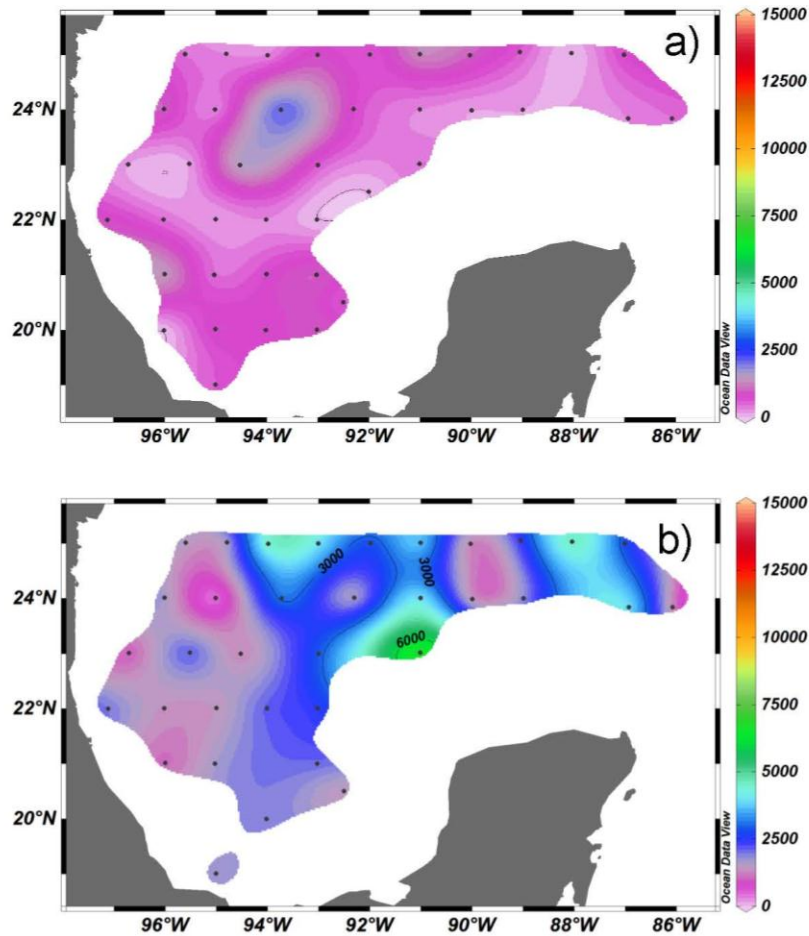


Figura 96. Abundancia de nano-microdinoflagelados (células L<sup>-1</sup>, >5 µm): a) superficie y b) 50 metros de profundidad.

*Principales pigmentos fotosintéticos por HPLC: Clorofila-a (Chl-a), Zeaxantina (Zea), Divinyl clorofila-a (DV chl-a), 19'-Hexanoyloxyfucoxantina (Hex-fuco)*

Durante el período de muestreo la clorofila-a (Chl-a) mostró un intervalo de valores entre 0.006-1.22 mg m<sup>-3</sup> (Figura 97a), observándose la mayor concentración en superficie en la zona de estudio frente a Tabasco y el sur de Veracruz (E41). Asimismo, se observó un segundo valor relativamente alto (0.546 mg m<sup>-3</sup>) a 50 m de profundidad en la estación E31 al norte de Yucatán (Figura 97b). Por otro lado, el carotenoide zeaxantina (Zea) mostró un intervalo de

concentración entre  $0.0002$  y  $0.269 \text{ mg m}^{-3}$  (Figura 98a y Figura 98b). El máximo valor de zeaxantina se detectó en la superficie, lo cual coincide con valores altos de clorofila-a, mientras que a la profundidad de 50 m las concentraciones fueron más homogéneas y en general menores de  $0.09 \text{ mg m}^{-3}$ . El pigmento Divinyl chl-a (DV chl-a) mostró un intervalo de valores entre  $0.0008$ - $0.182 \text{ mg m}^{-3}$  (Figura 99a y Figura 99b), observándose los valores altos a 50 m de profundidad en las estaciones E45 y E31 al sur de Veracruz y norte de Yucatán, respectivamente. El carotenoide hexanoyloxyfucoxantina (Hex-fuca) mostró un intervalo de valores entre  $0.002$ - $0.603 \text{ mg m}^{-3}$  (Figura 100a y Figura 100b), observándose el valor mas alto a 50 m de profundidad en la estación E20 al norte del área de estudio.

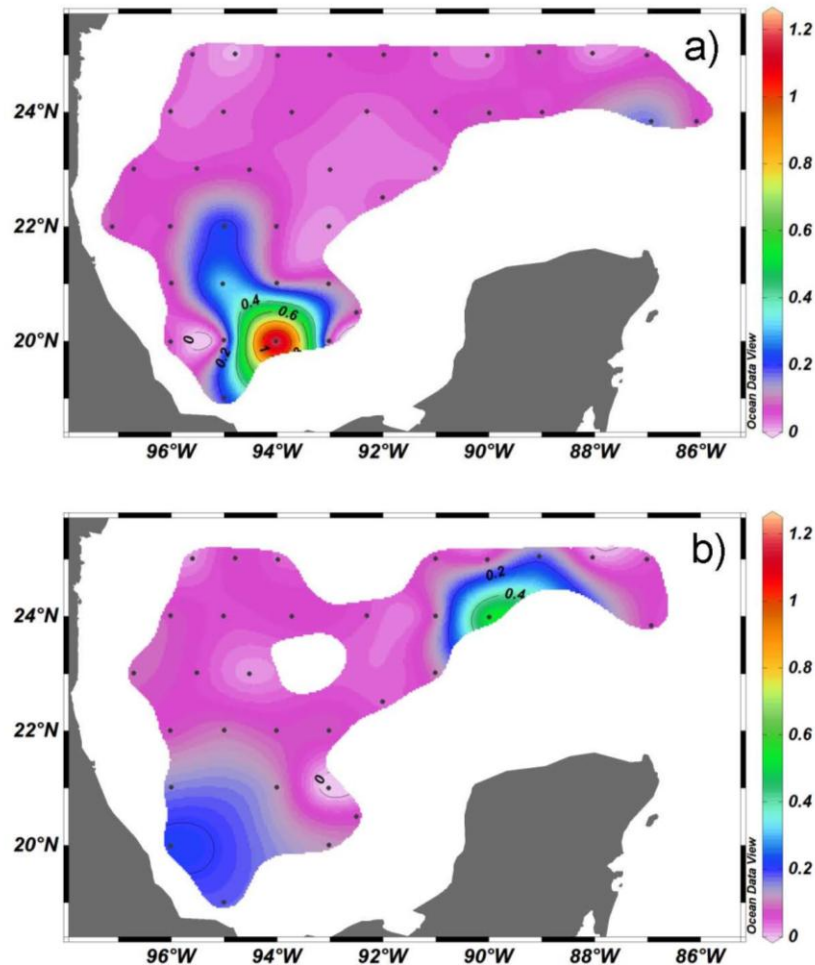


Figura 97. Distribución espacial de clorofila-a (Chl-a,  $\text{mg m}^{-3}$ ): a) superficie y b) 50 m de profundidad. Se considera que este pigmentos es característico del grupo de diatomeas.



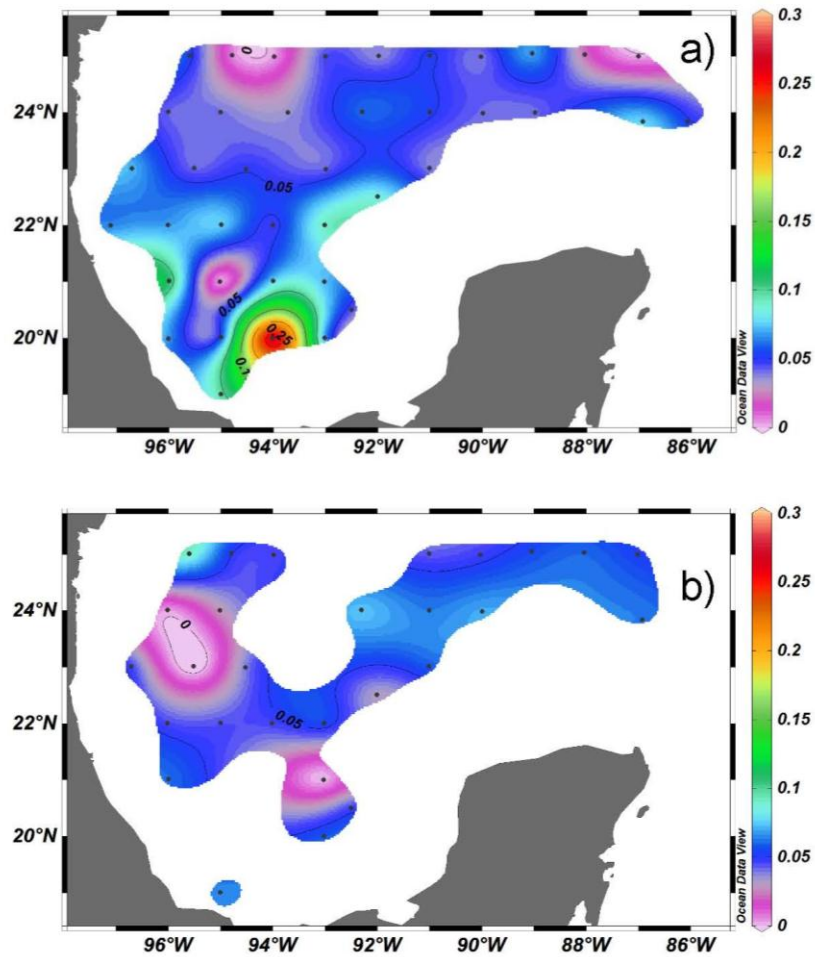


Figura 98. Distribución espacial de zeaxantina (Zea, mg m<sup>-3</sup>): a) superficie y b) 50 m de profundidad. Se considera que este caratenoide es característico del grupo de cianobacterias (por ejemplo, *Synechococcus* o *Trochodesmium ssp*).

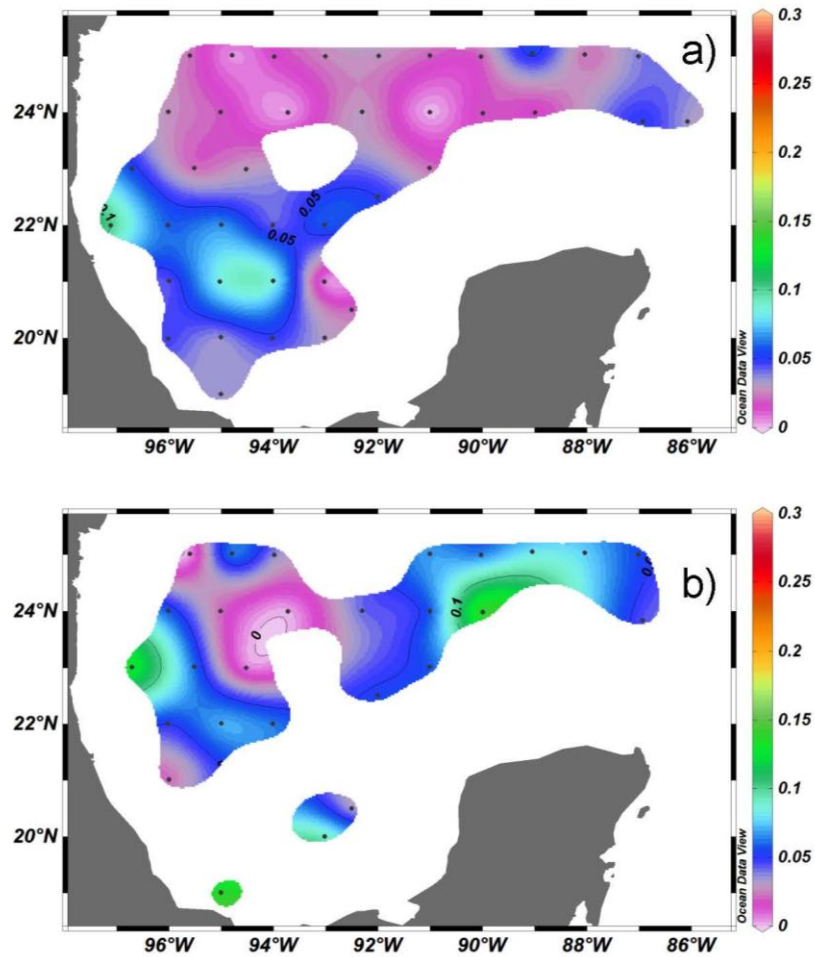


Figura 99. Distribución espacial de Divinyl chl-a (DV chl-a,  $\text{mg m}^{-3}$ ): a) superficie y b) 50 m de profundidad. Se considera que este pigmento es característico del grupo de prochlorofitas (por ejemplo, *Prochlorococcus* sp).

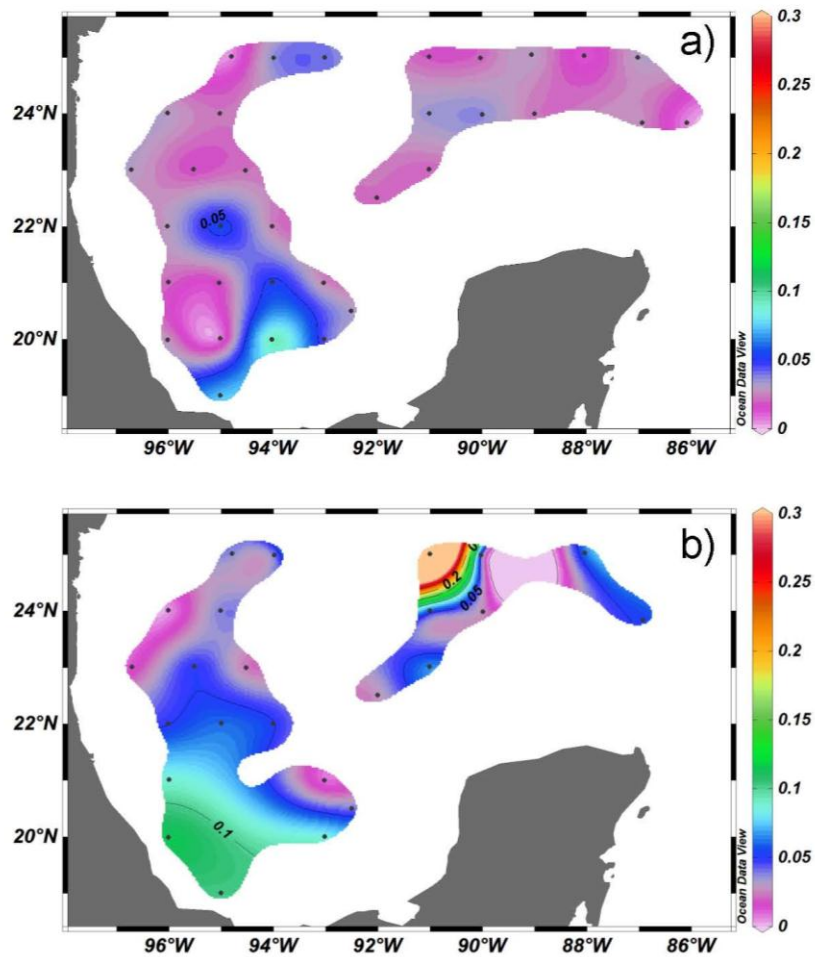


Figura 100. Distribución espacial de 19'-Hexanoyloxyfucoxantina (Hex-fuco, mg m<sup>-3</sup>). a) superficie y b) 50 m de profundidad. Se considera que este carotenoide es característico del grupo Prymnesiofitas (por ejemplo, *Emiliana huxleyi*).

*Coefficiente de absorción de luz por fitoplancton ( $a_{ph440\text{ nm}}$ ) y ( $a^*_{ph440\text{ nm}}$ )*

Durante el período de muestreo el  $a_{ph440\text{ nm}}$  mostró un intervalo de valores entre 0.001 a 0.053  $\text{m}^{-1}$  (Figura 101a y Figura 101b). Los valores mínimos se detectaron principalmente en superficie en las estaciones E27, E43, E44, y E47, mientras que los valores altos se localizaron a 50 m de profundidad en las estaciones E38, E40 y E46. El coeficiente específico de absorción por fitoplancton ( $a^*_{ph440\text{ nm}}$ ) mostró valores con un intervalo entre 0.019 a 1.019  $\text{m}^2 (\text{mg Chl-a})^{-1}$  (Figura 102a y Figura 102b). En general, los valores bajos del  $a^*_{ph440\text{ nm}}$  coincidieron con los valores altos del fitoplancton total y se detectaron principalmente en las estaciones E33, E44, E45, y E47. Por otro lado, la razón espectral entre dos máximos valores de longitudes de onda ( $a_{ph440\text{ nm}}/a_{ph674\text{ nm}}$ ) mostró valores con un intervalo entre 1.4 a 20 (Figura 103a y Figura 103b). Los valores  $>10$  unidades se detectaron en la parte central del Golfo en las estaciones E8, E10, E17, E27, E31, E36. Con esta información, podremos tener una idea de la distribución espacial de la estructura de tamaño de las células del fitoplancton en el GM. Por lo que se puede deducir, a partir de la Figura 103, una mayor abundancia de los organismos del picoplancton cerca a la superficie la parte central del GM.

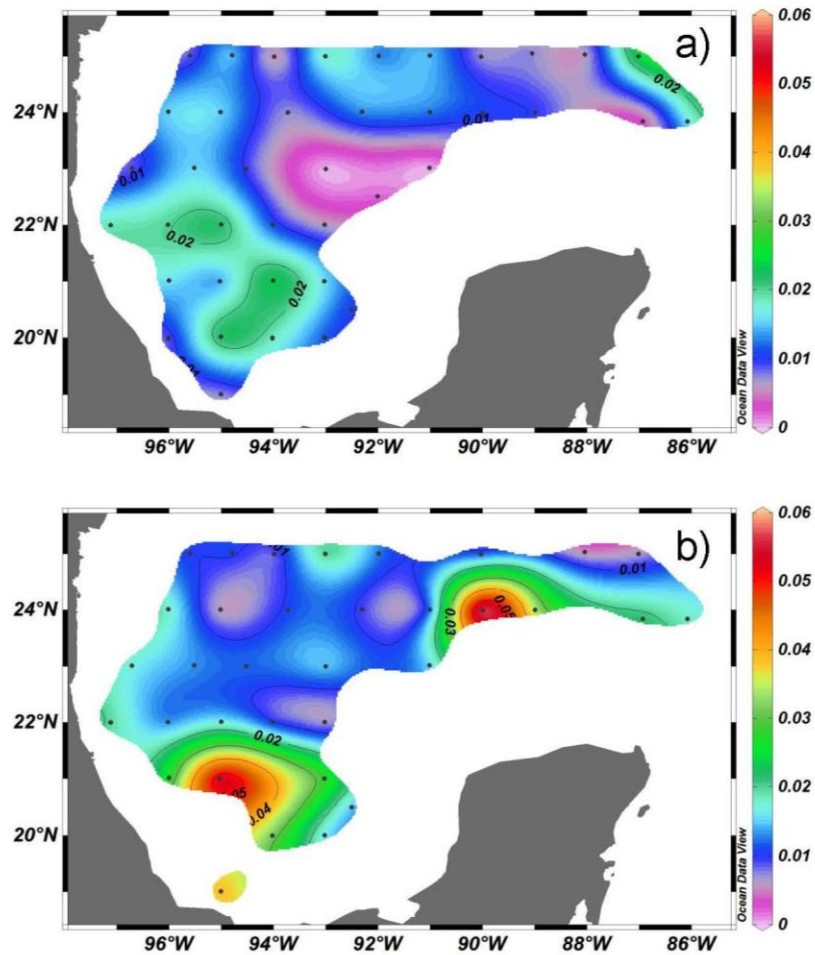


Figura 101. Coeficiente de absorción de luz por fitoplancton ( $a_{ph440\text{ nm}}$ ,  $\text{m}^{-1}$ ): a) superficie y b) 50 m de profundidad. Los valores altos indican una mayor abundancia de células del fitoplancton, por lo tanto una mayor concentración pigmentaria.

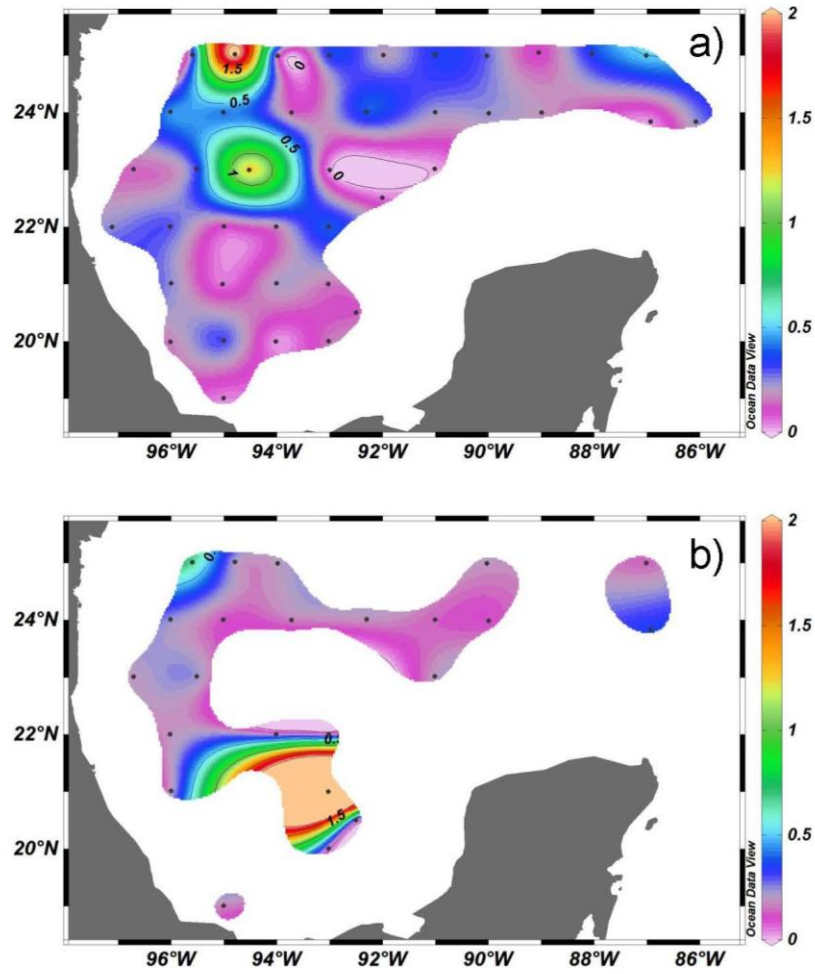


Figura 102. Coeficiente específico de absorción de luz por fitoplancton ( $a^*_{ph,440 \text{ nm}}, m^2(mg \text{ chl-}a)^{-1}$ ): a) superficie y b) 50 m de profundidad. Los valores bajos indican una mayor cantidad de células grandes del fitoplancton.

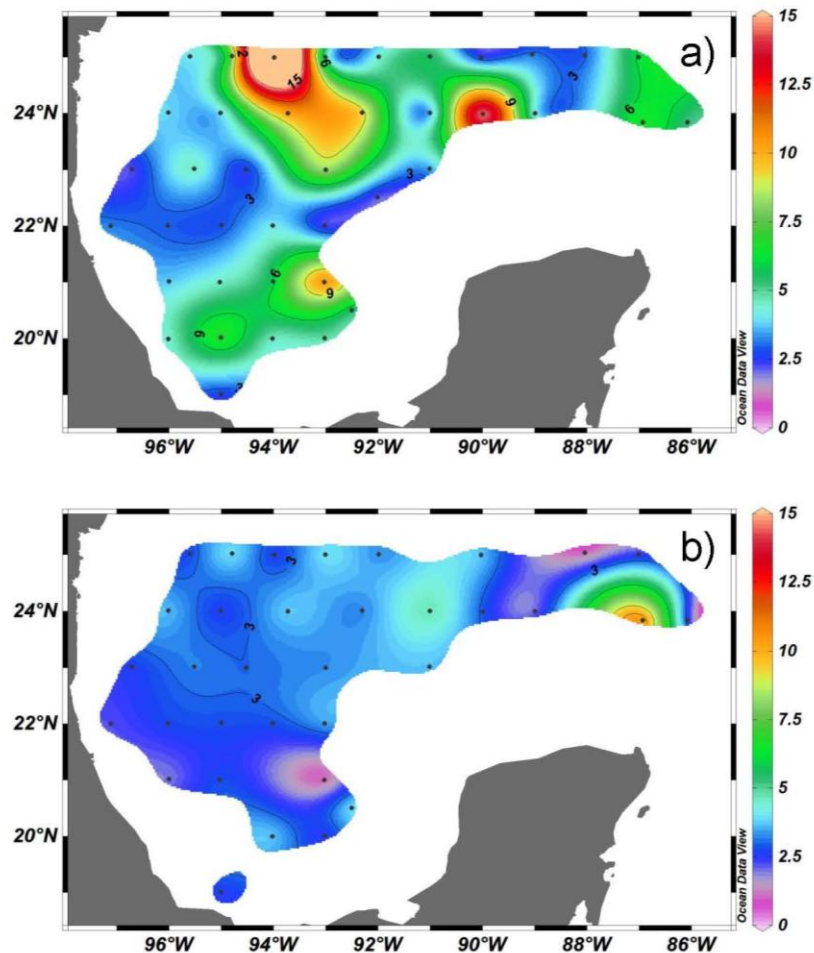


Figura 103. Distribución espacial del tamaño de talla del fitoplancton total. La razón de magnitud entre dos longitudes de onda del espectro de luz blanca, azul y roja (b/r) ( $a_{ph440\text{ nm}}/a_{ph674\text{ nm}}$ ): a) superficie y b) 50 m de profundidad. Los valores altos indican una dominancia de células del picoplancton.

En este estudio, se relacionan los principales pigmentos fotosintéticos denominados bio-marcadores con la estructura de la composición taxonómica y los parámetros bio-ópticos del fitoplancton: El pigmento chl-*a* se le relaciona tradicionalmente con la distribución de la biomasa del fitoplancton, esto por ser el pigmento que contienen la mayoría del fitoplancton. Podemos deducir que la distribución espacial del grupo taxonómico de las diatomeas están estrechamente relacionadas con la distribución del pigmento chl-*a*. Por otro lado, Zea y DV chl-*a* son pigmentos bio-marcadores que se relacionan con el picoplancton, ó células del fitoplancton menores a 1  $\mu\text{m}$ . Este grupo taxonómico de tamaño pequeño, que incluyen organismos como *Synechococcus sp* y *Prochlorococcus sp* son

considerado muy importantes desde la década de 1980, ya que el picoplancton puede aportar hasta 45% de la producción primaria total, particularmente en zonas oligotróficas. Al ser sumados estos dos pigmentos (zea + DV chl-a; Figura 103a), se observa que su distribución espacial mantiene una estrecha relación con la distribución en superficie. Con esta figura, podemos deducir diferencias de tamaño de células en fitoplancton. Recientemente, el grupo de las haptophytas y/o prymnesiophytas que incluye al grupo de los coccolitofóridos, son considerados de gran importancia a la relación bio-óptica de los océanos a través de los sensores remotos, esto por provocar influencia con el esparcimiento de luz provocados por sus placas carbonatadas. Asimismo, la presencia de los géneros *Emiliana* y *Gephyrocapsa* en estudios recientes han coincidido con la presencia del carotenoide 19'-Hex-fuca.

*Forma espectral del coeficiente de absorción de luz por fitoplancton ( $a_{phn}$ )*

En este estudio, se obtuvieron 42 curvas espectrales normalizadas (Figura 104). Después de analizar las diferencias entre las pendientes de las curvas de absorción en el ancho de banda entre 440-550 nm, los resultados indicaron que en la superficie del Golfo se detectaron cinco diferentes formas espectrales ó curvas patrones ( $a_{phn}/440$  nm), lo que significa que la parte central sur del GM durante el verano 2011, se caracterizó por tener cinco principales regiones ó áreas fitogeográficas (Figura 105, Figura 106).



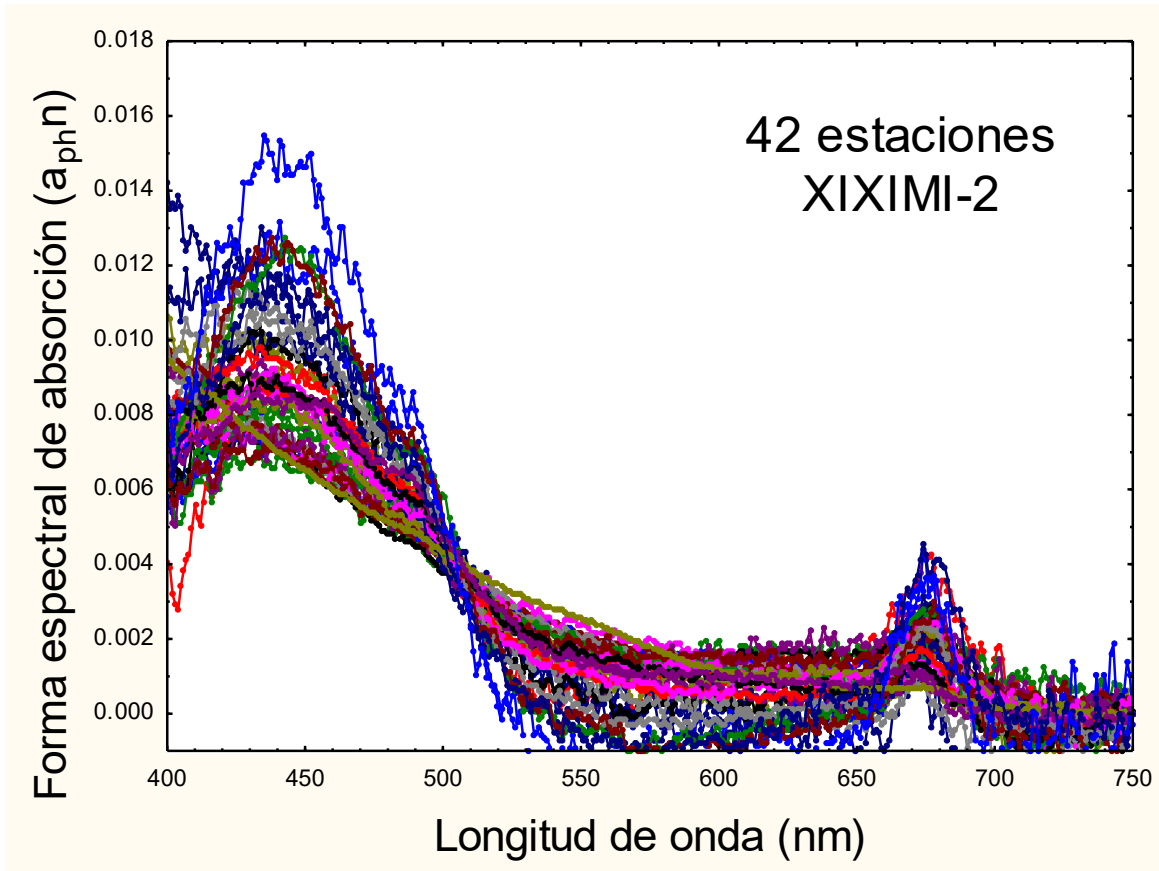


Figura 104. Variabilidad espacial de la forma espectral de absorción de luz por fitoplancton ( $a_{ph,n}$ ) durante el crucero XIXIMI-2 en el GM. Profundidad de superficie.

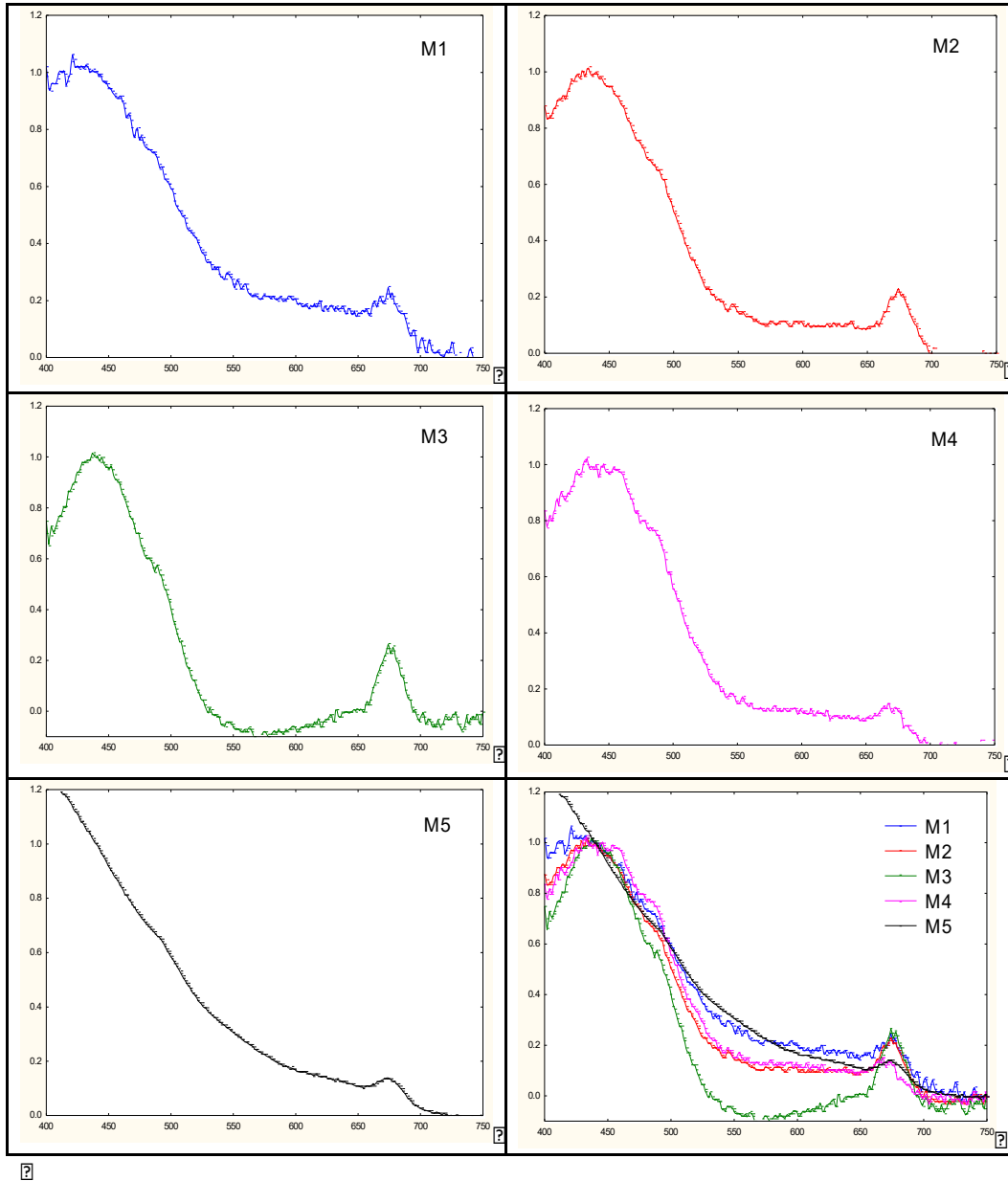


Figura 105. Variabilidad promedio de las Formas espectrales del fitoplancton ( $a_{ph}/440 \text{ nm}$ ) durante el crucero XIXIMI-2 en el GM. Profundidad de superficie. Variabilidad de curvas patrón: M1, M2, M3, M4, M5.

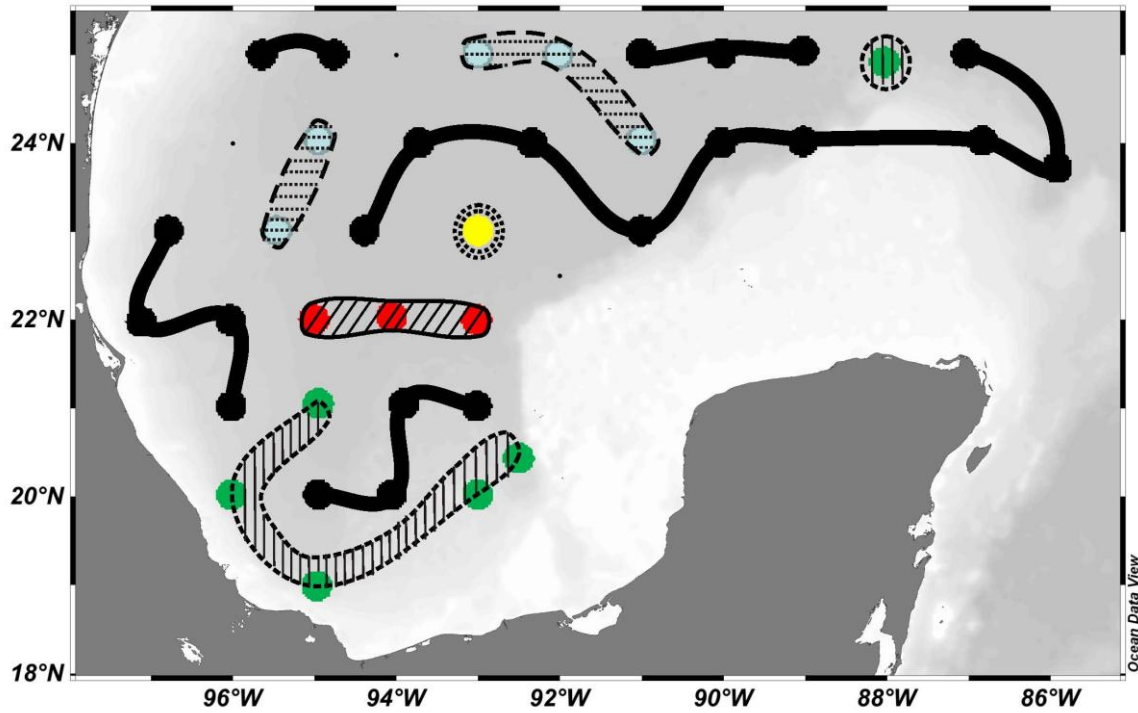


Figura 106. Distribución espacial y localización de provincias fitogeográficas a partir de la forma espectral ( $a_{ph}/440 \text{ nm}$ ) en el GM durante el crucero XIXIMI-2 a la profundidad de superficie. M1= color azul, M2= color negro, M3= color verde, M4= color amarillo, M5= color rojo.

Tabla 17. Provincias fitogeográficas asociadas a las estaciones y estructura de la comunidad del fitoplancton de superficie durante el verano 2011 en el GM. Principales grupos taxonómicos en porcentajes: Diat=diatomeas, Dinof=dinoflagelados.

Forma espectral promedio	Estaciones	Diat vs:Dinof (%) promedio
M1	3b-11-18-19-32	60-40
M2	1-2-3-4-8-10-15-16-20 21-22-24-25-27-30-31 33-36-37-39-40-41	62-38
M3	23-35-38-42-45-46	75-25
M4	44	51-49
M5	5-7-43	88-12

## Referencias

- Barlow RG, Cummings DG, Gibb SW 1997 Improve resolution of mono and divinyl chlorophylls *a* and *b* and zeaxanthin and lutein in phytoplankton extracts using reverse phase C-8 HPLC. *Marine Ecology Progress Series*, 161: 303-307.
- Bouman HA, Platt T, Kraay GW, Satthyendranath S, Irwin BD 2000 Bio-optical properties of the subtropical north Atlantic. I. Vertical variability. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 200: 3-18.
- Cleveland JS, Weidemann AD 1993 Quantifying absorption by aquatic particles: A multiple scattering correction for glass fiber filters. *Limnol. and Oceanogr.* 38 (6): 1321-1327.
- Cleveland JS 1995 Regional models for phytoplankton absorption as a function of chlorophyll *a* concentration. *Journal Geoph. Res.* 100 (7): 13333-13344.
- Falkowski PG, Baber RT, Smetacek V 1998 Biochemical controls and feedbacks on ocean primary productivity. *Science*, 281: 200-206.
- Kiefer DA, Mitchell BG 1983 A simple, steady state description of phytoplankton growth based on absorption cross section and quantum efficiency. *Limnol. and Oceanogr.* 28: 770-776.
- Kishino M, Takahashi N, Okami N, Ichimura S 1985 Estimation of the spectral absorption coefficients of phytoplankton in the sea. *Bull. Mar. Sc.* 37: 634-642.
- Hernández-Becerril DU, García-Resendiz JA, Salas-De-León DA, Monreal-Gómez MA, Signoret-Poillon M, Aldeco-Ramírez J 2008 Nanoplankton fraction in the phytoplankton structure in the southern Gulf of Mexico ( April 2000). *Cienc. Mar.* 34: 77-90.
- Licea S, Moreno JL, Santoyo H, Figueroa G 1995 Dinoflageladas del Golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California Sur, SEP-FOMES, PROMARCO, 165 pp.
- Millán-Núñez E, Sieracki ME, Millán-Núñez R, Lara-Lara JR, Gaxiola-Castro G, Trees CC 2004 Specific absorption coefficient and phytoplankton biomass in the southern region of the California Current. *Deep-Sea Res II*, 51: 817-826.

- Monreal-Gómez MA, Salas-De-León DA 1997 Circulación y estructura termohalina del Golfo de México. En: Lavín MF (ed.). Contribuciones a la oceanografía física en México, Monografía 3. Unión Geofísica Mexicana, Ensenada, pp. 183-199.
- Morel A, Bricaud A 1981 Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplankton. *Deep-Sea Res.* 28: 1375-1393.
- Moreno JL, Licea S, Santoyo H 1996 Diatomeas del Golfo de California. Universidad Autónoma de Baja California Sur, SEP-FOMES, PROMARCO, 273 pp.
- Müller-Karger FE, Walsh JJ, Evans RH, Meyers MB 1991 On the seasonal phytoplankton concentrations and sea surface temperature cycles of the Gulf of México as, determined by satellites. *J. Geophys. Res.* 96: 12645-12665.
- Platt T, Sathyendranath S 1988 Oceanic primary production: Estimation by remote sensing at local and regional scales. *Sci.* 241: 1613-1660.
- Sánchez-Iturbe A, Flores-Coto C, Zavala-García F 2006. Seasonal variations in growth and mortality of larval *Syacium gunteri* (Pisces: Parichthyidae) in the southern Gulf of Mexico (1992-1993). *Cienc. Mar.* 32: 83-95.
- Signoret M, Javier A, Barreiro MT 2006 Variabilidad de perfiles de clorofila a obtenidos por fluorescencia natural en el Oeste y centro del Golfo de México en Junio de 1999. *Hidrobiológica* 16: 221-232.
- Stommel H 1966 *The Gulf Stream: A physical and Dynamical Description*. Univ. California Press, Berkeley, 189 pp.
- Strathmann RR 1967 Estimating the organic carbon content of phytoplankton from cell volume or plasma volume. *Limnol. and Oceanogr.* 12: 411-418.
- Strickland JD, Parsons TR 1972 *A practical handbook of seawater analysis*. Bull. 167 Fish. Res. Board of Canada Ottawa pp. 310.
- Torrecilla E, Stramski D, Reynolds RA, Millán-Núñez E, Piera J 2011 Cluster analysis of hyperspectral optical data for discriminating phytoplankton pigment assemblages in the open ocean. *Remote sensing of Environment*, 115: 2578-2593.

Wiseman Jr WJ, Sturges W 1999 Physical oceanography of the Gulf of México: Processes that regulate its biology. In: Kumpf H, Steidinger K, Sherman K (eds.), the Gulf of México Large Marine Ecosystem. Blackwell Sciences, Malden, pp. 77-92.

Yentsch CS, Phinney DA 1989 A bridge between ocean optics and microbial ecology. *Limnol. and Oceanogr.* 34: 1694-1705

## COMPOSICIÓN ISOTÓPICA DEL ZOOPLANCTON

Responsables: Sharon Herzka, Jaime Farber, Juan Carlos Herguera  
Participantes: Reyna Barradas

### Antecedentes

La variabilidad natural en la abundancia relativa de los isótopos estables de elementos ligeros como el carbono y el nitrógeno es función de diversos procesos físicos, geoquímicos y biológicos que causan discriminación isotópica (o fraccionamiento). Desde hace casi cuatro décadas, los análisis de la composición isotópica de diferentes componentes de las cadenas alimentarias han servido como trazadores naturales de fuentes de producción primaria, procesos geoquímicos y para caracterizar relaciones tróficas tanto en sistemas terrestres como marinos (ver revisiones de Peterson y Fry 1987, Sharp 2007, Latjha and Michener 2007, Boecklen et al. 2011).

La aplicación de las técnicas isotópicas se basa en varias premisas:

(1) el carbono y nitrógeno inorgánico disuelto (CID y NID) tienen señales isotópicas características que reflejan tanto sus fuentes como procesos biogeoquímicos específicos,

(2) la composición isotópica de los productores primarios refleja las fuentes de nutrientes, la ruta fotosintética y sus características morfológicas y fisiológicas, y

(3) los heterótrofos reflejan la composición de sus fuentes de alimento de manera predecible

Dos de los elementos que más se han empleado para contribuir al entendimiento de los patrones y procesos involucrados en el flujo de nutrientes y transferencia de materia orgánica son el carbono y el nitrógeno. Mientras que la abundancia relativa de los isótopos estables de carbono ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) es útil para discriminar entre fuentes de materia orgánica, los isótopos estables de nitrógeno ( $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ) son particularmente útiles para identificar fuentes de nutrientes y estimar el nivel trófico de los heterótrofos (e.g. Fry y Sherr 1984, Rau et al. 1990).

En sistemas oceánicos, las técnicas isotópicas se han empleado para discriminar entre fuentes de producción primaria que aportan al reservorio de materia orgánica particulada (MOP; Macko et al. 1984, Rau et al. 1990, Sugisaki y

Tsuda 1995). Los valores isotópicos de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) del fitoplancton marino tienen un rango de -20 a -25‰, dependiendo del tipo de sistema (Fry y Sherr 1984). En contraste, la materia orgánica de origen terrestre (principalmente de plantas C-3) que los ríos transportan al océano tiene valores más negativos que la del fitoplancton de origen marino (-27 a -29‰). Estas diferencias en las señales isotópicas de producción primaria marina y terrestre hacen posible la discriminación entre ambas fuentes y la evaluación de la importancia relativa de cada una en cuanto a su contribución a la MOP en sistemas oceánicos (e.g., Wainright y Fry 1994).

Una fuente de carbono que se caracteriza por tener una señal isotópica distinta a la de la producción primaria marina son los hidrocarburos provenientes del petróleo (Hodgson 1966, Sharp 2007). La composición isotópica de los hidrocarburos derivados del petróleo, incluyendo los gases como el metano, tienen una composición relativamente ligera (valores de  $\delta^{13}\text{C}$  de -25 a -30‰ para el crudo, y valores de hasta -70‰ para el metano).

Si hidrocarburos isotópicamente ligeros (más negativos) son asimilados e incorporados a la red alimentaria, esta señal es detectable en los tejidos de los heterótrofos. Por ejemplo, Carney et al. (2010) usaron análisis isotópicos para evaluar la importancia relativa de carbono proveniente de emanaciones naturales de metano en equinodermos de hábitat profundo (>1000 m) en la región norte del GM. Encontraron que los valores isotópicos de los equinodermos eran más ligeros (valores de  $\delta^{13}\text{C}$  hasta -37‰) cerca de emanaciones naturales de metano que lejanas a ellas ( $\delta^{13}\text{C} = -18$  a -21‰). Becker et al. (2010) reportaron valores de  $\delta^{13}\text{C}$  muy negativos en bivalvos recolectados en el borde de la plataforma norte del GM (promedio de diferentes especies de -25 a -61‰), y también lo asociaron con fuentes naturales de metano que emanan del fondo marino ("cold seeps"). Ninguno de estos estudios se llevó a cabo dentro del contexto del derrame asociado a la plataforma Deepwater Horizon, pero sí sustentan el uso de análisis isotópicos de carbono como trazadores naturales de la incorporación de hidrocarburos a eslabones tróficos superiores.

Graham et al. (2010) reportaron un valor de  $\delta^{13}\text{C}$  de petróleo crudo intemperizado proveniente del pozo Macondo de -27.3‰, y trazaron la incorporación de materia orgánica derivada del petróleo a zooplancton de distintos tamaños. Esta incorporación de la señal del crudo al zooplancton pudo asociarse directamente con las zonas donde se habían documentado arribos de crudo. Por lo tanto, concluyeron que había evidencia de incorporación de petróleo sub-superficial a la red alimentaria pelágica.



Como se explica en la sección “Composición Isotópica del Carbono Orgánico Particulado” de este informe, se filtraron 8-12 L de agua de diferentes profundidades con el fin de llevar a cabo el análisis isotópico de la MOP. Esto fue necesario porque la concentración de carbono orgánico particulado es muy baja. La preparación de las muestras para análisis isotópicos del carbono orgánico involucra la acidificación de las muestras para eliminar los carbonatos, ya que su composición isotópica es muy diferente al fitoplancton y materia orgánica terrestre. Diversos estudios han establecido que la acidificación altera la composición isotópica de nitrógeno en la MOP ( $\delta^{15}\text{N}$ ; Harris et al. 2001, Carabel et al. 2006). Dado que no contábamos con un volumen de agua suficiente para obtener una segunda muestra de MOP, fue imposible obtener valores de  $\delta^{15}\text{N}$ . Por lo tanto, el análisis de la composición isotópica de grupos de zooplancton, que ocupan niveles tróficos relativamente bajos, provee información complementaria a la que se presenta en la sección sobre carbono orgánico particulado.

La medición de la composición isotópica de heterótrofos que consumen materia orgánica particulada se ha usado como proxy en sistemas acuáticos para establecer la línea de base de la composición isotópica de la cadena alimentaria (VanderZanden y Rasmussen 1999, Dorado et al. 2012). En zonas pelágicas, la composición isotópica del zooplancton se ha usado para distinguir entre redes tróficas sustentadas por distintas fuentes de producción primaria, diferenciar entre nitrógeno inorgánico disuelto (DIN, por sus siglas en inglés) proveniente de la mezcla entre agua profunda y superficial y de la fijación de nitrógeno, y para calcular el nivel trófico de heterótrofos (Macko et al. 1984, Bode et al. 1993, Capone et al. 2005, Altabet 2005).

El valor promedio de  $\delta^{15}\text{N}$  del nitrato en aguas profundas en sistemas marinos es de 4.7‰ (Altabet 2005). En zonas con un alto nivel de mezcla vertical, se espera que el nitrato que se transporta a la superficie tenga una composición isotópica similar. En contraste, el NID producto de fijación tiene una composición isotópica de  $\approx 0$ ‰ (ver revisión en Sharp 2007). En zonas oligotróficas, donde la fijación de nitrógeno puede contribuir sustancialmente al reservorio de DIN y por ende a la productividad, los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  de la MOP tienden a ser más bajos. Por ejemplo, en el Mar de Sargasso, una región oceánica oligotrófica que se encuentra dentro del giro anticiclónico del Atlántico norte, se han documentado valores muy bajos del nitrato en los primeros 500 m de la columna de agua (1-3‰; Figura 107). A profundidades mayores los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  se hacen más pesados y se aproximan al promedio oceánico después de los 1000 m (Altabet 2005). Los valores ligeros cerca de la superficie se ha atribuido a la fijación de nitrógeno por cianobacterias, particularmente del género *Trichodesmium* spp (Altabet 2005, Capone et al. 2005).

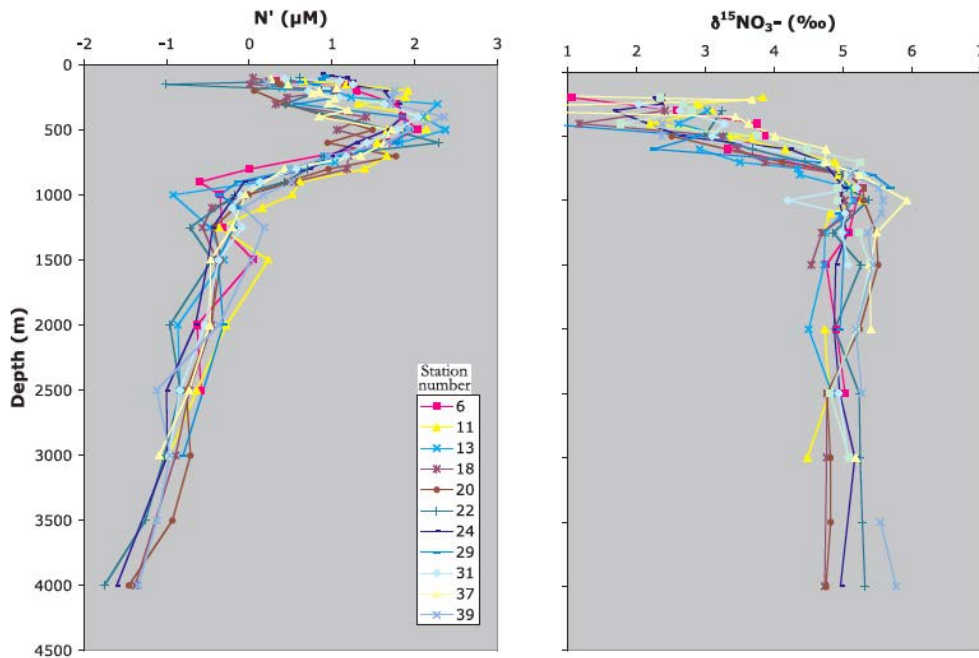


Figura 107. Izquierda: Perfiles verticales de la anomalía ( $N'$ ) en la concentración de nitrógeno inorgánico para el mar de Sargasso en el giro subtropical del Atlántico norte. Valores de  $N' > 0 \mu\text{M}$  indican una mayor concentración de nitrato que la predicha por la razón de Redfield, y es considerado como indicativo de fijación de nitrógeno en el sistema. Derecha: perfil vertical de valores de  $\delta^{15}\text{N}$  del nitrato. Los valores más ligeros  $< 5 \text{‰}$  son consistentes con aportes de nitrógeno proveniente de la fijación por cianobacterias. Fuente: Altabet 2005.

En este estudio, analizamos la composición isotópica de dos grupos de zooplankton, los copépodos y los eufáusidos, para apoyar en la caracterización de las fuentes de materia orgánica que sustentan la producción de su biomasa, evaluar si hay indicios de la incorporación de hidrocarburos a la red alimentaria planctónica, y para inferir las fuentes de nitrógeno en las capas superficiales de la zona de aguas profundas del GM. Los copépodos tienden a presentar más herbivoría que los eufáusidos. Los eufáusidos tienden a ocupar un nivel trófico superior que los copépodos, tanto por su tamaño como por sus hábitos alimentarios.

Para utilizar la composición isotópica del zooplancton como proxy de los productores primarios, es importante considerar el efecto de la discriminación isotópica trófica (también conocido como fraccionamiento trófico) sobre sus valores de  $\delta^{13}\text{C}$  y  $\delta^{15}\text{N}$ . Como consecuencia de procesos metabólicos, la composición isotópica de los heterótrofos está enriquecida en el isótopo pesado con respecto a su dieta. Para el zooplancton se han reportado valores de enriquecimiento de 1-2 ‰ para carbono y de 1‰ para nitrógeno (Schmidt et al. 2004). Para invertebrados acuáticos, se han reportado valores promedio de 0.5 ‰ para carbono y 3‰ para nitrógeno. Ya que se sabe que los valores de discriminación trófica varían en función de la cantidad y calidad del alimento y el tipo de tejido, entre otros (e.g. McCutchan et al. 2003), estos valores deben considerarse como aproximaciones.

En el informe se presentan los datos de los dos cruceros oceanográficos realizados en la zona de aguas profundas del GM (XIXIMI-1 y XIXIMI-2).

## Objetivos

Evaluar la importancia relativa de la incorporación de materia orgánica proveniente de fitoplancton marino o plantas terrestres a la cadena alimentaria con base en la composición isotópica de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) de copépodos y eufáusidos.

Evaluar si hay indicios de la incorporación de hidrocarburos derivados del petróleo a la cadena alimentaria pelágica del GM.

Identificar las fuentes de nitrógeno que se incorporan al fitoplancton con base en la composición isotópica de nitrógeno ( $\delta^{15}\text{N}$ ) usando copépodos y eufáusidos como proxy de la composición de productores primarios.

## Metodología

Los arrastres con la red bongo se llevaron a cabo en 44 estaciones durante el crucero oceanográfico XIXIMI-1 y en 40 estaciones en XIXIMI-2 (ver sección de zooplancton en este informe). Las muestras de zooplancton para análisis isotópicos se recolectaron de la muestra proveniente de la red de 500 $\mu\text{m}$  poco después de que ésta red llegó a bordo. Una submuestra de zooplancton se transfirió con una espátula a tubos de microcentrifuga de 2 ml que se congelaron

inmediatamente. Las muestras se mantuvieron congeladas hasta su preparación para análisis isotópicos.

En el Laboratorio de Ecología Pesquera del CICESE, las muestras se descongelaron una a la vez y los copépodos y eufáusidos fueron separados cuidadosamente bajo el estereoscopio usando pinzas de disección. Ambos grupos fueron enjuagados con agua destilada para eliminar rastros de bicarbonato en el agua, colocados por separado en platos de aluminio limpios y secados a 60°C por 24-48 h. Para cada medición isotópica se agruparon en promedio 24 y 89 copépodos y 3 y 7 eufáusidos para los análisis de XIXIMI-1 y XIXIMI-2, respectivamente. Las muestras secas se colocaron en un desecador, y posteriormente se molieron a mano usando un mortero de ágata. En todos los pasos involucrados en el procesamiento, se limpió el material que tuvo contacto con las muestras con etanol al 98% y Kim Wipes para evitar la contaminación con materia orgánica de otras fuentes.

Las muestras de XIXIMI-1 y XIXIMI-2 fueron enviadas para su análisis al Stable Isotope Facility (SIF) de la Universidad de California Davis, el cual se realizó utilizando un analizador Elementar Vario EL Cube or Micro Cube elemental analyzer (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau, Germany) acoplado a un espectrómetro de masas PDZ Europa 20-20 (Sercon Ltd., Cheshire, UK).

La abundancia relativa de los isótopos pesados y livianos de un elemento se reporta en notación delta ( $\delta$ ):

$$\delta^{13}\text{C} (\text{‰}) = [(R_{\text{muestra}} - R_{\text{estándar}}) / R_{\text{estándar}}] * 1000$$

Donde R es la razón del isótopo pesado al ligero ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  o  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$ ). Los datos se expresan relativos al estándar internacional V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite) o nitrógeno atmosférico, para carbono y nitrógeno, respectivamente.

Durante los análisis isotópicos de las muestras, se intercalaron estándares secundarios internos al SIF (Tabla 18). La comparación de los valores de referencia con las mediciones hechas durante las corridas indican que los valores isotópicos que se reportan en este informe tienen un alto grado de precisión. Para el estándar secundario con valores isotópicos más parecidos a las de las muestras de zooplancton (hígado bovino), la precisión ( $\pm 1$  desviación estándar) fue de  $\pm 0.03\%$  y  $\pm 0.14\%$  para carbono y nitrógeno, respectivamente. Además, las muestras de ambos cruceros se mandaron a analizar al SIF al mismo tiempo, por lo cual son enteramente comparables.

Tabla 18. Valores isotópicos de carbono y nitrógeno de los estándares internos de referencia usados en el Stable Isotope Facility de la Universidad de California Davis durante los análisis de las muestras de zooplancton. Los valores de referencia son certificados, y los promedios  $\pm$  DE representan las mediciones de los estándares que se llevaron a cabo durante la corrida. En negritas se resalta el estándar interno con mayor similitud a los valores isotópicos del zooplancton.

Estándares internos (Nombre/compuesto)	Valores de referencia		Promedio $\pm$ DE durante la corrida		
	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	$\delta^{13}\text{C}$ (‰)	$\delta^{15}\text{N}$ (‰)	N
Nylon (G-11)	-27.81	-9.77	-27.81 $\pm$ 0.03	-9.77 $\pm$ 0.18	43
<b>Bovine Liver (G-13)</b>	<b>-21.69</b>	<b>7.72</b>	<b>-21.66 <math>\pm</math> 0.03</b>	<b>95.82 <math>\pm</math> 0.14</b>	<b>4</b>
USGS-41 Glutamic Acid (G17)	37.626	47.6	37.32 $\pm$ 0.86	47.60 $\pm$ 0.11	8
Glutamic Acid (G9)	-28.85	-4.26	-28.90 $\pm$ 0.18	-4.31 $\pm$ 0.29	12

La precisión de los resultados isotópicos de C y N disminuye cuando el contenido de una muestra es menor a 100  $\mu\text{g}$  y 20  $\mu\text{g}$ , respectivamente. Las muestras con un contenido de C y N mayor fueron etiquetadas con QF=1 (buena calidad; Tabla 19). A las que tuvieron un contenido de carbono de 80-100  $\mu\text{g}$  y 15-20  $\mu\text{g}$  de nitrógeno se les otorgó un QF =4, aunque no se observaron diferencias entre sus valores isotópicos y los de las muestras con QF=1. Por lo tanto, los valores isotópicos con QF = 4 sí se usaron en el análisis de datos. Se consideraron valores no fiables (QF=8) aquellos con < 80  $\mu\text{g}$  de C y < 15  $\mu\text{g}$  de N. Los valores con QF = 8 se excluyeron del análisis de resultados, aunque sí se incluyen en la base de datos.

Tabla 19. Número de muestras isotópicas de copépodos o eufáusidos con etiquetas de calidad (QF)= 1, 4 u 8.

QF	$\delta^{13}\text{C}$ -copépodos	$\delta^{15}\text{N}$ -copépodos	$\delta^{13}\text{C}$ -eufáusidos	$\delta^{15}\text{N}$ -eufáusidos
1	82	55	83	84
4	3	30	4	3
8	3	3	1	1

## Resultados

Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  promedio de los copépodos y eufáusidos capturados durante XIXIMI-1 y XIXIMI-2 exhibieron valores muy similares (Tabla 20). El intervalo de variación en la composición isotópica entre muestras de un mismo grupo y crucero (mínimo-máximo) tuvo un mínimo de 2.04 (eufáusidos XIXIMI-2) a 3.65% (eufáusidos XIXIMI-1). Los valores promedio de  $\delta^{15}\text{N}$  también exhibieron traslape entre cruceros, aunque la composición isotópica de los eufáusidos fue más pesada que la de los copépodos (en promedio 1.26 y 0.74% para XIXIMI-1 y XIXIMI-2, respectivamente). La composición isotópica del nitrógeno entre muestras tendió a ser más variable que la del carbono, llegando a cubrir un rango de 4.96%.

Tabla 20. Promedios, DE y valores mínimos y máximos de los valores isotópicos de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) y nitrógeno ( $\delta^{15}\text{N}$ ) de copépodos y eufáusidos capturados en la zona de aguas profundas del GM durante los cruceros oceanográficos XIXIMI-1 (noviembre 2010) y XIXIMI-2 (julio 2011).

	XIXIMI-1					XIXIMI-2				
	Promedio	DE	Min	Max	n	Promedio	DE	Valor min	Valor max	N
$\delta^{13}\text{C}$										
Copépodos	<b>-21.64</b>	0.57	-22.96	-20.35	40	<b>-21.49</b>	0.55	-22.51	-20.30	33
Eufáusidos	<b>-20.77</b>	0.79	-22.37	-18.72	33	<b>-21.28</b>	0.58	-22.43	-20.40	32
$\delta^{15}\text{N}$										
Copépodos	<b>3.74</b>	1.05	1.46	6.42	40	<b>3.79</b>	0.95	1.98	6.09	33
Eufáusidos	<b>5.00</b>	1.15	2.10	7.29	33	<b>4.53</b>	0.86	2.93	6.57	32

La distribución espacial de la composición isotópica de carbono de los copépodos capturados durante XIXIMI-1 indica que la mayoría de las estaciones en la región central (entre los paralelo 22°N y 25°N) tuvieron valores de  $\delta^{13}\text{C}$  relativamente similares (-21.5 a -20.5‰; Figura 108). Los valores isotópicos de los copépodos de la bahía de Campeche (al sur del 22°N), tuvieron valores 1-2‰ más ligeros. En algunas estaciones cercanas al borde de la plataforma los valores fueron más negativos que en el resto del golfo (aprox -23‰). Los eufáusidos tuvieron en promedio valores más positivos que los copépodos y se observan valores un poco más pesados que la de los copépodos .

Durante el crucero XIXIMI-2, los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  promedio fueron muy similares a los de XIXIMI-1 (Figura 109). Sin embargo, sí hubo algunas diferencias en los patrones de distribución espacial. Aunque en general en la región central de la zona de estudio se registraron los valores más pesados (-21 a -22‰), en la región de la sonda de Campeche se observó una mayor amplitud espacial en la cobertura de los valores más negativos (-22 a -23‰) en comparación con los resultados de XIXIMI-1. Los valores más positivos de toda la región de estudio se midieron en la muestra de las aguas cálidas del borde de la corriente de Yucatán, en la estación oeste del paralelo 25°N. La distribución de la composición isotópica del carbono de los eufáusidos fue similar a la de los copépodos, aunque los valores fueron un poco más positivos.

En el caso de los isótopos estables del nitrógeno, hubo un alto nivel de variación espacial. Durante XIXIMI-1 algunas de las muestras de copépodos capturados cerca a la plataforma de Tamaulipas y Veracruz tuvieron valores de  $\delta^{15}\text{N}$  relativamente ligeros (2.0-3.5‰; Figura 110). En la bahía de Campeche, y en algunas estaciones del paralelo 25N, los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  fueron mucho más pesados (4-8‰). En general, y como es de esperarse con base en la discriminación trófica, los eufáusidos tuvieron valores más pesados de  $\delta^{15}\text{N}$  que los copépodos. El patrón de distribución fue distinto durante XIXIMI-2 (Figura 111); los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  más ligeros se encontraron a lo largo del paralelo 25N y en una sola estación de la sonda de Campeche. Este patrón se reflejó en la composición isotópica de los eufáusidos en el norte de la zona de estudio, pero no en la zona de Campeche.

Aunque hubo una relación lineal ligeramente positiva entre los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  de los copépodos y eufáusidos de una misma muestra tanto para XIXIMI-1 como XIXIMI-2, estas relaciones exhibieron un alto nivel de variabilidad (Figura 112). La comparación de los valores isotópicos de nitrógeno de los dos taxones para los dos cruceros indicó que en general los eufáusidos tuvieron valores más altos (Figura 113).

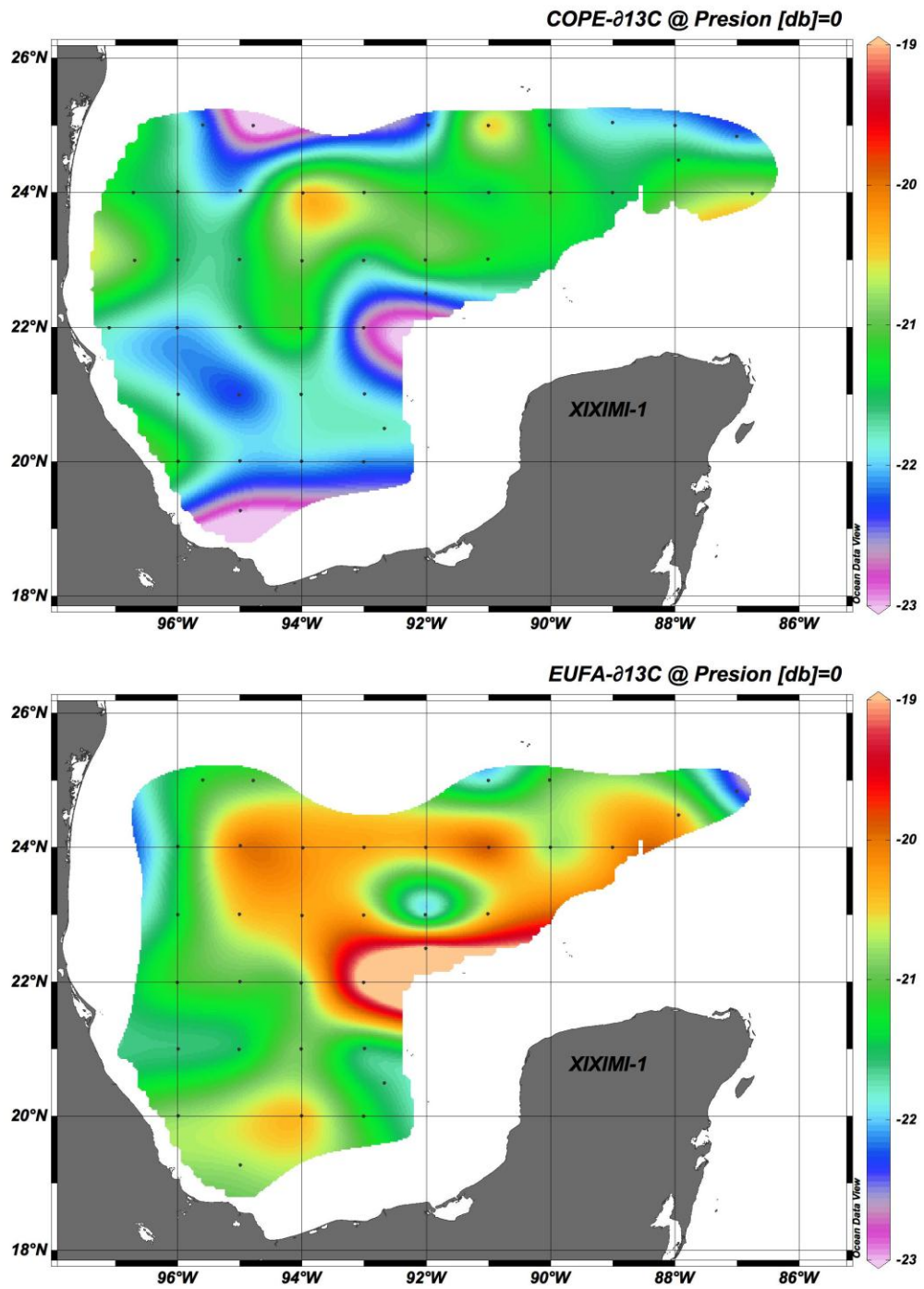


Figura 108. Valores isotópicos de carbono ( $\delta^{13}C$ ) de copépodos (panel superior) y eufáusidos (panel inferior) capturados en la zona de aguas profundas del GM durante el crucero oceanográfico XIXIMI-1 (noviembre 2010).



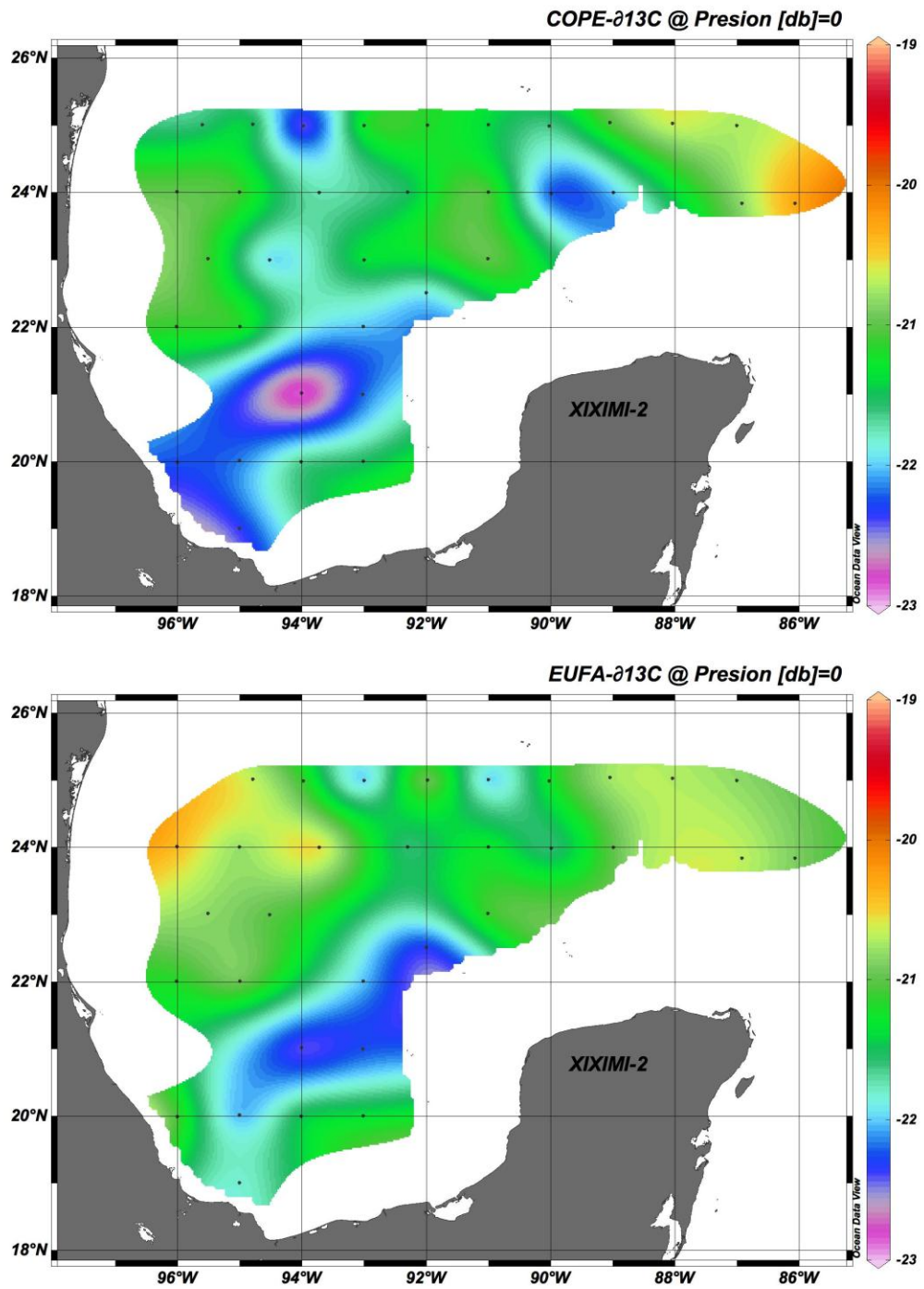


Figura 109. Valores isotópicos de carbono ( $\delta^{13}C$ ) de copépodos (panel superior) y eufáusidos (panel inferior) capturados en la zona de aguas profundas del GM durante el crucero oceanográfico XIXIMI-2 (julio 2011).

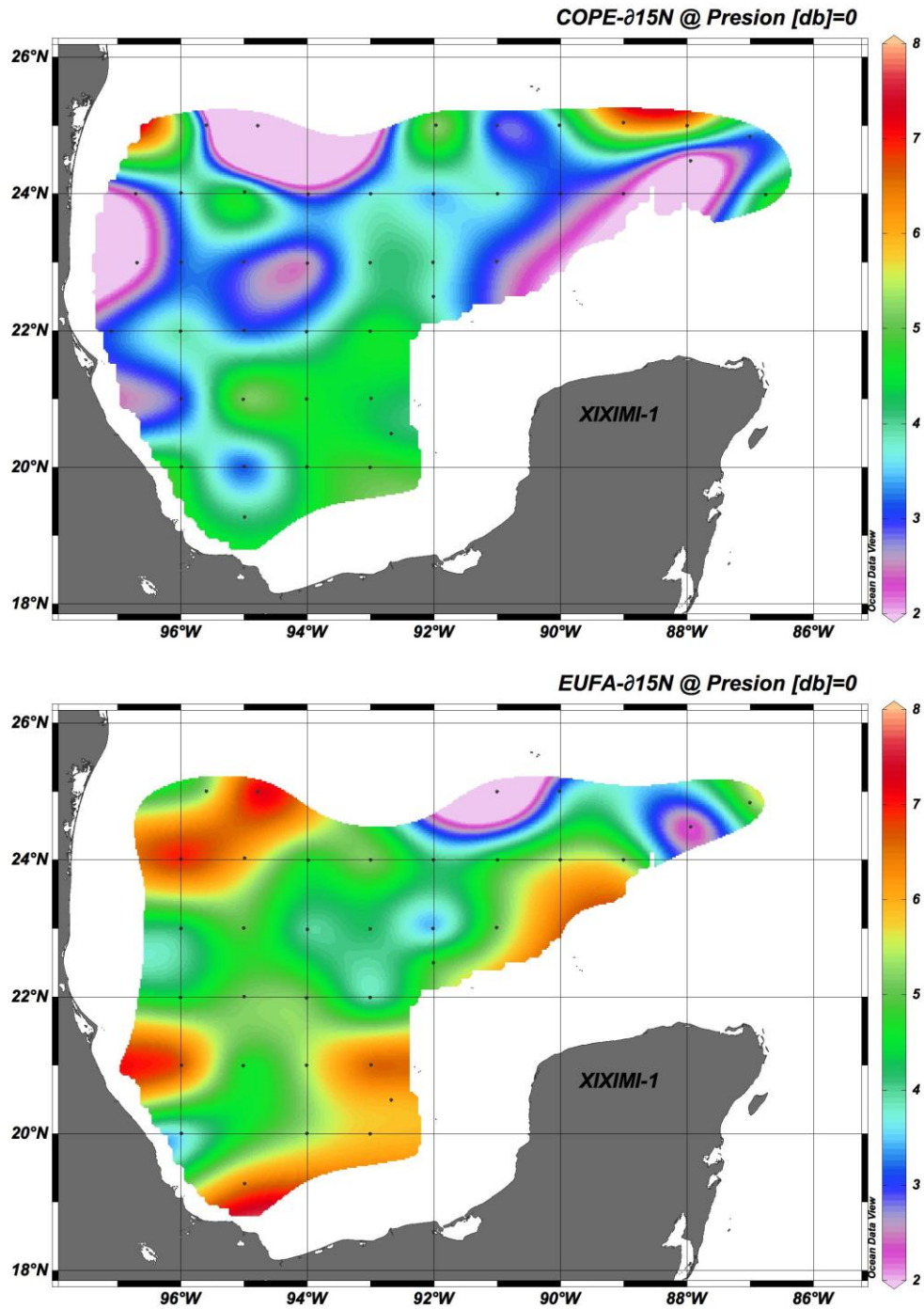


Figura 110. Valores isotópicos de nitrógeno ( $\delta^{15}N$ ) de copépodos (panel superior) y eufáusidos (panel inferior) capturados en la zona de aguas profundas del GM durante el crucero oceanográfico XIXIMI-1 (noviembre 2010).

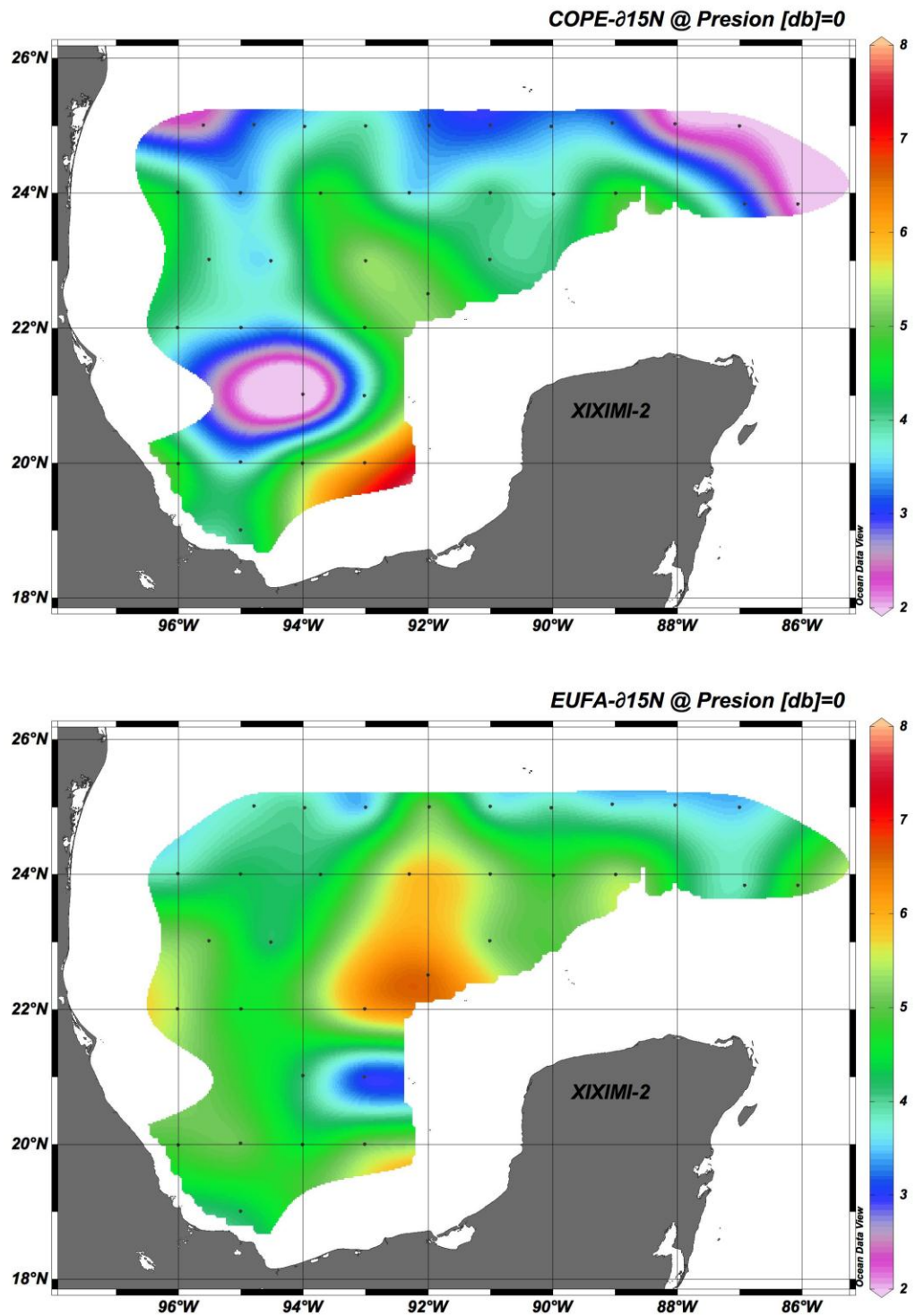


Figura 111. Valores isotópicos de nitrógeno ( $\delta^{15}N$ ) de copépodos (panel superior) y eufáusidos (panel inferior) capturados en la zona de aguas profundas del GM durante el crucero oceanográfico XIXIMI-2 (julio 2011).

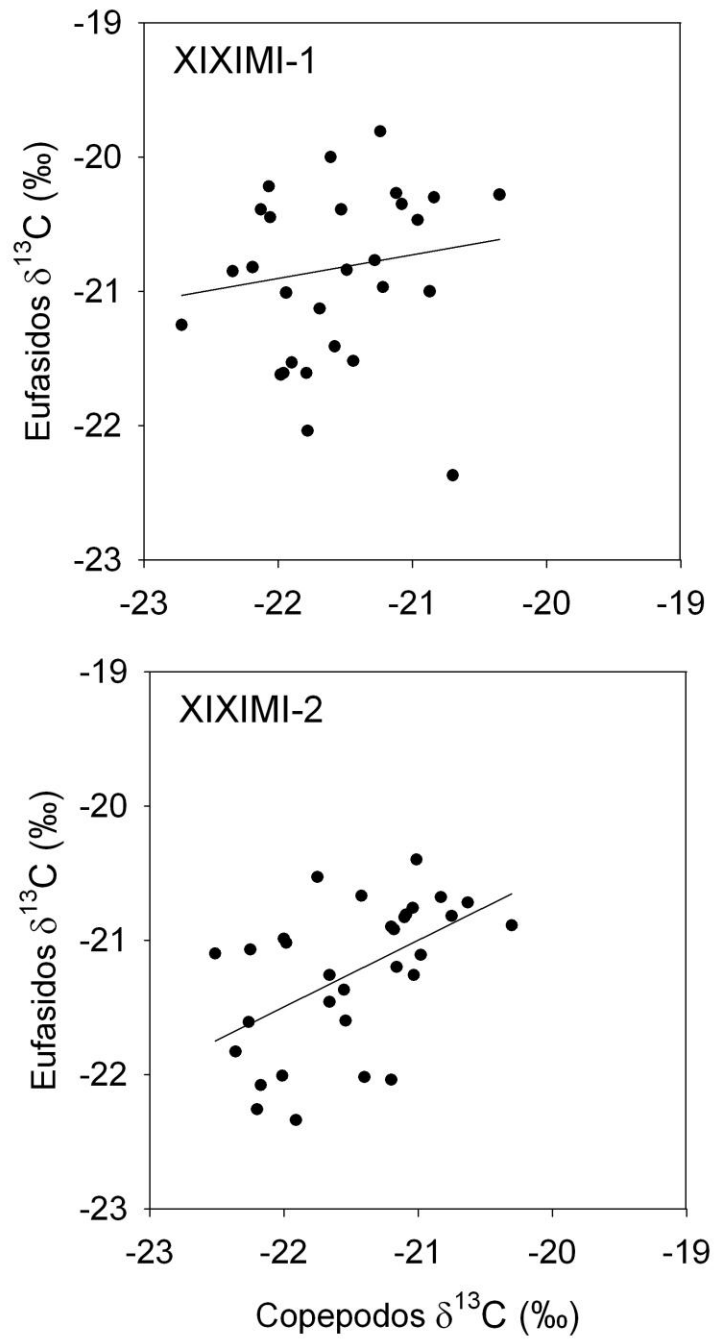


Figura 112. Correlación entre los valores isotópicos de carbono ( $\delta^{13}\text{C}$ ) de copépodos vs. eufásidos capturados en la zona de aguas profundas del GM durante los crueros oceanográficos XIXIMI-1 y XIXIMI-2.

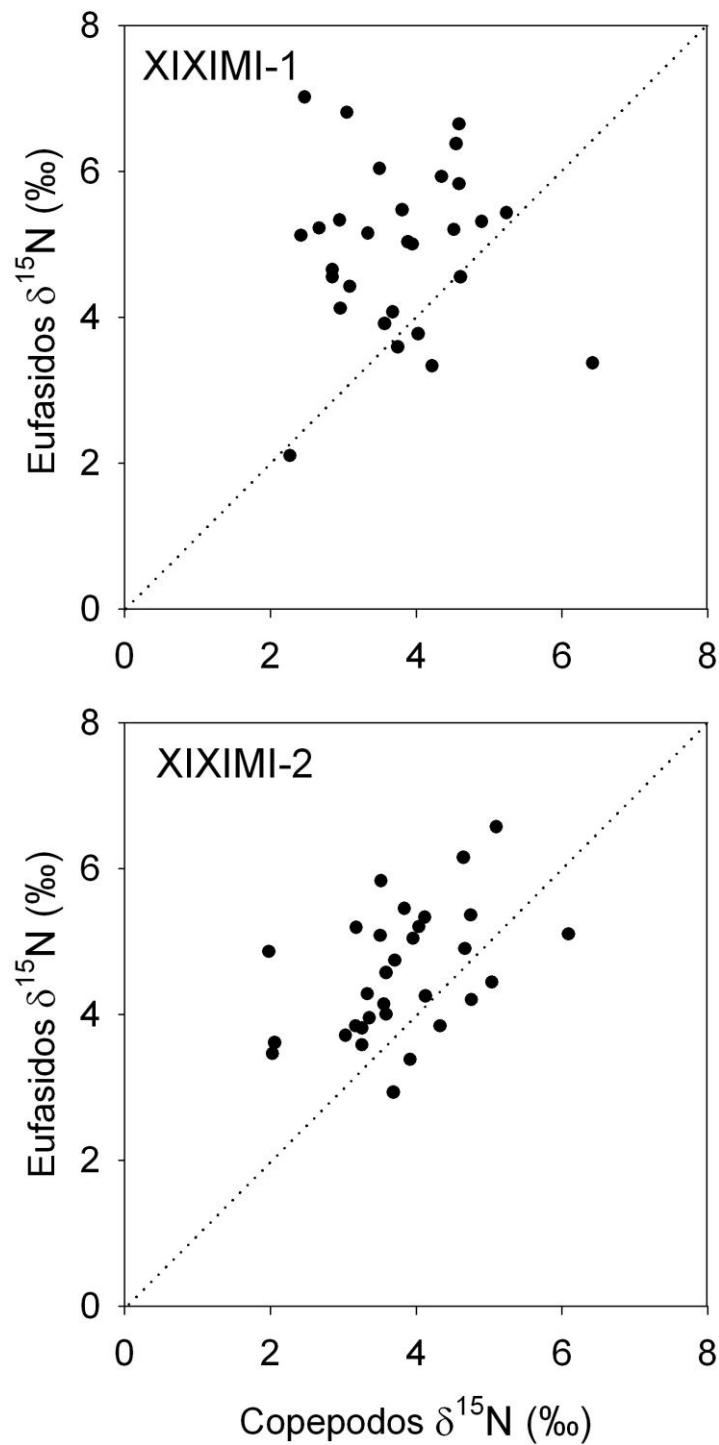


Figura 113. Relación entre los valores isotópicos de nitrógeno ( $\delta^{15}\text{N}$ ) de copépodos vs. eufásidos capturados en la zona de aguas profundas del GM durante los cruceros oceanográficos XIXIMI-1 y XIXIMI-2. La línea punteada indica una relación 1:1.

## Discusión

La composición isotópica del carbono de copépodos y eufáusidos capturados en la zona de aguas profundas del GM es consistente con el uso de materia orgánica de origen fitoplanctónico de la zona oceánica del GM (-20 a -22‰; Chanton y Lewis 2002). Macko et al. (1984) evaluaron la composición isotópica de la MOP, zooplancton (no especificaron composición taxonómica) de la plataforma noroeste del GM, y reportaron valores de  $\delta^{13}\text{C}$  un poco más pesados (-19.2 a -21.0‰ para el MOP y zooplancton del noroeste, respectivamente, y -18.4 a -19.4‰ para Florida). Sin embargo, hay que considerar que ellos muestrearon sobre la plataforma. Se ha documentado que la composición isotópica de las cadenas alimentarias suele ser más positiva sobre la plataforma que en zonas oceánicas, aunque ambas regiones dependan del fitoplancton (Perry et al. 1999). Dorado et al. (2012) también reportaron valores de  $\delta^{13}\text{C}$  del zooplancton un poco más pesados que los de este estudio para la zona oceánica al sur de la plataforma de Mississippi (-21.4 a -17.8‰). Ellos encontraron diferencias significativas entre la MOP y el zooplancton de zonas costeras con mayor influencia de aportes de agua dulce y las oceánicas; estas últimas tuvieron valores más negativos, lo cual consideraron indicativo de aportes de materia orgánica de origen terrestre. A diferencia de nuestro estudio, Dorado et al. (2012) muestrearon solo en la superficie (< 1m).

Como se mencionó anteriormente, el petróleo crudo (fase no gaseosa) del petróleo del Pozo Macondo tenía una composición isotópica de -27‰ (Chanton et al. 2010). Graham et al. (2010) detectaron la incorporación de petróleo proveniente del pozo Macondo al mesozooplancton (0.2-2mm) y partículas más pequeñas (1 $\mu\text{m}$  – 0.2mm) durante los picos en el volumen de las descargas del petróleo (Figura 114). Los valores más ligeros de  $\delta^{13}\text{C}$  que encontraron en el zooplancton fueron de -25 a -26‰ (paneles D y E de la Figura 114). Dado que pudieron eliminar la posibilidad que esta señal relativamente ligera se debiese a aportes de materia orgánica de origen terrestre (ver Figura 114c), la atribuyeron a incorporación a la cadena alimentaria pelágica de carbono proveniente del derrame. Dado que la composición isotópica de carbono del zooplancton que se recolectó durante XIXIMI-1 y XIXIMI-2 tuvo valores mucho más positivos que los reportados por Graham et al. (2010), no hay evidencia de la incorporación de petróleo al zooplancton durante noviembre del 2010 y julio del 2011 en la zona de aguas profundas del GM.

Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  del COP del agua cercana a la superficie (< 150 m de profundidad) de muchas de las estaciones cubiertas durante los dos cruceros son consistentes con el fitoplancton como fuente principal de producción primaria (ver sección Composición Isotópica del Carbono Orgánico Particulado). Sin embargo,

en algunas estaciones del primer crucero pudieron haber aportes sustanciales de materia orgánica de origen terrestre. Por ejemplo, en algunas estaciones de la Sonda de Campeche, los valores isotópicos del COP fueron más negativos (-24 a -27‰ para XIXIMI-1 y alrededor de -25‰ para XIXIMI-2), lo cual sugiere una contribución sustancial de materia orgánica de origen terrestre de plantas C3 al “pool” de materia orgánica particulada. Varias de las estaciones de XIXIMI-1 y XIXIMI-2 en las cuales el zooplancton tuvo valores más ligeros (de hasta -23‰) también estaban en la sonda de Campeche, por lo cual es probable que materia orgánica de origen terrestre se haya incorporado a la cadena alimentaria.

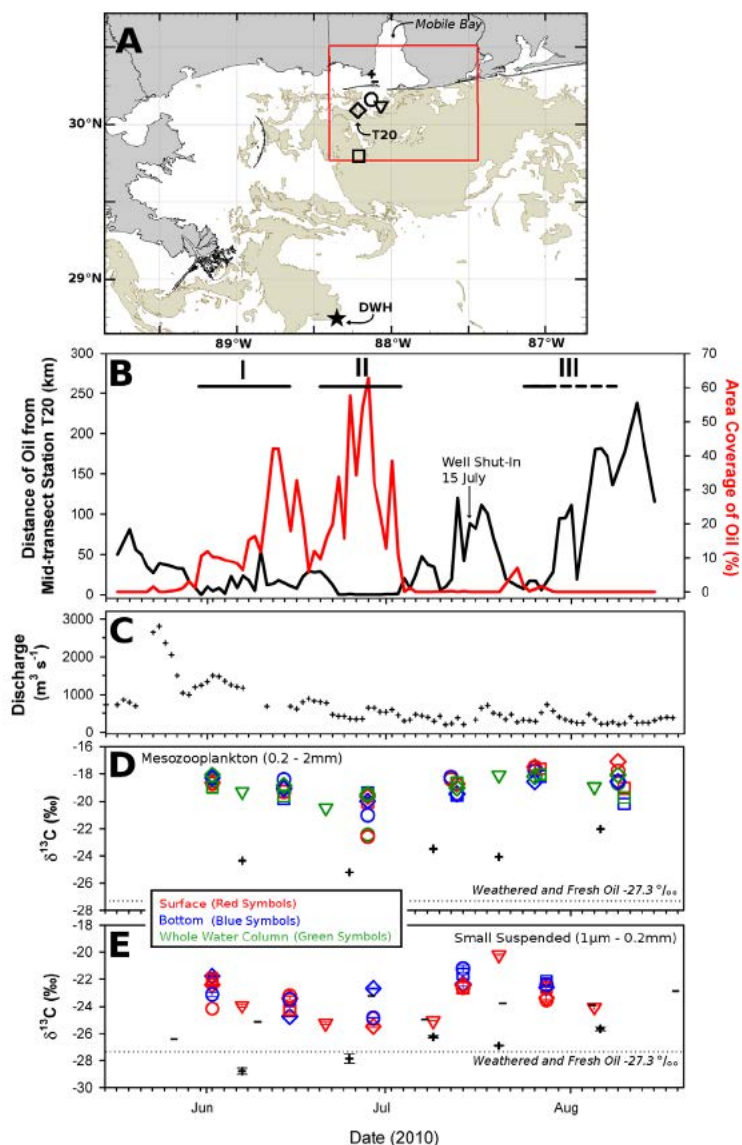


Figura 114. Zona de muestreo cerca al pozo Macondo (a), estimación del área cubierta por el petróleo proveniente del derrame (b), aportes de agua dulce regionales (c) y composición isotópica de carbono del zooplancton y partículas recolectadas en la zona del derrame. Los valores de  $\delta^{13}\text{C}$  del zooplancton más negativos reflejan la incorporación de petróleo a la cadena alimentaria pelágica. Fuente: Graham et al. 2010.

El amplio rango de valores isotópicos de  $\delta^{15}\text{N}$  que se midieron en los copépodos y eufáusidos refleja la presencia de varios procesos, incluyendo la inyección de nitrógeno por cianobacterias en algunas zonas del golfo, aportes de  $\text{NO}_3$  nuevo que debe de estar asociado a procesos de mezcla, y el enriquecimiento trófico entre consumidores que se alimentan en distintos niveles tróficos.

En sistemas oceánicos oligotróficos, medir valores ligeros de  $\delta^{15}\text{N}$  cerca de la base de una cadena alimentaria es claramente indicativo de la fijación de  $\text{N}_2$ . No hay ningún otro proceso de discriminación isotópica que conlleve a valores más bajos que los del nitrato que se introduce a la superficie por procesos de mezcla (la composición promedio del nitrato en profundidad en el Atlántico es de aprox. 4.7‰; Altabet 2005). Varios estudios han relacionado estrechamente la composición isotópica del zooplancton con la fijación de nitrógeno en el Atlántico subtropical y tropical (Montoya et al. 1992, McClelland et al. 2003, Altabet 2005, Capone 2005). Dentro de GM, Macko et al. (1984) atribuyeron las diferencias en la composición isotópica de la MOP y el zooplancton entre la plataforma de Texas (7.5 y 8.9‰) y el sur de la península de Florida (-0.9 y 5.9‰) a la predominancia de la fijación en las aguas oligotróficas cercanas a Florida. Dorado et al. (2012) también reportaron valores ligeros para el zooplancton de las zonas oceánicas del GM (promedio 2.8‰). Ambos estudios señalan la importancia de *Trichodesmium* como parte de la comunidad bacteriana del golfo, y Dorado et al. (2012) reportaron valores isotópicos de *Trichodesmium* de -0.7 a -0.04‰. Considerando que se espera que haya un enriquecimiento trófico entre el zooplancton y sus fuentes de alimento, los valores de  $\delta^{15}\text{N}$  que se encontraron para los copépodos y eufáusidos en algunas estaciones es consistente con la importancia de la fijación de  $\text{N}_2$  en el golfo. Otros artículos también han reportado la presencia de *Trichodesmium* en el GM, particularmente en la sonda de Campeche (Aldeco et al. 2009). Por último, en este estudio también se encontraron tricomas de *Trichodesmium* (ver sección de Estructura y Abundancia del Fitoplancton y Microzooplancton).

## Conclusiones

La composición isotópica del carbono de copépodos o zooplancton es consistente con la importancia del fitoplancton como fuente de carbono en la mayoría de las estaciones cubiertas durante XIXIMI-1 y XIXIMI-2. Solo en algunas se detectaron valores indicativos de aportes de materia orgánica de origen terrestre.



No hay evidencia de la asimilación de petróleo o metano al zooplancton.

La composición isotópica de nitrógeno del zooplancton indica que en algunas zonas de la región de estudio la fijación de nitrógeno contribuye sustancialmente al “pool” de nitrógeno inorgánico disuelto. Esto es consistente con lo que se ha reportado para el Atlántico subtropical y el Caribe, y con la presencia de *Trichodesmium* en el GM.

### **Agradecimientos**

Agradecemos a Jose Luis Abella, Reyna Barradas y Jose Antonio Mata, quienes apoyaron con los muestreos de zooplancton durante las campañas oceanográficas. Reyna Barradas procesó todas las muestras de zooplackton. Vicente Ferreira tuvo la amabilidad de generar las imágenes en ODV.

### **Referencias**

- Aldeco J, Monreal-Gómez M A & Signoret M 2009 Occurrence of a subsurface anticyclonic eddy, fronts, and *Trichodesmium* spp. over the Campeche Canyon region, Gulf of Mexico. *Ciencias Marinas*, 35(4), 333–344.
- Becker EL, Lee RW, Macko SA, Faure BM & Fisher CR 2010 Stable carbon and nitrogen isotope compositions of hydrocarbon-seep bivalves on the Gulf of Mexico lower continental slope. *Deep-Sea Research Part II*, 57(21-23), 1957–1964.
- Bode A, Alvarez-Ossorio MT, Carrera P y Lorenzo J 2004 Reconstruction of trophic pathways between plankton and the North Iberian sardine (*Sardina pilchardus*) using stable isotopes. *Scientia Marina*, 68(1), 165–178.
- Boecklen WJ, Yarnes CT, Cook BA y James AC 2011 On the Use of Stable Isotopes in Trophic Ecology. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42(1), 411–440.
- Carabel S, Godínez-Domínguez E, Verlsimo P, Fernández L y Freire J 2006 An assessment of sample processing methods for stable isotope analyses of

- marine food webs. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 336(2), 254–261
- Carney RS 2010 Stable isotope trophic patterns in echinoderm megafauna in close proximity to and remote from Gulf of Mexico lower slope hydrocarbon seeps. *Deep-Sea Research Part II*, 57(21-23), 1965–1971.
- Capone DG 2005. Nitrogen fixation by *Trichodesmium* spp.: An important source of new nitrogen to the tropical and subtropical North Atlantic Ocean. *Global Biogeochemical Cycles*, 19(2), GB2024.
- Chanton J.P y Lewis FG 2002 Plankton and dissolved inorganic carbon isotopic composition in a river-dominated estuary: Apalachicola Bay, Florida *Estuaries* 22 575–83.
- Dorado S, Rooker JR, Wissel B 2012. Isotope baseline shifts in pelagic food webs of the Gulf of Mexico. *Marine Ecology Progress Series*, 464, 37–49.
- Graham WM, Condon RH, Carmichael RH, D'Ambra I, Patterson HK, Linn LJ Hernandez FJ Jr 2010 Oil carbon entered the coastal planktonic food web during the Deepwater Horizon oil spill. *Environmental Research Letters*, 5(4), 045301.
- Harris, D, Horwáth WR, Van Kessel C 2001 Acid fumigation of soils to remove carbonates prior to total organic carbon or carbon-13 isotopic analysis. *Soil Science Society of America Journal*, 65(6), 1853–1856.
- Hodgson WA 1966 Carbon and oxygen isotope ratios in diagenetic carbonates from marine sediments. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 30(12), 1223–1233.
- Karl D, Michaels A, Bergman B, Capone D, Carpenter E, Letelier R, Lipschultz F, et al. 2002 Dinitrogen fixation in the world's oceans. *Biogeochemistry*, 57(1), 47–98.
- Macko SA, Entzeroth L y Parker PL 1984 Regional differences in nitrogen and carbon isotopes on the continental shelf of the Gulf of Mexico. *Naturwissenschaften*, 71(7), 374–375.
- McCutchan JH, Lewis WM, Kendall C y McGrath, CC 2003 Variation in trophic shift for stable isotope ratios of carbon, nitrogen, and sulfur. *Oikos*, 102(2), 378–390.

- Perry, R. I., Thompson, P. A., Mackas, D. L., Harrison, P. J., & Yelland, D. R. (1999). Stable carbon isotopes as pelagic food web tracers in adjacent shelf and slope regions off British Columbia, Canada. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 56(12), 2477–2486.
- Peterson, B. J., & Fry, B. (1987). Stable isotopes in ecosystem studies. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 18, 293–320.
- Rau, G., Teyssie, J., Rassoulzadegan, F., & Fowler, S. (1990).  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  and  $^{15}\text{N}/^{14}\text{N}$  variations among size-fractionated marine particles: Implications for their origin and trophic relationships. *Marine Ecology Progress Series*, 59(1-2), 33–38.
- Schmidt, K., McClelland, J. W., Mente, E., Montoya, J. P., Atkinson, A., & Voss, M. (2004). Trophic-level interpretation based on  $\delta^{15}\text{N}$  values: implications of tissue-specific fractionation and amino acid composition. *Marine Ecology Progress Series* 266:43-58.
- Sharp, Z (2007) Principles of stable isotope geochemistry. Pearson/Prentice Hall.
- Sugisaki, H., & Tsuda, A. (1995). Nitrogen and carbon stable isotopic ecology in the ocean: The transportation of organic materials through the food web. In H. Sakai & Y. Nozaki (Eds.), *Biogeochemical Processes and Ocean Flux in the Western Pacific* (pp. 307–317). Terra Scientific Publishing Company.
- Wainright, S. C., & Fry, B. (1994). Seasonal variation of the stable isotopic compositions of coastal marine plankton from Woods Hole, Massachusetts and Georges Bank. *Estuaries and Coasts*, 17(3), 552–560.
- Vander Zanden, M. J. V., & Rasmussen, J. B. (1999). Primary consumer  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  and the trophic position of aquatic consumers. *Ecology*, 80(4), 1395–1404.

## ZOOPLANCTON E ICTIOPLANCTON

Responsables : Dr. Jaime Farber, Dra. Sharon Herzka  
Participantes : Jose Antonio Mata, Reyna Barradas

### Antecedentes

No hay información sobre la biomasa del zooplancton en la zona de aguas profundas del GM, particularmente dentro de la Zona Económica Exclusiva mexicana. Para la zona sur del GM, existen datos para verano e invierno que se presentan en una amplia revisión de la distribución espacial del ictioplancton del GM por Flores-Coto et al. (2009). Sin embargo este trabajo se concentró en la zona de la plataforma continental. López-Salgado y Suarez-Morales (1998) estudiaron la distribución de copépodos en aguas superficiales en la parte occidental del GM frente al estado de Tamaulipas; estos autores no presentan datos de biomasa.

Existen pocos estudios de la hidrología de la zona sur GM (particularmente de la zona profunda) en comparación con el norte y oeste del GM. En esas zonas se presentan características muy diferentes frente al Delta del Río Mississippi, donde se ha documentado la presencia de hipoxia y anoxia estacional (Rabalais et al., 2002; Turner, 2001; Biggs, 1992; Biggs y Sanchez, 1997), lo que afecta la distribución del zooplancton (Turner y Allen, 1982a).

### Objetivos

El objetivo principal es establecer una línea de base de las poblaciones de zooplancton presentes en la zona de estudios (Figura 1), y relacionar ésta información con la hidrología de la zona de estudio, así como entender los cambios estacionales.

#### Objetivos específicos

Cuantificar la biomasa del zooplancton

Caracterizar la composición taxonómica del zooplancton en la zona de aguas profundas del GM, incluyendo larvas de peces, y considerando a un total de 30 grupos taxonómicos.

Comparar los resultados de los cruceros oceanográficos XIXIMI-1 y XIXIMI-2.

## Metodología

Se colectaron un total de 44 muestras durante la campaña oceanográfica XIXIMI-1 y 40 durante el crucero XIXIMI-2. Las muestras fueron obtenidas con una red bongo. El marco de las redes utilizadas tiene una apertura de 80 cm y está equipado con 2 redes de diferente malla (333 y 500  $\mu\text{m}$ ), cada una equipada con un flujómetro General Oceanics previamente calibrado. Para el crucero XIXIMI-1 la mayoría de los lances se llevaron a cabo desde los 150 m a la superficie, en forma oblicua, manteniendo un ángulo de 45° con el cable del winche. Para el crucero XIXIMI-2 los lances fueron de 200 a 0 m siendo el resto de la operación igual que para el crucero XIXIMI-1. Las muestras de la red de malla de 333 $\mu\text{m}$  fueron fijadas en formol al 4% tamponado con borato de sodio inmediatamente después de su recolecta, y posteriormente fueron analizadas para obtener los biovolumenes y cuantificar la composición taxonómica del zooplancton por grandes grupos; se identificaron un total de 30 grupos diferentes.

De la muestra total de la red de 333 $\mu\text{m}$  se obtuvieron los biovolumenes ( $\text{ml}/\text{m}^3$ ) por el método del volumen desplazado. Posteriormente se obtuvieron sub-muestras con un fraccionador Folsom para obtener muestras más pequeñas, con el fin de llevar a cabo los conteos. En general, se analizó  $\frac{1}{4}$  de la muestra completa excepto en el caso de las larvas y huevos de peces, para los cuales se extrajeron y contaron todos los organismos. El zooplancton se analizó bajo el microscopio para obtener su composición taxonómica por grandes grupos. La abundancia de zooplancton y los biovolumenes se estandarizaron por 1000  $\text{m}^3$  con base en las mediciones del volumen filtrado durante cada arrastre, utilizando los datos obtenidos por los flujómetros previamente calibrados antes del crucero. Considerando la amplitud de los valores de abundancia del zooplancton se decidió graficarlas los valores como número de individuos  $\times 10^3$ .

De la red de malla de 500  $\mu\text{m}$  se colectaron sub-muestras para isótopos estables (ver sección Composición isotópica del zooplancton en este informe). El resto se fijó en alcohol para estudios de genética (fuera del contexto del proyecto).

Es importante mencionar que se detectaron algunos errores en la toma de datos de los flujómetros durante el crucero XIXIMI-1. Por lo tanto, los datos de biovolumenes y de la abundancia de los grupos zooplanctónicos del crucero XIXIMI-1 se tuvieron que corregir. Favor de tomar en cuenta que esta corrección a los datos las figuras de biovolumenes y la abundancia, por lo que éstas se

presentan nuevamente en éste reporte y se hace entrega de una versión actualizada de la base de datos. Se utilizaron análisis estadísticos no-paramétricos de Kruskal-Wallis debido a que los datos no tuvieron una distribución normal.

## Resultados y discusión

Durante el crucero XIXIMI-1, los biovolúmenes fueron relativamente bajos, con la excepción de algunas estaciones cercanas al borde de la plataforma en la zona sur del Golfo frente a Campeche (E38, E40, E42, E46; Figura 115). En el crucero XIXIMI-2, los biovolúmenes fueron más elevados; en promedio éstos se multiplicaron por un factor de 9.20 con respecto a los de XIXIMI-1 (Figura 115). Éste aumento tan importante en los biovolúmenes durante el segundo crucero está relacionado, principalmente, con un “bloom” de salpas presente en la zona sur de muestreo durante el verano. Tomando en cuenta el tamaño grande de las salpas, se entiende que los biovolúmenes aumenten tanto con respecto a las estaciones en las cuales no estuvieron presentes durante el verano. Si no tomamos en cuenta los biovolúmenes de salpas de las estaciones donde estuvieron presentes estos “blooms” (E36, E37, E38, E39, E40, E41, E45, y E46), el biovolumen promedio de las muestras de verano fue solo 4.97 veces más alto. Además, los valores más altos de los biovolúmenes siguen encontrándose en la parte sur de la sonda de Campeche (Figura 115). Hubo una diferencia significativa entre los biovolúmenes de otoño y verano (Kruskal- Wallis:  $H= 7.829$ ,  $p<0.05$  G.L.= 43).

Las salpas son consideradas oportunistas, y su aumento en abundancia puede estar asociadas a las fuertes lluvias que ocurrieron en la zona antes del crucero de verano, y que podría aportar una cantidad importante de nutrientes a la sonda de Campeche, derivando en una alta productividad primaria que pudiese ser aprovechada inmediatamente por éstos grupos.

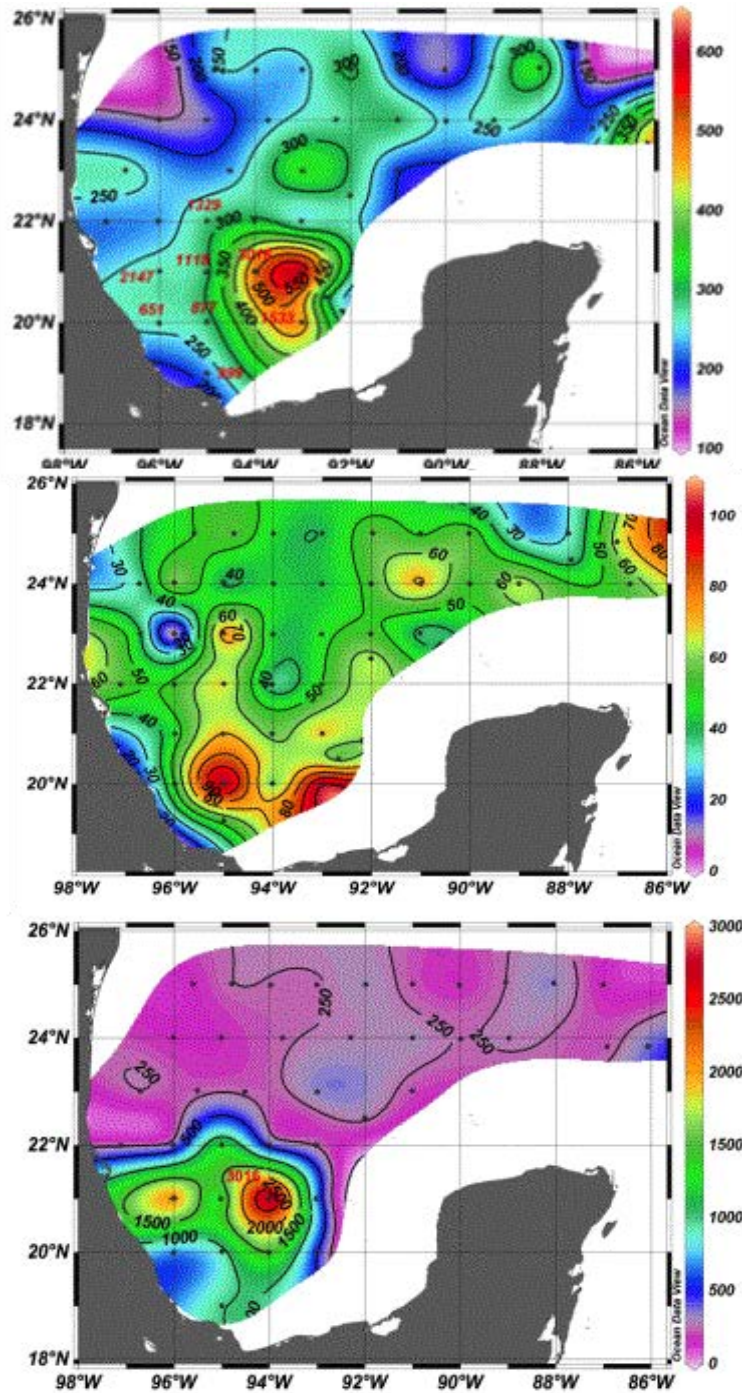


Figura 115. Distribución de los biovolúmenes del zooplancton en la zona de estudio ( $\text{ml } 1000 \text{ m}^{-3}$ ). Panel superior: XIXIMI-1 (noviembre 2010), panel central XIXIMI-2 (julio 2011, sin macrozooplancton), panel inferior XIXIMI-2 (con macrozooplancton). Notar la diferencia en las escalas.

Durante ambos cruceros, en la bahía de Campeche se registraron temperaturas relativamente bajas, salinidad baja, las más altas concentraciones de clorofila a, y valores negativos de la altura dinámica de la zona de aguas profundas (Figura 116, Figura 117, Figura 118). Esto es consistente con la presencia del giro ciclónico que se ha documentado en la bahía de Campeche. En esta región también se reportaron valores altos de abundancia de fitoplancton y clorofila (ver secciones Fitoplancton, taxonomía y Variabilidad bio-óptica del fitoplancton). Durante el crucero de julio, las imágenes de satélite muestran valores más elevados de clorofila superficial en esta zona que durante el crucero de otoño (Figura 119). Además del giro, la productividad de esta zona puede estar asociada a su interacción con corrientes costeras que provocan surgencias y que al interactuar con giros se extienden hacia el noreste (Martínez-López y Zavala-Hidalgo, 2009), y a descargas de nutrientes de los ríos de la región.

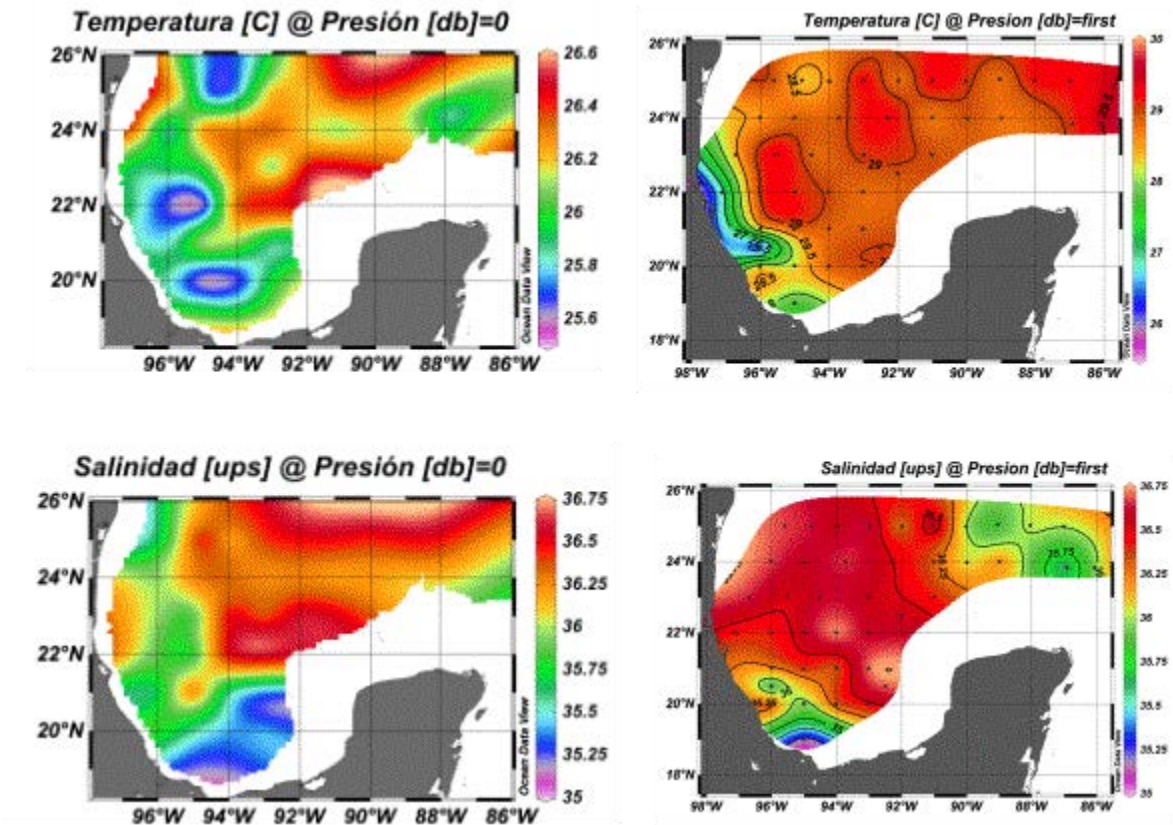


Figura 116. Temperatura y salinidad superficial durante los cruceros oceanográficos XIXIMI-1 (paneles izquierdos) y XIXIMI-2 (paneles derechos) que se llevaron a cabo en la zona de aguas profundas del GM durante noviembre del 2010 y julio del 2011, respectivamente.





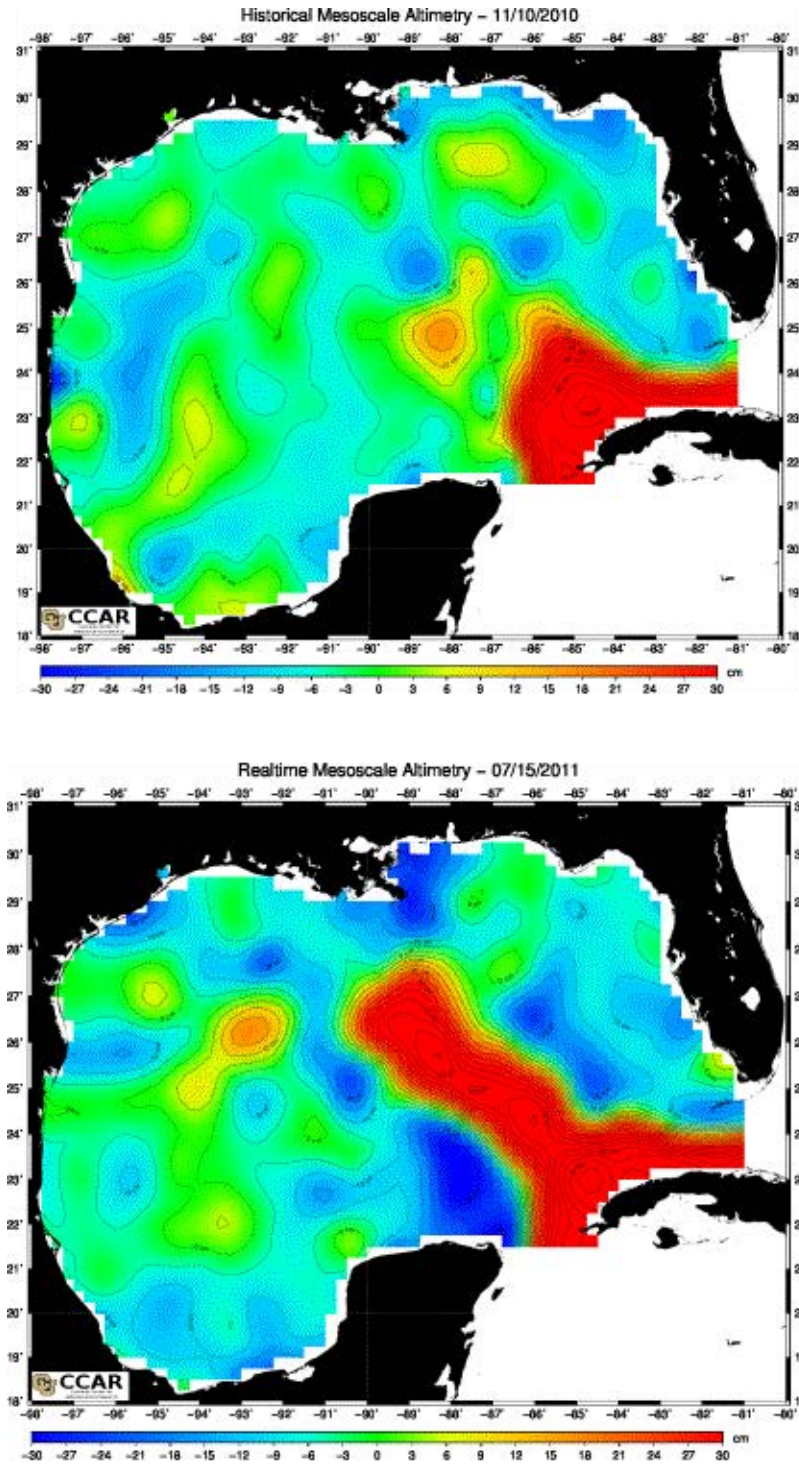


Figura 118. Altura dinámica durante el crucero oceanográfico XIXIMI-1 (panel superior) y XIXIMI-2 (panel inferior). Fuente: Colorado Center for Astrodynamics Research).

## Abundancia

La abundancia total (la sumatoria del promedio de abundancia estandarizada de cada taxón, considerando todas las estaciones) fue 32% más elevada en verano del 2011 que en otoño del 2010 (Tabla 21, Tabla 22). En comparación, los biovolúmenes presentaron un incremento de 9.20 veces; ya se mencionó que el incremento más marcado en los biovolúmenes estuvo relacionado con la presencia de las salpas. Para las abundancias totales, hubo una diferencia significativa entre los dos cruceros ( $H=9.287$ ,  $P=0.002$ ,  $G.L.=43$ ).

Para XIXIMI-1, los siete grupos taxonómicos más abundantes constituyeron el 89.89% de la abundancia total (Tabla 23). Durante XIXIMI-2, los 7 grupos más abundantes constituyen el 94.79% del total. Esto implica que un número limitado de grupos taxonómicos dominó la comunidad del zooplancton. Hubo un aumento en la abundancia de algunos grupos taxonómicos entre el primer y segundo crucero, como por ejemplo los copépodos, las salpas y los apendicularios. En relación con el primer crucero, se ve un aumento de las salpas y de los copépodos; estos últimos presentaron un aumento de 57% entre el otoño y el verano, con una abundancia promedio de  $29,878 \pm 12,052$  individuos por  $1000 \text{ m}^{-3}$  y  $57,390 \pm 35,191$  individuos por  $1000 \text{ m}^{-3}$ , respectivamente. Los copépodos pasaron de 53.43% a 64.14% de dominancia entre XIXIMI-1 y XIXIMI-2. Hubo una diferencia significativa en la su abundancia los dos cruceros ( $H=19.03$ ,  $P=<0.001$ ,  $G.L.=43$ ).

Otros taxones estuvieron ausentes durante el verano, como las larvas de bivalvos, los isópodos y los caprilidáceos, y otros tuvieron una menor abundancia promedio en otoño, como las larvas de equinodermos y los foraminíferos. Sin embargo, hay que considerar que estos últimos no son colectados eficientemente con las redes utilizadas durante estos muestreos, por su pequeño tamaño.

Si vemos en la Tabla 23 y Tabla 24, las salpas no estuvieron presentes entre los primeros 6 grupos más abundantes durante el crucero de otoño y paso a ser el quinto grupo en abundancia en el crucero de verano, también. Por otra parte, las abundancias de ostrácodos disminuyeron en verano con respecto al otoño, pasando de  $6,184.49 \pm 5,611.89$  individuos por  $1000 \text{ m}^{-3}$  a  $3,656.81 \pm 2,817.68$  individuos por  $1000 \text{ m}^{-3}$ , reduciéndose de un 11.06% a 4.41% del total. Hubo una diferencia significativa entre las abundancias de los ostrácodos entre los dos cruceros ( $H=17.01$ ,  $P=<0.001$ ,  $G.L.=43$ ).

Tabla 21. Abundancias (total, media, error estándar y porcentaje de abundancia con respecto al total) de los diferentes grupos taxonómicos cuantificados para el crucero XIXIMI-1 (n=44 estaciones).

GRUPOS	Total individuos 1000 m <sup>-3</sup>	Media (Ind1000m <sup>-3</sup> )	Error Estandar (Ind1000m <sup>-3</sup> )	% de abundancia
Amphipoda	22979.92	522.27	349.78	0.93
Appendicularia	45769.29	1040.21	949.78	1.86
Bivalvia larvas	4269.51	99.29	99.47	0.17
Brachiopoda	697.97	16.62	28.30	0.028
Briozoa larvas	856.07	20.38	50.50	0.035
Caprilidaceos	40.36	0.98	4.41	0.002
Cephalopoda larvas	1005.33	22.85	26.38	0.041
Chaetognata	325278.17	7392.69	3287.68	13.22
Cirripedia larvas	153.26	3.74	9.70	0.006
Cladocera	405.65	9.89	23.20	0.017
Copepoda	1314719.41	29879.99	12052.39	53.43
Ctenophora	60.35	1.47	5.31	0.002
Decápoda	8660.37	196.83	167.13	0.35
Decápoda larvas	16477.83	383.20	327.68	0.67
Doliolida	21597.96	490.86	307.28	0.88
Echinodermata larva	22913.52	520.76	442.85	0.93
Euphausiacea	77820.18	1768.64	898.21	3.16
Foraminiferos	39047.80	887.45	1844.3	1.59
Gasteropodos larvas	1859.27	42.26	50.82	0.076
Heterópoda	3312.27	77.03	65.95	0.13
Isopodos	483.84	11.52	21.01	0.020
Medusae	5758.71	133.92	139.43	0.23
Misidaceos	635.06	15.49	30.02	0.026
Ostracoda	272117.63	6184.49	5611.89	11.06
Otraslarvas inv.	1952.68	40.64	73.36	0.07
Piscis huevos	1380.96	32.12	39.81	0.06
Piscis larvas	25194.37	572.60	707.45	1.02
Polychaeta	25607.43	581.99	260.30	1.04
Polychaeta larvas	24682.13	560.96	1813.78	1.00
Pteropoda	96634.07	2196.23	1153.66	3.93
Radiolarios	1760.37	40.94	152.08	0.072
Salpida	16531.80	375.72	338.53	0.67
Siphonophora	79635.43	1809.90	713.57	3.24
Stomatopoda larvas	232.28	5.53	23.53	0.009
Total	2460531.27	55921.17	22202.29	100

Tabla 22. Abundancias (total, media, error estándar y porcentaje de abundancia con respecto al total) de los diferentes grupos taxonómicos de zooplancton cuantificados para el crucero XIXIMI-2 (n=40 estaciones).

GRUPOS	Total individuos 1000m <sup>-3</sup>	Media (Ind.1000 m <sup>3</sup> )	Error Estándar (Ind. 1000 m <sup>3</sup> )	% de abundancia
Amphipoda	36052.83	924.43	887.33	1.11
Appendicularia	119755.20	3070.65	2892.73	3.70
Bivalvia larvas	0.00	0.000	0.000	0.00
Brachiopoda	31.12	0.80	4.984	0.00095
Briozoa larvas	3204.77	82.17	179.51	0.099
Caprilidaceos	0.00	0.00	0.00	0.00
Cephalopoda larvas	862.39	22.11	36.77	0.03
Chaetognata	315050.56	8078.22	5660.55	9.73
Cirripedia larvas	552.73	14.17	34.83	0.02
Cladocera	4263.44	109.32	237.41	0.13
Copepoda	2238221.02	57390.28	35190.80	69.14
Ctenophora	1170.84	30.02	64.38	0.04
Decápoda	12173.98	312.15	255.89	0.38
Decápoda larvas	2529.44	64.86	88.37	0.08
Doliolida	15098.54	387.14	395.68	0.47
Echinodermata larva	2659.02	68.18	205.19	0.08
Euphausiacea	82541.21	2116.44	1609.55	2.55
Foraminíferos	2789.99	71.54	256.74	0.09
Gasteropodos larvas	6746.34	172.98	247.52	0.21
Heterópoda	973.98	24.97	47.50	0.03
Isopodos	0.00	0.00	0.00	0.00
Medusae	25880.26	663.60	771.48	0.80
Misidaceos	3853.98	98.82	342.26	0.12
Ostracoda	142615.67	3656.81	2817.68	4.41
Otras larvas inv.	1657.54	42.50	134.40	0.05
Piscis huevos	988.83	25.36	32.29	0.03
Piscis larvas	17216.44	441.45	310.17	0.74
Polychaeta	23149.92	593.59	521.67	0.72
Polychaeta larvas	870.38	22.32	44.90	0.03
Pteropoda	2236.24	57.34	191.04	0.07
Radiolarios	2242.38	57.50	340.39	0.07
Salpida	85688.37	2197.14	3234.16	2.65
Siphonophora	84462.76	2165.71	1988.67	2.61
Stomatopoda larvas	1892.78	48.53	82.47	0.06
Total	3237432.95	83011.10	44909.40	100100 100

Tabla 23. Promedio  $\pm$  desviación estándar de la abundancia de los principales taxones de zooplancton capturados durante el crucero oceanográfico XIXIMI-1 (noviembre 2010). Estos siete grupos taxonómicos componen el 89.89% de la abundancia total promedio del zooplancton recolectado en las zonas de aguas profundas del GM.

<b>Grupo</b>	<b>Ind. 1000 m<sup>-3</sup></b>	<b>% del total</b>
1.-Copépodos	29879.99 $\pm$ 12052.39	53.43
2.-Quetognatos	7392.69 $\pm$ 3287.68	13.22
3.-Ostrcodos	6184.49 $\pm$ 5611.89	11.06
4.-Pterópodos	2196.23 $\pm$ 1153.66	3.93
5.-Sifonóforos	1809.90 $\pm$ 713.57	3.24
6.-Eufásidos	1768.64 $\pm$ 898.21	3.15
7.-Apendicularios	1040.21 $\pm$ 949.78	1.86
		<b>89.89</b>

Tabla 24. Promedio  $\pm$  desviación estándar de la abundancia de los principales taxones de zooplancton capturados durante el crucero oceanográfico XIXIMI-2 (noviembre 2010). Estos siete grupos taxonómicos conforman el 94.79% de la abundancia total promedio del zooplancton recolectado en las zonas de aguas profundas del GM.

<b>Grupo</b>	<b>Ind. 1000 m<sup>-3</sup></b>	<b>% del total</b>
1.- Copepodos	57390.28 $\pm$ 35190.80	69.14
2.- Quetognatos	8078.22 $\pm$ 5660.55	9.73
3.- Ostracodos	3656.81 $\pm$ 2817.68	4.41
4.- Apendicularios	3070.65 $\pm$ 2892.73	3.70
5.- Salpas	2197.14 $\pm$ 3234.16	2.65
6.- Sifonóforos	2165.71 $\pm$ 1988.67	2.61
7.- Eufásidos	2116.44 $\pm$ 1609.55	2.55
		<b>94.79</b>

Los Quetognatos cambiaron en proporción, pero no se encontró una diferencia significativa entre los dos cruceros (Kruskall-Wallis,  $H=0.00008$ ,  $P=0.993$ , G.L.=43) ya que la abundancia fue muy similar, la Figura 122 a y b muestran la distribución durante los dos cruceros.

La abundancia media de las salpas fue más alta en verano que en otoño (Figura 121) ( $2197.14 \pm 3234.16$  y  $375.72 \pm 338.53$ , respectivamente, aumenta

por un factor de 5.84), hay una diferencia significativa entre las abundancias de los dos cruceros (Kruskall-Wallis,  $H=24.73$   $P<0.001$  G.L.=43).

Así mismo, los apendicularios pasaron de estar en el séptimo lugar, en el XIXIMI-1, al cuarto lugar de abundancia en el crucero XIXIMI-2; para este grupo existe una diferencia significativa en abundancia entre los dos cruceros ( $H=13.52$ ,  $P<0.001$  G.L.= 43).

Las larvas de peces tuvieron una abundancia muy baja. Se recolectó un promedio de  $572.60 \pm 707.45$  individuos  $1000 \text{ m}^{-3}$  (el 1.02% del total) para el XIXIMI-1 y de  $441.45 \pm 310.17$  individuos  $1000 \text{ m}^{-3}$  (el 0.74 % del total) para el XIXIMI-2 (Tabla 21, Tabla 22). La abundancia de las larvas de peces no fue significativamente diferente ( $H=0.520$ ,  $P= 0.471$ , G.L.=43) entre los dos cruceros. Se recolectaron muy pocos huevos de peces durante los cruceros.

#### Distribución espacial

Con algunas excepciones, la abundancia total de zooplancton fue más alta en la bahía de Campeche (Figura 119). Siendo dominantes los copépodos, como ya se mencionó, éstos muestran la misma tendencia en su distribución espacial que la abundancia total y los biovolúmenes del zooplancton (Figura 115, Figura 120). En la Figura 121 (salpas), Figura 122 (quetognatos), Figura 124 (ostrácodos), Figura 123 (apendicularios) y Figura 125 (larvas de peces) podemos ver la distribución espacial de grupos de zooplancton que tuvieron, en términos relativos, una abundancia alta después de los copépodos. Todos presentan variaciones en su distribución espacial. Sin embargo, estos grupos representan en realidad fracciones muy menores de la muestra total; el segundo grupo en importancia fueron los quetognatos, con solo un 13.22% y 9.73% del total para XIXIMI-1 y XIXIMI-2, respectivamente.

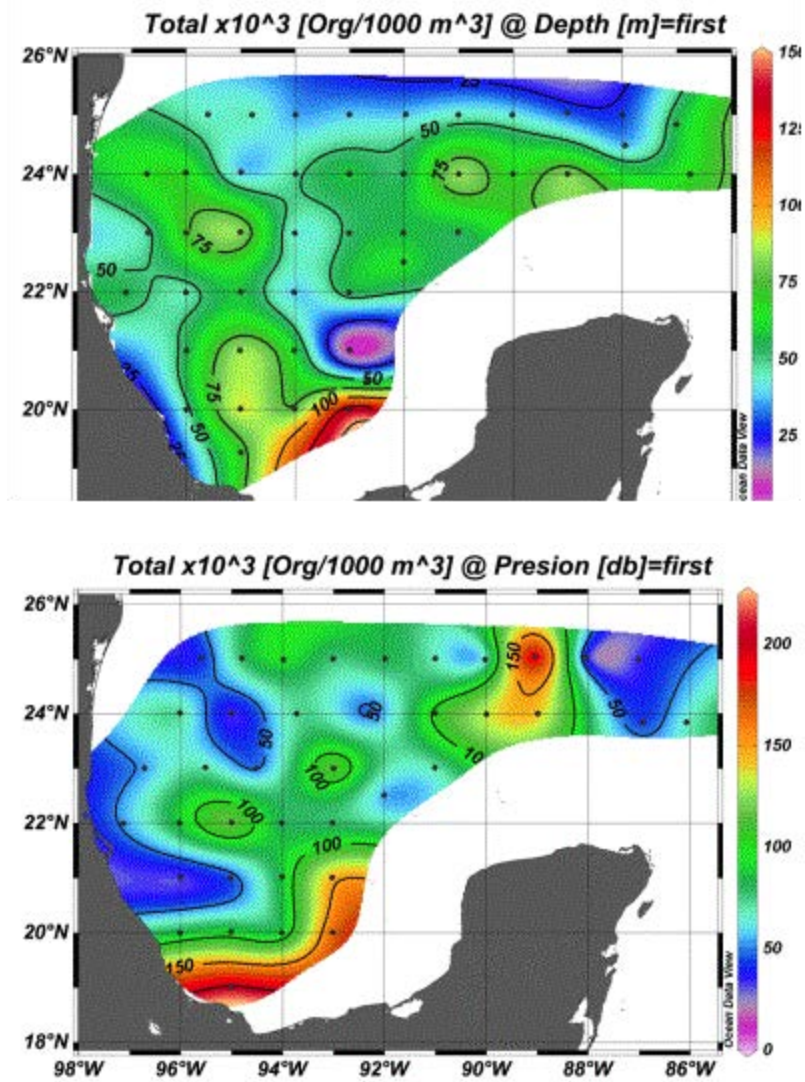


Figura 119. Abundancia total de zooplancton (individuos m<sup>-3</sup>) durante el crucero XIXIMI-1 (panel superior) y XIXIMI-2 (panel inferior).



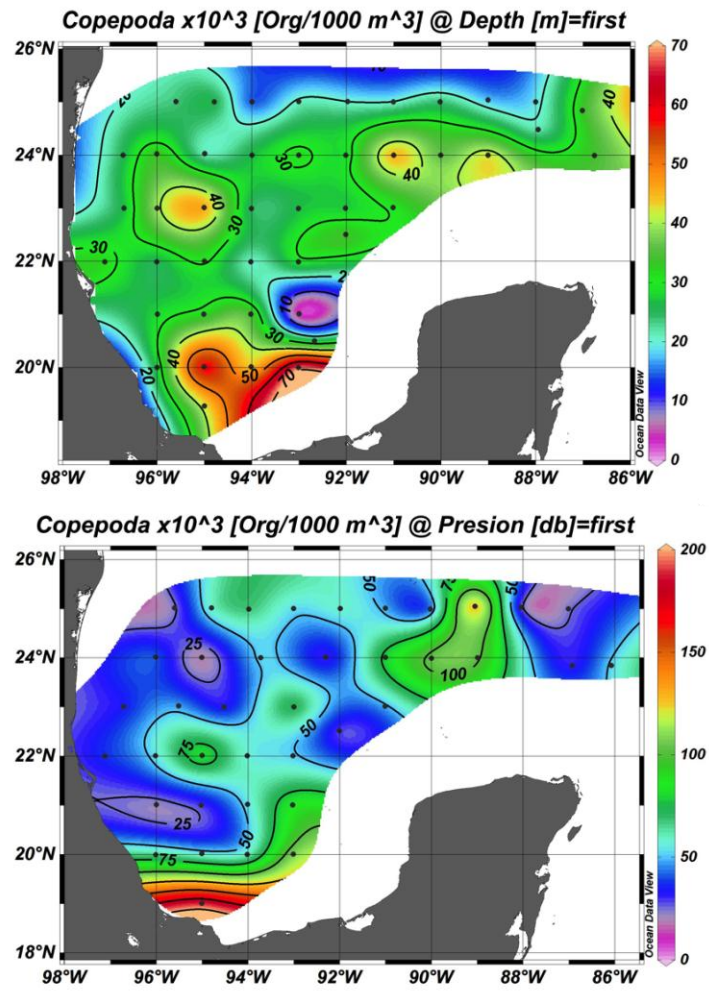


Figura 120. Abundancia de copépodos durante el crucero XIXIMI-1 (panel superior) y XIXIMI-2 (panel inferior).

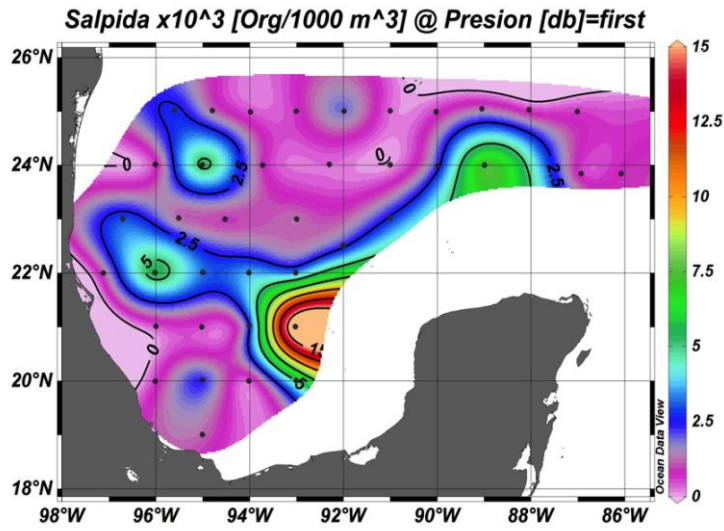


Figura 121. Distribución espacial de las salpas durante el crucero XIXIMI-2. Aunque el número de individuos es bajo, su tamaño grande conlleva a alta biomasa.

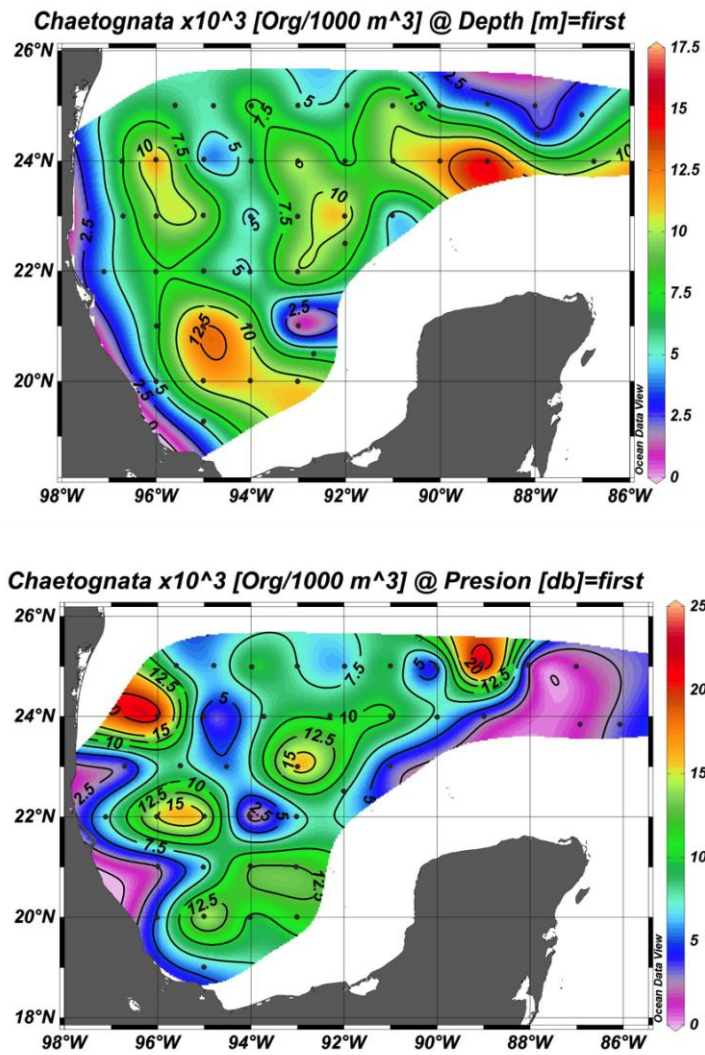


Figura 122. Abundancia de los quetognatos durante el crucero XIXIMI-1 (panel superior) y XIXIMI-2 (panel inferior).

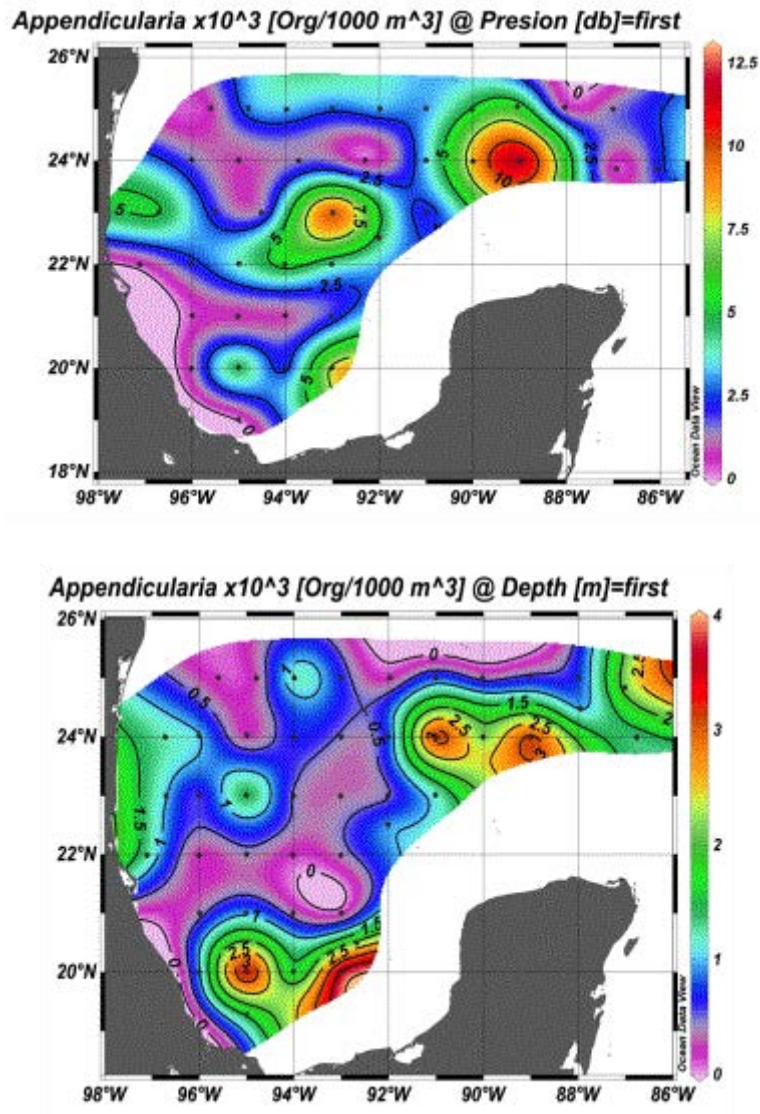


Figura 123. Abundancia de los apendicularios durante el crucero XIXIMI-1 (panel superior) y XIXIMI-2 (panel inferior).

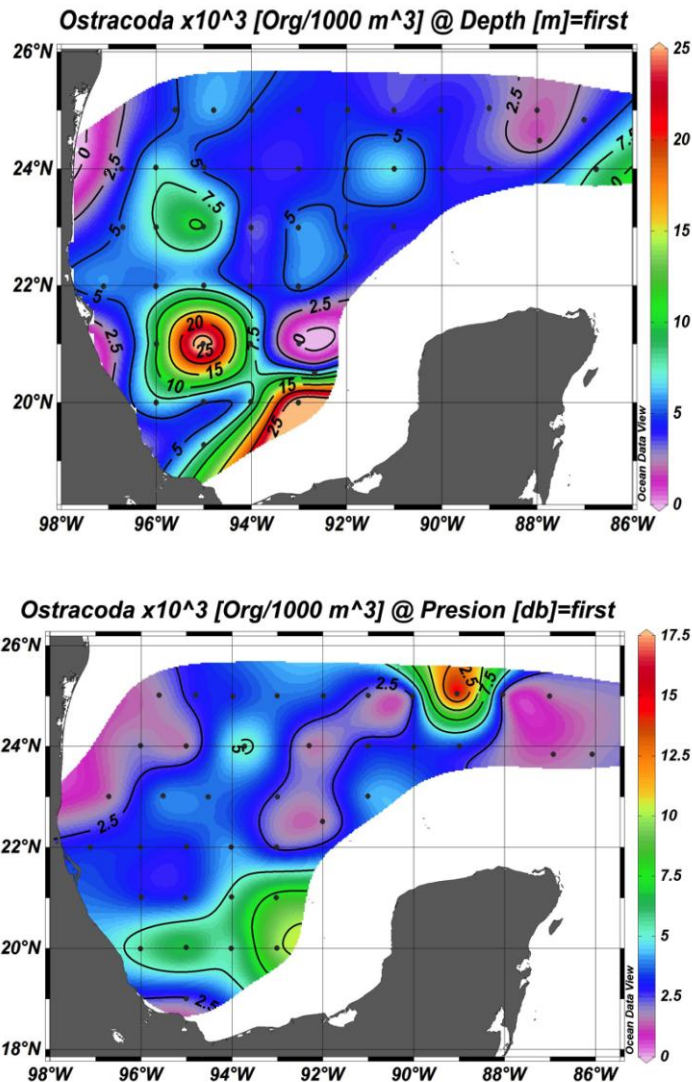


Figura 124. Abundancia de los ostrácodos durante el crucero XIXIMI-1 (panel superior) y XIXIMI-2 (panel inferior).

Flores-Coto et al. (2009) describen la distribución de la biomasa zooplanctónica en la parte sur el GM. En su análisis de largo plazo, ellos concluyen que las biomazas zooplanctónicas son más altas en verano que en invierno, pero que esta tendencia se ha invertido en algunos años (por ejemplo, 1994-1995), siendo más altas las biomazas en otoño e invierno que en verano. Sus resultados muestran valores similares a los encontrados por nosotros en noviembre del 2010. Sin embargo, sus estaciones son, en general, más costeras y estaban concentradas en la zona de la plataforma continental. Para el estudio taxonómico, López-Salgado y Suárez-Morales (1998) describen la abundancia de los copépodos frente al estado de Tamaulipas. Ellos deducen que la Corriente de

Lazo influye en su distribución, presentándose también un gradiente costa-océano. En nuestros datos los valores más elevados estuvieron presentes, como ya se ha mencionado, frente a Campeche, presentándose en algunas estaciones valores de abundancia de más del doble que las estaciones adyacentes; esta tendencia se conserva en otoño pero con unos valores menores que en verano, lo cual no coincide con lo que ellos dicen en relación al aumento reciente de las biomásas en otoño. Sin embargo, sus resultados pueden no ser comparables a los nuestros dadas las diferencias en la zona de muestreo.

Aparentemente el mismo mecanismo de corrientes costeras en otoño y en verano esta motivando que encontremos valores más elevados de biovolumenes en esa zona, los valores se multiplican por 9.20 en verano con relación al otoño, dichas corrientes costeras están presentes y fluyen hacia el sur en otoño y hacia el norte en verano, y cuando encuentran una corriente en dirección opuesta frente en la Bahía de Campeche, o más al norte en verano, se produce un flujo hacia el nordeste que atraviesa la plataforma continental y enriquece las aguas de nutrientes y de clorofila (Martinez-López y Zavala-Hidalgo, 2009), lo que produce unas biomásas más elevadas. Éste puede ser el mecanismo que explique los resultados encontrados. Las concentraciones más altas de clorofila durante el verano, podrían explicar ese aumento tan importante en la biomasa del zooplancton.

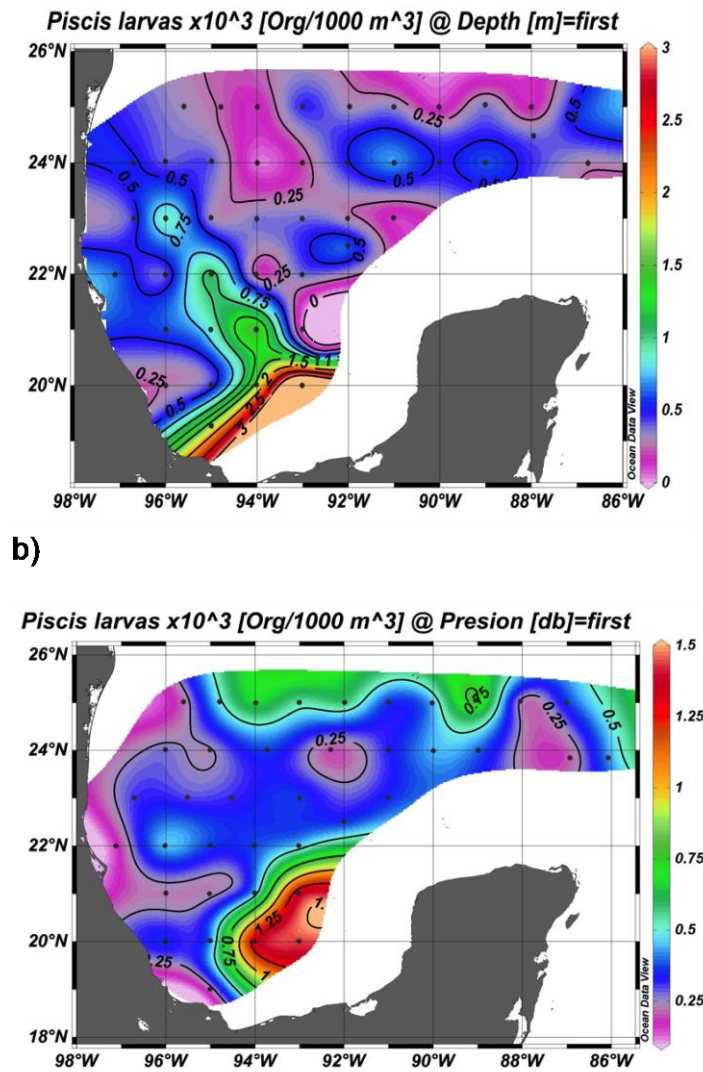


Figura 125. Distribución de larvas de peces. a) XIXIMI-1 b) XIXIMI-2.

## Conclusiones

Durante el otoño, la zona estudiada muestra temperaturas y salinidades un poco más elevadas en la zona norte y más frías y menos salinas en la zona sur, frente a Campeche y Veracruz. La imagen de satélite de la clorofila superficial, durante noviembre del 2010, muestra una coincidencia con esas condiciones físicas del medio (Figura 118). Como ya se mencionó los valores encontrados son relativamente bajos y coinciden con los encontrados por Flores-Coto et al. (2009)

para invierno, sin embargo las zonas no son coincidentes, su muestreo fue más costero, en aguas sobre la plataforma continental. La presencia de corrientes costeras, hacia el sur en otoño y hacia el norte en veranos, podría ser el mecanismo que produce esta distribución del zooplancton. Es importante resaltar que las mayores biomásas coinciden con los valores más elevados de clorofila, según lo muestran las imágenes de satélite, las que también nos muestran, para la misma zona sur, más altas concentraciones de clorofila en verano que en invierno. Esta zona podría estar enriquecida por los aportes continentales de los ríos presentes frente a dicha zona, en Campeche y Veracruz. En general, las abundancias totales más elevadas también estuvieron presentes en la misma zona sur. Así mismo, los copépodos, el grupo taxonómico más importantes, tuvo el mismo patrón de distribución.

Durante el verano del 2011, por supuesto las temperaturas estuvieron más elevadas llegando a 30 grados en algunos lugares. Las imágenes de satélite muestran, de nuevo, valores más elevados de clorofila frente a Campeche, en una zona donde existe también la presencia de giros. Encontramos biovolúmenes más elevados, estos fueron determinados principalmente por una mayor abundancia de salpas, las cuales debido a su gran tamaño representan un biovolumen considerablemente más elevado. Los copépodos presentaron un aumento considerable en su abundancia en verano. Por otra parte algunos grupos disminuyeron en abundancia como los ostrácodos. Los cambios estacionales, en biomasa, pueden estar relacionados con las lluvias de verano con su aporte suplementario de nutrientes, que dan como resultado una más alta productividad primaria y secundaria.

## **Recomendaciones**

Sería deseable contar con una variable como la clorofila, simultáneamente durante el crucero, u otro indicador de condiciones tróficas para entender mejor cuales son los mecanismos que están determinando estas condiciones. El aporte de nutrientes a la zona de estudio podría ser otra variable muy importante a considerar. Otros cruceros durante otras estaciones del año, podrían aportar mayor información sobre los cambios estacionales.

## **Referencias**

Biggs DC, Sánchez LL 1997 Nutrient-enhanced primary productivity of the Texas-Louisiana continental shelf. *J. Mar, Sys.* 11:237-247.



- Biggs, D. C., (1992). Nutrients, plankton and productivity in a warm/core ring in the western Gulf of México. *J. Geophys. Res.* 97(C2): 2143-2154.
- Flores-Coto, M. L., Espinoza-Fuentes, F. Zavala-García, L. Sanvicente-Añorve. (2009) Ictioplancton del sur del Golfo de México. Un compendio. *Hidrobiol.* 19(1):49-76.
- Lopez-Salgado, I., E. Suarez-Morales (1998). Copepod assemblages in surface waters of the wetern Gula of México. *Crustaceana.* 71(3) 312-330.
- Martinez-López, B., J. Zavala-Hidalgo. (2009) Seasonal and interannual variability of cross-shelf transports of chlorophyll in the Gulf of México. *J. Mar. Syst.* 77: 1-20.
- Rabalais, N. N., R. E. Turner, W. J. Wiseman. (2002) Gulf of Mexico hypoxia A.K.A. "The dead zone". *Ann. Rev. Ecol. Syst.* 33:235-263.
- Turner, R. E., (2001) Some effects of eutrophication on pelagic and demersal marine food webs In: Rabalais and Turner. *Coastal hypoxia: Consequences for living resources and ecosystems.* Am. Geophys. Union. 371-398.
- Turner, R. E., R. L. Allen. (1982) Plankton respiration rates in the bottom waters of the Mississippi river, delta bight. *Contr. Mar. Sci.* 25: 173-179.

## Créditos

El M. C. Ignacio Romero-Vargas Marquez organizó todo el material para el crucero y la calibración de los flujómetros, José Luis Cadena llevó a cabo el análisis de las muestras de zooplancton y la determinación de las biomásas. El M. C. Cesar Álmeda Jáuregui realizó las figuras de éste reporte. Las figuras de satélite fueron proporcionadas por el M.C. Vicente Ferreira y el Dr. Julio Sheinbaum. Concepción Curiel analizó las muestras de zooplancton y determinó las abundancias de los grupos taxonómicos y de las larvas y huevos de peces.

## COMPOSICIÓN ELEMENTAL E ISOTÓPICA DE LOS SEDIMENTOS EN LOS TALUDES Y LLANURA ABISAL

Responsable: Juan Carlos Herguera (CICESE)

Participantes: Nathalí Cordero Quirós, Jose Luis Abellá, Vicente Ferreira Bartrina

### Antecedentes

En esta trabajo colectamos muestras de sedimentos de los taludes y llanuras abisales del GM con el objetivo de caracterizar su geoquímica elemental y su composición isotópica para comprender la importancia de los procesos que controlan su abundancia y distribución con el objetivo de poder evaluar el posible impacto del derrame de hidrocarburos del pozo Macondo acaecido durante el verano del 2010 en esta región de aguas profundas. Los resultados de este estudio muestran la variabilidad de las abundancias relativas de carbono orgánico y su composición isotópica, carbonatos y del componente terrígeno en los sedimentos del talud continental y abisales del Golfo. Utilizamos determinaciones de carbonatos, y análisis de portas frotis (smear-slides) para determinar los patrones de distribución de los carbonatos y terrígenos, así como la determinación del carbono orgánico, y su composición isotópica con el objetivo de caracterizar la importancia de los posibles controles de producción, transferencia y preservación en la región de aguas profundas del GM al S del paralelo 25°N.

Se han publicado numerosos trabajos de investigación sobre múltiples aspectos de la sedimentología de la región norte del Golfo, que abarcan desde transporte y dispersión de sedimentos (Coleman et al., 1991; Davies and Moore, 1970), a la mineralogía (Griffen, 1962), a las propiedades texturales como el tamaño de grano (Mazzulo, 1986), a las características acústicas y estructurales de los sedimentos (Bouma et al., 1990; Twichell et al., 1992), como a las distribuciones de metales (Trask et al., 1953; Huerta and Morse, 1992). La mayoría de estos trabajos destacan la importancia del flujo del río Mississippi no solo para las plataformas cercanas (Doyle and Sparks, 1980; LeBlanc and Hodgson, 1959; Goldstein, 1942; Van Andel and Poole, 1960) sino para la zona del talud norte hasta la llanura abisal de Sigsbee (Bouma, 1972; Bouma et al., 1985; Davies and Moore, 1970). Sin embargo de la región de aguas profundas y pie de talud al sur del paralelo 25°N la información que tenemos es aún muy fragmentaria.

Recientemente se han publicado un importante número de trabajos en los que se describen y explican los efectos que las fugas de hidrocarburos (Callender and Powell, 1992; Kennicutt and Brooks, 1990), troneras frías (Callender et al., 1992), sedimentos asociado a gases (Anderson and Bryant, 1990), y piscinas de salmueras (MacDonald, 1992) tienen sobre los organismos bénticos por un lado y

la naturaleza de los sedimentos asociados. Todos estos procesos aunque ejercen un marcado efecto sobre la composición faunística y la naturaleza de los sedimentos tienen una distribución espacial muy restringida que nos pueden servir de guía para evaluar el posible impacto del derrame en estos sedimentos profundos.

### Área de estudio

El GM es una pequeña cuenca oceánica con una extensión de  $1.5 \times 10^6$  Km<sup>2</sup> y rodeada por continente excepto en dos umbrales el Canal de Yucatán al SE y el estrecho de la Florida al NE por donde se intercambian las aguas del Caribe y Atlántico con las del Golfo mientras que por el segundo estas aguas salen hacia el Atlántico Norte.

Para caracterizar el contenido elemental de los sedimentos profundos del GM optamos durante ambas campañas XIXIMI-1 y XIXIMI-2 por elegir varios lugares repartidos a lo largo de todo el recorrido, por un criterio de economía de tiempo, que mas tarde en sucesivas campañas podamos complementar espacialmente, hasta alcanzar una cobertura espacial de al menos de  $1^\circ \times 1^\circ$ . Las muestras en estas dos primeras campañas se colectaron sobre la llanura abisal y las zonas de talud, generalmente a profundidades entre los 2200 a los 3800m (Figura 126) (Tabla núcleos XIXIMI-1-2). Durante XIXIMI-21 los núcleos se obtuvieron con un nucleador de caja tipo Sutar del que se submuestreaba 4 subnúcleos de los que uno de ellos se dedicaba a muestreos de geoquímica elemental y metales. Durante la campaña XIXIMI-2 utilizamos un multinucleador que básicamente consiste en una estructura con forma de araña de 6 patas con una estructura central a la que se aseguran mediante unas camisas de acero 6 cilindros de policarbonato de 45 cm de longitud y un diámetro de 9.5 cm. Cuando el multinucleador aterriza sobre el fondo marino el peso de esta estructura central fuerza la caída y penetración de los cilindros de policarbonato en los sedimentos. A medida que los 6 núcleos avanzan en profundidad por debajo de la interfase agua sedimentos un mecanismo interno situado en el eje central de la estructura topa sobre el sedimento y acciona el mecanismo disparador que libera las tapas de los nucleadores para cerrar los cilindros por su base. Cuando el winche del barco comienza a cobrar la cuerda a la que está conectada el nucleador levanta los cilindros de policarbonato dejando que las tapas inferiores puedan cerrar los tubos por la base apresando los sedimentos durante su viaje ascendente por la columna de agua. Una vez recuperado el multinucleador por el marco de popa se asegura sobre la cubierta para su posterior manipulación. Para una descripción en mayor detalle de su funcionamiento recomendamos consultar el reporte de la campaña XIXIMI-2 (Herguera et al., 2011).

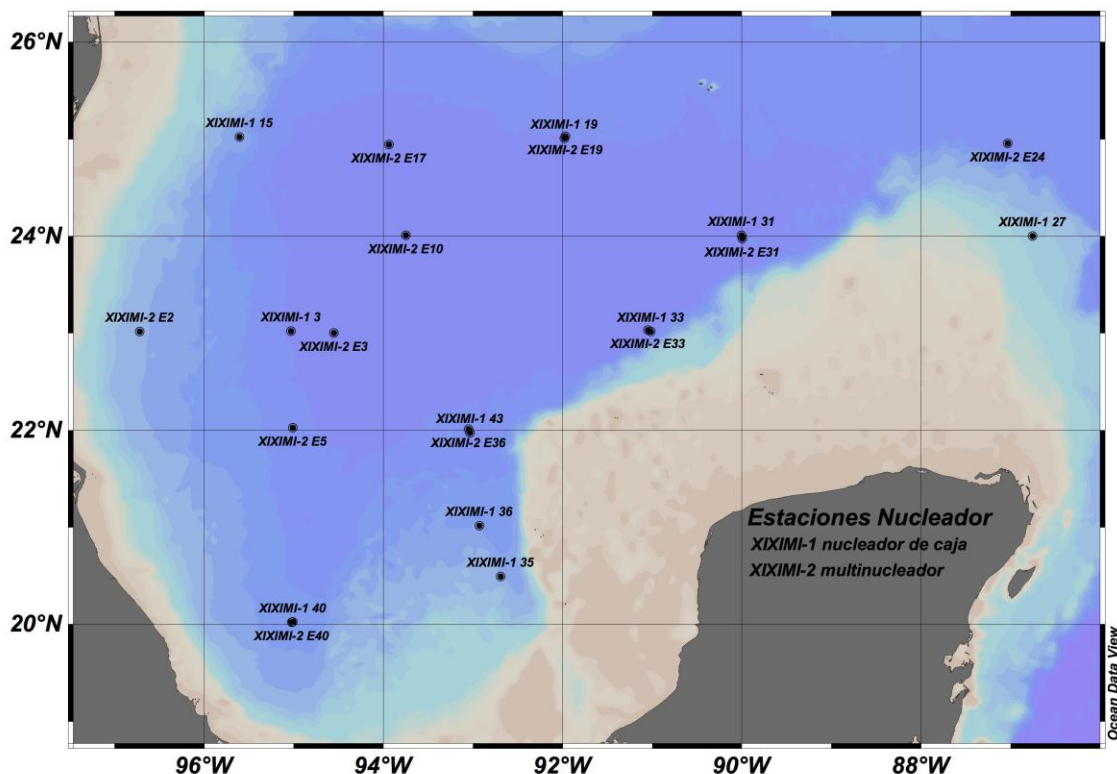


Figura 126. Mapa de localización de las estaciones en las que se colectaron núcleos de sedimentos para este reporte durante las campañas XIXIMI-1 y XIXIMI-2.

Todos los subnúcleos se muestrearon breves horas después de llegar a cubierta en segmentos cilíndricos perpendiculares al eje vertical del núcleo, generalmente los primeros 5 cm se muestreaban con resolución centimétrica y a partir de ese nivel cada 2 cm. Las muestras de sedimentos se mantuvieron congeladas hasta su posterior liofilización en el laboratorio. Reportamos los resultados de los primeros 10 cm del sedimento, para evaluar hasta que punto la profundidad de la capa de mezcla afecta al contenido elemental de los núcleos, ya que a mayores profundidades nos encontramos con el registro geológico al que ya no afectan los procesos actuales de sedimentación en el fondo.

## Objetivos

1. Cartografiar la distribución del contenido elemental de carbono orgánico e inorgánico de los sedimentos en la región de aguas profundas del GM al sur del

paralelo 25°N basada en las determinaciones de carbonatos por coulometría apoyados en las láminas de sedimentos y en determinaciones de carbono orgánico en analizador elemental acoplado a un espectrómetro de masas para entender los controles de la sedimentación pelágica en esta región que nos permitan establecer la línea base de los patrones de la distribución de la sedimentación biogénica y litogénica en las aguas profundas del GM.

2. Evaluar el potencial impacto en los sedimentos profundos del GM como consecuencia de la oxidación de los hidrocarburos en muestras obtenidas durante la campaña XIXIMI-1.

## **Metodología**

### Análisis de carbonatos

La metodología que utilizamos fue fundamentalmente la determinación del contenido de carbonato de calcio por coulometría. Utilizamos un coulometro UIC Modelo 5014 CO<sub>2</sub> que proporciona determinaciones absolutas de carbono en un flujo de gas controlado. El rango de detección se encuentra entre 0.01µg hasta 100 mg. La celda de este coulómetro se llena con una solución propiedad de UIC que contiene monoetanolamina y un indicador colorimétrico del pH. En la celda se introducen unos electrodos de platino Pt –cátodo- y de plata Ag –ánodo. Esta celda se coloca en el compartimento de la celda en el coulómetro entre una fuente de luz y un fotodetector. A medida que el flujo de gas pasa por la celda, el CO<sub>2</sub> se absorbe cuantitativamente por medio de una reacción con la monoetanolamina para formar un ácido titulable. El ácido hace desaparecer la coloración indicadora de la solución que la celda fotoeléctrica monitorea y lo reporta como % de la transmitancia (%T). A medida que este porcentaje aumenta la corriente para la titulación se activa automáticamente para generar electroquímicamente la base a una tasa proporcional al %T (aproximadamente 1500µg carbono/minuto), cuando la solución retorna a su color original se detiene la corriente. La corriente de titulación se está midiendo continuamente y como ésta es el agente titulador no hay necesidad para la calibración de la muestra. Sin embargo para asegurarnos que la electrónica está trabajando adecuadamente todos los días antes de comenzar la corrida corremos un standard de 100% calcita y entre las determinaciones de las muestras desconocidas intercalamos varios patrones internos del laboratorio que utilizamos para comprobar el correcto funcionamiento así como para calcular la precisión interna de las determinaciones. A lo largo de las determinaciones que realizamos en los sedimentos de XIXIMI-1 la precisión interna de los análisis fue de ±1%.

### Análisis de frotis (smear slide)

Para el 1er cm de la columna de sedimentos utilizamos el frotis (smear-slide), método en el que se unta de sedimentos una lámina de cristal, en las que podemos observar algunos de los caracteres texturales de los sedimentos y sus componentes se reportan como porcentajes y la nomenclatura adoptada es la utilizada por el Joint Ocean Deep Sea Drilling Project. Este es un análisis semicuantitativo que nos provee de información sobre la importancia relativa de los componentes bio- y litogénicos de los sedimentos.

### Análisis de la composición de C orgánico y de su composición isotópica de carbono $\delta^{13}\text{C}$

Las muestras de sedimentos destinadas a este análisis se trataron previamente en el laboratorio de CICESE para disolver la fracción carbonatada de los sedimentos y que no interfiriera con la composición isotópica del carbono orgánico. Se tomaron alícuotas del sedimento de 150 mg previamente molida en tubos Falcon de base cónica de 50 ml. A cada uno de los tubos se añadieron 5ml de HCl al 10% y se dejaron reposar por 2 horas. Al cabo de este tiempo se agitó el sedimento con una espátula para comprobar que ya no había reacción y que la disolución del componente carbonatado había culminado. Se llenaron con 40 ml de agua desionizada, se cerraron los tubos y centrifugaron a 4800 rpm por 8 minutos. Se extrajo la mayor parte del sobrenadante con una pipeta y se volvió a repetir hasta 2 veces el procedimiento con agua desionizada resuspendiendo el sedimento mecánicamente cada vez que se introducía el agua desionizada. Finalmente se extrajo el sobrenadante y se dejaron secar a temperatura ambiente, una vez seco se transfirieron a cápsulas de estaño para su posterior análisis elemental.

Las muestras se enviaron para sus análisis al Stable Isotope Facility (SIF) de la Universidad de California Davis, que se llevaron a cabo utilizando un analizador elemental VarioEICube or Micro Cube elemental analyzer (Elementar Anlaysensysteme GmbH, Hanau, Germany) acoplado a un espectrómetro de masas PDZ Europa 20-20 (Sercon Ltd., Cheshire, UK). La metodología que se siguió para las determinaciones isotópicas de estas muestras incluye la combustión de los filtros a 1000°C en un reactor empacado con óxido de cobre y cromato de plomo en el analizador elemental. Después de la combustión, se separan los óxidos en una cámara de reducción (cobre reducido a 650°C). El gas acarreador empleado en este sistema, helio de alta pureza, fluye por una trampa de agua (perclorato de magnesio). Las moléculas de CO<sub>2</sub> que resultan de este proceso se

separan mediante una trampa de absorción de tamiz molecular antes de entrar al espectrómetro de masas donde se ionizan las moléculas de CO<sub>2</sub> y se separan a lo largo de un tubo de vuelo de acuerdo a sus masas y se cuantifican sus arribos en unos colectores Faraday al final de dichos tubos de vuelo, resultados que posteriormente se convierten en relaciones isotópicas refereridas a un estándar internacional V-PDB (Vienna Pee Dee Belemnite).

Los valores isotópicos son expresados en la notación delta ( $\delta$ ):

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{COS}} (\text{‰}, \text{PDB}) = [(\text{R}_{\text{muestra}} - \text{R}_{\text{estándar}}) / \text{R}_{\text{estándar}}] \times 1000$$

Donde R es la razón del isótopo pesado al ligero (<sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C).

Durante los análisis isotópicos de las muestras se inetrcalaron estándares secundarios internos al SIF (Nylon G-11  $\delta^{13}\text{C} = -27.81\text{‰}$ ; Hígado bovino:  $\delta^{13}\text{C} = -21.69\text{‰}$ ; Ácido glutámico USGS-41  $\delta^{13}\text{C} = 37.63\text{‰}$ ; Hojas de durazno:  $\delta^{13}\text{C} = -26.12\text{‰}$ ). Los promedios de los valores isotópicos de los estándares secundarios fueron  $-27.81$  (n=67),  $-21.68$  (n=5),  $37.63$  (n=10) y  $-26.15\text{‰}$  (n=20), respectivamente. Para todos los estándares secundarios, la precisión fue  $\leq 0.046\text{‰}$  ( $\pm 1$  desviación estándar).

Los resultados que se obtienen de SIF también incluyen estimaciones de la cantidad de carbono en cada muestra ( $\mu\text{g C}$ ). La concentración de carbono orgánico reportado es el equivalente a sedimentos sin el componente carbonatado. Tanto los valores de  $^{13}\text{C}_{\text{PDB}}$  como las concentraciones de carbono orgánico se reportan y grafican con respecto a la profundidad media para cada muestra de sedimento.

Para la asignación de estas etiquetas de calidad (quality flags) seguimos los criterios de asignación del programa de graficado de datos Ocean Data View (ODV) (Schlitzer, 2002) ampliamente utilizado por la comunidad oceanográfica internacional. Estos criterios básicamente distinguen cuatro categorías, la etiqueta = 0 se asigna a datos de buena calidad, la etiqueta = 1 se asigna a datos con calidad desconocida, la etiqueta = 4 se aplica a datos de calidad cuestionable, y la etiqueta = 8 se asigna a datos de mala calidad. En nuestro caso, utilizamos solo dos etiquetas (0 y 4) y el criterio de asignación fue el que tuvieran el peso adecuado de muestra para obtener una determinación isotópica fiable.

## Resultados

### Patrones de distribución de los carbonatos

La composición promedio del contenido en carbonatos en los sedimentos abisales del GM oscilan entre el 15 al 50%, excepcionalmente en el talud N de la Península de Yucatán este porcentaje aumenta hasta el 75%. En general se observan composiciones uniformes para todos los núcleos, al menos para los primeros 10 cm de la columna de sedimentos (Figura 127). En general el contenido relativo de calcita aumenta a medida que nos alejamos de las zonas del talud occidental –Tamaulipas a Veracruz- y meridional –Veracruz a Tamaulipas- hacia la llanura abisal de Sigsbee y este aumento se hace mas marcado en la región al N del talud de la Península de Yucatán y especialmente en la zona del talud donde pueden llegar a observarse valores de hasta 75% de los contenidos de calcita.



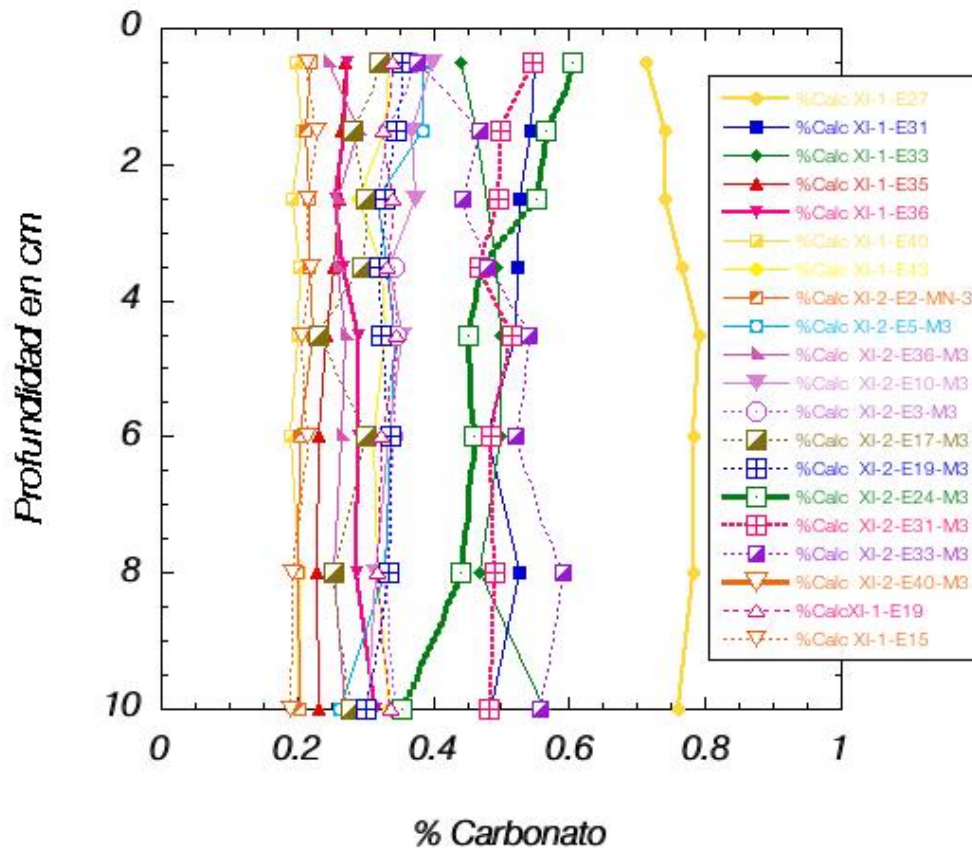
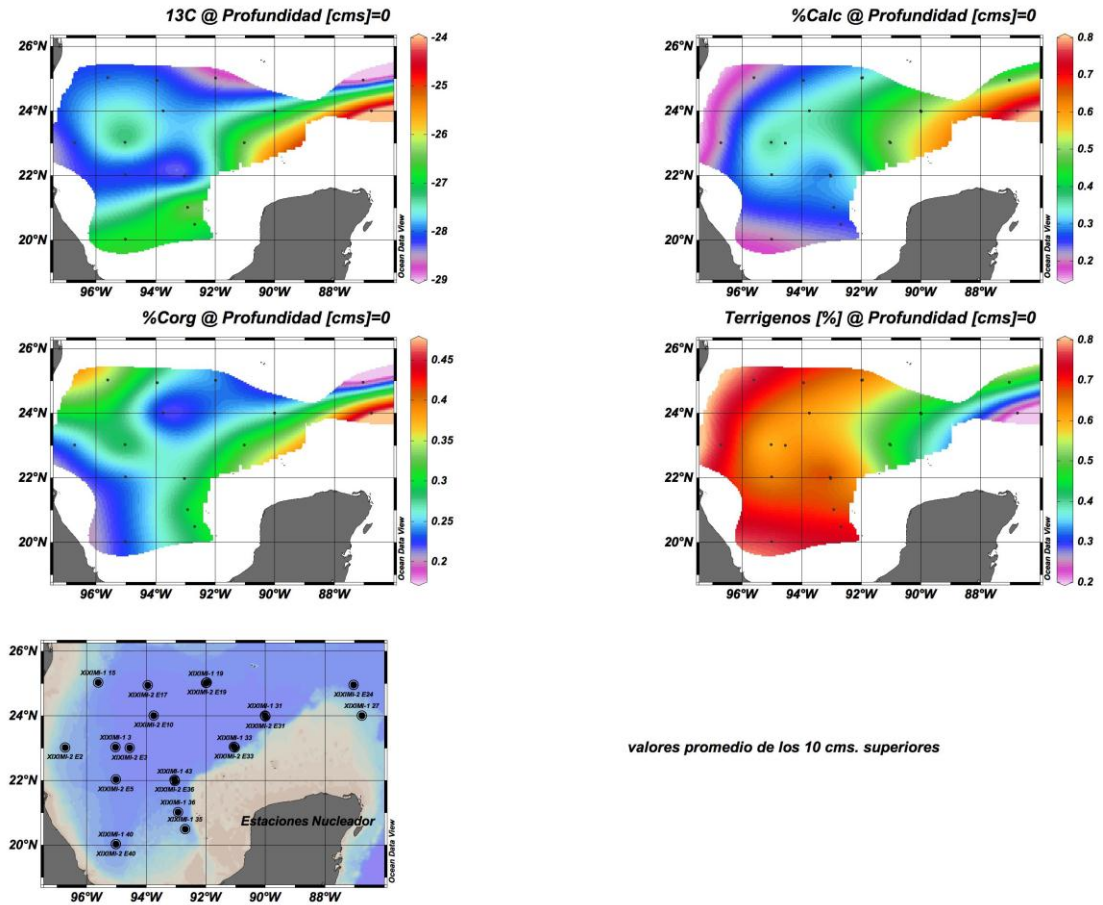


Figura 127. Contenido relativo del contenido en carbonatos en los sedimentos de mar profundo del GM. Los porcentajes están referidos al 1.

Uno de los patrones más importantes a escala regional es la tendencia a aumentar en el contenido de carbonatos de las zonas de talud continental hacia la llanura abisal, patrón que se invierte alrededor del talud N de la Península de Yucatán. El primer patrón es especialmente evidente en la parte Nororiental y en la meridional a lo largo de los cañones de Coatzacoalcos y Campeche y que paradójicamente corre en sentido contrario a lo que conocemos de los sedimentos de talud y abisales en los océanos. En el talud y la llanura abisal lindantes al N de la Península de Yucatán observamos un enriquecimiento en carbonatos a profundidades intermedias del talud y una progresiva disminución en profundidad hasta la llanura abisal (Figura 128, panel superior derecho).



valores promedio de los 10 cms. superiores

Figura 128. Mapas de los patrones de distribución de distintos componentes sedimentarios de los valores promedio de los primeros 10cm de sedimento en la región de aguas profundas del GM. Composición isotópica del carbono orgánico panel superior izquierda. Contenido relativo de carbonatos en el panel superior izquierdo. Contenido relativo del carbono orgánico panel medio izquierdo. Contenido en terrígenos panel medio derecho.

### Análisis de las láminas frotis

Los análisis de microscopio de las láminas frotis se realizaron sobre el residuo <math><64\mu\text{m}</math> que lavamos durante el proceso de tratamiento de las muestras. En estas láminas pudimos observar que el componente carbonatado de los sedimentos de la llanura abisal estaba compuesto fundamentalmente de placas de cocolitofóridos y fragmentos de foraminíferos. Las zonas de talud tanto occidental como el meridional mostraban un mayor contenido en limos y arcillas de origen continental. En contraste con la zona del talud al norte de Yucatán en cuyos sedimentos además de la presencia de cocolitofóridos, foraminíferos y pterópodos se observa un mayor contenido de calcita microcristalina sin morfologías aparentes que bien podrían ser el resultado de la fragmentación de estructuras originalmente

coralinas, esqueletos de carbonatos –moluscos, equinoideos, briozoos-, pellets, clastos e intraclastos de carbonatos del frente de arrecife, y de oolitos de origen algal procedentes de la extensa plataforma de Yucatán. Esta sustitución de calcita microcristalina por los terrígenos explica el enriquecimiento en carbonatos especialmente a profundidades intermedias del talud de Yucatán y en la región adena de la llanura abisal. También observamos una progresiva disminuci3n de estos fragmentos microcristalinos entre las profundidades intermedias del talud a la llanura abisal donde dominan las placas de los cocolitof3ridos y caparazones de foramin3feros pl3ncticos.

Contenido en carbono org3nico y composici3n isot3pica del carbono de los sedimentos (Anexo 13)

El valor medio del carbono org3nico en los sedimentos (COS) es de  $0.3 \pm 0.15\%$ , promedio extraordinariamente bajo cuando lo comparamos con otras regiones profundas de talud y abisales del oc3ano global.

La distribuci3n del promedio del contenido relativo del COS para los primeros 10 cm muestra un patr3n de empobrecimiento entre el borde de la plataforma y el talud, con valores entre 0.4-0.45%, hacia la llanura abisal donde sus valores no sobrepasan el 0.25% de abundancia. Curiosamente este patr3n se rompe en la regi3n del talud de Veracruz situado en la regi3n m3s meridional del GM donde se observan valores tan bajos c3mo en el centro de la llanura abisal m3s alejada de las regiones del talud

El promedio de las composiciones isot3picas del COS  $\delta^{13}C_{COS}$  es de  $-26.5 \pm 2.5\text{‰}$ , valores que son extraordinariamente negativos en comparaci3n con los valores medios de la materia org3nica de origen marino y se acercan a los de la materia org3nica de origen continental. Su distribuci3n espacial muestra un patr3n hacia valores m3s negativos entre el borde la plataforma de Yucat3n ( $-25\text{‰}$ ) hacia la llanura abisal, regi3n en la que se observa el mayor empobrecimiento del  $\delta^{13}C_{COS}$  justo por debajo de la corriente del Lazo ( $-28.5\text{‰}$ ), de una forma an3loga al patr3n del contenido en el COS que observamos anteriormente. Sin embargo este patr3n de similitud se rompe para el resto del Golfo. Hacia el sur, especialmente la regi3n comprendida entre los ca3ones de Coatzacoalcos y Campeche los valores son en general mucho m3s negativos ( $-26.5 \pm 0.5\text{‰}$ ) que los t3picos del carbono org3nico de origen marino ( $-21 \pm 1\text{‰}$ ), tendencia que se hace a3n m3s negativa sobre la llanura abisal de Sigsbee y aparentemente todo el talud occidental del GM entre Tampico hasta el norte de Veracruz ( $-28 \pm 1\text{‰}$ ).

## Patrones de distribución de los terrígenos

La proporción de los sedimentos terrígenos no la determinamos directamente sino que la derivamos a partir de la diferencia entre el total y la suma de los porcentajes de carbonatos al que agregamos un 3% de ópalo biogénico y el porcentaje de carbono orgánico reportado en este informe. Los patrones que observamos de su distribución es de un alto contenido en terrígenos bordeando todas las zonas del talud occidental y meridional incluyendo los cañones de Coatzacoalcos y Campeche y un empobrecimiento hacia la llanura abisal y especialmente en el talud norte de la Península de Yucatán (Figura 128, panel medio derecha). Estos patrones de distribución nos indican la presencia de tres grandes regiones, una dominada por la sedimentación de los sedimentos de origen continental al occidente y sur del GM, la llanura abisal central donde la importancia de los terrígenos disminuye y aumenta relativamente los carbonatos pelágicos y la región del talud norte de la Península de Yucatán donde observamos los menores contenidos de terrígenos de todo el GM

## Discusión

Los patrones de la distribución de los carbonatos en los sedimentos podrían estar controlados por una serie de procesos que procedemos a discutir con las evidencias que tenemos. En principio la producción de placas y caparazones de calcita tanto por el fitopláncton como por el zoopláncton es aproximadamente uniforme para todo la región de aguas profundas del Golfo (Lorenz and Verity, 2006). Su transferencia por la columna de agua y su sedimentación en el fondo podría estar afectadas bien por procesos de disolución controlados por el estado de saturación del ión carbonato en columna de agua, como por dilución por terrígenos procedentes por aportes de los ríos del continente. Esta dilución está fundamentalmente controlada por los materiales que aporta el delta del Mississippi al norte cuyos efectos se notan hasta la llanura abisal de Sigsbee hasta los 24°N, los ríos que drenan Sierra Madre Oriental al oeste alimentados especialmente por el monzón de verano y los caudales de los ríos del S alimentados por el efecto de borde de la Zona de Convergencia Intertropical que alimenta de agua los ríos más caudalosos de todo el país.

Queda por dirimir el papel que la disolución podría introducir en la preservación de estos carbonatos. En principio la disolución de los carbonatos en la columna de agua está controlado por el estado de saturación de la calcita en el agua, y que está definido cómo

$$\Omega = [\cdot \cdot ]_{aq} * [CO_3]_{aq} / [\cdot \cdot ]_{sat} * [CO_3]_{sat}$$

cuando  $\Omega > 1$  decimos que esta sobresaturado y cuando  $\Omega < 1$  decimos que está subsaturado. En este último caso los carbonatos se disuelven a una tasa que está relacionada de una forma no lineal con el estado de subsaturación, y esta se puede producir bien en la columna de agua o en los sedimentos especialmente cuando éstos tienen un alto porcentaje de materia orgánica. En principio esto último no sucede en los sedimentos de las aguas profundas del GM por su bajo contenido en carbono orgánico por lo que procedemos a explorar el estado de saturación en la columna de agua. Para realizar el cálculo de  $\Omega$  recurrimos a los datos públicos de mayor confiabilidad de la Cuenca del Caribe campaña WOCE línea A22 (Johnson et al., 2003), cuyas aguas alimentan prácticamente todas las profundidades del Golfo y que constituyen su miembro inicial. Estos datos los tratamos con el programa CO2SYS.BAS y utilizando las constantes  $K_1$  y  $K_2$  de Mehrbach et al., 1973 referidas en Dickson y Millero, 1987, la  $K_{H_2SO_4}$  de Dickson y la escala de pH para agua de mar en [mol/kg-SW]. Como podemos observar de la (Figura 129). Los valores de  $\Omega$  por encima de 1 implica que no hay procesos de disolución ni en la columna de agua ni en los sedimentos, razón por la que podemos descartar la importancia de este control para explicar la distribución espacial del contenido en carbonatos de los sedimentos para todo el GM.

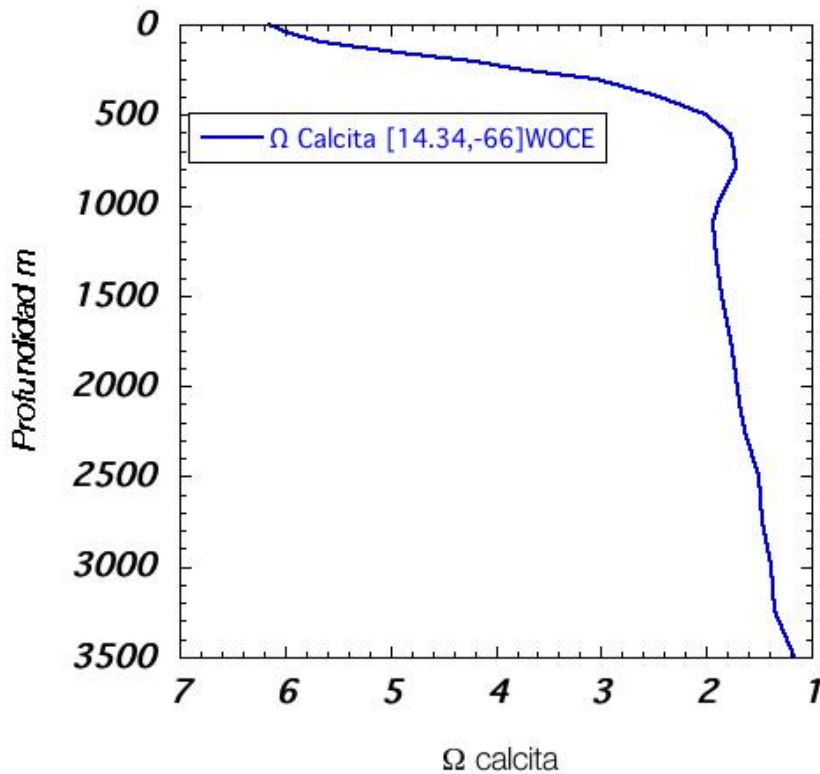


Figura 129. Estado de saturación de la calcita  $\Omega$  en el texto como la relación entre la concentración de los iones  $[\text{CO}_3^{2-}][\text{Ca}]$  determinada en el agua sobre su concentración en equilibrio; valores  $>1$  denotan sobresaturación, igual a 1 denotan saturación,  $<1$  denotan subsaturación y disolución.

Los patrones de distribución de los contenidos en carbonatos y terrígenos junto con los obtenidos por análisis visual al microscopio de los frotis delinean la importancia de tres grandes provincias en la región de aguas profundas. El talud y pie de talud de los márgenes de Tampico-Veracruz que continúa hacia los cañones de Coatzacoalcos y de Campeche, la llanura abisal de Sigsbee y el talud N de la Península de Yucatán. Estas regiones delinean las distintas provincias terrígenas dominadas por los sedimentos de origen litogénico que provienen de la Sierra Madre Oriental al occidente drenada por el sistema de ríos que atraviesan el continente desde Tampico hasta Veracruz, alimentados estacionalmente por el monzón de verano en esta región. tanto del río Mississippi al norte. En el sur el talud de Campeche están tapizados por sedimentos que provienen de los ríos que drenan los macizos del sur de Chiapas hasta Belice, y que posiblemente son los mas caudalosos del país que descargan la precipitación de verano asociada a la

migración latitudinal de la zona de convergencia intertropical. La llanura abisal central de Sigsbee al estar rodeada por el continente y debido a su cercanía al mismo captura una parte importante de los materiales litogénicos mas finos junto con el material carbonatado de origen biogénico que se exporta desde la superficie. Estas arcillas de la llanura abisal han podido ser transportadas por una variedad de procesos que incluyen plumas y filamentos originados durante las descargas de los ríos que pueden viajar cientos de km en suspensión hasta que los organismos los engullen y empaquetan como pellets lo que facilita su transferencia y sedimentación en el fondo, junto con otros procesos como son las corrientes turbidíticas, corrientes de gravedad, transporte isopícnico.

La tercera región la encontramos en el talud N de la Península de Yucatán donde la dilución del material biogénico de origen pelágico se produce con materiales carbonatados, calcita microcristalina con origen en la extensa plataforma de Yucatán proceso que controla el enriquecimiento en carbonatos de estos sedimentos con respecto al resto del GM. Estos fragmentos y cristales de calcita van perdiendo importancia hacia el pie de talud hasta llegar a la llanura abisal de Sigsbee donde dejan de ser reconocibles en los sedimentos.

La distribución del contenido en carbono orgánico en los sedimentos confirma el importante papel que juega la dilución por terrígenos que define el carácter de las regiones del talud norte de Yucatán donde se observa un gradiente a disminuir hacia el pie de talud, y los valores relativamente bajos sobre la llanura abisal de Sigsbee hasta el sur especialmente en el cañón de Coatzacoalcos. Sin embargo este patrón difiere sensiblemente en el cañón de Campeche donde se aprecian unos contenidos relativamente mayores de carbono orgánico que los esperados por la importante dilución por los terrígenos, y en el norte sobre el talud de Tamaulipas donde se aprecian valores relativamente más altos de carbono orgánico. Estas observaciones implican bien una importancia relativamente mayor de la producción en superficie y exportación en profundidad de carbono de origen fitopláctico y/o de un mayor aporte por los ríos de materia orgánica de origen continental tanto para la región del cañón de Campeche cómo el talud de Tamaulipas.

La característica general más importante que observamos en las composiciones isotópicas de carbono en los sedimentos es su aparente ligereza o sus valores más negativos y cercanos a la materia orgánica de origen continental para todo el GM. En general la vegetación terrestre se encuentra empobrecida en el isótopo más pesado ( $C^{13}$ ) con respecto al fitoplácton marino y esta diferencia se ha utilizado comúnmente para distinguir la procedencia de ambos tipos de carbono en los sedimentos (Wickman, 1952, Craig, 1953). Estos valores negativos observados en principio puede implicar un mayor enriquecimiento en este componente de origen terrestre en los sedimentos de las aguas profundas

especialmente teniendo en cuenta su carácter más refractario que el de origen marino lo que explica su mejor preservación relativa.

Sabemos que la temperatura también puede introducir un efecto en la composición isotópica del carbono la uniformidad de las temperaturas en las aguas superficiales del Golfo, sin embargo su baja amplitud estacional descartan la posibilidad de que este mecanismo deje una señal reconocible en el carbono orgánico preservado en los sedimentos.

La distribución espacial de las composiciones isotópicas de carbono en los sedimentos muestra un patrón hacia valores más negativos entre el borde la plataforma de Yucatán hacia la llanura abisal extendiéndose hasta los cañones de Campeche y Coatzacoalcos en el sur, tendencia que se hace aún más negativa sobre la llanura abisal de Sigsbee y aparentemente todo el talud occidental del GM entre Tamaulipas hasta Veracruz. Tendencias que se nos hacen difíciles de conciliar con las observadas en el contenido relativo del carbono orgánico en los sedimentos, especialmente la distribución de los valores más negativos sobre la llanura abisal de Sigsbee y el talud entre Tamaulipas y Veracruz.

Existe la posibilidad, que señalábamos en el capítulo del carbono orgánico particulado en la columna de agua (Herguera y Sherzka, este informe), de los procesos de fraccionamiento que puede introducir la red trófica y especialmente la microbiología en los sedimentos durante la asimilación de este carbono orgánico por el meio- y microbentos. Sin embargo nuestro desconocimiento actual de estos procesos nos limitan para evaluar su importancia para explicar los patrones observados y no podemos descartar esta posibilidad.

Otros procesos que pueden alterar la composición isotópica del carbono especialmente en los sedimentos del GM son las fugas naturales de hidrocarburos que dan origen a las abundantes chapopoterías que se encuentran en el fondo de cañones como el de Campeche como sobre la llanura abisal los *Sigsbee knolls*. Procesos que además de contribuir con carbono orgánico fósil a los sedimentos aporta una señal isotópica sensiblemente más ligera que la típica del fitopláncton y más cercana a la de origen continental. Si bien este proceso nos ayudaría a explicar las composiciones isotópicas más ligeras observadas en el cañón de Campeche y posiblemente en el de Coatzacoalcos, donde conocemos de numerosas chapopoterías reportadas desconocemos de su importancia sobre la llanura abisal como sobre talud de Tamaulipas hasta Veracruz.

Aunque en principio el número de núcleos que obtuvimos del fondo del GM no nos permite establecer con alto grado de significancia estadística los patrones de distribución encontrados, no encontramos evidencias de empobrecimientos anómalos de carbonato que pudieran interpretarse como disolución causada por la



sedimentación de hidrocarburos o enriquecimientos anómalos de carbono orgánico por aporte de los mismos.

## Conclusiones

La composición promedio del contenido en carbonatos en los sedimentos abisales del GM oscilan entre el 15 al 50% mostrando una gran uniformidad para los 10 primeros cm de cada núcleo, excepcionalmente en el talud N de la Península de Yucatán este porcentaje aumenta hasta el 75%.

En general el contenido relativo de calcita aumenta a medida que nos alejamos de las zonas del talud occidental –Tamaulipas a Veracruz- y meridional –Veracruz a Tamaulipas- hacia la llanura abisal de Sigsbee y este aumento se hace mas marcado en la región al N del talud de la Península de Yucatán

Los procesos de disolución en la columna de agua ni en los sedimentos no juegan ningún papel en esta distribución, por lo que la dilución por el componente terrígeno es el mecanismo principal que modula su abundancia relativa.

El componente carbonatado de los sedimentos de la llanura abisal está compuesto fundamentalmente de placas de cocolitofóridos y fragmentos de foraminíferos. Las zonas de talud tanto occidental como el meridional muestran un mayor contenido en limos y arcillas de origen continental. En contraste con la zona del talud al N de Yucatán en cuyos sedimentos además de la presencia de cocolitofóridos, foraminíferos y pterópodos se observa un mayor contenido de calcita microcristalina con origen en la vecina plataforma de Yucatán.

Los patrones de distribución de los contenidos en carbonatos y terrígenos junto con los obtenidos por análisis visual al microscopio delinear la importancia de tres grandes provincias en la región de aguas profundas. El talud y pie de talud de los márgenes de Tampico-Veracruz que continúa hacia los cañones de Coatzacoalcos y de Campeche, la llanura abisal de Sigsbee y el talud N de la Península de Yucatán.

Los sedimentos del GM muestran unos valores promedio extraordinariamente bajos de carbono orgánico  $0.3 \pm 0.15\%$ , en comparación con otras regiones profundas de talud y abisales del océano global.

La distribución del promedio del contenido relativo del COS para los primeros 10 cm muestra un patrón de empobrecimiento entre el borde de la

plataforma y el talud, con valores entre 0.4-0.45%, hacia la llanura abisal donde sus valores no sobrepasan el 0.25% de abundancia.

El promedio de las composiciones isotópicas del COS  $\delta^{13}\text{C}_{\text{COS}}$  es de  $-26.5 \pm 2.5\text{‰}$ , valores que son extraordinariamente negativos en comparación con los valores medios de la materia orgánica de origen marino y se acercan a los de la materia orgánica de origen continental

La distribución del contenido en carbono orgánico en los sedimentos confirma el importante papel que juega la dilución por terrígenos que define el carácter de las regiones del talud norte de Yucatán donde se observa un gradiente a disminuir hacia el pie de talud, y los valores relativamente bajos sobre la llanura abisal de Sigsbee hasta el sur especialmente en el cañón de Coatzacoalcos. Sin embargo este patrón difiere sensiblemente en el cañón de Campeche donde se aprecian unos contenidos relativamente mayores de carbono orgánico que los esperados por la importante, y en el norte sobre el talud de Tamaulipas. Estas observaciones implican bien una importancia relativamente mayor de la producción en superficie y exportación en profundidad de carbono de origen fitopláctico y/o de un mayor aporte por los ríos de materia orgánica de origen continental.

La distribución espacial de las composiciones isotópicas de carbono en los sedimentos muestra un patrón hacia valores más negativos entre el borde la plataforma de Yucatán hacia la llanura abisal extendiéndose hasta los cañones de Campeche y Coatzacoalcos en el sur, tendencia que se hace aún más negativa hacia el norte sobre la llanura abisal de Sigsbee y aparentemente todo el talud occidental del GM entre Tamaulipas hasta Veracruz cuyos controles pudieran ser bien por un mayor aporte de carbono orgánico de origen continental, por mezcla con fugas locales de hidrocarburos, y/o por procesos de asimilación biológicos aun relativamente desconocidos.

## **Recomendaciones**

En próximas campañas se debería de coleccionar núcleos en lugares diferentes para ampliar la cobertura de la colecta y poder establecer una cartografía de la distribución elemental de mayor fiabilidad que la que aquí se presenta.

## **Referencias**

Bouma (1972). Bouma, A.H., 1972. Distribution of sediments and sedimentary structures in the Gulf of Mexico. In: Rezak, R., Henry, V.J. (Eds.), Contributions

- on the Geological and Geophysical Oceanography of the Gulf of Mexico. Texas A&M University Oceanographic Studies 3, 35–61.
- Bouma et al (1990). A.H. Bouma, H.H. Roberts and J.M. Coleman, Acoustical and geological characteristics of near-surface sediments, upper continental slope of northern Gulf of Mexico. *Geo-Marine Letters* **10** (1990), pp. 200–208.
- Callender and Powell (1992). W.R. Callender and E.N. Powell, Taphonomic signature of petroleum seep assemblages on the Louisiana upper continental slope: recognition of autochthonous shell beds in the fossil record. *Palaios* **7** (1992), pp. 388–408.
- Davies and Moore (1970). D.K. Davies and W.R. Moore, Dispersal of Mississippi sediment in the Gulf of Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology* **40** (1970), pp. 339–353.
- Griffen (1962). G.M. Griffen, Regional clay-mineral facies—product of weathering intensity and current distribution in the northeastern Gulf of Mexico. *Geological Society of America Bulletin* **73** (1962), pp. 737–768.
- Huerta-Diaz M.A. and Morse J.W. (1992) Pyritization of trace metals in anoxic marine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta* **56**, 2681-2702.
- Johnson K., R. Key, F. Millero, C. Sabine, D. Wallace, C. Winn, L. Arlen, K. Erickson, K. Friis, M. Galanter, J. Goen, R. Rotter, C. Thomas, R. Wilke, T. Takahashi, and S. Sutherland. 2003. Carbon Dioxide, Hydrographic, and Chemical Data Obtained During the R/V *Knorr* Cruises in the North Atlantic Ocean on WOCE Sections AR24 (November 2 - December 5, 1996) and A24, A20, and A22 (May 30 - September 3, 1997), A. Kozyr (ed.) ORNL/CDIAC-143, NDP-082. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tennessee. doi: 10.3334/CDIAC/otg.ndp082
- Kennicutt, M. C. II and J.M. Brooks, 1990. Recognition of areas effected by petroleum seepage: northern Gulf of Mexico continental slope. *Geo-Marine Letters* **10** (1990), pp. 221–224.
- Logan (1969). B.W. Logan, Carbonate sediments and reefs, Yucatan Shelf, Mexico. *American Association of Petroleum Geologists Memoir* **11** (1969), pp. 7–128.
- Lohrenz, S. and Verity, P. 2005. Chapter 6. Regional Oceanography: Southeastern United States and Gulf of Mexico, in: *The Sea*, v. 14, ed. A. R. Robinson and K. H. Brink, p. 169-223.

- Rezak and Edwards (1972). Rezak, R., Edwards, G.S., 1972. Carbonate sediments of the Gulf of Mexico. In: Rezak, R.V.J., Henry (Eds.), Contributions on the Geological and Geophysical Oceanography of the Gulf of Mexico. Texas A&M University Oceanographic Studies 3, 263–280.
- Thunell (1976). R. Thunell, Calcium carbonate dissolution history in late Quaternary deep-sea sediments, western Gulf of Mexico. *Quaternary Research* **6** (1976), pp. 281–298.
- Trask (1953). Trask, P.D., 1953. Chemical studies of sediments of the western Gulf of Mexico: Part 2. In: The Sediments of the Western Gulf of Mexico. Papers in Physical Oceanography and Meteorology 12, 49–120.
- Van Andel and Poole (1960). T.J. Van Andel and D.M. Poole, Sources of recent sediment in the northern Gulf of Mexico. *Journal of Sedimentary Petrology* **30** (1960), pp. 91–122.

## **Créditos**

El reporte fue elaborado por Juan Carlos Herguera.

La colecta de las muestras y datos asociados en el barco estuvo a cargo de Vicente Ferreira-Bartrina y Juan Carlos Herguera.

La preparación de las muestras la realizaron Nathalí Cordero Quirós y Jose Luis Abellá en el laboratorio de Paleoceanografía del CICESE.

Las figuras fueron realizadas por Vicente Ferreira-Bartrina.

## METALES TRAZA EN SEDIMENTO

Responsable: Dr. Miguel Angel Huerta, IIO-UABC  
Participantes: Arturo Siqueiros, IIO-UABC

### Antecedentes

La pirita representa una de las principales fases reducidas durante la diagénesis en sedimentos anóxicos y además tiene una gran capacidad para incorporar metales traza (Huerta-Díaz y Morse, 1992). La formación de pirita está directamente relacionada con las tasas de reducción de sulfato, la cual a su vez depende de la cantidad y labilidad de la materia orgánica presente en los sedimentos (e.g., Berner, 1980, 1981). En los sedimentos y a profundidades donde el oxígeno se ha agotado los metales traza se incorporan rápidamente en diferentes fases minerales. En el caso específico del hierro y manganeso, dichos elementos forman sulfuros en la parte anóxica del sedimento (Berner, 1964, 1970), y oxihidróxidos en su parte óxica (Jenne, 1968; Belzile *et al.*, 1989). Estos componentes tienen una profunda influencia en la geoquímica de los sedimentos marinos, sobre todo en las reacciones que gobiernan el almacenamiento (o liberación) de elementos traza (Jenne, 1977; Lion *et al.*, 1982; Huerta-Díaz y Morse, 1992; Huerta-Díaz *et al.*, 1993; 1998). Una vez depositados y enterrados, los oxihidróxidos de Fe y Mn que eventualmente alcanzan la porción reducida/anóxica de los sedimentos, son reducidos a Fe(II) y Mn(II), respectivamente, y solubilizados en el agua intersticial. Una vez disueltos, una porción de estos dos constituyentes se difundirá hacia la interface sedimento/agua, mientras que la porción restante se difundirá hacia las profundidades de los sedimentos, en donde precipitará en forma de sulfuros (FeS amorfo, mackinawita, greigita, pirita, MnS), coprecipitando en el proceso gran parte de los metales traza en solución (e.g., Jacobs *et al.*, 1987; Morse y Arakaki, 1993; Huerta-Díaz *et al.*, 1998).

El porcentaje de incorporación de Fe al mineral pirita puede ser medido a través del grado de piritización (DOP, por sus siglas in inglés; Berner, 1970), el cual puede ser calculado a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{DOP}(\%) = \left( \frac{\text{Fe}_{\text{pir}}}{\text{Fe}_{\text{pir}} + \text{Fe}_{\text{HCl}}} \right) \times 100 \quad (1)$$

En donde  $\text{Fe}_{\text{HCl}}$  y  $\text{Fe}_{\text{Pir}}$  se refieren a los metales asociados a las fracciones HCl y pirita, respectivamente. De manera similar al DOP, el grado de asociación de los metales traza al mineral pirita puede ser medido a través de los grados de

piritización de metales traza (DTMP; Huerta-Díaz y Morse, 1990), los cuales pueden ser calculados a partir de la ecuación:

$$DTMP(\%) = \left( \frac{Me_{pir}}{Me_{pir} + Me_{HCl}} \right) \times 100 \quad (2)$$

En donde  $Me_{HCl}$  y  $Me_{pir}$  se refieren a los metales asociados a las fracciones HCl y pirita, respectivamente.

El conocimiento de la distribución de los metales traza en las principales fracciones geoquímicas de los sedimentos marinos es importante ya que esta asociación determinará si los metales van a ser preservados en los sedimentos, o reciclados de nuevo a través de su incorporación a la columna de agua. El reciclaje de metales traza es una función de la “labilidad” o “reactividad” de la fase mineral a la cual se encuentran asociados, por lo que la cuantificación de las masas elementales asociadas a las fracciones más “reactivas” del sedimento (e.g., pirita, oxihidróxidos metálicos) puede servir para evaluar los efectos de la acumulación y/o presencia de hidrocarburos (petróleo). Estudios realizados por Huerta-Díaz y Morse (1992) mostraron como sedimentos asociados con derrames crónicos de petróleo (e.g., Green Canyon) del GM (GDM) podían ser fácilmente distinguidos de los sedimentos profundos y de la plataforma continental del GDM combinando los valores de DTMP con los de DOP. Para el caso particular de Green Canyon, los valores de DTMP para Cd, Co, Cu, Mn, Pb y Ni fueron generalmente superiores a los obtenidos para sedimentos de la plataforma continental del GDM. La hipótesis central correspondiente a esta parte del estudio es que los hidrocarburos representan materia orgánica sumamente lábil que puede ser aprovechada fácilmente por las bacterias sulfato-reductoras, incrementándose en el proceso las tasas de reducción de sulfato y, como consecuencia, la formación de cantidades importantes de pirita y metales traza asociados (Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, V), lo cual podría ser observado a través de diagramas DOP vs. DTMP similares a los reportados por Huerta-Díaz y Morse (1992).

## Objetivos

El objetivo fundamental de este estudio fue cuantificar la pirita ( $FeS_2$ ) sedimentaria y metales traza asociados en los sedimentos profundos del GM para el establecimiento de una línea base de elementos traza en sedimentos y su aplicación a la detección de la posible intrusión de hidrocarburos.

## Metodología

En total se recolectaron 5 núcleos de los que se obtuvieron 67 muestras de sedimento continuas en el eje vertical de la profundidad. Se decidió procesar solo 5 núcleos de los 11 que se obtuvieron durante XIXIMI-2 dado que algunas de las estaciones también habían sido muestreadas durante XIXIMI-1. Para cada muestra se analizaron un total de siete metales (Cd, Co, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb) en la fracción HCl y los mismos siete elementos en la fracción pirita. Los núcleos sedimentarios fueron recolectados con un muestreador de caja, submuestreados con cilindros de plástico, extruidos y seccionados cada centímetro por medio de espátulas de plástico. Las muestras fueron congeladas en el barco y permanecieron congeladas hasta el momento de iniciar su procesamiento en el laboratorio.

Para el caso de los metales traza asociados a la pirita, se realizó una extracción secuencial química para obtener las fracciones operacionalmente definidas de ácido clorhídrico ( $Me_{HCl}$ ), silicatos y pirita ( $Me_{Pir}$ ) desarrollada por Huerta-Díaz y Morse (1990).

Este método consiste en la digestión de 2.5 g de sedimento seco durante 16 h con 20 mL de HCl 1N (fracción HCl, incluye carbonatos, óxidos de Fe y Mn, y monosulfuros de hierro), seguido de la eliminación de los aluminosilicatos (principalmente arcillas) con dos extracciones sucesivas (de 1 y 16 horas, respectivamente) con 30 mL de HF 10M (fracción silicatos), y finalmente la disolución del residuo resultante (fracción pirita) con 10 mL de HNO<sub>3</sub> concentrado durante una hora. La fracción de silicatos fue descartada ya que los metales traza asociados a esta fase mineral son considerados esencialmente como "no lábiles" (Huerta-Díaz y Morse, 1992), mientras que la suma de las fracciones HCl y pirita ( $Me_{FR} = Me_{HCl} + Me_{Pir}$ ) representan la fracción "reactiva" o "lábil" ( $Me_{FR}$ ) del sedimento.

Las mediciones de metales traza fueron realizadas por medio de espectrofotometría de absorción atómica a la flama (Varian modelo SpectrAA 220 Fast Sequential). Los límites de detección para cada una de las dos fracciones obtenidas se muestran en la Tabla 25. No se utilizaron materiales certificados de referencia (MCRs) para evaluar la exactitud de las extracciones dado que no existen MCRs disponibles para extracciones secuenciales químicas. La precisión analítica de la absorción atómica a la flama estuvo normalmente entre el 5 y el 10% ( $\pm$  desviación estándar relativa). Debido a problemas técnicos, no fue posible efectuar la medición de V, la cual se realizará en fecha posterior.

Tabla 25. Límites de detección para los diferentes metales traza en las fracciones HCl y pirita medidos con absorción atómica a la flama.

Elemento	Límite de detección (mg/L)	
	Fracción HCl	Fracción pirita
Cd	0.022	0.022
Co	0.042	0.037
Cu	0.027	0.019
Fe	0.028	0.076
Mn	0.019	0.097
Ni	0.037	0.031
Pb	0.035	0.075

## Resultados

Los resultados del crucero XIXIMI-2 serán descritos en conjunto con los obtenidos en el crucero anterior (XIXIMI-1) para tener una mejor perspectiva del comportamiento de los metales traza en los sedimentos profundos del GM (GDM). Para facilitar la comparación, la referencia a datos correspondientes a XIXIMI-1 y XIXIMI-2 será X-1-E (donde X-1 o X-2 representa el crucero y E el número de estación).

Las concentraciones promedio de metales traza en la fracción HCl ( $Me_{HCl}$ ) obtenidas en XIXIMI-2 estuvieron dentro de los rangos obtenidos en el primer crucero para esta misma fracción, excepto para el caso de  $Cu_{HCl}$ , el cual presentó valores máximos en la estación E17 para las muestras del segundo crucero (Tabla 26). En general y continuando la comparación con los comportamientos observados en XIXIMI-1, los perfiles de las concentraciones de  $Me_{HCl}$  (Figura 130) muestran que los valores generalmente se encuentran dispersos a lo largo de las diferentes estaciones, con los valores menores correspondiendo a las estaciones X-1-E27, X-1-E31 y X-1-E33 y los más elevados al resto de las estaciones. El rango de concentraciones obtenidas en la fracción HCl estuvo entre  $0.0010 \pm 0.0010 \mu\text{mol g}^{-1}$  (para Pb; estación X-1-E33) y  $162 \pm 54 \mu\text{mol g}^{-1}$  (para Fe; estación X-1-E19). De manera similar a los resultados obtenidos con la fracción



HCl, las concentraciones de la fracción pirita ( $Me_{pir}$ ) obtenidas en el segundo crucero se encontraron dentro del rango de concentraciones obtenido en XIXIMI-1 (Tabla 27), con los valores dispersos a lo largo de las diferentes estaciones (Figura 131). Continuando con la misma tendencia mostrada en el primer crucero, la fracción pirita generalmente presentó las mayores concentraciones en las estaciones X-1-E27, X-1-E31 y X-1-E33 (Tabla 27). Los valores promedio para los  $Me_{pir}$  se presentaron en el rango  $0.0013 \pm 0.0015 \mu\text{mol g}^{-1}$  (para Pb; estación X-1-E35) a  $7.2 \pm 2.2 \mu\text{mol g}^{-1}$  (para Fe; estación X-1-E27).

Tabla 26. Concentraciones promedio ( $\pm$  una desviación estándar) de metales traza en la fracción HCl para los diferentes sedimentos. Estaciones del primer crucero XIXIMI-1 en *itálicas*. Nota: nd = no detectable.

<b>Metales traza (<math>\mu\text{mol g}^{-1}</math>)</b>				
<b>Estación</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Cd</b>
X-2-E2	18 $\pm$ 10	43 $\pm$ 19	0.158 $\pm$ 0.065	0.00075 $\pm$ 0.00055
X-2-E5	4.9 $\pm$ 3.3	23 $\pm$ 18	0.184 $\pm$ 0.095	0.0011 $\pm$ 0.0011
X-2-E10	3.8 $\pm$ 2.5	22 $\pm$ 17	0.17 $\pm$ 0.11	0.00134 $\pm$ 0.00094
X-2-E17	14.3 $\pm$ 9.4	43.8 $\pm$ 8.7	0.276 $\pm$ 0.047	Nd
X-2-E24	3.9 $\pm$ 4.5	61 $\pm$ 82	0.12 $\pm$ 0.13	Nd
<i>X-1-E3</i>	<i>7.4 <math>\pm</math> 4.9</i>	<i>26 <math>\pm</math> 17</i>	<i>0.19 <math>\pm</math> 0.07</i>	<i>0.017 <math>\pm</math> 0.002</i>
<i>X-1-E15</i>	<i>45 <math>\pm</math> 35</i>	<i>90 <math>\pm</math> 12</i>	<i>0.27 <math>\pm</math> 0.05</i>	<i>0.012 <math>\pm</math> 0.002</i>
<i>X-1-E19</i>	<i>9.7 <math>\pm</math> 7.3</i>	<i>162 <math>\pm</math> 54</i>	<i>0.24 <math>\pm</math> 0.03</i>	<i>0.011 <math>\pm</math> 0.003</i>
<i>X-1-E27</i>	<i>1.3 <math>\pm</math> 1.2</i>	<i>0.14 <math>\pm</math> 0.01</i>	<i>0.022 <math>\pm</math> 0.005</i>	<i>0.018 <math>\pm</math> 0.001</i>
<i>X-1-E31</i>	<i>0.67 <math>\pm</math> 0.20</i>	<i>0.15 <math>\pm</math> 0.02</i>	<i>0.019 <math>\pm</math> 0.001</i>	<i>0.017 <math>\pm</math> 0.001</i>
<i>X-1-E33</i>	<i>1.5 <math>\pm</math> 1.0</i>	<i>0.21 <math>\pm</math> 0.17</i>	<i>0.042 <math>\pm</math> 0.041</i>	<i>0.016 <math>\pm</math> 0.007</i>
<i>X-1-E35</i>	<i>25 <math>\pm</math> 16</i>	<i>71 <math>\pm</math> 25</i>	<i>0.15 <math>\pm</math> 0.05</i>	<i>0.015 <math>\pm</math> 0.002</i>
<i>X-1-E36</i>	<i>46 <math>\pm</math> 50</i>	<i>72 <math>\pm</math> 21</i>	<i>0.20 <math>\pm</math> 0.05</i>	<i>0.013 <math>\pm</math> 0.001</i>
<i>X-1-E40</i>	<i>22 <math>\pm</math> 11</i>	<i>100 <math>\pm</math> 15</i>	<i>0.19 <math>\pm</math> 0.04</i>	<i>0.010 <math>\pm</math> 0.001</i>
<i>X-1-E43</i>	<i>20 <math>\pm</math> 8</i>	<i>49 <math>\pm</math> 13</i>	<i>0.21 <math>\pm</math> 0.04</i>	<i>0.015 <math>\pm</math> 0.001</i>
<b>Estación</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>V</b>
X-2-E02	0.107 $\pm$ 0.013	0.244 $\pm$ 0.034	0.028 $\pm$ 0.014	-----
X-2-E05	0.106 $\pm$ 0.018	0.184 $\pm$ 0.055	0.021 $\pm$ 0.012	-----
X-2-E10	0.103 $\pm$ 0.010	0.171 $\pm$ 0.055	0.018 $\pm$ 0.012	-----
X-2-E17	0.117 $\pm$ 0.018	0.231 $\pm$ 0.042	0.0271 $\pm$ 0.0093	-----
X-2-E24	0.0986 $\pm$ 0.0082	0.120 $\pm$ 0.046	0.016 $\pm$ 0.019	-----
<i>X-1-E3</i>	<i>0.15 <math>\pm</math> 0.02</i>	<i>0.25 <math>\pm</math> 0.06</i>	<i>0.022 <math>\pm</math> 0.011</i>	<i>0.044 <math>\pm</math> 0.014</i>
<i>X-1-E15</i>	<i>0.17 <math>\pm</math> 0.03</i>	<i>0.33 <math>\pm</math> 0.07</i>	<i>0.042 <math>\pm</math> 0.018</i>	<i>0.22 <math>\pm</math> 0.08</i>
<i>X-1-E19</i>	<i>0.14 <math>\pm</math> 0.01</i>	<i>0.22 <math>\pm</math> 0.03</i>	<i>0.027 <math>\pm</math> 0.008</i>	<i>0.079 <math>\pm</math> 0.040</i>
<i>X-1-E27</i>	<i>0.12 <math>\pm</math> 0.01</i>	<i>0.15 <math>\pm</math> 0.02</i>	<i>0.0017 <math>\pm</math> 0.0013</i>	<i>0.0012 <math>\pm</math> 0.0011</i>
<i>X-1-E31</i>	<i>0.13 <math>\pm</math> 0.01</i>	<i>0.138 <math>\pm</math> 0.005</i>	<i>nd</i>	<i>0.00091 <math>\pm</math> 0.00032</i>
<i>X-1-E33</i>	<i>0.16 <math>\pm</math> 0.09</i>	<i>0.21 <math>\pm</math> 0.14</i>	<i>0.0010 <math>\pm</math> 0.0010</i>	<i>0.0030 <math>\pm</math> 0.0018</i>
<i>X-1-E35</i>	<i>0.16 <math>\pm</math> 0.02</i>	<i>0.34 <math>\pm</math> 0.05</i>	<i>0.036 <math>\pm</math> 0.020</i>	<i>0.18 <math>\pm</math> 0.09</i>
<i>X-1-E36</i>	<i>0.16 <math>\pm</math> 0.01</i>	<i>0.36 <math>\pm</math> 0.06</i>	<i>0.027 <math>\pm</math> 0.011</i>	<i>0.11 <math>\pm</math> 0.08</i>
<i>X-1-E40</i>	<i>0.18 <math>\pm</math> 0.01</i>	<i>0.32 <math>\pm</math> 0.06</i>	<i>0.036 <math>\pm</math> 0.009</i>	<i>0.27 <math>\pm</math> 0.10</i>
<i>X-1-E43</i>	<i>0.17 <math>\pm</math> 0.01</i>	<i>0.37 <math>\pm</math> 0.05</i>	<i>0.027 <math>\pm</math> 0.006</i>	<i>0.052 <math>\pm</math> 0.036</i>

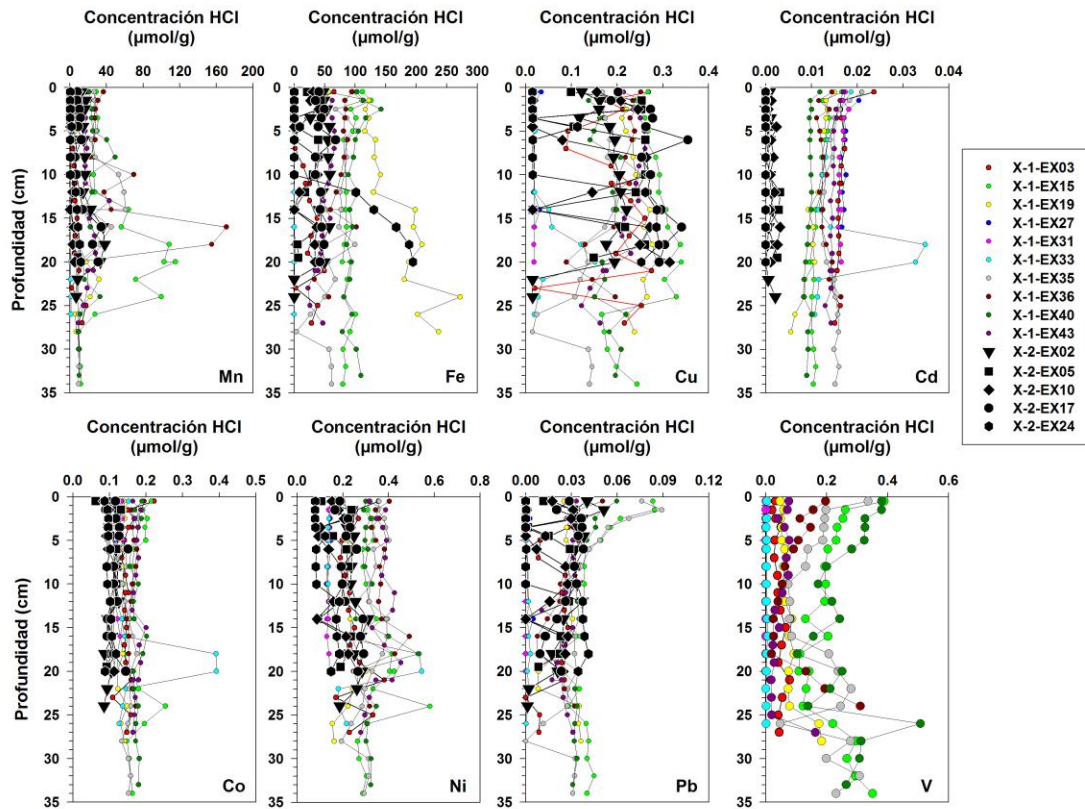


Figura 130. Perfiles de las concentraciones de metales asociados a la fracción HCl ( $Me_{HCl}$ ) para sedimentos de las diferentes estaciones del GM.

Tabla 27. Concentraciones promedio ( $\pm$  una desviación estándar) de metales traza asociados a la fracción pirita para los sedimentos de las diferentes estaciones del crucero XIXIMI-2. Como referencia, se muestran las concentraciones obtenidas durante el primer crucero XIXIMI-1 en *itálicas*.

<b>Metales traza (<math>\mu\text{mol g}^{-1}</math>)</b>				
<b>Estación</b>	<b>Mn</b>	<b>Fe</b>	<b>Cu</b>	<b>Cd</b>
X-2-E2	0.149 $\pm$ 0.074	1.35 $\pm$ 0.44	0.013 $\pm$ 0.011	0.0014 $\pm$ 0.0015
X-2-E5	0.132 $\pm$ 0.063	0.96 $\pm$ 0.38	0.0193 $\pm$ 0.0095	0.0018 $\pm$ 0.0004
X-2-E10	0.106 $\pm$ 0.049	0.75 $\pm$ 0.35	0.0196 $\pm$ 0.0077	0.0015 $\pm$ 0.0007
X-2-E17	0.152 $\pm$ 0.062	0.89 $\pm$ 0.32	0.0151 $\pm$ 0.0077	0.0012 $\pm$ 0.0003
X-2-E24	0.108 $\pm$ 0.056	1.9 $\pm$ 1.3	0.0157 $\pm$ 0.0081	0.00073 $\pm$ 0.00016
<i>X-1-E3</i>	<i>0.19 <math>\pm</math> 0.17</i>	<i>1.1 <math>\pm</math> 0.4</i>	<i>0.019 <math>\pm</math> 0.007</i>	<i>0.0034 <math>\pm</math> 0.0005</i>
<i>X-1-E15</i>	<i>2.1 <math>\pm</math> 4.4</i>	<i>1.0 <math>\pm</math> 0.4</i>	<i>0.033 <math>\pm</math> 0.036</i>	<i>0.0032 <math>\pm</math> 0.0005</i>
<i>X-1-E19</i>	<i>0.7 <math>\pm</math> 2.2</i>	<i>0.55 <math>\pm</math> 0.35</i>	<i>0.023 <math>\pm</math> 0.009</i>	<i>0.0029 <math>\pm</math> 0.0005</i>
<i>X-1-E27</i>	<i>0.54 <math>\pm</math> 0.60</i>	<i>7.2 <math>\pm</math> 2.2</i>	<i>0.017 <math>\pm</math> 0.004</i>	<i>0.0069 <math>\pm</math> 0.0004</i>
<i>X-1-E31</i>	<i>0.092 <math>\pm</math> 0.033</i>	<i>2.6 <math>\pm</math> 0.7</i>	<i>0.032 <math>\pm</math> 0.007</i>	<i>0.0068 <math>\pm</math> 0.0005</i>
<i>X-1-E33</i>	<i>0.11 <math>\pm</math> 0.08</i>	<i>3.0 <math>\pm</math> 1.4</i>	<i>0.041 <math>\pm</math> 0.013</i>	<i>0.0064 <math>\pm</math> 0.0011</i>
<i>X-1-E35</i>	<i>0.10 <math>\pm</math> 0.11</i>	<i>1.8 <math>\pm</math> 1.0</i>	<i>0.038 <math>\pm</math> 0.028</i>	<i>0.0044 <math>\pm</math> 0.0005</i>
<i>X-1-E36</i>	<i>0.14 <math>\pm</math> 0.12</i>	<i>1.6 <math>\pm</math> 0.8</i>	<i>0.029 <math>\pm</math> 0.029</i>	<i>0.0047 <math>\pm</math> 0.0007</i>
<i>X-1-E40</i>	<i>0.19 <math>\pm</math> 0.44</i>	<i>1.5 <math>\pm</math> 0.2</i>	<i>0.037 <math>\pm</math> 0.021</i>	<i>0.0042 <math>\pm</math> 0.0001</i>
<i>X-1-E43</i>	<i>0.17 <math>\pm</math> 0.08</i>	<i>1.4 <math>\pm</math> 0.5</i>	<i>0.034 <math>\pm</math> 0.023</i>	<i>0.0041 <math>\pm</math> 0.0006</i>
<b>Estación</b>	<b>Co</b>	<b>Ni</b>	<b>Pb</b>	<b>V</b>
X-2-E2	0.0239 $\pm$ 0.0058	0.0075 $\pm$ 0.0037	0.0048 $\pm$ 0.0026	-----
X-2-E5	0.0218 $\pm$ 0.0069	0.0089 $\pm$ 0.0056	0.0067 $\pm$ 0.0073	-----
X-2-E10	0.0154 $\pm$ 0.0061	0.0160 $\pm$ 0.0046	0.0062 $\pm$ 0.0063	-----
X-2-E17	0.058 $\pm$ 0.0037	0.0068 $\pm$ 0.0030	0.0036 $\pm$ 0.0027	-----
X-2-E24	0.0268 $\pm$ 0.0071	0.0102 $\pm$ 0.0048	0.0094 $\pm$ 0.0057	-----
<i>X-1-E3</i>	<i>0.022 <math>\pm</math> 0.004</i>	<i>0.028 <math>\pm</math> 0.004</i>	<i>0.0043 <math>\pm</math> 0.0024</i>	<i>0.0051 <math>\pm</math> 0.0015</i>
<i>X-1-E15</i>	<i>0.021 <math>\pm</math> 0.006</i>	<i>0.030 <math>\pm</math> 0.007</i>	<i>0.0040 <math>\pm</math> 0.0042</i>	<i>0.024 <math>\pm</math> 0.043</i>
<i>X-1-E19</i>	<i>0.012 <math>\pm</math> 0.007</i>	<i>0.028 <math>\pm</math> 0.004</i>	<i>0.0030 <math>\pm</math> 0.0051</i>	<i>0.013 <math>\pm</math> 0.026</i>
<i>X-1-E27</i>	<i>0.047 <math>\pm</math> 0.003</i>	<i>0.056 <math>\pm</math> 0.003</i>	<i>0.0082 <math>\pm</math> 0.0024</i>	<i>0.017 <math>\pm</math> 0.009</i>
<i>X-1-E31</i>	<i>0.040 <math>\pm</math> 0.006</i>	<i>0.054 <math>\pm</math> 0.005</i>	<i>0.015 <math>\pm</math> 0.004</i>	<i>0.010 <math>\pm</math> 0.003</i>
<i>X-1-E33</i>	<i>0.037 <math>\pm</math> 0.010</i>	<i>0.051 <math>\pm</math> 0.010</i>	<i>0.0095 <math>\pm</math> 0.0029</i>	<i>0.012 <math>\pm</math> 0.006</i>
<i>X-1-E35</i>	<i>0.021 <math>\pm</math> 0.005</i>	<i>0.039 <math>\pm</math> 0.008</i>	<i>0.0013 <math>\pm</math> 0.0015</i>	<i>0.0043 <math>\pm</math> 0.0018</i>
<i>X-1-E36</i>	<i>0.025 <math>\pm</math> 0.009</i>	<i>0.038 <math>\pm</math> 0.008</i>	<i>0.0041 <math>\pm</math> 0.0032</i>	<i>0.0032 <math>\pm</math> 0.0014</i>
<i>X-1-E40</i>	<i>0.030 <math>\pm</math> 0.004</i>	<i>0.039 <math>\pm</math> 0.004</i>	<i>0.0032 <math>\pm</math> 0.0019</i>	<i>0.0067 <math>\pm</math> 0.0015</i>
<i>X-1-E43</i>	<i>0.027 <math>\pm</math> 0.005</i>	<i>0.038 <math>\pm</math> 0.004</i>	<i>0.0049 <math>\pm</math> 0.0023</i>	<i>0.0032 <math>\pm</math> 0.0018</i>

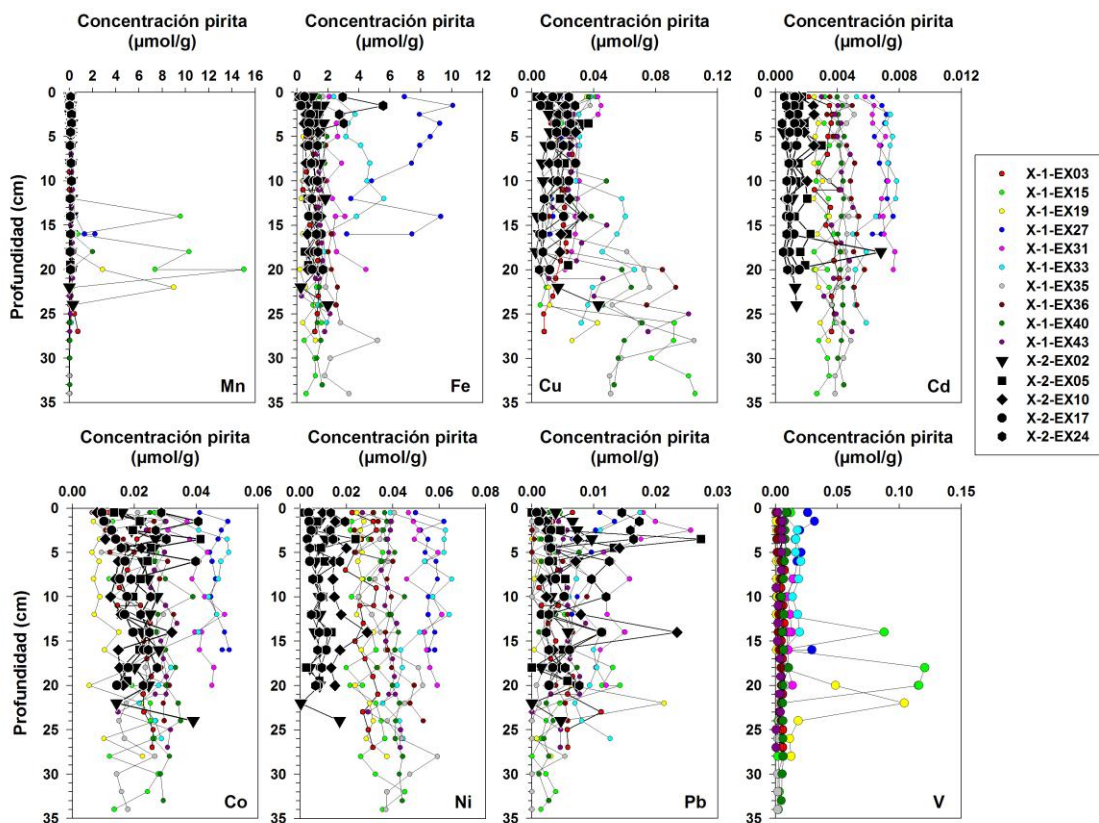


Figura 131. Perfiles de las concentraciones de metales asociados a la fracción pirita ( $Me_{pir}$ ) para sedimentos de las diferentes estaciones del GM.

Los perfiles de DOP y de DTMP (Figura 132) muestran la existencia de un grupo de estaciones que generalmente presentan sedimentos con valores elevados de piritización (X-1-E27, X-1-E31 y X-1-E33) y un segundo grupo con valores relativamente bajos (el resto de las estaciones, incluidas las de XIXIMI-2). La existencia del primer grupo es una consecuencia de los valores bajos de  $Me_{HCl}$  y altos de  $Me_{pir}$  que consistentemente fueron medidos para estas tres estaciones. Sin embargo, las estaciones recolectadas durante XIXIMI-2 presentaron valores de DOP cercanos al 100% en profundidad (X-2-E2), a profundidad media (X-2-E5 y X-2-E10), y a profundidad somera (X-2-E24). La única estación que consistentemente presentó valores bajos de DOP a lo largo de todo el núcleo fue la estación X-2-E17 (Figura 132). La consistencia en valores elevados de DOP y DTMP de las estaciones X-1-E27, X-1-E31 y X-1-E33 se puede ver más claramente en la Figura 133, en la cual se arreglaron las estaciones en orden creciente de DOP y DTMP. En esta figura también se puede observar que los únicos metales que llegaron a alcanzar valores promedio de piritización cercanos a 100% para algunas de las estaciones fueron Fe, Pb y Cd. La Figura 134 muestra

como, en general, los valores elevados de DOP corresponden con valores elevados de DTMP, indicando que la incorporación de metales traza a la piritita aumenta conforme aumenta la piritización de los sedimentos, especialmente cuando los valores de DOP son cercanos al 100%. Esta tendencia se pudo observar tanto en las estaciones de XIXIMI-1 como en las de XIXIMI-2 (Figura 134).

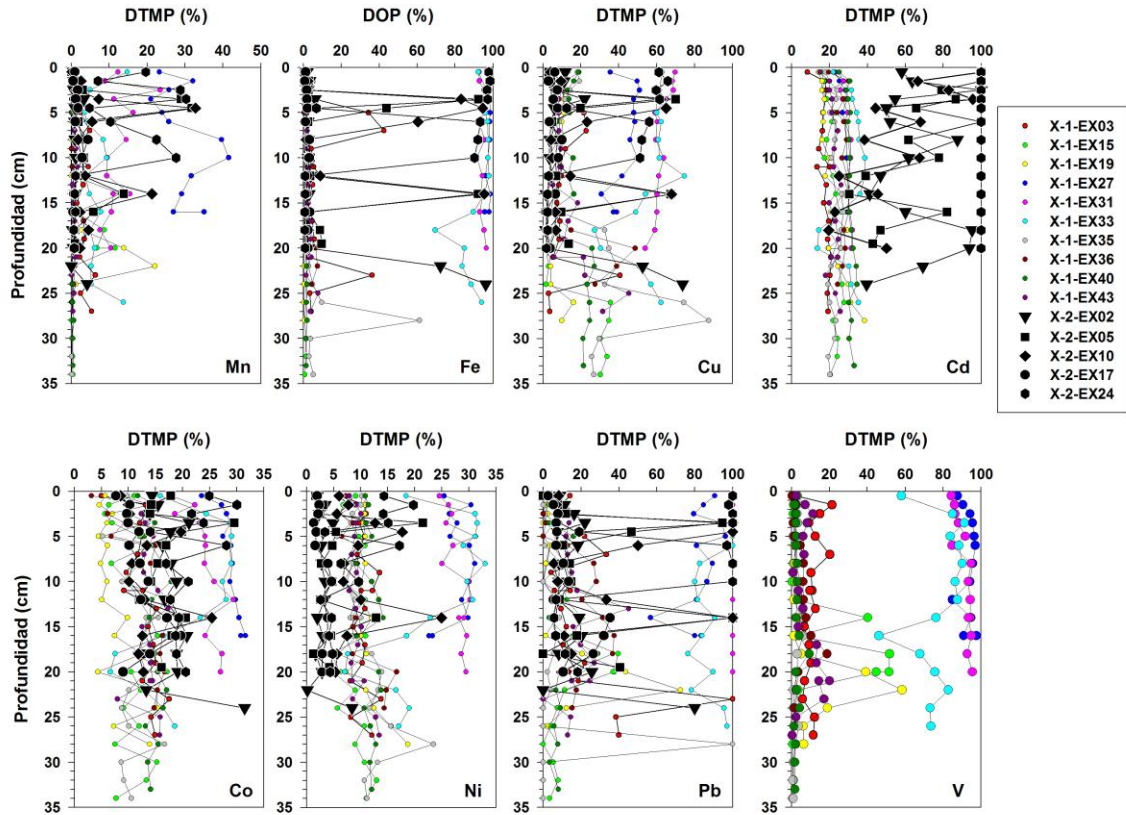


Figura 132. Perfiles de valores de grados de piritización (para Fe) y de grados de piritización de metales traza (para el resto de los elementos traza) para sedimentos de las diferentes estaciones del GM.

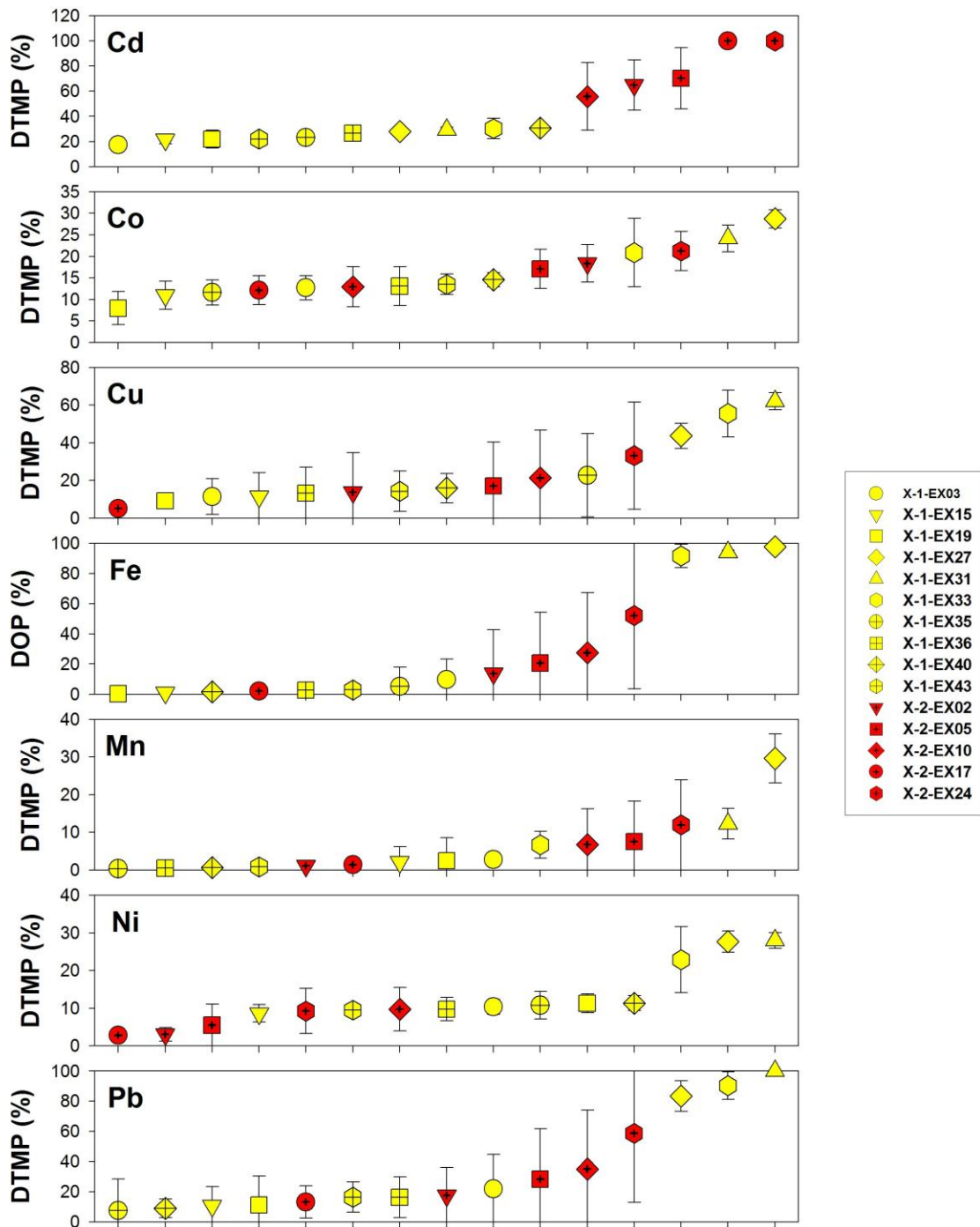


Figura 133. Valores promedio ( $\pm$  una desviación estándar) de grados de pirritización (DOP) y grados de pirritización de metales traza (DTMP) arreglados en orden creciente de magnitud.

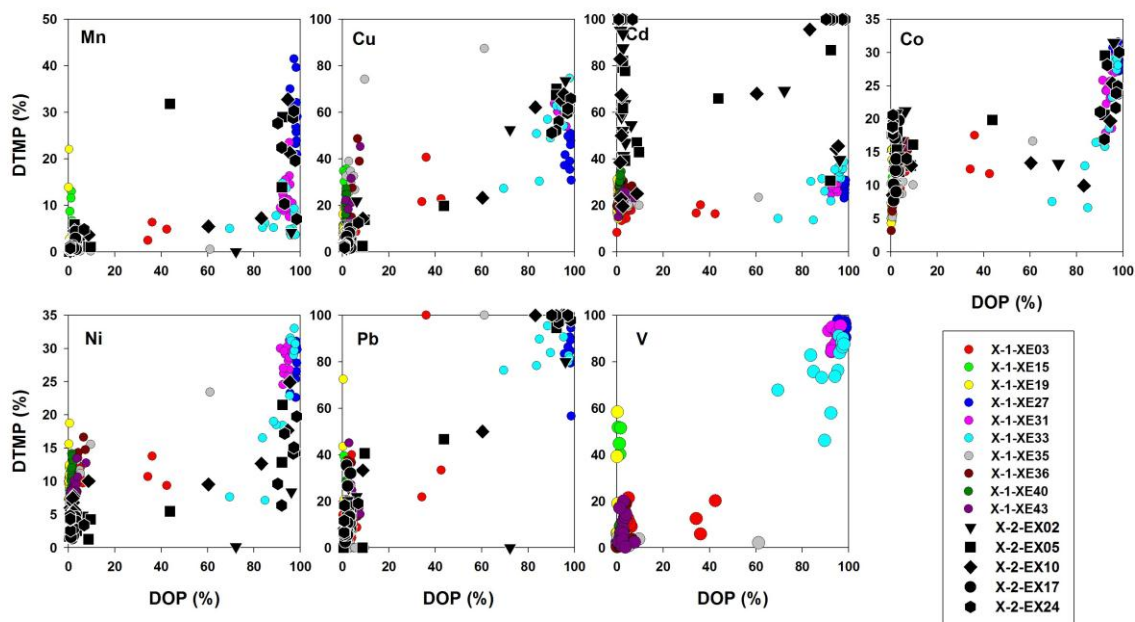


Figura 134. Grados de piritización (DOP) graficados contra los grados de piritización de metales traza (DTMP) para Mn, Cu, Cd, Co, Ni, Pb y V y para las diferentes estaciones muestreadas en el GM (XIXIMI-1 y XIXIMI-2).

Los elevados porcentajes de DOP observados en las estaciones X-1-E27, X-1-E31, X-1-E33 y, hasta cierto punto, X-2-E24 pueden ser ocasionados por: (1) la presencia de concentraciones elevadas de materia orgánica lábil (*poco probable* dada la profundidad a la que fueron recolectados los sedimentos); (2) por la falta de Fe reactivo, representado en este caso por la suma de  $Me_{HCl} + Me_{pir}$  (*probable*); (3) debido a la dilución por carbonatos o por aportes terrígenos al sedimento (*probable*). Las cuatro estaciones que mostraron los valores más elevados de DOP y de DTMP fueron recolectados cerca de (X-2-E24) o al borde de la plataforma continental de la Península de Yucatán (X-1-E27, X-1-E31, X-1-E33); estos sedimentos contienen elevadas concentraciones de carbonato de calcio (rango de  $47 \pm 3$  a  $75 \pm 3$  %, estaciones X-1-E33 y X-1-E27, respectivamente) de acuerdo a Juan Carlos Herguera (comunicación personal). Como comparación, los sedimentos recolectados en las afueras de la plataforma continental de Yucatán presentaron concentraciones promedio de  $CaCO_3$  de entre  $20 \pm 1$  y  $37 \pm 2$  % (Juan Carlos Herguera, comunicación personal). El carbonato de calcio actúa como diluyente en los sedimentos, disminuyendo la concentración de Fe (*i.e.*,  $Fe_{HCl}$ ) y del carbono orgánico disponible para la formación de pirita (Berner, 1984). Combinando los valores de DOP con los de carbonato (Figura 135) se puede apreciar que los valores promedio más elevados de DOP ( $92 \pm 8$ ,  $94 \pm 1$  y  $98 \pm 1$  % para las estaciones X-1-E33, X-1-E31 y X-1-E27, respectivamente) corresponden a las menores concentraciones de  $Fe_{HCl}$  ( $0.14 \pm 0.01$ ,  $0.15 \pm 0.02$  y  $0.21 \pm 0.17 \mu\text{mol g}^{-1}$  para las estaciones X-1-E27, X-1-E31 y X-1-E33, respectivamente) y con los contenidos más elevados de carbonato de calcio.



Sin embargo, también es muy posible que los valores bajos de DOP ( $0.34 \pm 0.16$  a  $10 \pm 13\%$ ) para las estaciones de aguas profundas sea una consecuencia de la falta de materia orgánica lábil. La materia orgánica que llega a la superficie del sedimento, después de viajar a lo largo de la columna de agua desde la zona fótica, es sumamente refractaria ya que es remineralizada considerablemente durante su largo viaje desde la superficie del mar (Hedges et al., 1999). Una vez en la superficie del sedimento y dadas las bajas tasas de sedimentación presentes en los sedimentos de aguas profundas, la materia orgánica es sujeta a degradación adicional durante su larga estancia en los sedimentos superficiales, ya que se encuentra en contacto permanente con las aguas oxigenadas sobreyacentes (Hedges et al., 1999). Nuestros resultados muestran, por un lado, la existencia de sedimentos altamente piritizados como consecuencia de la dilución de sus contenidos de Fe reactivo y materia orgánica lábil por los carbonatos y, por otro lado, la existencia de sedimentos poco piritizados (a pesar de la abundancia de Fe reactivo) como consecuencia de la falta de materia orgánica lábil en los sedimentos profundos. Sin embargo, es importante enfatizar que, a pesar del efecto de dilución producido por el aporte de carbonatos, los sedimentos recolectados cerca de la plataforma continental de Yucatán muestran concentraciones que son significativamente más elevadas que las medidas en los sedimentos profundos lejos de la plataforma (Figura 136).

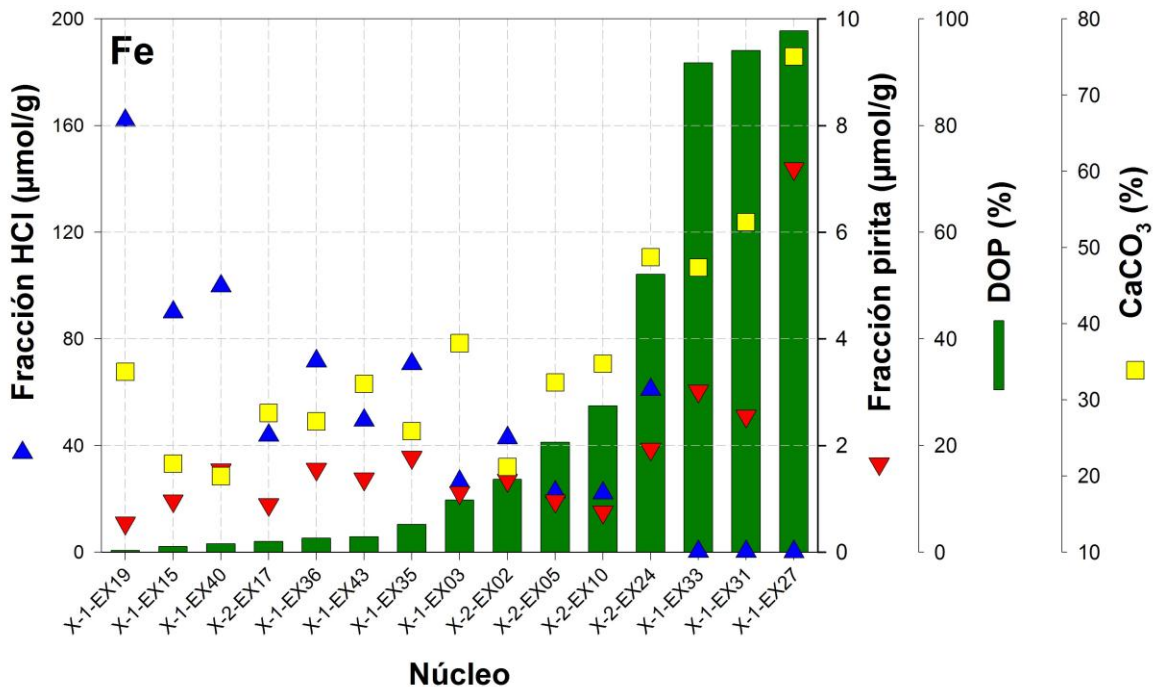


Figura 135. Valores promedio de las concentraciones de carbonato de calcio (datos proporcionados por Juan Carlos Herguera) y hierro en las fracciones HCl y pirita, así como los valores promedio de grados de

piritización (DOP) correspondientes a las diferentes estaciones del GM. Las barras de error se omitieron para una mayor claridad. Los datos fueron ordenados en orden de DOP creciente.

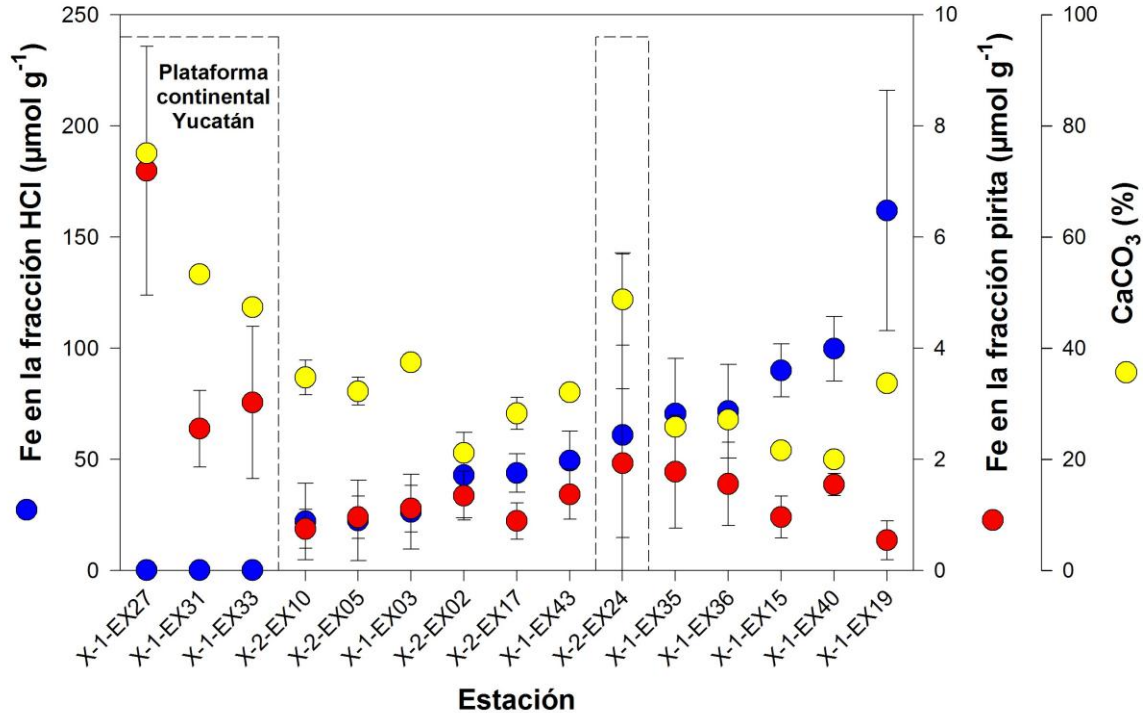


Figura 136. Valores promedio de carbonato de calcio (datos proporcionados por Juan Carlos Herguera) y de las fracciones HCl y pirita para las diferentes estaciones del GM recolectadas durante los crueros XIXIMI-1 y XIXIMI-2. Las estaciones recolectadas cerca de o en la plataforma continental de la Península de Yucatán se encuentran comprendidas dentro de las áreas demarcadas por las líneas discontinuas.

La relación obtenida entre las concentraciones promedio de la fracción HCl y las de la fracción pirita que fue observada para las estaciones del crucero XIXIMI-1 también se conservó para las estaciones combinadas de este crucero y XIXIMI-2, como se puede observar en la Figura 137, en donde se graficó el logaritmo de las concentraciones de ambas fracciones. Se utilizó el logaritmo de las concentraciones debido al amplio rango de concentraciones involucradas, que abarcaron hasta cuatro órdenes de magnitud (Figura 137). La linealización utilizando todas las estaciones fue altamente significativa ( $r^2 = 0.63$ ,  $n = 104$ ,  $p \leq 0.001$ ) y dio como resultado la siguiente ecuación:

$$\log(\text{Me}_{\text{pir}}) = (0.550 \pm 0.042)\log(\text{Me}_{\text{HCl}}) - (1.133 \pm 0.057) \quad (3)$$

Sin embargo, la remoción de las estaciones carbonatadas (X-1-X31, X-1-E33, X-1-E35) del cálculo de regresión lineal mejoró de manera importante la

correlación ( $r^2 = 0.75$ ,  $n = 81$ ,  $p \leq 0.001$ ), dando como resultado la siguiente ecuación:

$$\log(\text{Me}_{\text{pir}}) = (0.603 \pm 0.040)\log(\text{Me}_{\text{HCl}}) - (1.184 \pm 0.052) \quad (4)$$

Comparación de las ecuaciones (3) y (4) nos indican que existe una mayor dispersión de los datos cuando las estaciones carbonatadas son consideradas y también que existe una importante dispersión en los valores de los metales traza, lo que sugiere la existencia de una elevada heterogeneidad en los ambientes sedimentarios del GM. Los resultados obtenidos sugieren que los valores medidos de Fe pirítico y Fe-HCl (y metales traza asociados) corresponden a lo que podríamos denominar como línea base de metales y elementos traza reactivos para los diferentes ambientes sedimentarios del GM. La inclusión de los sedimentos obtenidos en XIXIMI-2 reforzaron los resultados obtenidos con los datos correspondientes a los análisis de XIXIMI-1.

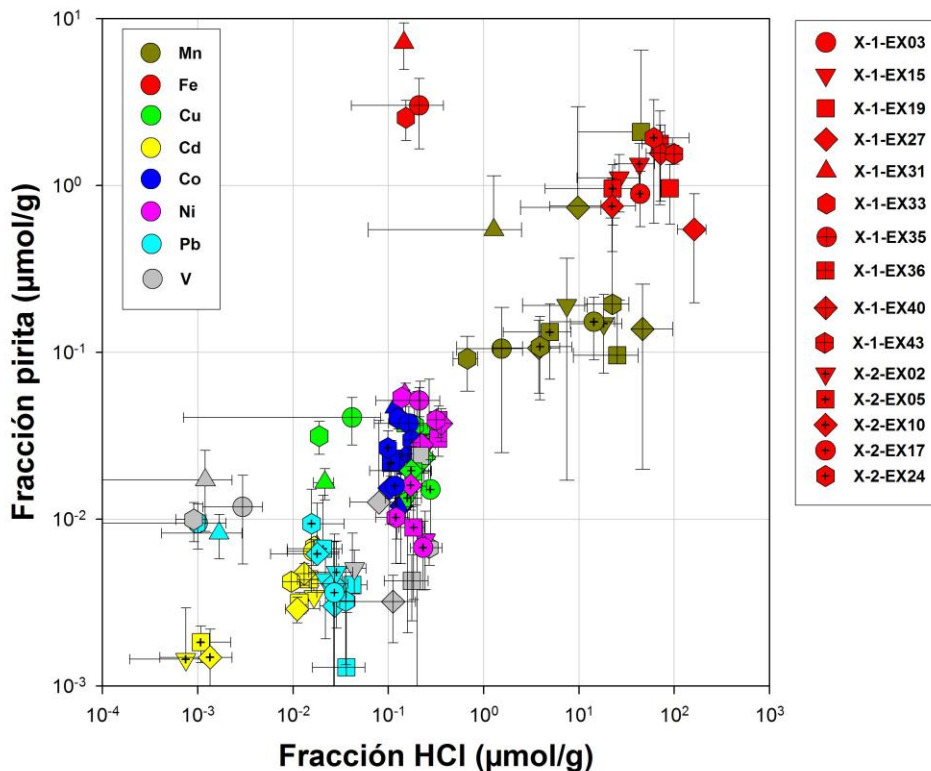


Figura 137. Valores promedio de las concentraciones metales traza en las fracciones HCl y pirita correspondientes a las diferentes estaciones del GM. Nótese la escala logarítmica en ambos ejes de la gráfica.

Como se mencionó en el informe anterior, las concentraciones de estos metales son extraordinariamente bajas cuando se les compara con sedimentos de otras regiones oceánicas o incluso con el mismo GM. La inclusión de las nuevas estaciones obtenidas en XIXIMI-2 no modificó los resultados mostrados en la Figura 138, en donde las concentraciones máximas de Fe pirítico son comparadas con valores máximos de otras zonas del GM y con sedimentos de otras regiones oceánicas. De hecho, los valores máximos de Fe pirítico obtenidos en XIXIMI-2 fueron menores a los obtenidos en XIXIMI-1. La Figura 138 nos muestra que los valores de Fe pirítico medidos en nuestra zona de estudio son sumamente bajos comparados con los otros ambientes sedimentarios. De hecho esta característica se puede extender a los otros metales traza, lo que indica que la línea base de estos elementos en los sedimentos profundos el GM también es sumamente baja en relación a otros sedimentos oceánicos.

Ver Anexo 12.

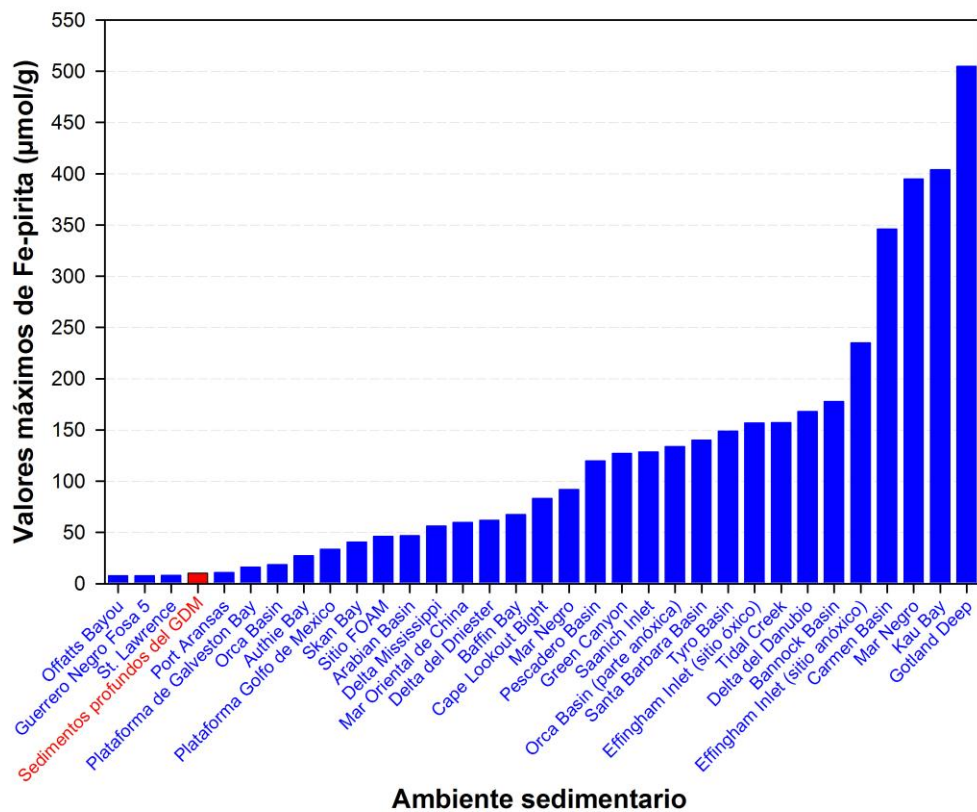


Figura 138. Valores máximos de las concentraciones de Fe pirítico en diferentes ambientes sedimentarios: Offatts Bayou, Port Aransas, plataforma de Galveston Bay, Orca Basin, plataforma GDM (GM), Skan Bay, Sitio FOAM, Delta Mississippi, Baffin Bay, Cape Lookout Bight, Saanich Inlet, Tidal Creek (Cooper y Morse,

1996); Guerrero Negro Fosa 5, (Huerta-Díaz et al., 2011); Green Canyon (derrame crónico de petróleo; Huerta-Díaz y Morse, 1992); St. Lawrence (Morse y Cornwell, 1987); Sedimentos profundos del GDM (este estudio); Authie Bay (Norte de Francia; Billon et al., 2001); Arabian Basin (núcleo 484BC; Passier et al., 1997); Mar Oriental de China (Lin et al., 2000); Delta del Dniester (Wijsman et al., 2001); Mar Negro (Lyons, 1997); Pescadero Basin (Golfo de California; Goldhaber y Kaplan, 1980); Orca Basin (parte anóxica; Hurtgen et al., 1999); Santa Barbara Basin (Kaplan et al., 1963); Tyro Basin (Mar Mediterráneo, sulfídico, hipersalino; Henneke et al., 1997); Effingham Inlet (sitio óxico, Hurtgen et al., 1999); Delta del Danubio (Wijsman et al., 2001); Bannock Basin (Mar Mediterráneo, sulfídico, hipersalino; Henneke et al., 1997); Effingham Inlet (sitio anóxico; Hurtgen et al., 1999); Carmen Basin (Golfo de California; Goldhaber y Kaplan, 1980); Mar Negro (Wijsman et al., 2001); Kau Bay (Middelburg, 1991); Gotland Deep (Mar Báltico; Boesen y Postma, 1988).

## Conclusiones

Las conclusiones a las que se llegó en base a los datos obtenidos con la adición de los sedimentos recolectados en XIXIMI-2 son esencialmente las mismas que se obtuvieron con los resultados de XIXIMI-1:

Las concentraciones de las fracciones HCl, pirita y los valores de DOP y DTMP sugieren dos tipos de limitaciones en la formación de pirita en los sedimentos:

1) Limitación por disponibilidad de Fe lábil ( $Fe_{HCl}$  en los sedimentos de las estaciones XI-1-E33, XI-1-E31 y XI-1-E27).

2) Limitación por la disponibilidad de materia orgánica lábil para el resto de los núcleos de la llanura abisal del GDM.

La abundancia de metales traza reactivos ( $Me_{HCl}$ ) en los sedimentos limitados por materia orgánica lábil sugiere que los aportes de petróleo, que representarían materia orgánica reactiva, podrían incrementar las concentraciones de pirita en los sedimentos. Este incremento a su vez propiciaría un incremento en las concentraciones de metales traza asociados a este mineral ( $Me_{pir}$ ) y, por ende, también incrementaría los grados piritización de metales traza.

Las concentraciones medidas de Fe asociado a la fracción pirita son sumamente bajas cuando se las compara con las reportadas para otros ambientes sedimentarios marinos.

La dispersión observada en los valores promedio de metales asociados a las fracciones HCl y pirita indica la existencia de diferentes ambientes en los sedimentos profundos del GM.

## Recomendaciones

Los resultados obtenidos indican que el tipo de sedimento más sensible a los efectos ocasionados por un posible derrame de petróleo sería el carbonatado, el cual de manera natural posee contenidos bajos de materia orgánica lábil y Fe reactivo. Dada la dificultad y costo asociado a la recolección de núcleos de sedimentos profundos, el monitoreo de metales traza en sedimentos carbonatados parece ser la opción más adecuada para la implementación de un Programa Nacional de Monitoreo y para la obtención de un marco de referencia a través de la elaboración de líneas base de metales traza en sedimentos del GM.

## Referencias

- Belzile N., De Vitre R.R. y Tessier A. (1989) *In situ* collection of diagenetic iron and manganese oxyhydroxides from natural sediments. *Nature* 340, 376-377.
- Berner R.A. (1964) Stability fields of iron minerals in anaerobic marine sediments. *J. Geol.* 72, 826-834.
- Berner R.A. (1970) Sedimentary pyrite formation. *Amer. J. Sci.* 268, 1-23.
- Berner R.A. (1980) A rate model for organic matter decomposition during bacterial sulfate reduction in marine sediments. In: *Colloques Internationaux du C.N.R.S., No. 293 - Biogéochimie de la Matière Organique à L'interface Eau-Sédiment Marin*, pp. 35-44.
- Berner R.A. (1981) Authigenic mineral formation resulting from organic matter decomposition in modern sediments. *Fortsch. Miner.* 59, 117-135.
- Bindler R., Renberg I., Anderson N.J., Appleby P.G., Emteryd O. y Boyle J. (2001) Pb isotope ratios of lake sediments in West Greenland: inferences on pollution sources. *Atmos. Environ.* 35, 4675-4685.
- Berner R.A. (1984) Sedimentary pyrite formation: An update. *Geochim. Cosmochim. Acta* 48, 605-615.

- Billon G., Ouddane B. y Boughriet A. (2001) Chemical speciation of sulfur compounds in surface sediments from three bays (Fresnaye, Seine and Authie) in northern France, and identification of some factors controlling their generation. *Talanta* 53, 971-981.
- Boesen C. y Postma D. (1988) Pyrite formation in anoxic environments of the Baltic. *Amer. J. Sci.* 288, 575-603.
- Cooper D.C. y Morse J.W. (1996) The chemistry of Offatts Bayou, Texas: A seasonally highly sulfidic basin. *Estuaries* 19, 595-611.
- Goldhaber M.B. y Kaplan I.R. (1980) Mechanisms of sulfur incorporation and isotope fractionation during early diagenesis in sediments of the Gulf of California. *Mar. Chem.* 9, 95-143.
- Hedges J.I., Hu F.S., Devol A.H., Hartnett H.E., Tsamakis E. y Keil R.G. (1999) Sedimentary organic matter preservation: a test for selective degradation under oxic conditions. *Am. J. Sci.* 299, 529-555.
- Henneke E., Luther G.W., III, de Lange G.J. y Hoefs J. (1997) Sulphur speciation in anoxic hypersaline sediments from the eastern Mediterranean Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 307-321.
- Huerta-Diaz M.A. y Morse J.W. (1990) A quantitative method for determination of trace metal concentrations in sedimentary pyrite. *Mar. Chem.* 29, 119-144.
- Huerta-Diaz M.A. y Morse J.W. (1992) Pyritization of trace metals in anoxic marine sediments. *Geochim. Cosmochim. Acta* 56, 2681-2702.
- Huerta-Diaz M.A., Carignan R. y Tessier A. (1993) Measurement of trace metals associated with acid volatile sulfides and pyrite in organic freshwater sediments. *Environ. Sci. Technol.* 27, 2367-2372.
- Huerta-Diaz M.A., Tessier A. y Carignan R. (1998) Geochemistry of trace metals associated with reduced sulfur in freshwater sediments. *Appl. Geochem.* 13, 213-233.
- Huerta-Diaz M.A., Delgadillo-Hinojosa F., Otero X.L., Hernandez-Ayon J.M., Segovia-Zavala J.A., Galindo-Bect M.S. y Amaro-Franco E. (2011) Iron and trace metals in microbial mats and underlying sediments: results from Guerrero Negro saltern, Baja California Sur, Mexico. *Aquat. Geochem.* 17, 603-628.

- Hurtgen M.T., Lyons T.W., Ingall E.D. y Cruse A.M. (1999) Anomalous enrichments of iron monosulfide in euxinic marine sediments and the role of H<sub>2</sub>S in iron sulfide transformations: Examples from Effingham Inlet, Orca Basin, and the Black Sea. *Am. J. Sci.* 299, 556-588.
- Jacobs L., Emerson S. y Huested S.S. (1987) Trace metal geochemistry in the Cariaco Trench. *Deep-Sea Res.* 34, 965-981.
- Jenne E.A. (1968) Controls on Mn, Fe, Co, Ni, Cu, and Zn concentrations in soils and water: the significant role of hydrous Mn and Fe oxides. In: Gould R.F. (ed.) *Trace Inorganics in Water*. Adv. Chem. Ser. 73, pp. 337-387.
- Jenne E.A. (1977) Trace element sorption by sediments and soil-sites and processes. In: Chappel W. y Petersen K. (eds.) *Symposium on Molybdenum in the Environment*. Marcel Dekker, pp. 425-453.
- Kaplan I.R., Emery K.O. y Rittenberg S.G. (1963) The distribution and isotopic abundance of sulfur in recent marine sediments off southern California. *Geochim. Cosmochim. Acta* 27, 297-331.
- Lin S., Huang K.-M. y Chen S.-K. (2000) Organic carbon deposition and its control on iron sulfide formation of the southern East China Sea continental shelf sediments. *Continental Shelf Res.* 20, 619-635.
- Lion L.W., Altmann R.S. y Leckie J.O. (1982) Trace-metal adsorption characteristics of estuarine particulate matter: evaluation of contributions of Fe/Mn oxide and organic surface coatings. *Environ. Sci. Technol.* 16, 660-666.
- Lyons T.W. (1997) Sulfur isotopic trends and pathways of iron sulfide formation in upper holocene sediments of the anoxic Black Sea. *Geochim. Cosmochim. Acta* 61, 3367-3382.
- Middelburg J.J. (1991) Organic carbon, sulfur, and iron in recent semi-euxinic sediments of Kau bay, Indonesia. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, 815-828.
- Morse J.W. y Arakaki T. (1993) Adsorption and coprecipitation of divalent metals with mackinawite (FeS). *Geochim. Cosmochim. Acta* 57, 3635-3640.
- Morse J.W. y Cornwell J.C. (1987) Analysis and distribution of iron sulfide minerals in recent anoxic marine sediments. *Mar. Chem.* 22, 55-69.



Passier H.F., Luther G.W., III y De Lange G.J. (1997) Early diagenesis and sulphur speciation in sediments of the Oman Margin, northwestern Arabian Sea. *Deep-Sea Res. Part-II* 44, 1361-1380.

Wijsman J.W.M., Middelburg J.J. y Heip C.H.R. (2001) Reactive iron in Black Sea Sediments: Implications for iron cycling. *Mar. Geol.* 172, 167-180.

### **Glosario de términos**

DOP: Grado de piritización. Indica el porcentaje de Fe reactivo ( $Fe_{FR}$ ) que se encuentra en forma del mineral pirita.

DTMP: Grado de piritización de metal traza. Indica el porcentaje de metal (Me) reactivo ( $Me_{FR}$ ) que se encuentra asociado al mineral pirita.

$Me_{pir}$ : Metal asociado a la fracción pirita.

$Me_{HCl}$ : Metal asociado a la fracción HCl (incluye carbonatos, óxidos de Fe y Mn, y monosulfuros de hierro) el cual eventualmente puede ser transformado por procesos diagenéticos a  $Me_{pir}$ .

$Me_{FR}$ : Metal asociado a la fracción reactiva y definido como la suma de  $Me_{HCl}$  +  $Me_{pir}$ .

### **Créditos**

La parte analítica de este trabajo contó con la ayuda de la M.C. Karla Gabriela Mejía Piña y la asesoría del Oc. Arturo Siqueiros Valencia. Los datos de porcentaje de carbonato fueron proporcionados amablemente por el Dr. Juan Carlos Herguera de CICESE.

## ESTUDIO FAUNÍSTICO DE LA MEIOFAUNA (TAXONOMÍA)

Responsable: Axayácatl Rocha, CICESE

Participantes: Mirayana Marcelino Barros y Ana Yonori Castillo Paez, CICESE

### Antecedentes

La mayor parte de los estudios bénticos sobre la infauna del mar profundo del GM se han realizado en el mar patrimonial de E.U.A. (Baguley et al. 2006a; Baguley et al. 2006b; Sharma et al. 2007; Baguley et al. 2008; Bernhard et al. 2008; Rowe et al. 2008; Cordes et al. 2009; Sharma et al. 2012). En comparación, los estudios que abarcan la fauna profunda de la región mexicana del GM son escasos. Entre ellos, la mayoría se enfoca en la macrofauna (Escobar-Briones et al. 1999; Escobar-Briones et al. 2008a; Wei et al. 2012). Se han realizado varias tesis de grado como las de Hernández (1999), Muñiz (2001), Rodríguez (2003) y Alonso (2006). Estos trabajos reconocen un decremento de la densidad de la macrofauna béntica con la profundidad, asociándolo a la hidrodinámica, a la disponibilidad de alimento, a condiciones de hipoxia, a interacciones con la meiofauna, y al tipo de sedimento. En otros estudios también se ha observado una disminución de la densidad con la profundidad y con respecto a la distancia de la costa (Velázquez 2005), en respuesta a la cantidad de materia orgánica que disminuye a la par, generando cambios en la densidad y biomasa de la comunidad bentónica.

Son pocos los trabajos que se han realizado sobre la comunidad meiofáunica profunda del GM. Rowe y Menzel (1971) realizaron un estudio seminal sobre el talúd continental y en la planicie abisal frente al Banco de Campeche (escarpe de Campeche) y frente a Florida (escarpe de Florida) (Figura 139) observando una fauna béntica profunda depauperada en comparación con otras cuencas oceánicas. Se observó una disminución logarítmica de la biomasa infaunal (expresada en pesos húmedo y seco, abundancia numérica, y carbono orgánico) con la profundidad, que fue interpretada como resultado de la pérdida considerable de energía a lo largo de la trama trófica de la columna de agua. Un par de décadas después, Escobar *et al.* (1997) realizaron un estudio comparativo de la densidad y biomasa de la meiofauna presente en la parte superior del talud continental en dos regiones del golfo (zona sedimentaria frente a Tamaulipas y Veracruz y frente al escarpe de Campeche), encontrando una mucho mayor abundancia y densidad en los fondos sedimentarios frente a las costas de Tamaulipas. También reconocieron diferencias en la composición taxonómica

entre los sectores occidental (dominado por aportes terrígenos) y sur (dominados por sedimentos carbonatados). Salas (2001) analizó el patrón de distribución de la biomasa y densidad de la meiofauna a lo largo del gradiente batimétrico (21 a 2230 m) en el suroeste del GM. En el plano espacial reconoció variación de los promedios de densidad y biomasa de este a oeste, vinculándolo a producción local de la superficie y su contribución al fondo, así como a lo largo del gradiente latitudinal.

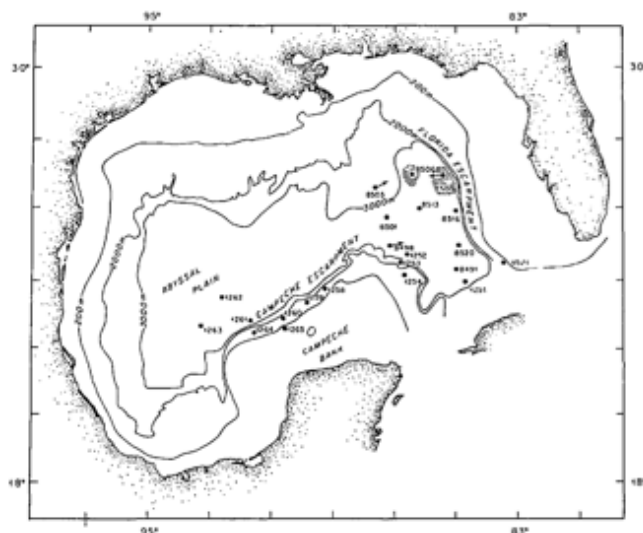


Figura 139. Red de estaciones estudiadas por Rowe y Menzel (1971) en su estudio seminal de la meiofauna profunda del GM.

Más recientemente, Baguley et al. (2006a) realizaron un estudio en el talud continental de la sección norte del GM, con algunas estaciones en la planicie abisal (Figura 140). En ese trabajo se correlacionó la abundancia de la meiofauna con variables medioambientales, encontrando que la abundancia de ese componente infáunico varió longitudinalmente en respuesta a una fuerte influencia del río Mississippi, además de a la profundidad. Se encontró que el efluente del río Mississippi altera las características sedimentarias locales, y que interactúa tanto con los eddies producidos por la Corriente de Lazo como con la topografía dinámica del talud continental, lo cual incrementa los flujos de materia orgánica hacia el sedimento en la región noreste y crea regiones con una mayor abundancia meiofáunica que en otras zonas del golfo. En un estudio más funcional de esas mismas comunidades meiofáunicas, Baguley et al. (2008) analizaron la dinámica y flujos energéticos asociados a la micro- y meiofauna de la región. Encontraron que la biomasa y respiración de la meiofauna disminuyó con la profundidad, mientras que las mayores biomásas y tasas respiratorias ocurrieron en el talud continental superior de la región central del GM, cerca del río Mississippi. Las tasas respiratorias de la meiofauna, que puede representar del 8 al 22% del consumo de oxígeno total del sedimento, reflejan la importancia de ese

grupo ecológico en la diagénesis de la materia orgánica, en los presupuestos de carbono del mar profundo y en los ciclos biogeoquímicos globales (Baguley et al. 2008).

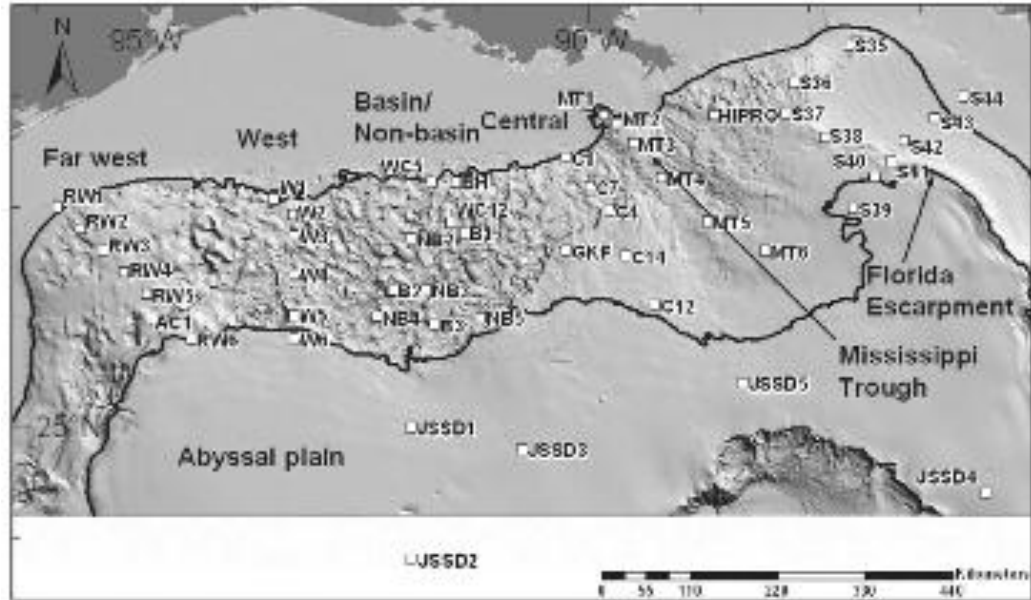


Figura 140. Red de estaciones en la sección norte del GM del trabajo del Baguley et al. (2006a y 2008).

Por su parte, Bernhard et al. (2008) restringieron sus análisis a la comunidad de foraminíferos bénticos de las estaciones batiales y abisales de la red de estación de los estudios anteriores. Encontraron que la biomasa y densidad de dicha comunidad fue sumamente variable ( $\sim 2\text{--}53 \text{ mgC m}^{-2}$ ;  $\sim 3600\text{--}44,500 \text{ indiv. m}^{-2}$ , respectivamente) sin una correlación con la profundidad. En el sector norte del GM, la comunidad de foraminíferos se encontró dominada por especies aglutinadoras, más que especies calcáreas o tectónicas. La densidad de los foraminíferos nunca excedió la de la meiofauna metazoaria en ninguno de los sitios. Sin embargo, si excedió su biomasa en el 50% de las estaciones, lo que refrenda el hecho de que estos organismos constituyen un componente importante de la biomasa meiofáunica de los sedimentos profundos del GM.

Finalmente, Escobar-Briones et al. (2008b) compararon la estructura de la meiofauna de dos regiones del GM, una en el talud continental (ca. 1630-1860 m) y otra en la planicie abisal (ca. 3720-3830 m) utilizando dos métodos de extracción de los organismos del sedimento. Sus resultados indican que la extracción manual de los organismos produce valores de biomasa y abundancia superiores a los obtenidos mediante el método de centrifugación con Ludox.

## Objetivos

La meiofauna representa la gran mayoría de la biodiversidad eucariótica que habita los sedimentos marinos. Estas comunidades llevan a cabo una variedad de funciones ecológicas claves que influyen sobre la biogeoquímica sedimentaria y el acoplamiento bento-pelágico. En este proyecto, se planteó caracterizar a nivel de grandes grupos taxonómicos a la comunidad meiobentónica de 11 estaciones del GM de núcleos obtenidos durante el crucero XIXIMI-2 mediante métodos tradicionales morfológicos. Mediante esta caracterización se planteaba:

1. Establecer una línea de base de la diversidad de la comunidad meiofaúnica utilizando análisis faunísticos.
2. Monitorear los cambios en la comunidad bentónica de mar profundo e identificar zonas impactadas por la contaminación petrolera.

## Metodología

### Estrategia de muestreo

Se recolectaron muestras de sedimento en 11 estaciones de la campaña XIXIMI-2 (Figura 1) De cada estación se obtuvieron muestras para tres tipos de análisis: (1) muestras para análisis morfológicos tradicionales fijados en formalina, (2) muestras para análisis genéticos moleculares fijados en solución DESS y (3) muestras para análisis metagenómicos congeladas. En este informe se reportan los resultados del análisis de las muestras fijadas en formalina obtenidas con ayuda de nucleadores con 10 cm de diámetro hasta una profundidad de 12 cm. El núcleo de sedimento se estratificó para analizar la estructura vertical de la comunidad. La estratificación se hizo en cuatro estratos superficiales de un cm seguidos por cuatro estratos de 2 cm hasta los 12 cm (estratos: 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-6, 6-8, 8-10 y 10-12 cm). Este diseño provee una mayor resolución en los niveles superficiales del sedimento donde ocurre la mayor parte de la biomasa infáunica (Gheskiere et al. 2004).

### Métodos de laboratorio

Extracción de meiofauna.

La extracción de la meiofauna (45 a 500 micras) del sedimento se hizo a través del método de flotación con sílica coloidal y tamizado, que permite recuperar arriba del 96% de la comunidad independientemente del tipo de sedimento (de Jonge and Bouwman 1977; Burgess 2001). Brevemente, el método consiste en:

- a. Enjuagado
- b. Tamizado
- c. Flotación en Ludox™ 50 (tres veces)
- d. Recuperación por tamizado (tres veces)
- e. Impregnación en glicerina
- f. Montaje de laminillas

Se ha extraído la meiofauna del 100% de las muestras en las cuales también se ha colaborado para la extracción de los foraminíferos asociados al sedimento para su análisis por el Dr. Juan Carlos Herguera.

#### Cuantificación e identificación al microscopio

La cuantificación de la fauna incluida en este informe incluye el 100% de las estaciones y de los estratos. La identificación a grandes grupos taxonómicos se realizó conforme a Giere (1993). Los principales grupos taxonómicos que se encontraron son los que típicamente se caracterizan las comunidades meiofáunicas (p. ej., Smol et al. 1994).

#### Análisis granulométricos

La determinación del tamaño de las partículas sedimentarias se realizó sobre una muestra de cada horizonte sedimentario (0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-5, 5-7, 7-9, 9-11cm) con un analizador de laser-tungsteno HORIBA LA910.

## Análisis de datos

Las abundancias de organismos se analizaron mediante análisis multivariados de escalamiento multidimensional (MDS, por sus siglas en inglés) utilizando índices de similitud de Bray-Curtis (McGarigal et al. 2000) para determinar la similitud en la composición de las comunidades. La características granulométricas entre las estaciones se compararon mediante un análisis de conglomerados (dendograma UPGMA) realizado sobre distancias Euclidianas.

## Resultados

### Abundancia y composición de la meiofauna

#### *Abundancia*

En el segundo crucero realizado en el GM, XIXIMI-2, se recolectaron muestras en 11 estaciones distribuidas entre 1791 y 3739 m de profundidad. Los valores de abundancia de la meiofauna variaron entre 221 y 670 inds.  $10\text{ cm}^{-2}$ , con un promedio de 401 inds.  $10\text{ cm}^{-2}$ . (Figura 141). La mayor abundancia, 670 inds.  $10\text{ cm}^{-2}$ , ocurrió en la estación E40 (profundidad de 2758 m) y la menor, 221 inds.  $10\text{ cm}^{-2}$ , abundancia en la estación E24 (profundidad de 3374 m). Tres de las 11 estaciones presentaron valores de abundancia cercanos al promedio (E2, E33 y E36). Las estaciones E19, E31 y E40 se destacaron por abundancias arriba del promedio, mientras que el resto presentaron valores por debajo de este.

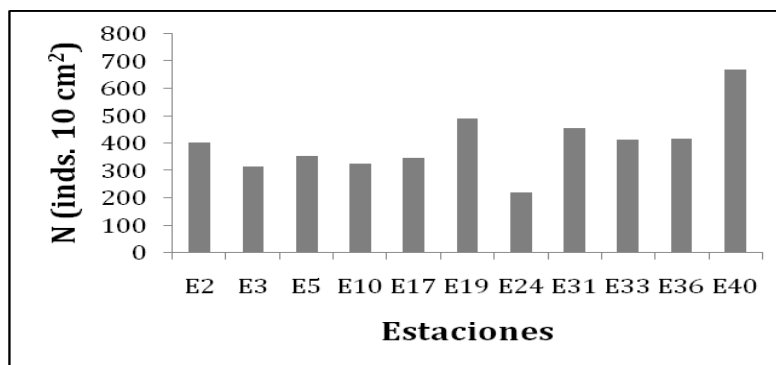


Figura 141. Abundancia de la meiofauna total en las estaciones del crucero XIXIMI-2

### *Composición taxonómica*

Se identificaron un total de 5682 organismos. Al igual que en XIXIMI-1, el grupo Nematoda fue el dominante en todas las estaciones, representando el 86% del total de organismos identificados (Figura 142a). El grupo Copepoda representó el 8% del total de organismos, seguido de Turbellaria con un 5% del total. Los demás grupos juntos representaron el 1% de la meiofauna total (Figura 142a).

El mayor número de grupos meiofaunales (9 taxones) se registró en la estación E31. En las estaciones E10 y E24 se encontraron sólo cuatro grupos. En las estaciones E10, E24 y E33 el grupo Nematoda siguió siendo el grupo más abundante y fue seguido por Turbellaria y por Copepoda en tercer lugar (Figura 142b). En la estación E36 el grupo Turbellaria presentó la menor abundancia, mientras los nemátodos fueron los más abundantes, seguidos por los copépodos y ostrácodos. En las demás estaciones, el patrón de abundancia de los grupos meiofaunales fue muy similar al patrón general (Figura 142a), ya que el grupo Nematoda fue el más abundante seguido de Copepoda y Turbellaria (Figura 142b).



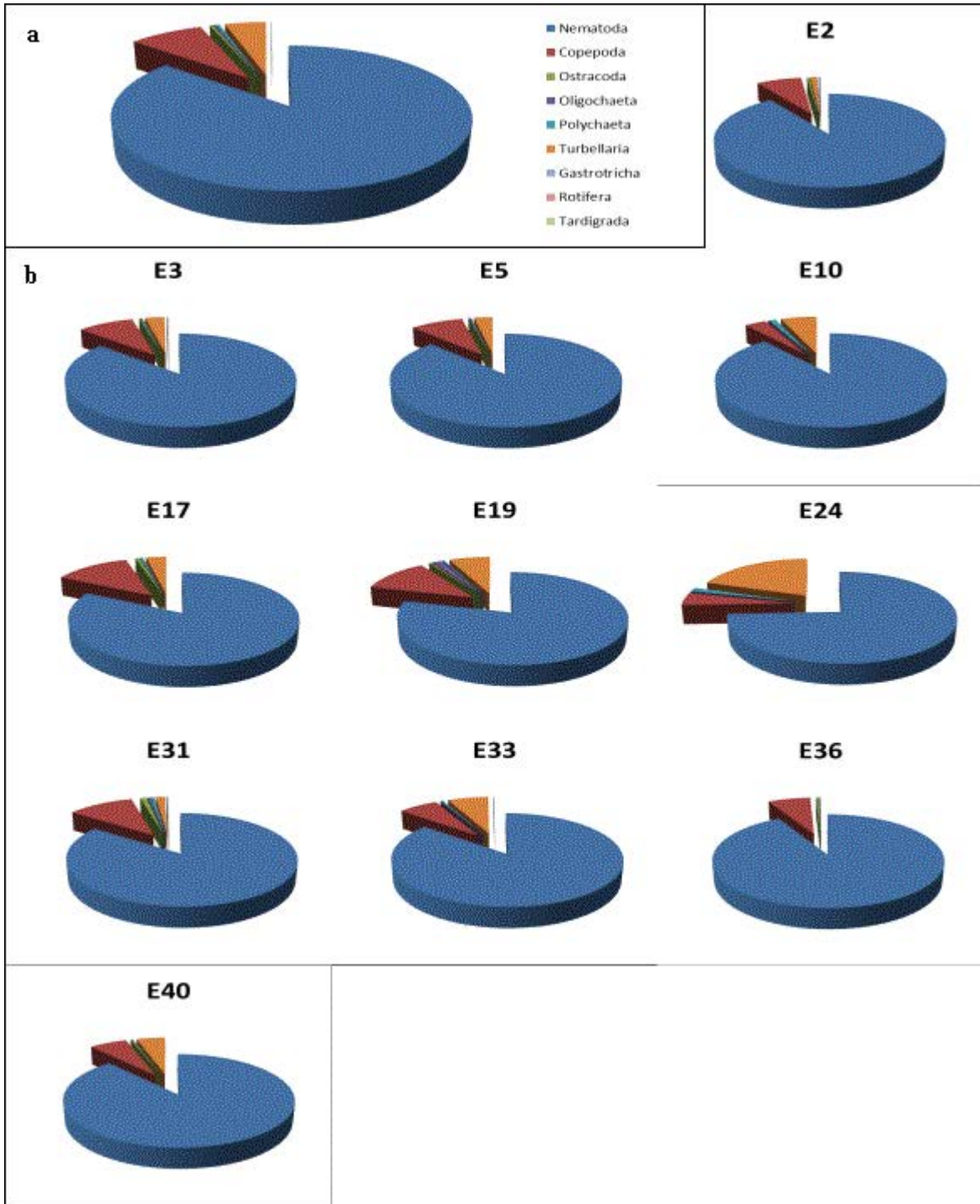


Figura 142. Composición taxonómica de la meiofauna recolectada en la campaña XIXIMI-2. a Composición total de la meiofauna; b Composición de la meiofauna en cada estación.

El MDS construido con los índices de similitud de Bray-Curtis reveló el grado de similitud de la comunidad meiofáunica entre las estaciones (Figura 143). Los grupos Nematoda, Copepoda y Turbellaria fueron los taxones principales que estuvieron presentes en todas las estaciones. Al codificar cada estación con el grado de abundancia de estos grupos principales, se observa que los nemátodos son los más abundantes en todas las estaciones, mientras que las abundancias de Copepoda y Turbellaria fueron del mismo orden de magnitud. Para Nematoda, los mayores y menores valores de abundancia fueron observados en la estación E40 y E24, respectivamente. Para Copepoda los mayores valores fueron registrados en la estación E19, mientras que en las estaciones E10 y E24 se encontraron pocos copépodos. Para el grupo Turbellaria los mayores valores de abundancia se presentaron en la estación E24. Sin embargo, lo más relevante es que no se destaca un agrupamiento de estaciones con base en los patrones de abundancia de los tres taxones principales (Figura 143).



Figura 143. Diagramas de MDS en los que las estaciones se agrupan de acuerdo a su nivel de similitud (entre más cercanas, más similares en términos taxonómicos). En cada estación se representa la abundancia de los tres principales grupos meiofaunales de acuerdo al diámetro del círculo (ver escala).

### *Distribución vertical*

La distribución vertical de la meiofauna se presenta hasta los 12 cm de profundidad en el sedimento, que fue la profundidad de los núcleos (Figura 144). Se observaron los mayores valores de densidad en los niveles superiores del sedimento (0-2 cm); más del 50% de la fauna se registró en dichos estratos superficiales. A partir de ese nivel (2 cm), se observa una reducción rápida (logarítmica) de la abundancia con el aumento la profundidad en el sedimento (Figura 144).

Por lo general, el patrón de distribución vertical de la abundancia fue similar entre todas las estaciones. Sin embargo, el patrón de reducción con respecto a la profundidad se observa con mayor claridad en las estaciones E3, E19, E31 y E40 (Figura 144). Las demás estaciones presentan algunos picos de abundancia en niveles inferiores (p. ej. E2 nivel 6 cm). Los valores de abundancia parecen reducirse drásticamente en los niveles más profundos (6-8 cm), excepto en las estaciones E2, E10 y E33 que presentaron las mayores abundancias (alrededor de 50 inds. 10 cm<sup>-2</sup>) en el estrato más profundo (estrato 8: 10-12 cm, Figura 144).

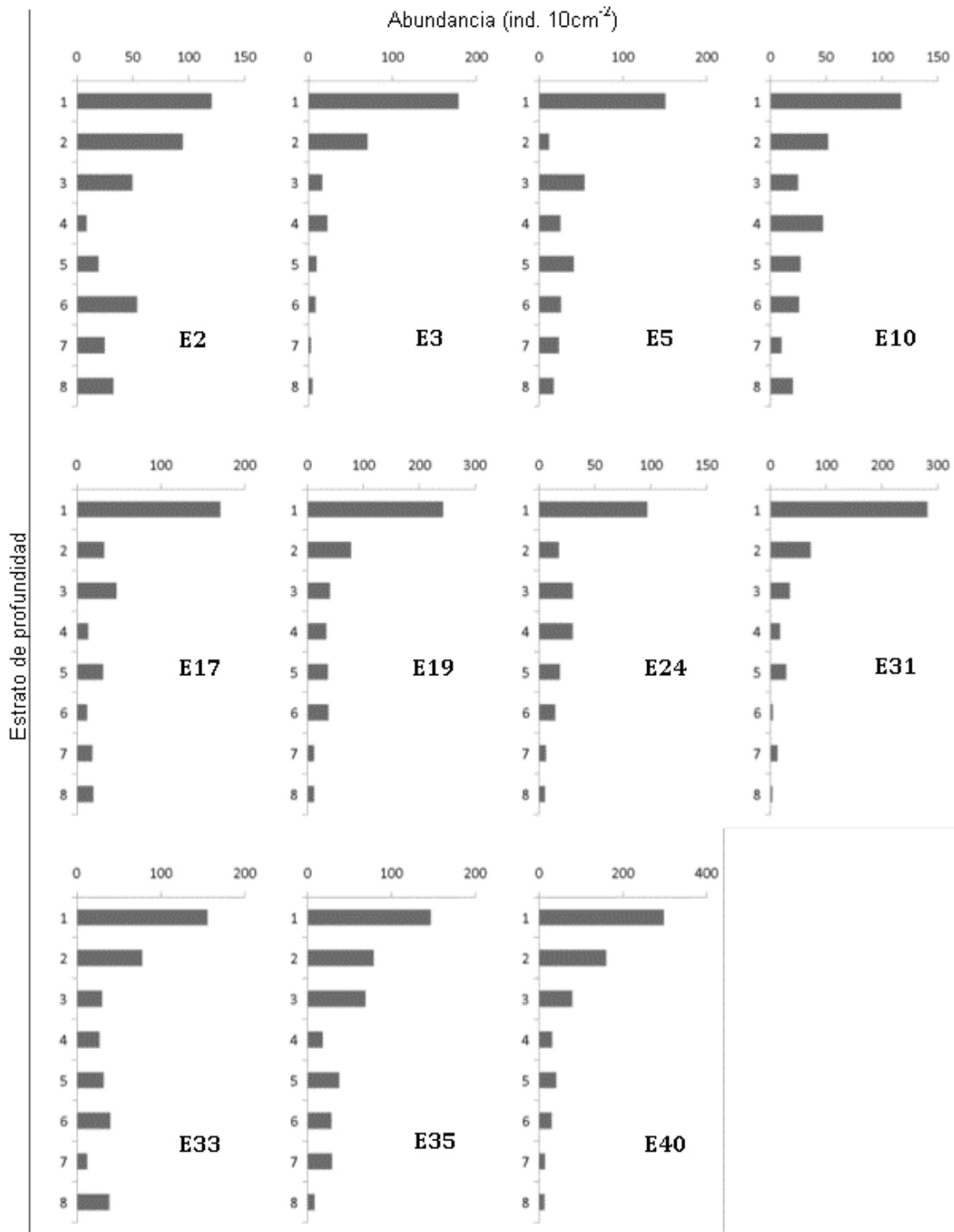


Figura 144. Distribución vertical de la meiofauna en las once estaciones del crucero XIXIMI-2. Estratos de profundidad del 1 al 8: 0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-6, 6-8, 8-10, 10-12 cm.

### *Distribución espacial*

Los resultados del análisis MDS indicaron una diferenciación de las comunidades meiofáunicas de todas las estaciones. Es decir, no hubo grupos de estaciones que formaran conglomerados en el diagrama bidimensional ni estaciones geográficamente cercanas que se juntaran en el diagrama, con la posible excepción de las estaciones E3 y E5 (Figura 145). No existió un traslape entre estaciones como se observó en los resultados del primer crucero. Cabe mencionar que de las 3 estaciones que fueron altamente similares en XIXIMI-1 (E35, E36 y E43), sólo la estación E36 fue visitada en el crucero XIXIMI-2. La distribución espacial de las 11 estaciones en el segundo crucero no parece reflejar un patrón de geográfico (Figura 145).

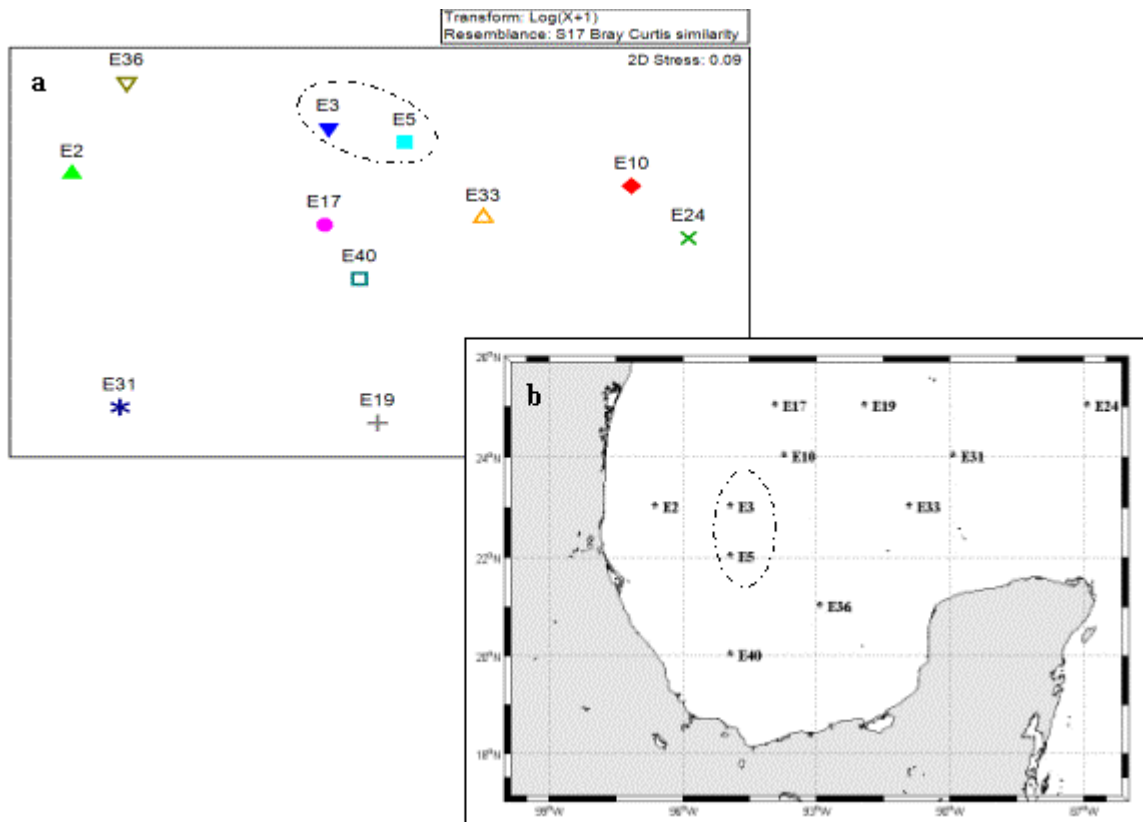


Figura 145. a: Análisis de MDS para los datos derivados de la meiofauna de las once estaciones del GM. b: Mapa del área de estudio con las estaciones recolectadas en la campaña XIXIMI-2 en el GM.

Al igual que lo que se observó en las muestras recolectadas durante XIXIMI-1, el análisis de la abundancia meiofáunica en los horizontes sedimentarios de cada estación no revela un patrón de distribución espacial por estación; es decir, los niveles de una misma estación no se agrupan (Figura 146a).

Por otro lado, al codificar los estratos en función de su profundidad en el sedimento podemos observar una agrupación en el MDS, al igual que sucedió en XIXIMI-1 (Figura 146b). En efecto, los niveles de una misma profundidad perteneciente a diferentes estaciones se agrupan, reflejando la similitud en la abundancia y estructura de sus comunidades y, una vez más, destacando la importancia del componente vertical. Al igual que en los resultados de las muestras recolectadas durante el primero crucero, podemos identificar claramente un gradiente desde los niveles superiores hacia los niveles más inferiores (Figura 146b). Dicho gradiente es más conspicuo cuando analizamos solamente los primeros niveles (0-4 cm) de cada estación donde se concentra la mayor biomasa meiofáunica (Figura 146c).

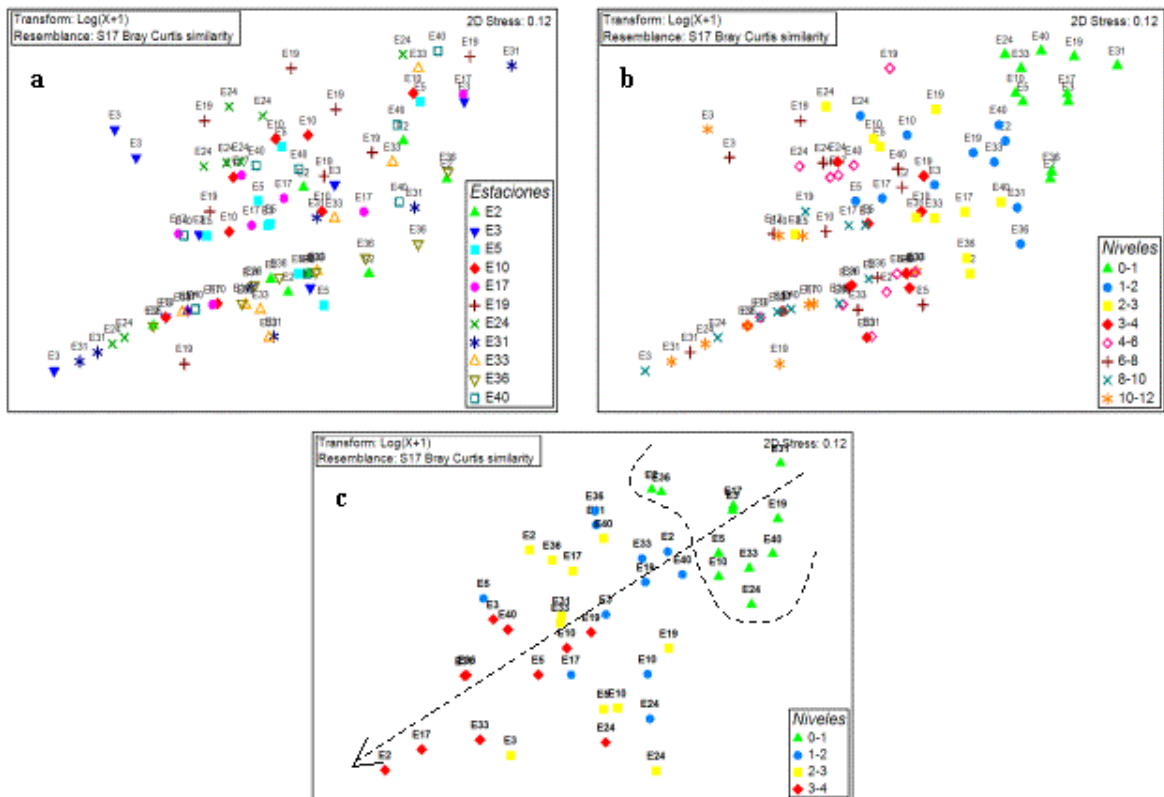


Figura 146. Análisis de MDS para los datos derivados de la composición de la meiofauna de las once estaciones muestreadas en el GM durante la campaña XIXIMI-2. a distribución espacial por estaciones, b distribución espacial de acuerdo a los niveles, c distribución espacial de acuerdo a los niveles (énfasis a los primeros niveles de 0-4 cm)

Variación temporal de la estructura meiofáunica: XIXIMI-1 vs. XIXIMI-2

*Abundancia*

La comparación de los valores de composición y abundancia de la meiofauna sólo es posible en las tres estaciones que fueron visitadas en las dos campañas oceanográficas: E3 (algo cercanas), E36 y E40 (Figura 147).

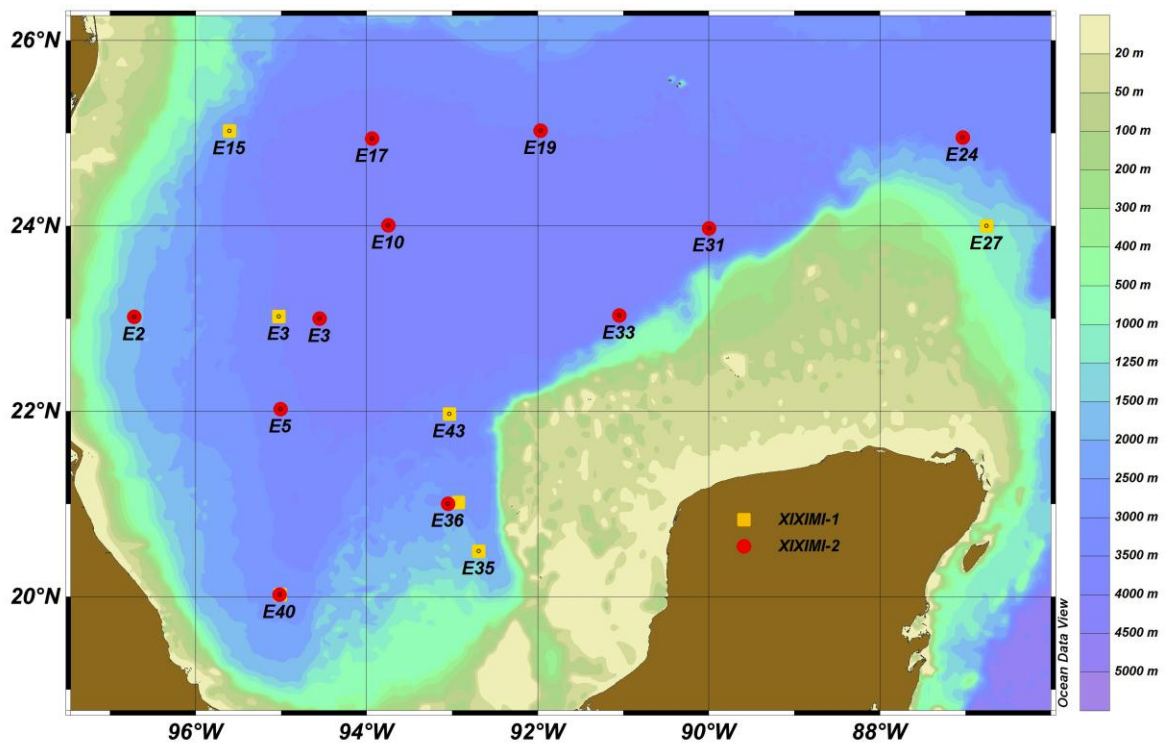


Figura 147. Mapa de las estaciones de muestreo de sedimentos de las campañas XIXIMI-1 y 2.

La abundancia de la meiofauna en las muestras de estos pares de estaciones no presentó una gran variación, manteniendo valores muy similares entre ambos cruceros (Figura 148). En dos de las estaciones (E3 y E40) se presentaron valores ligeramente más altos en el segundo crucero (XIXIMI-2), mientras que la estación E36 presentó valores ligeramente más bajos en la densidad en el segundo crucero.

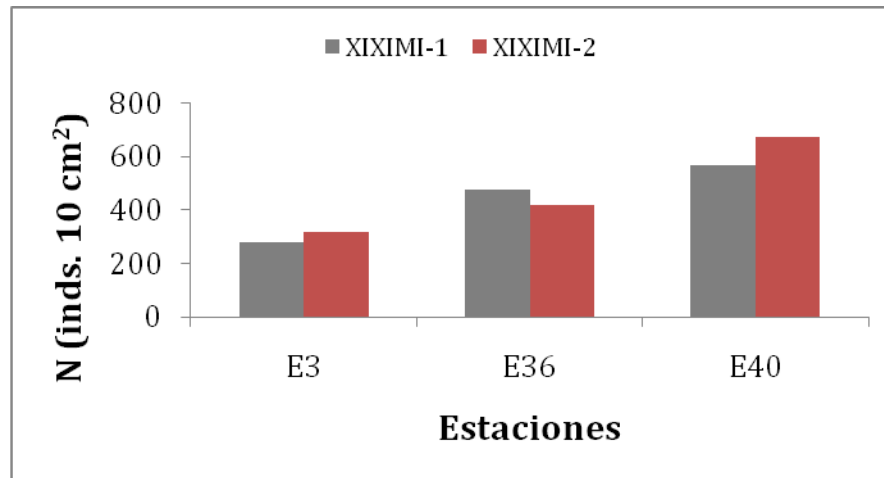


Figura 148. Abundancia de la meiofauna en las 3 estaciones repetidas en las campañas XIXIMI-1 y XIXIMI-2 en el GM.

### *Composición taxonómica*

Comparando la composición taxonómica de la meiofauna de ambos cruceros observamos algunas pequeñas diferencias. En las muestras de XIXIMI-1 se encontraron siete grupos meiofaunales que también se observaron en las muestras de XIXIMI-2, aunque en este último aparecieron dos grupos adicionales, Rotifera y Tardigrada (Figura 149). En el crucero XIXIMI-2, la abundancia de individuos de los taxones Ostracoda y Oligochaeta disminuyó en relación al XIXIMI-1. Por otra parte, la abundancia de organismos de los taxones Copepoda, Turbellaria y Polychaeta fueron más abundantes en las muestras de XIXIMI-2, mientras que Gastrotricha mantuvo la misma abundancia en ambos cruceros. Nematoda, Copepoda y Turbellaria fueron los taxones más representativos en ambos los cruceros en términos de su abundancia (Figura 149).



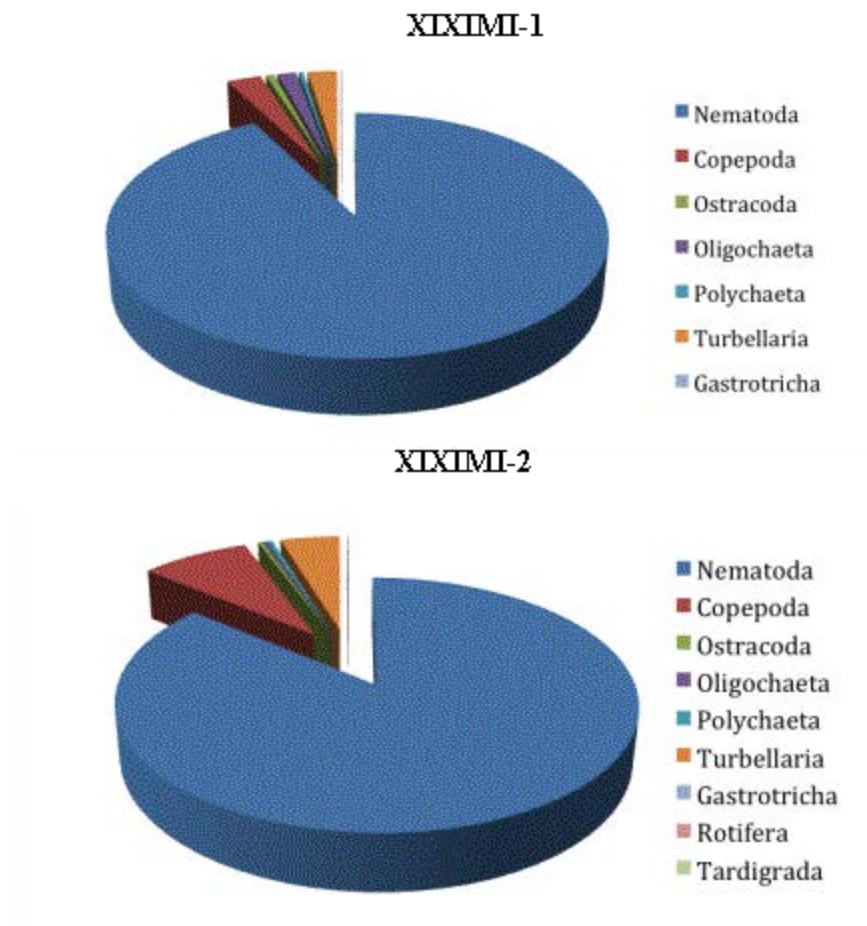


Figura 149. Composición taxonómica del total de la meiofauna recolectada en las campañas XIXIMI-1 y XIXIMI-2 en el GM.

### *Distribución vertical*

Comparando la distribución vertical de la abundancia meiofáunica en el sedimento, las estaciones E36 y E40 presentaron el perfil vertical típico de la meiofauna en las muestras de ambos cruceros (XIXIMI-1 y XIXIMI-2). Hubo mayores valores de densidad hacia la superficie del sedimento (primeros niveles), y estos disminuyeron rápidamente con la profundidad (Figura 150). Sin embargo, el perfil de la estación E3 difirió entre las muestras de ambos cruceros. Para XIXIMI-1 se observó una distribución homogénea de la abundancia en los diferentes estratos del sedimento, mientras que en el segundo se observó el patrón típico que se mencionó anteriormente (Figura 150).

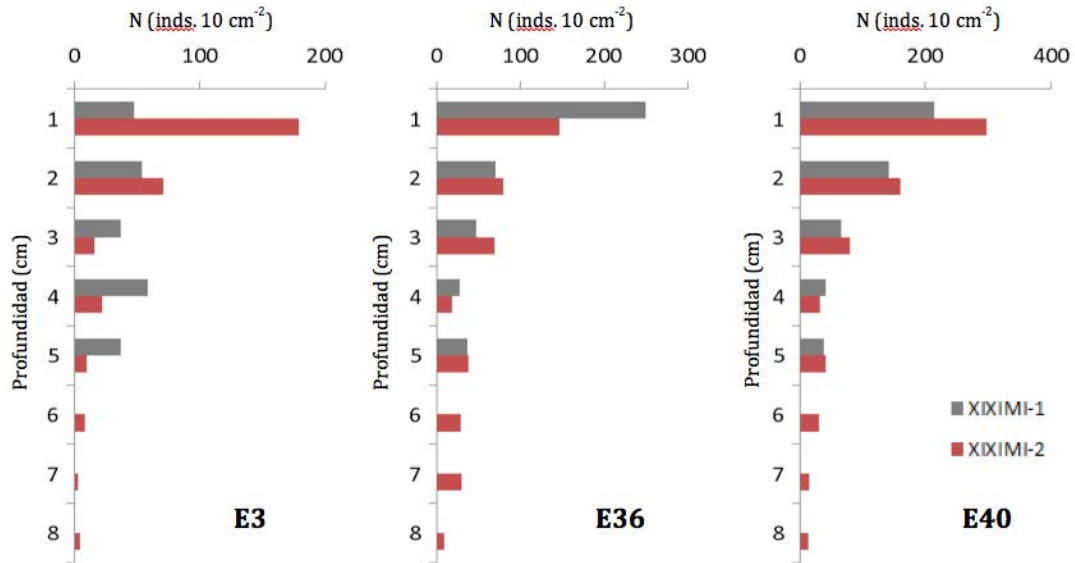


Figura 150. Distribución vertical de la meiofauna en las estaciones repetidas en las campañas XIXIMI-1 y XIXIMI-2 en el GM.

### *Granulometría de XIXIMI-2*

Los análisis granulométricos de los 11 centímetros superiores del sedimento revelaron que estuvieron compuestos fundamentalmente de limos medio, fino, y muy fino (promedios para el total de todas las muestras: arena = 10.34%, limo = 67.9%, arcilla = 21.8%). Sólo la estación E24 presentó arena muy fina en los horizontes superiores (Figura 152). El análisis de conglomerados confirmó las características sedimentarias distintas de la estación E24, que está cerca de la plataforma de Yucatán. Entre el resto de las estaciones se pudieron discriminar dos grupos con granulometría similar. Uno de ellos con menor distancia euclídeana que agrupa E2, E10, E3, E5, E17, E38, y un segundo grupo que agrupa el resto de las estaciones E19, E33, E40 y E31. Entre estas, destaca como la más diferente la E31 más cercana a la E24, mientras que el resto guarda un nivel de distinción granulométrica –distancias Euclídeanas- comparable al primer conglomerado mencionado anteriormente (Figura 151).

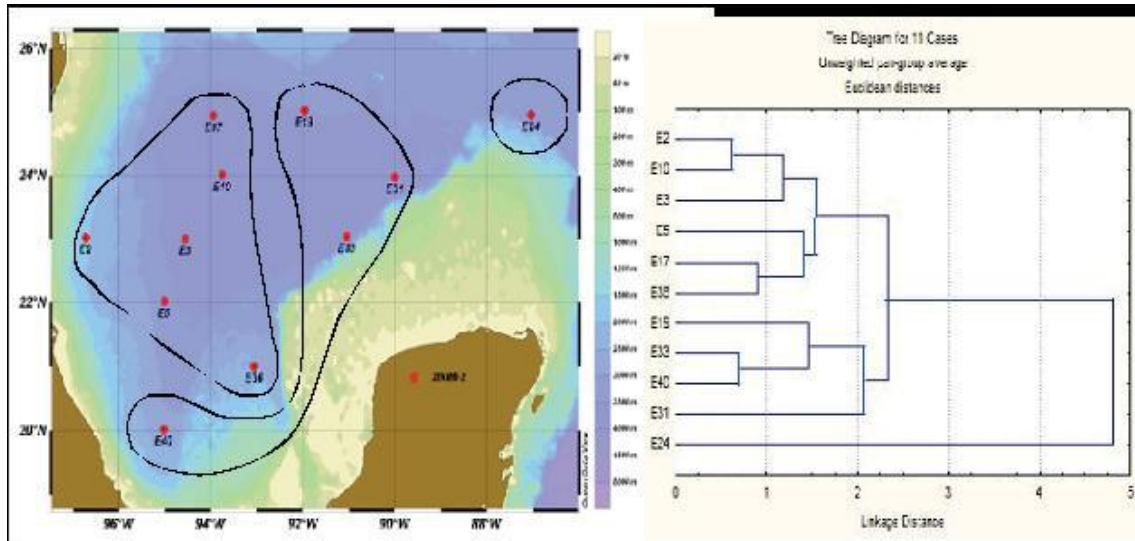


Figura 151. Dendrograma UPGMA basado en distancias Euclídeanas de la composición granulométrica promedio por estrato de los núcleos de sedimento (12 cm). En el mapa se representa la estación E24 como altamente divergente y a las estaciones agrupadas por su similitud en composición.

Fase II: Línea de base de aguas profundas del Golfo de México  
Informe final

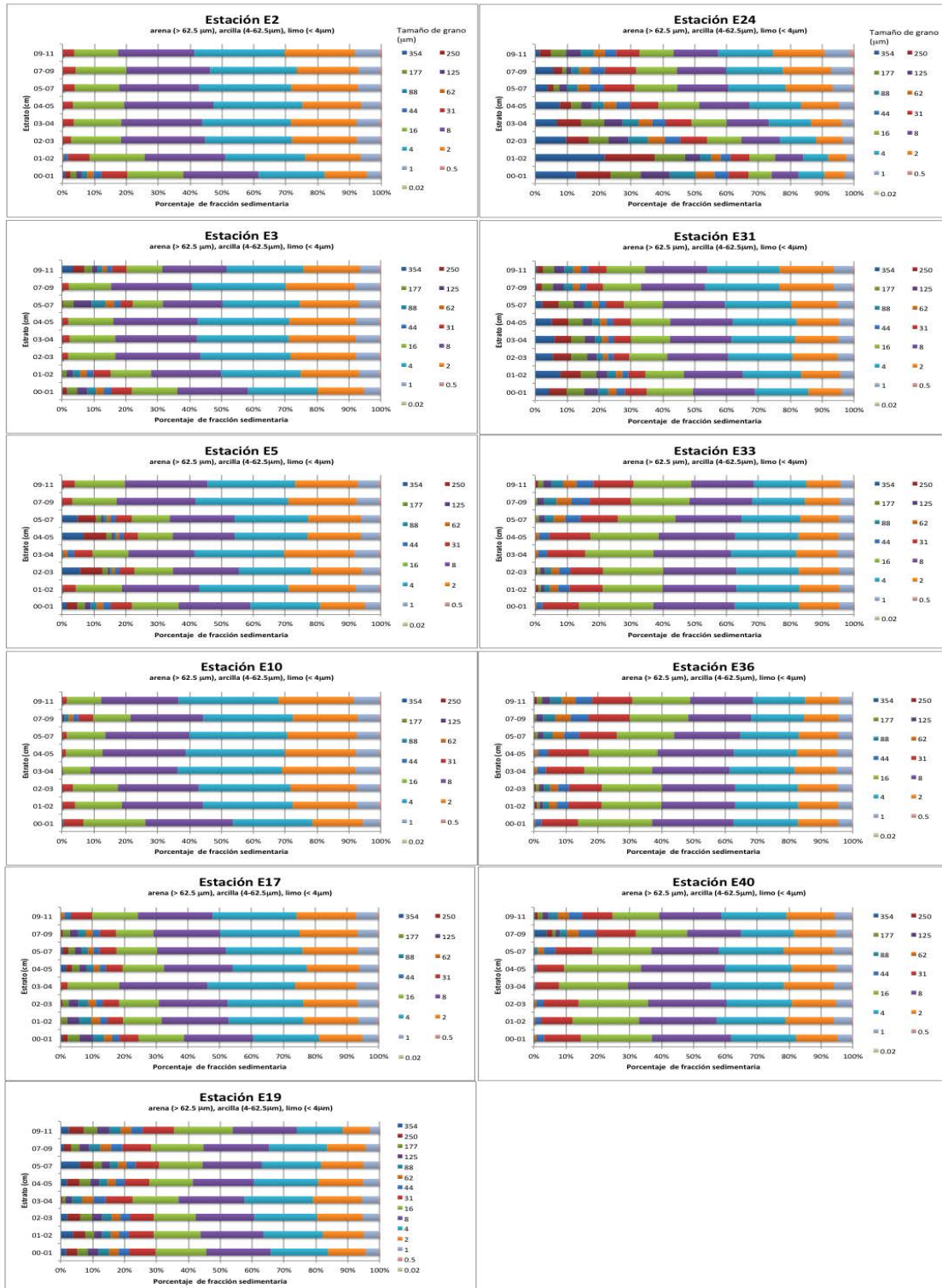


Figura 152. Composición granulométrica por horizonte sedimentario de los núcleos de sedimento superficial colectados en la campaña XIXIMI-2.

## Conclusiones

- Los patrones de distribución vertical de la meiofauna en los sedimentos profundos del GM corresponde a los perfiles de distribución típicos de la meiofauna profunda y somera.
- El perfil se caracteriza por una abundancia de la meiofauna máxima en superficie que decae rápidamente (geoméricamente) con la profundidad dentro del sedimento. Dicho patrón domina la estructura tridimensional de la meiofauna en los sedimentos profundos del GM.
- La comunidad meiofáunica se encuentra dominada por nemátodos de vida libre.
- No existe un patrón espacial horizontal evidente en la estructura comunitaria meiofáunica revelada por el análisis MDS.
- Se encontraron diferencias temporales en la estructura de la comunidad meiofáunica entre XIXIMI-1 y 2, que pueden asociarse tanto a variaciones estacionales en la comunidad como a variación espacial a pequeña escala en el caso de la estación E3. El esclarecimiento de la variación estacional en la comunidad meiofáunica requiere de un monitoreo a esa escala temporal.
- Los sedimentos de las estaciones visitadas están compuestos mayoritariamente por limos y arcillas. Sólo se distinguió la estación E24 cercana a la plataforma de Yucatán por un mayor porcentaje de arenas respecto a las demás.

## Recomendaciones

1. Se completará el análisis taxonómico detallado de la nematofauna encontrada, pues representa el grupo taxonómico dominante de la meiofauna en todas las estaciones. Dichos análisis ya se encuentran disponibles para XIXIMI-1 y darán lugar a la comparación temporal de dichas comunidades.
2. La caracterización morfológica de la meiofauna se complementará con herramientas genéticas que permitan una mejor valoración de la diversidad alfa y filogenética. Se cuenta con muestras fijadas en DESS y congeladas

para realizar análisis genéticos. Se ha conseguido financiamiento complementario para utilizar secuenciación de ADN de última generación para análisis de metagenómica ambiental.

3. Es necesario realizar análisis conjuntos de las variables medioambientales con los patrones de estructura de la comunidad de la meiofauna para entender cuáles de ellas se encuentran influenciando más dicha estructura.

## Referencias

- Alonso DR 2006 Variación espacio-temporal de la densidad de la macrofauna béntica de la planicie abisal en el Golfo de México. Tesis de licenciatura, Facultad de Ciencias, UNAM. México
- Baguley JG, Montagna PA, Hyde LJ, Kalke RD, Rowe GT 2006a Metazoan meiofauna abundance in relation to environmental variables in the northern Gulf of Mexico deep sea. *Deep-Sea Res Pt I* 53: 1344-1362
- Baguley JG, Montagna PA, Hyde LJ, Rowe GT 2008 Metazoan meiofauna biomass, grazing, and weight-dependent respiration in the Northern Gulf of Mexico deep sea. *Deep-Sea Res Pt II* 55: 2607-2616
- Baguley JG, Montagna PA, Lee W, Hyde LJ, Rowe GI 2006b Spatial and bathymetric trends in Harpacticoida (Copepoda) community structure in the Northern Gulf of Mexico deep-sea. *J Exp Mar Biol Ecol* 330: 327-341
- Bernhard JM, Sen Gupta BK, Baguley JG 2008 Benthic foraminifera living in Gulf of Mexico bathyal and abyssal sediments: Community analysis and comparison to metazoan meiofaunal biomass and density. *Deep-Sea Res Pt II* 55: 2617-2626
- Burgess B 2001 An improved protocol for separating meiofauna from sediments using colloidal silica sols. *Mar Ecol-Prog Ser* 214: 161-165
- Cordes EE, Bergquist DC, Fisher CR 2009 Macro-Ecology of Gulf of Mexico Cold Seeps. *Annu Rev Mar Sci* 1: 143-168
- de Jonge VN, Bouwman LA 1977 A simple density separation technique for quantitative isolation of meiobenthos using the colloidal silica Ludox™. *Mar Biol* 42: 143-148

- Escobar E, Lopez M, Soto LA, Signoret M 1997 Density and biomass of the meiofauna of the upper continental slope in two regions of the Gulf of Mexico. *Cienc Mar* 23: 463-489
- Escobar-Briones E, Estrada-Santillan EL, Legendre P 2008a Macrofaunal density and biomass in the Campeche Canyon, Southwestern Gulf of Mexico. *Deep-Sea Res Pt II* 55: 2679-2685
- Escobar-Briones E, Signoret M, Hernandez D 1999 Variation of the macrobenthic infaunal density in a bathymetric gradient: Western Gulf of Mexico. *Cienc Mar* 25: 193-212
- Escobar-Briones EG, Diaz C, Legendre P 2008b Meiofaunal community structure of the deep-sea Gulf of Mexico: Variability due to the sorting methods. *Deep-Sea Res Pt II* 55: 2627-2633
- Gheskiere T, Hoste E, Vanaverbeke J, Vincx M, Degraer S 2004 Horizontal zonation patterns and feeding structure of marine nematode assemblages on a macrotidal, ultra-dissipative sandy beach (De Panne, Belgium). *Journal of Sea Research* 52: 211-226
- Giere O 1993 *Meiobenthology. The Microscopic Fauna in Aquatic Sediments*. Springer-Verlag, Berlin
- Hernández RD 1999 Riqueza taxonómica, densidad y biomasa de la infauna macrobéntica a lo largo de un gradiente batimétrico en el sector occidental del GM. Tesis de Licenciatura, FES Zaragoza, UNAM. México
- McGarigal K, Cushman S, Stafford S 2000 *Multivariate statistics for wildlife and ecology research*. Springer-Verlag, New York
- Muñiz IG 2001 Variación de la estructura comunitaria de la infauna macrobéntica en el gradiente batimétrico del sector occidental del escarpe de Campeche, suroeste del GM. Tesis de licenciatura, Facultad de ciencias, UNAM. México
- Rodríguez PP 2003 Efecto de los factores ambientales en la variación espacial y temporal de la densidad y la biomasa de la infauna macrobéntica en el sur del GM. Tesis de Maestría en Ciencias, Ciencias del Mar y Limnología. UNAM. Mexico

- Rowe GT, Menzel DW 1971 Quantitative benthic samples from the deep Gulf of Mexico with some comments on the measurement of deep-sea biomass. *Bull Mar Sci* 21: 556-566
- Rowe GT, Wei CL, Nunnally C, Haedrich R, Montagna P, Baguley JG, Bernhard JM, Wicksten M, Ammons A, Briones EE, Soliman Y, Deming JW 2008 Comparative biomass structure and estimated carbon flow in food webs in the deep Gulf of Mexico. *Deep-Sea Res Pt II* 55: 2699-2711
- Salas HA 2001 Variación espacial y batimétrica de la biomasa de microfauna del suroeste del Golfo de México. Tesis de licenciatura, Escuela Nacional de Estudios Profesionales Iztacala, UNAM. México
- Sharma J, Baguley JG, Huettel RN 2007 The role of environmental gradients in the distribution of free-living nematodes in the deep northern Gulf of Mexico. *J Nematol* 39: 82-82
- Sharma J, Baguley JG, Montagna PA, Rowe GT 2012 Assessment of longitudinal gradients in Nematode communities in the deep northern Gulf of Mexico and concordance with benthic taxa. *International Journal of Oceanography* 2012: ID903018
- Smol N, Willems KA, Govaere JCR, Sandee AJJ 1994 Composition, distribution and biomass of meiobenthos in the Oosterschelde estuary (SW Netherlands). *Hydrobiologia* 282/283: 197-217
- Velázquez LR 2005 Variación de las comunidades de la macrofauna béntica de tres localidades de la zona abisal del suroeste del Golfo de México. Tesis de licenciatura, UAM-Xochimilco. México
- Wei C-L, Rowe GT, Escobar-Briones E, Nunnally C, Soliman Y, Ellis N 2012 Standing stocks and body size of deep-sea Macrofauna: Predicting the baseline of 2010 Deepwater Horizon oil spill in the northern gulf of Mexico. *Deep-Sea Res Pt I* in press

### **Créditos**

- Dr. Axayácatl Rocha Olivares, investigador responsable
- M. C. Ana Y. Castillo Páez, técnico de laboratorio



- M. C. Andrea Figueroa Montiel, técnico de laboratorio
- Biol. Mirayana Marcelino Barros, estudiante

## ESTUDIO FAUNÍSTICO DE LA MACROFAUNA (TAXONOMÍA)

Responsable, Dra. Victoria Díaz CICESE  
Participante: Ocean. Carmen Montiel

### Antecedentes

El conocimiento de la diversidad biológica es fundamental para comprender la estructura de los ecosistemas y poder determinar si hay algún impacto de origen antropogénico. Esto tiene mayor importancia particularmente ante el cambio global (calentamiento y acidificación de los océanos). El GM es un área con un alto valor económico por el contenido en hidrocarburos y la pesca. Los estudios de bentos del mar profundo del GM son limitados. Las condiciones extremas en esta región profunda del GM tales como baja temperatura (3-4°C), ausencia de luz, poco alimento han hecho considerar que hay poca abundancia y riqueza específica. El bentos en las zonas centrales de los mares tropicales como es el caso del GM dependen de la exportación del carbono biogénico para su subsistencia.

Diversos autores han encontrado que la abundancia y biomasa de los principales taxa del bentos decrecen a medida que aumenta la profundidad y se aleja de la costa. Esto está relacionado con una disminución en el flujo COP (C orgánico particulado) de la zona eufótica al fondo marino (Suess, 1980; Hernández-Arana et al., 2003; Chih-Lin et al., 2010). También se ha observado que a mayor profundidad la composición taxonómica cambia a taxa con organismos más pequeños como ostrácodos, nemátodos, poliquetos pequeños. Áreas con mayor flujo de COP presentan mayores abundancias de poliquetos y anfípodos (Rowe et al., 1991; Wei et al., 2010). Escobar-Briones & Soto (1997), Morse & Beazley (2008) y Escobar-Briones et al. (2008) encuentran en el G. de México que la concentración de C y N orgánicos disminuyen con la profundidad y la distancia a la costa, esto explica en gran medida la baja densidad y pequeña talla de la macroinfauna en la zona de estudio.

El área de muestreo de sedimentos para el GM debe ser de 0.16 a 0.25 m<sup>2</sup> y en este estudio solo se pudo analizar un núcleo de 78 cm<sup>2</sup> lo cual es insuficiente para calcular índices y describir la composición y estructura de las comunidades bénticas sin embargo la información generada aunque insuficiente será de utilidad en el establecimiento de la línea base, así como para la toma de decisiones en un futuro, sobre la explotación de recursos renovables y no renovables.

## Objetivos

Contribuir al conocimiento de la macrofauna béntica en la zona profunda del GM así como al establecimiento de la línea base.

1. Describir la composición faunística.
2. Determinar la variación hacia el interior del sedimento en 8 estratos de 0 a 12 cm de profundidad, de la abundancia y la riqueza taxonómica.

## Metodología

### Estrategia de muestreo

Las 11 estaciones analizadas se colectaron entre 1784 y 3748 m de profundidad con un nucleador múltiple de 6 núcleos de policarbonato. Para macrofauna solo fue posible analizar un núcleo de 10 cm diámetro y 12 cm de profundidad (área= 78 cm<sup>2</sup>). Las muestras fueron seccionadas en 8 estratos (0-1, 1-2, 2-3, 3-4, 4-6, 6-8, 8-10, 10-12 cm de profundidad al interior del sedimento) y posteriormente fijadas en una solución de formaldeído al 4% neutralizada con borato de sodio. Las estaciones muestreadas fueron: 2, 3, 5, 10, 17, 19, 24, 31, 33, 36 y 40 (Figura 1)

### Métodos de laboratorio

Para separar la fauna las muestras se lavaron con agua corriente, por estratos, utilizando malla de 300µm y la macrofauna retenida se transfirió a etanol al 70%. La observación de la fauna béntica se efectuó bajo microscopio estereoscópico, los organismos fueron clasificados, contados y colocados en viales con etanol para su preservación.

### Métodos de análisis

No es adecuado efectuar calculos de diversidad, equitatividad y otros análisis ecológicos con un solo núcleo (0.0078 m<sup>2</sup>), además cabe mencionar que el tamaño de muestra no es el apropiado. Para la investigación del bentos en el G. de México se recomienda una muestra de mayor tamaño (0.16 a 0.20 m<sup>2</sup>),

tamizada con malla de 300  $\mu\text{m}$  o al menos 4 núcleos (multinucleador) por estación.

## Resultados

En todas las estaciones se colectaron un total de 73 organismos pertenecientes a seis phyla: Annelida, Arthropoda, Phoronida, Sipunculida, Nemertinea y Nematoda. No se encontraron moluscos (Anexo 6).

Los resultados muestran que en los dos estratos más superficiales: 0-1 cm y 1-2 cm de profundidad se localizaron el mayor número de organismos bénticos: 24 y 26 respectivamente, considerando todas las estaciones. En estos estratos predominan los crustáceos con el 31.0% del total de macrofauna seguido por los anélidos poliquetos con el 26.02%. En los estratos intermedios 2-3 cm y 3-4 cm se encontraron 8 y 10 organismos respectivamente (poliquetos 9.6%, crustáceos 2.74% del total de macrofauna). De 4-6 cm y 6-8 cm se encontraron solo 2 y 1 organismo en todas las muestras analizadas: 1 oligoqueto, 1 eufásido y 1 nemátodo respectivamente. De 8-10 cm de profundidad no hubo ningún organismo del bentos presente y de 10-12 cm se encontraron solo 2 organismos (1 copépodo harpacticoide y un nemertino).

Los anélidos poliquetos fueron los más abundantes de 0-2 cm, las familias colectadas fueron: Spionidae, Paraonidae, Oweniidae, Sabellidae, Nereididae, Goniadidae y Syllidae: siendo las más abundantes Spionidae (11 individuos) y Paraonidae (6 individuos). Los espionidos son depositóvoros pero bajo ciertas condiciones hidrodinámicas pueden alimentarse como suspensívoros, los paraonidos son depositóvoros no selectivos. Se identificaron 8 géneros de poliquetos: Owenis, Paraonella, Aricidea, Levinsenia, Prionospio, Paraprionospio, Syllis y Glycinde. Los crustáceos estuvieron principalmente representados por ostracodos, isópodos y un amphipodo. No se encontró ningún molusco.

La densidad varió de 385 a 1,923 orgs/m<sup>2</sup> (Tabla 28). Las estaciones que presentaron mayores densidades fueron la 36 con 15 organismos (1,923 orgs/m<sup>2</sup>) y la 31 con 13 organismos (1,667 orgs/m<sup>2</sup>), ubicadas al NE y SE de la zona de estudio respectivamente.

Rowe et al. (2008) encuentran que las bacterias y la meiofauna son dominantes y usan el 96% de la materia orgánica disponible (4 mg C/m<sup>2</sup>), mientras que la macrofauna y los peces consumen solo el 4% y presentan baja diversidad y biomasa. Cosson et al. (1997) colectando con un nucleador USNL (0.25 m<sup>2</sup>) determinan densidades de 231 a 5403 orgs/m<sup>2</sup>, a profundidades de 1600 a 4600

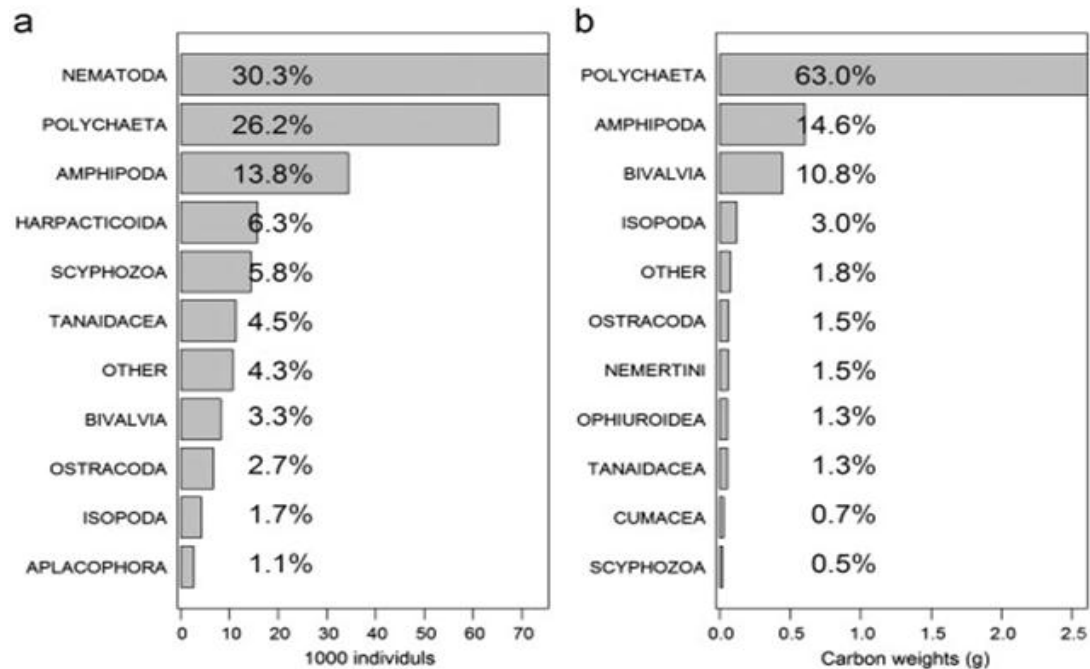
m. La densidad más alta encontrada en el presente estudio fue de 1,923 orgs/m<sup>2</sup> que es aproximadamente una tercera parte de la encontrada por estos autores.

Tabla 28. Densidad de macroinvertebrados bénticos en la zona de estudio.

ESTACION	DENSIDAD (orgs/m <sup>2</sup> )
2	1154
3	385
5	385
10	513
17	769
19	513
24	513
31	1667
33	897
36	1923
40	769

Se observa en la Tabla 29 tomada de Wei et al. (2012) que en cuanto a abundancia, Nematoda y Annelida Polychaeta predominan constituyendo el 30.3 y 26.2% respectivamente del total de macrofauna colectada (ambos grupos 56%); en biomasa los poliquetos ocupan el primer lugar (63% C en g), seguido por Amphipoda (14.6%) y Mollusca Bivalvia (10.8%). Cosson et al. (1997) en su estudio encuentran que los taxa dominantes son Polychaeta, Tanaidacea, Isopoda y Bivalvia. En este trabajo se encontraron 31% de crustáceos principalmente Peracárida, 26% de poliquetos y 0% de moluscos. Al igual que Wei et al. (2012) encontramos que los principales taxa en las muestras analizadas son Crustacea (Isopoda, Cumacea) y Polychaeta.

Tabla 29. Abundancia y biomasa de los diferentes taxa del bentos en el GM (Wei et al., 2012).



## Conclusiones

Se colectaron un total de 73 organismos pertenecientes a seis phyla. No se encontraron moluscos. Las estaciones con más abundancia fueron la 36 y la 31.

En los dos estratos más superficiales se localizaron el mayor número de organismos bénticos (50), predominaron los crustáceos peracáridos seguidos por los poliquetos.

Se obtuvo una baja abundancia y diversidad en parte debido a que la talla de muestra no fué adecuada y en parte por la poca disponibilidad de alimento en la zona. Los poliquetos fueron más abundantes de 0-2 cm, se colectaron 7 familias: Spionidae, Paraonidae, Oweniidae, Sabellidae, Nereididae, Goniadidae y Syllidae.

No se pudo establecer la estructura de la macrofauna y conocer el aporte de biomasa expresada en carbono ( $\text{g C/m}^2$ ), tampoco se pudieron hacer calculos de índices ecológicos por que el área de muestreo por estación no fué suficiente para estudiar las comunidades del bentos.

## Recomendaciones

Para la investigación del bentos en el G. de México se recomienda un nucleador de caja o una draga Smith-McIntyre de 0.16 m<sup>2</sup>, tamizando el material sedimentario con malla 300µm o la colecta de 3-4 núcleos (multinucleador) por estación.

## Referencias

- Cosson, N., M. Sibuet & J. Galeron. 1997. Community structure and spatial heterogeneity of the deep-sea macrofauna at three contrasting stations in the tropical northeast Atlantic. *Deep-sea Res. I* Vol. 44: 247-269.
- Escobar-Briones, E. & L. Soto. 1997. Continental shelf benthic biomass in the western Gulf of Mexico. *Continental Shelf Res.* 17: 585-604.
- Escobar Briones, E., L. Estrada Santillán and P. Legendre. 2008. Density and biomass of macrofauna in the Campeche canyon, southern Gulf of Mexico. *Deep sea Res.* Vol 55: 2679-2685.
- Hernández-Arana H., A. Rowden, M. Attrilla, R. Warwick G and G. Gold-Bouchot. 2003. Large-scale environmental influences on the benthic macroinfauna of the southern Gulf of Mexico. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 58: 825–841.
- Morse, J. & M. Beazley. 2008. Organic matter in deepwater sediments of the Northern Gulf of Mexico and its relationship to the distribution of benthic organisms. *Deep-Sea Res. II*, Vol. 55: 2563-2571.
- Rowe G., M. Sibuet, D. Deming, A. Khripounoff, J. Tietjan, S. Macko & R. Theroux. 1991. "Total" sediment biomass and preliminary estimates of organic carbon residence time in deep-sea benthos. *Mar. Ecol. Prog. ser.* 79: 99-114. (la biomasa se correlaciona con el flujo de POC en Introducción)
- Suess, E. 1980. Particulate organic carbon flux in the ocean-surface productivity and oxygen utilization. *Nature* 288: 260-263.
- Wei, C., G. Rowe, G. Hubbard, A. Scheltema, G. Wilson, I. Petrescu, J. Foster, M. Wicksten, M. Chen, R. Davenport, Y. Solimann & Y. Wang. 2010. Bathymetric zonation of deep-sea macrofauna in relation to export of surface phytoplankton production. *Mar. Ecol. prog. ser.* 399: 1-14.

Wei, C., G. Rowe, E. Escobar, C. Nunnally, Y. Soliman & N. Ellis. 2012. Standing stocks and body size of deep-sea macrofauna. Predicting the baseline of 2010 Deepwater Horizon oil spill in the northern Gulf of Mexico. *Deep-Sea Res. I*, Vol. 69: 82-99.



## MONITOREO DE HONGOS EN SEDIMENTOS MARINOS

Responsable: Dra. Meritxell Riquelme, CICESE

Participantes: Jovani Catalán Dibene, Adriana Romero Olivares, CICESE

### Introducción

Durante la primera campaña de muestreo XIXIMI I se procesaron muestras provenientes de 10 núcleos de sedimento (5 por estación) de las cuales las muestras de las estaciones 3, 19 y 35 amplificaron parte de la secuencia ITS1 e ITS2, así como la subunidad 5.8 de hongos Dikarya. Estos amplicones fueron clonados y los plásmidos obtenidos se sometieron a análisis de restricción con la enzima *Rsa* I con la cual se definieron 28 filotipos. Las secuencias de cada filotipo fueron secuenciadas y se encontró que en la estación 3 el 62% de los amplicones secuenciados correspondían al hongo *Didymella bryoniae* un fitopatógeno de las cucurbitáceas; en la estación 19 el 62% correspondieron a la levadura *Candida albicans*; por último en la estación 35 el 89% de los amplicones correspondieron a *Candida sake*. Las especies del género *Candida* han sido reportadas anteriormente como hongos capaces de degradar hidrocarburos (Kaczorek *et al*, 2008; Kaczorek *et al*, 2005; Polman *et al*, 1994). Es necesario el procesamiento de las muestras de la campaña XIXIMI II para poder realizar una comparación de los resultados y poder determinar si la presencia de estas especies es coincidental o siguen alguna tendencia ambiental emergente.

### Metodología

#### Estrategia de muestreo

El muestreo se llevó a cabo en puntos ubicados en el GM (Figura 1) entre los paralelos 20 – 25°N, así como entre los meridianos 86 – 96°O. Hubo un total de 11 muestras de las cuales las estaciones E3, E10, E17, E19, E24, E31, E33, E36 y 4E0, E2 y E5. Con excepción de las estaciones E2, E10, E17 y E24, todas las demás estaciones habían sido muestreadas en la campaña XIXIMI I.

Para la toma de muestras en cada estación se llevó a cabo el siguiente protocolo usando guantes de nitrilo en todo momento:

Abrir cinco nuevas jeringas y cortarles la punta con la aguja de tal forma que quede un cilindro.

Sumergir las jeringas (cilindro) en el núcleo (Figura 153).

Sacar las jeringas e inmediatamente taparlas con parafilm en lo que se transporta al laboratorio.

Vaciar aproximadamente 1 ml de sedimento (o hasta que el sedimento alcance el tope) en viales con amortiguador de sacarosa 25% w/v (almacenados a temperatura ambiente) (Figura 153). Agitar para que se haga una muestra homogénea de amortiguador y sedimento. Sellar los viales con parafilm horizontal y verticalmente. Marcar cada vial con el número de estación y número de submuestreo, por ejemplo: 1-01, 1-02, 1-03, 1-04 y 1-05.

Sellar con parafilm la jeringa que contiene el resto de sedimento (también de forma horizontal y vertical) y marcar al igual que los viales.

Las muestras se almacenaron en bolsas ziploc a -20 °C durante la campaña, así como durante su transporte al laboratorio. Posteriormente se guardaron a -80°C hasta su procesamiento en el mes de enero de 2012.



Figura 153. Esquema de la toma de muestras, así como método de almacenamiento de sedimentos en tubos de 1.5 ml con amortiguador de sacarosa 25% w/v.

## Métodos de laboratorio

### *Extracción de ADN de muestras de sedimentos*

Se extrajo ADN total de cada muestra de sedimento usando el *Ultraclean Soil DNA Isolation kit* (MoBio Lab), especial para extracción de ADN de suelos, siguiendo el protocolo proporcionado por el fabricante. Se utilizó aproximadamente

1 gr de sedimento por extracción; 5 muestras por estación fueron procesadas, lo que consumió la muestra en su totalidad. Antes de la extracción las muestras fueron centrifugadas a 13,000 rpm por 1 minuto para eliminar la solución amortiguadora de sacarosa. Se llevó a cabo la cuantificación de ADN utilizando un espectrofotómetro Nanodrop™ (Thermo Fisher Scientific, Inc.), haciendo lecturas a 260 nanómetros. Se utilizó 1 µl de muestra y como blanco, agua.

Para los controles de ADN en las PCR taxón-específicas los hongos *Neurospora crassa*, *Coprinopsis cinerea*, *Mucor rouxii*, *Allomyces macrogynus*, y *Saprolegnia parasitica*, fueron crecidos en PDA por una semana para obtener micelio. Una porción de micelio de cada uno de los hongos se usó para realizar una extracción de ADN con fenol-cloroformo-alcohol isoamílico.

#### *Amplificación por PCR del ADNr de hongos*

Se utilizó la reacción en cadena de la polimerasa anidada de dos pasos, para hongos Dikarya (Martin y Rygiel, 2005) así como una PCR convencional en la cual se utilizaron oligonucleótidos taxón-específico dentro de la región ITS1-5.8S-ITS2 de hongos para los distintos taxones del reino Fungi (Nikolcheva y Bärlocher, 2005) y oligonucleótidos universales para hongos que amplifican parte de la región de ADNr de la subunidad pequeña 18S de hongos (Greene *et al.* 2000). Ambas PCR amplifican la región ITS 1 y 2 así como la subunidad 5.8 del ADN ribosomal (ADNr), asimismo amplifican parcialmente la región 28S y 18S, también del ADNr.

Las reacciones se prepararon en un volumen final de 20 µl. En el caso de la PCR taxón-específico se utilizó 1 µl de una dilución 1:10 de las extracciones de ADN total como molde para la reacción. Para las reacciones anidadas, 1 µl de ADN total fue utilizado para el primer paso; para el segundo paso se mezcló 1 µl de la primera reacción de cada submuestra (5 en total por cada estación) para formar un combinado por estación, del cual se utilizó 1 µl como molde. Para las reacciones se utilizaron 1.5 µl de una mezcla de deoxinucleótidos a una concentración de 10 mM (Promega, EUA), 1.25 µl de oligonucleótido sentido (Tabla 30) a una concentración de 10 µM, así como 1.25 µl de oligonucleótido antisentido (Tabla 30) a una concentración de 10 µM, 2 µl de cloruro de magnesio a una concentración de 25 mM (Promega, EUA), 0.25 µl (1 unidad) de GoTaq™ Flexi DNA polymerase [5U/µl] (Promega, Co.), 4 µl de amortiguador GoTaq™ [5x] (Promega, Co.) y 8.75 µl de agua destilada grado HPLC. Se hicieron reacciones control (un control negativo y un control positivo) las cuales fueron acarreadas a la segunda PCR. Como control negativo se utilizó agua y como control positivo ADN genómico de especies correspondientes a cada taxón; para los oligonucleótidos universales Dikarya (PCR anidada) e ITSAsco se utilizó como control positivo 1 µl

del ADN genómico del ascomiceto *Neurospora crassa*, a una concentración de 100 ng/μl; en el caso de las reacciones con los oligos ITSBasidio se utilizó 1 μl del ADN del basidiomiceto *Coprinopsis cinerea* a una concentración de 100 ng/μl; para ITSZygo se utilizó 1 μl del ADN del zigomiceto *Mucor rouxii* a una concentración de 30 ng/μl; para ITSChytrid se utilizó 1 μl del ADN del quítrido *Allomyces macrogynus* a una concentración de 30 ng/μl; en el caso de ITSOo se utilizó 1 μl del ADN del oomiceto *Saprolegnia parasitica* a una concentración de 100 ng/μl. Las condiciones de los ciclos de PCR variaron (Tabla 31), así como también el tamaño esperado de los amplicones (Tabla 30) dependiendo de los oligonucleótidos utilizados. Cabe recalcar que los oligonucleótidos específicos por taxón (Nikolcheva y Bärlocher, 2005) se utilizaron en combinación con el oligo ITS5 (White et al. 1990) (Tabla 30). Todas las reacciones se llevaron a cabo en un termociclador MJ Mini™ Gradient Thermal Cycler (Biorad, EUA).

Tabla 30. Nombre, secuencias y referencia de los oligonucleótidos utilizados, así como los tamaños esperados en las distintas reacciones de PCR

<b>OLIGONUCLEÓ- TIDOS</b>	<b>SECUENCIA (5' – 3')</b>	<b>REFERENCIA</b>
<b>DIKARYA</b>		
Primera PCR		
NSA3 (sentido)	AAACTCTGTCGTGCTGGGG ATA	Martin y Rygiewicz, 2005
NLC2 (antisentido)	GAGCTGCATTCCCAACAA CTC	Martin y Rygiewicz, 2005
Tamaño esperado: 1200 pb		
Segunda PCR		
NSI1 (sentido)	GATTGAATGGCTTAG TGAGG	Martin y Rygiewicz, 2005
NLB4 (antisentido)	GGATTCTCACCTCTATGA C	Martin y Rygiewicz, 2005
Tamaño esperado: 900 pb		
<b>UNIVERSALES (HONGOS)</b>		
RDS 478	GTGGTTCTATTTGTTGGTT TCTA	Greene <i>et al.</i> 2000
RDS 482	TAGCGCGCGTGCGGCCCA GA	Greene <i>et al.</i> 2000
Tamaño esperado: 600 pb		
<b>TAXÓN ESPECÍFICO</b>		
ITS5 (sentido)	GGAAGTAAAAGTCGTAACA AGG	White <i>et al.</i> 1990
ITSAsco (antisentido)	CGTTACTRRGG CAATCCCTGTTG	Nikolcheva y Bärlocher, 2004
Tamaño esperado: 500 pb		
ITSBasidio (antisentido)	GCRCGGAARACGCTTCTC	Nikolcheva y Bärlocher, 2004
Tamaño esperado: 900 pb		
ITSZygo (antisentido)	AAAACGTWTCTTCAA	Nikolcheva y Bärlocher, 2004
Tamaño esperado: 500		
ITSChytrid (antisentido)	TTTTCCCGTTTCATTCGCCA	Nikolcheva y Bärlocher, 2004
Tamaño esperado: 700 pb		
ITSOo (antisentido)	AAAACGTWTCTTCAA	Nikolcheva y Bärlocher, 2004
Tamaño esperado: 1500 pb		

Tabla 31. Condiciones de la PCR para los distintos conjuntos de oligonucleótidos utilizados.

Conjunto de oligonucleótidos	Programa de PCR				
	Desnaturalización Inicial °C/min	Ciclo Paso 1 Desnaturalización °C/seg	Ciclo Paso 2 Alineamiento de oligonucleótidos °C/seg	Ciclo Paso 3 Extensión de la polimerasa °C/seg	Extensión final °C/min
<b>Dikarya</b>	95/2	95/30	55/40 y 60/40	72/60	72/5
<b>Universales</b>	95/2	95/30	68/30	72/50	72/5
<b>ITSAsco</b>	95/2	95/30	58/30	72/50	72/5
<b>ITSBasidio</b>	95/2	95/30	58/30	72/50	72/5
<b>ITSChytrid y Zygo</b>	95/2	95/30	55/30	72/50	72/5
<b>ITSOo</b>	95/2	95/30	49/30	72/60	72/5

Todos los productos de PCR fueron analizados por electroforesis en un gel de agarosa al 1% teñido con GelRed® (Phenix Research, EUA) en el cual se corrieron 5 µl del producto de PCR a 80 Volts por 45 minutos, utilizando como referencia 10 µl del marcador de peso molecular de ADN de fago lambda digerido con *EcoRI* y *HindIII* (Promega, EUA) a una concentración de 50 ng/µl.

#### *Clonación de amplicones y análisis de transformantes*

Para determinar la riqueza fúngica, los amplicones de la PCR anidada para hongos del subreino Dikarya fueron purificados y clonados en el vector TOPO TA (Invitrogen, Co.). Esta técnica se ha utilizado con éxito para caracterizar la riqueza

fúngica de ecosistemas extremos a partir de ADN extraído de suelo (Romero-Olivares *et al.* 2012 en prensa).

La purificación de los amplicones previa a la clonación, se llevó a cabo con el kit de purificación *QIAquick™ gel extraction kit* (Qiagen, Inc.) siguiendo el protocolo recomendado por la compañía. Una vez purificados los insertos, la clonación se realizó siguiendo las recomendaciones del kit de clonación TOPO TA (Invitrogen, Co.). El vial con 50 µl de las células competentes de *Escherichia coli* (TOP10), fue descongelado en hielo. A éste se le agregaron 2 µl de la reacción de clonación y se incubó en hielo por 30 minutos. Se aplicó shock térmico por 30 segundos en baño maría a 42°C. Inmediatamente se colocó el vial en hielo y se agregaron 250 µl de medio SOC precalentado a 37°C a las células transformadas. Se incubó 1 hora a 37°C con agitación a 200 rpm. Posteriormente se esparcieron 50 µl de las células transformadas en cada una de cuatro placas de medio LB (Luria-Bertani) suplementado con agar (1.5 %) ampicilina (100 µg/ml) y X-Gal (40mg/ml) y se incubaron a 37°C de 12 a 16 horas. Se seleccionaron las colonias transformadas por complementación α (color blanco), tomando de 40-100 colonias por cada clonación.

#### *Extracción de ADN plasmídico por lisis alcalina y análisis de restricción*

Las colonias seleccionadas se crecieron en 5 ml de LB/Ampicilina a 37°C a 250 rpm de agitación por 14 horas. De los 5 ml de cultivo se tomaron 0.8 ml de cultivo que fueron mezcaldos con 1.2 ml de glicerol al 80% para ser resguardados. Posteriormente se cosecharon las colonias centrifugando aproximadamente 3 ml de cultivo, 30 segundos a 13,000 rpm. Se decantó el sobrenadante y se resuspendió el pellet en 100 µl de solución de Tris-HCl 50 mM fría con ribonucleasa A. Se agregaron 150 µl de solución NaOH 1 M – SDS 20% y se mezcló por inversión. Se añadieron 200 µl de solución de acetato de potasio fría y nuevamente se mezcló por inversión. Se centrifugó 10 minutos a 13,000 rpm. Se transfirió el sobrenadante a un vial limpio y se agregaron 2 volúmenes de etanol absoluto frío, se mezcló por inversión y se incubó 30 minutos a -20°C. Se centrifugó durante 10 minutos a 13,000 rpm y se desechó el sobrenadante. A continuación se lavó el ADN con 500 µl de etanol al 75% frío y se centrifugó 5 minutos a 13,000 rpm. Se desechó el sobrenadante y se dejó secar el pellet al aire por aproximadamente 30 minutos. El ADN plasmídico fue resuspendido en 40 µl de agua HPLC. Para verificar la presencia de ADN plasmídico se llevó a cabo una electroforesis con las mismas condiciones descritas anteriormente para la verificación de amplicones.

Para diferenciar las secuencias ITS, los plásmidos obtenidos fueron sometidos a un análisis de restricción (RFLP). La enzima utilizada fue la RsaI que

reconoce la secuencia GTAC dejando extremos romos y que sólo corta tres veces dentro del plásmido obteniendo 3 fragmentos de 1800, 700 y 200 pb.

Una vez seleccionada la enzima, se llevaron a cabo los RFLPs siguiendo las recomendaciones descritas para la enzima *RsaI*. Esto es: 1 unidad de *RsaI* [10,000U/ml] (New England Biolabs, Inc.), 2 - 4 µl de plásmido (dependiendo de la concentración de las extracciones de ADN plasmídico), 2 µl de buffer 4 [10x] (New England Biolabs, Inc.) para una concentración final de 1x y se llevó a 20 µl con agua destilada grado HPLC. Se incubó a 37°C durante 2 horas. Para amplicones ITS que no presentaron secuencia de reconocimiento para la enzima *RsaI* se llevó a cabo una digestión alternativa con la enzima *EcoRI* (GAATTC). Las reacciones se llevaron a cabo siguiendo las recomendaciones descritas para la enzima *EcoRI*, esto es: 1 unidad de *EcoRI* [10U/µl] (Promega, Co.), 2 - 4 µl de plásmido (dependiendo de la concentración de las extracciones de ADN plasmídico), 2 µl de buffer RE "H" [10x] (Promega, Co.), 0.2 µl de BSA [10µg/µl] (Promega, Co.) y se llevó a 20 µl con agua destilada grado HPLC. Se incubó a 37°C durante 2 horas.

La verificación de los productos de restricción se llevó a cabo bajo las mismas condiciones descritas anteriormente para las electroforesis.

Se analizaron los patrones de bandas y se seleccionó una muestra por patrón para enviar a secuenciar.

#### *Extracción de ADN plasmídico por lisis alcalina para secuenciación y secuenciación*

Para la secuenciación se crecieron las colonias en LB líquido bajo las condiciones previamente descritas a partir de los resguardos de glicerol. La purificación de ADN plasmídico se llevó a cabo con el *kit Zippy® plasmid purification kit* (Zymo Research, USA), para asegurar la pureza del ADN. La extracción se llevó a cabo siguiendo el protocolo proporcionado por el fabricante y se verificó por electroforesis bajo las mismas condiciones descritas anteriormente.

Las muestras de ADN plasmídico se enviaron a secuenciar a la empresa SeqXcel (San Diego, CA, EE.UU.), por el método de Sanger utilizando los oligonucleótidos sentido y antisentido M13F (5' – GTAAAACGACGGCCAGT – 3') y M13R (5' – GCGGATAACAATT TCACACAGG – 3'), respectivamente, proporcionados por la empresa y que flanquean los extremos en donde se insertaron los amplicones ITS en el plasmido utilizado.

#### Métodos de análisis



El análisis de los electroferogramas se llevó a cabo con el software FinchTV (Geospiza, Inc. 2005). Estas secuencias fueron alineadas con las secuencias disponibles en la base de datos del GenBank (NCBI) utilizando BLAST (Basic Local Alignment Search Tool) (Altschul *et al*, 1990). En base al valor de E, al porcentaje de la cobertura y el porcentaje de máxima identidad se determinaron los filotipos de las secuencias.

Los patrones de restricción fueron analizados *InSilico* con el software NEBcutter V2.0 (Vincze et al, 2003). Las secuencias ITS recibidas fueron insertadas en el sitio que flanquean los cebadores M13F y M13R en la secuencia de ADN del plásmido; se formó un archivo.fas por cada muestra y estas se sometieron a digestión *InSilico*. Una vez llevada a cabo la digestión, se observó el patrón de restricción obtenido en cada muestra en un gel de agarosa al 1% simulado *In Silico*, con un marcador de peso molecular de 1 kb.

## **Resultados**

Las extracciones de ADN presentaron concentraciones muy bajas, las cuales no pudieron ser vistas al ser teñidas con GelRed®. Sin embargo en la Tabla 32 se muestran las concentraciones de cada una de las muestras de ADN total obtenidas.

Tabla 32. Concentración de ADN de cada muestra pro estación de muestreo.

Estación	Muestra	ADN (ng/μl)	Estación	Muestra	ADN (ng/μl)
1	E2-1	30.8	24	E24-1	35.4
	E2-2	32.8		E24-2	31.1
	E2-3	6.5		E24-3	33
	E2-4	6.8		E24-4	27.5
	E2-5	5.2		E24-5	31.7
3	E3-1	31.5	31	E31-1	33.6
	E3-2	31.7		E31-2	34.4
	E3-3	34.1		E31-3	45.6
	E3-4	27.2		E31-4	27.1
	E3-5	32.8		E31-5	34.6
5	E5-1	32.7	33	E33-1	34.3
	E5-2	25.8		E33-2	29
	E5-3	31.6		E33-3	25.7
	E5-4	29.1		E33-4	32.7
	E5-5	24.9		E33-5	29.2
10	E10-1	12.4	36	E36-1	36
	E10-2	6		E36-2	32.1
	E10-3	6.1		E36-3	30.5
	E10-4	12.4		E36-4	31.1
	E10-5	8.6		E36-5	26.5
17	E17-1	7.1	40	E40-1	5.7
	E17-2	6.6		E40-2	7.3
	E17-3	4		E40-3	4.4
	E17-4	3.5		E40-4	4
	E17-5	3.8		E40-5	6.6
19	E19-1	27.2			
	E19-2	27.2			
	E19-3	26.8			
	E19-4	25.6			
	E19-5	29			

La reacción de PCR anidada usando los oligos NS11 y NLB4 de las muestras de ADN genómico total, amplificó bandas entre 700-900 pb en todas las muestras (Figura 154).

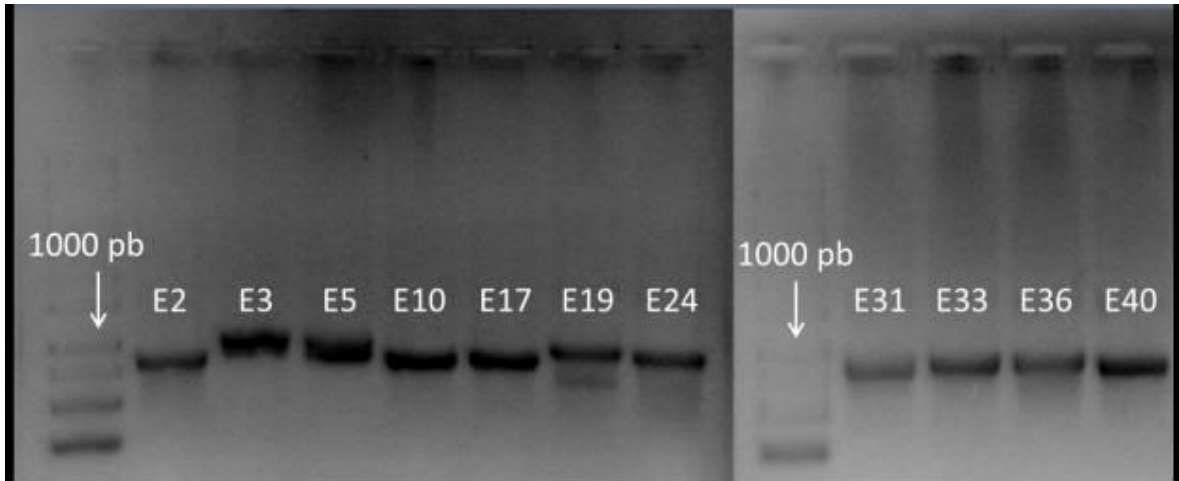


Figura 154. Resultado de la segunda reacción de PCR anidada con los oligonucleótidos universales NSI1 y NLB4 para hongos Dikarya

Los oligos universales RDS no detectaron ADN fúngico en ninguna de las estaciones (Figura 155, A). Los oligos ITS específicos para ascos, basidios y zigomicetos tampoco lograron detectar hongos de esos taxones en las muestras (Figura 155, B, C y D).

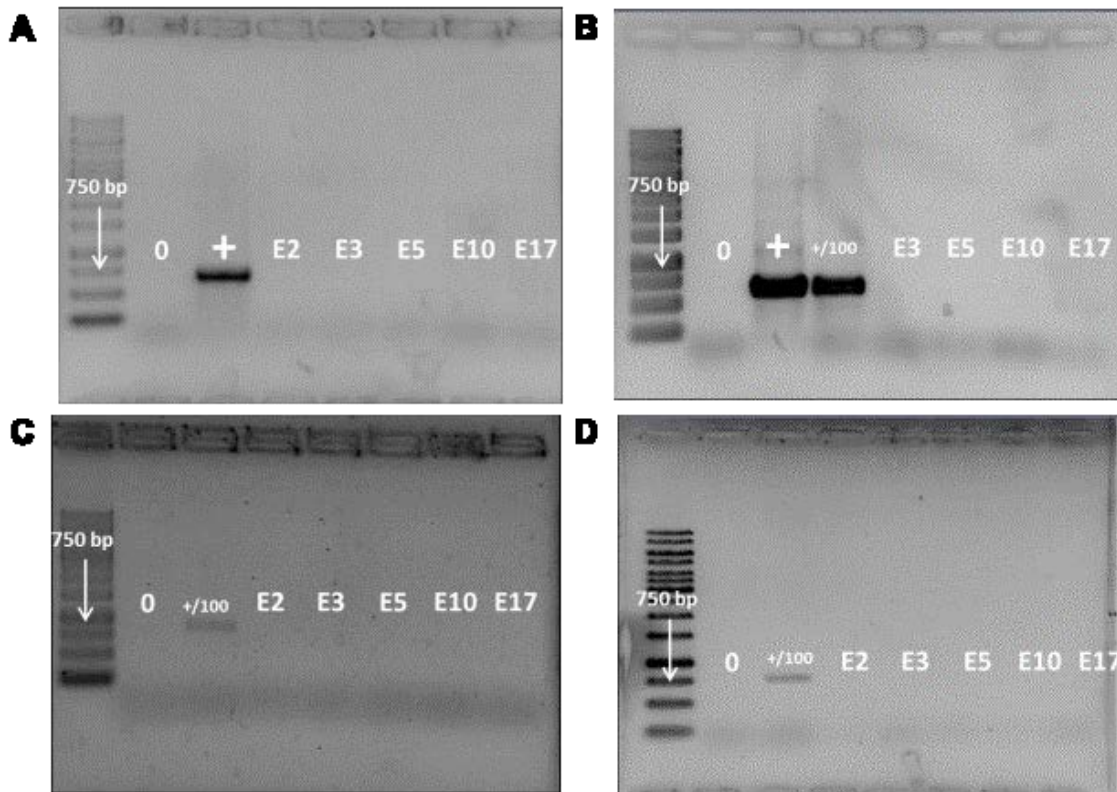


Figura 155. Resultado de la reacción de PCR con los oligos universales RDS (A) y los oligos específicos para Ascomicetos (B), Basidiomicetos (C) y Zigomicetos (D). El 0 corresponde al control negativo (sin templado) y el signo + corresponde al control positivo y el signo +/100 indica que el control fue diluido 100 veces. Para A y B, ADN genómico de *Neurospora crassa* se utilizó como control; para el C, se utilizó ADN genómico de *Coprinopsis cinerea* y para el D ADN genómico de *Mucor rouxii*.

### Análisis de restricción y secuenciación

Para el análisis de restricción, las clonaciones se llevaron a cabo solamente con los amplicones obtenidos con la PCR anidada para hongos Dikarya. Se obtuvieron clones de la estaciones E2, E3, E19, E36 y E40. La estación E19 fue la que presentó más patrones de restricción diferentes (11), seguida por la E3 y E36, que presentaron ambas 8 patrones, mientras que E2 y E40 presentaron 6 y 4 patrones, respectivamente. En la Tabla 33 se presentan los resultados de la secuenciación por estación con sus respectivos valores de cobertura de secuencia, Valor de E, Máxima identidad y la frecuencia de cada patrón de restricción. Se envió a secuenciar una muestra por cada patrón.

Tabla 33. Filotipos según el porcentaje de cobertura, similitud y valor de E, así como el número de repeticiones del patrón de restricción por estación.

Estación	Muestra	Filotipo	Cobertura de secuencia (%)	Valor de E	Máxima Identidad (%)	Frecuencia del patrón
2	6	<i>Candida dubliniensis</i>	80%	2.00E-162	99%	3
	8	<i>Candida albicans</i>	70%	3.00E-96	99%	3
3	1	Uncultured Chytridiaceae	33%	3.00E-105	88%	1
	2	<i>Chytriumyces angularis</i>	22%	4.00E-50	97%	7
	3	<i>Gelasinospora sp.</i>	60%	4.00E-55	98%	1
19	1	Uncultured Pezizomycotina	70%	7.00E-82	95%	1
	2	Fungal sp. AB6 18S	70%	0	98%	46
	3	Fungal sp. AB6 18S	65%	0	98%	29
	4	Fungal sp. AB6 18S	73%	0	98%	1
	5	Uncultured ascomycete	70%	7.00E-92	95%	2
	11	<i>Aureobasidium pullulans</i>	65%	0	98%	3
	18	<i>Aureobasidium pullulans</i>	84%	5.00E-143	88%	2
	42	<i>Aureobasidium pullulans</i>	86%	0	90%	1
	50	<i>Aureobasidium pullulans</i>	85%	1.00E-164	89%	1
	64	<i>Aureobasidium pullulans</i>	85%	8.00E-166	89%	1
80	<i>Aureobasidium sp.</i>	39%	5.00E-59	99%	1	

Tabla 33, continuación

36	1	Eurotiomycetes sp.	80%	4.00E-174	100%	2
	2	Eurotiomycetes sp.	80%	8.00E-166	99%	6
	4	<i>Penicillium dipodomycicola</i>	67%	7.00E-82	99%	1
	5	Eurotiomycetes sp.	80%	2.00E-162	99%	6
	6	<i>Penicillium chrysogenum</i>	87%	0	99%	9
	7	Eurotiomycetes sp.	81%	0	100%	8
	9	<i>Eupenicillium crustaceum</i>	45%	2.00E-57	98%	7
	13	<i>Eupenicillium crustaceum</i>	66%	2.00E-78	100%	27
40	1	<i>Penicillium solitum</i>	71%	3.00E-100	99%	34
	2	Saccharomycetale s sp.	79%	0	98%	1
	10	<i>Candida albicans</i>	84%	0	99%	2
	17	<i>Candida albicans</i>	85%	0	99%	2

La cobertura de secuencia se refiere al porcentaje de la secuencia que se alinea o es similar a la registrada en la base de datos de NCBI; el valor de E indica la probabilidad de que el alineamiento haya ocurrido al azar, es decir, si la similitud es casualidad o si realmente son similares, y por último la identidad máxima es el porcentaje de nucleótidos similares en ambas secuencias.

Se obtuvo la abundancia de cada filotipo por estación, con base en el número de veces que se repitió un determinado patrón de restricción. En la Figura 156 se puede observar que para la estación 2 se obtuvieron patrones diferentes, pero todos pertenecientes al género *Candida*, alineándose a secuencias tanto de *Candida dublinensis* como de *Candida albicans*. En la Figura 157 se observa la abundancia relativa de las especies encontradas en la estación 3 donde se encontraron varias secuencias que se alinean con secuencias correspondientes al ITS de hongos quitridiomycetos, principalmente con la especie *Chytrium angularis*, así como con un miembro de la familia Sordariaceae y género *Gelasinospora*. Para la estación 19 (Figura 158) dominó una especie fúngica no descrita, nombrada Fungal sp. AB6, que parece ser cercana a *Aureobasidium*. Este último fue encontrado en solo una muestra de esta estación. La segunda especie más abundante en la estación 19 fue el ascomiceto *Sarcinomyces*

*crustaceus*, el cual es un viejo nombre de *Aureobasidium pullulans*. En la estación 36 (Figura 159) dominaron miembros del género *Penicillium*, siendo el más abundante *Eupenicillium crustaceus*. Por último, en la Figura 160 se puede observar que esta estación estuvo dominada por *Penicillium solitum*, sin embargo, también se encontraron representantes de las levaduras del género *Candida* y un miembro no descrito de los sacaromicetales a los cuales pertenece el género *Candida*. La estación 40 aún está en proceso.

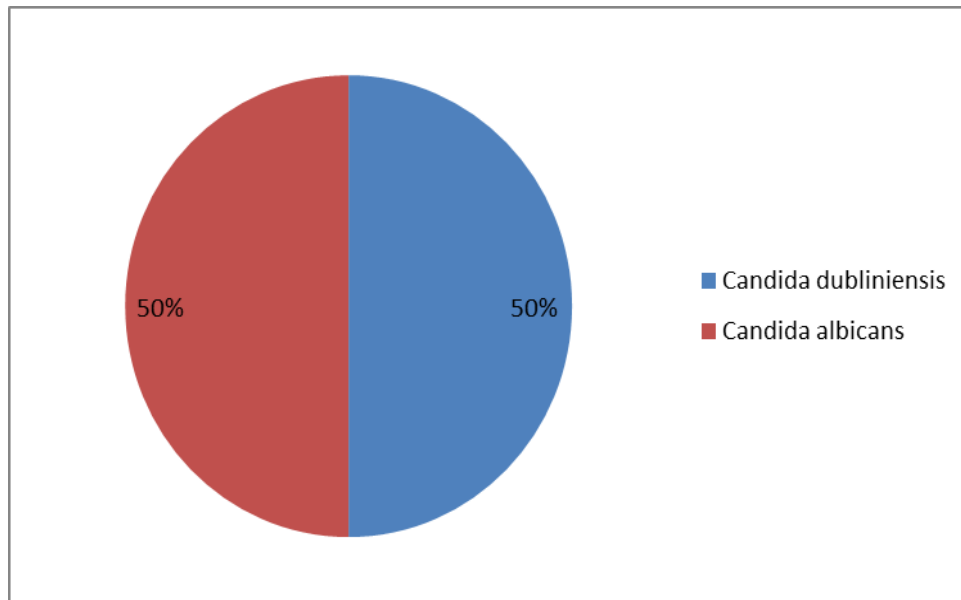


Figura 156. Abundancia de los filotipos encontrados en la estación 2.

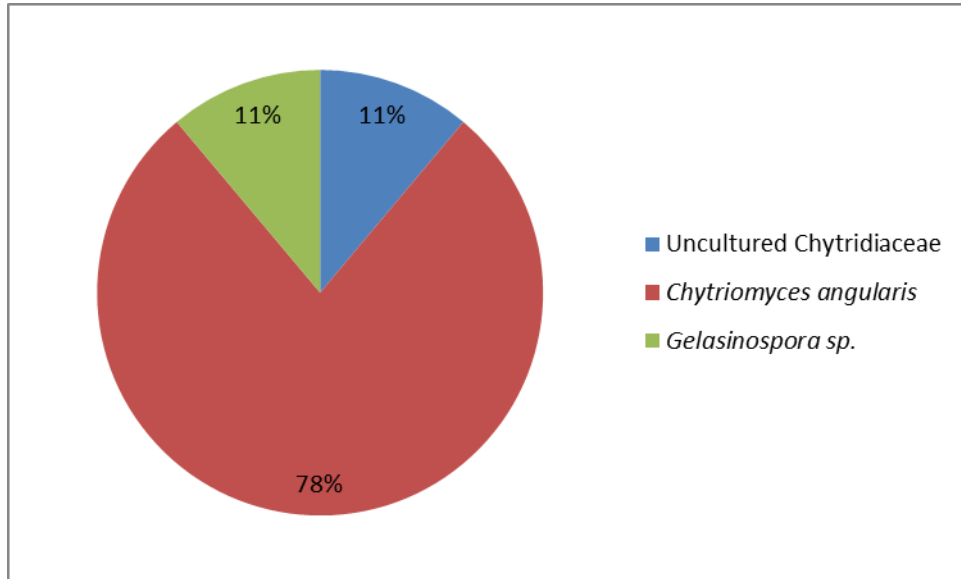


Figura 157. Abundancia de los filotipos encontrados en la estación 3.

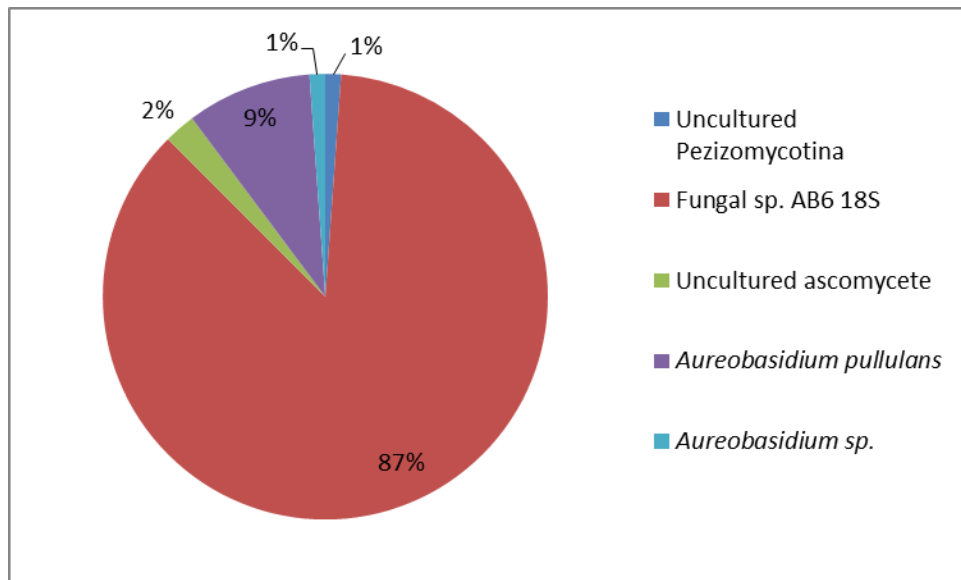


Figura 158. Abundancia de los filotipos encontrados en la estación 19.



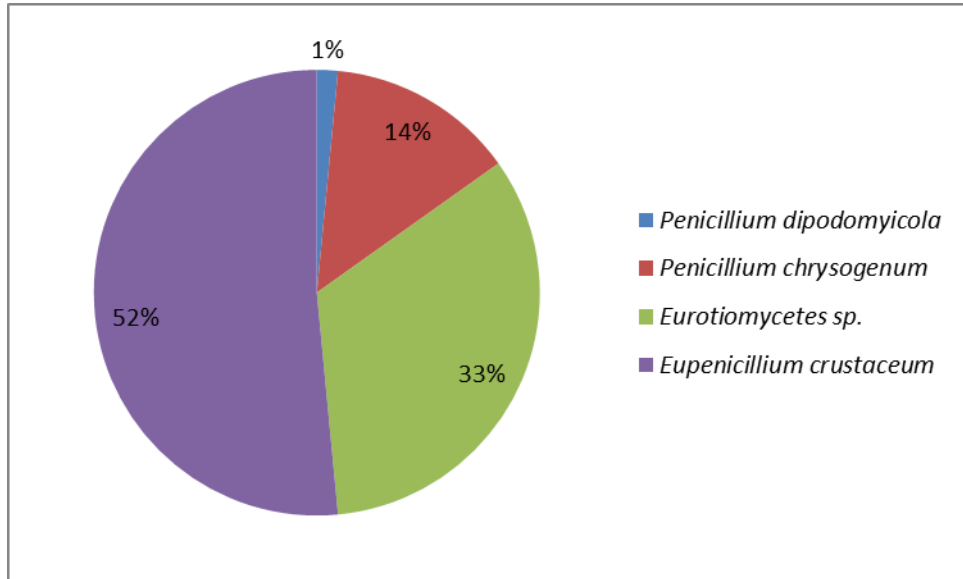


Figura 159. Abundancia de los filotipos encontrados en la estación 36.

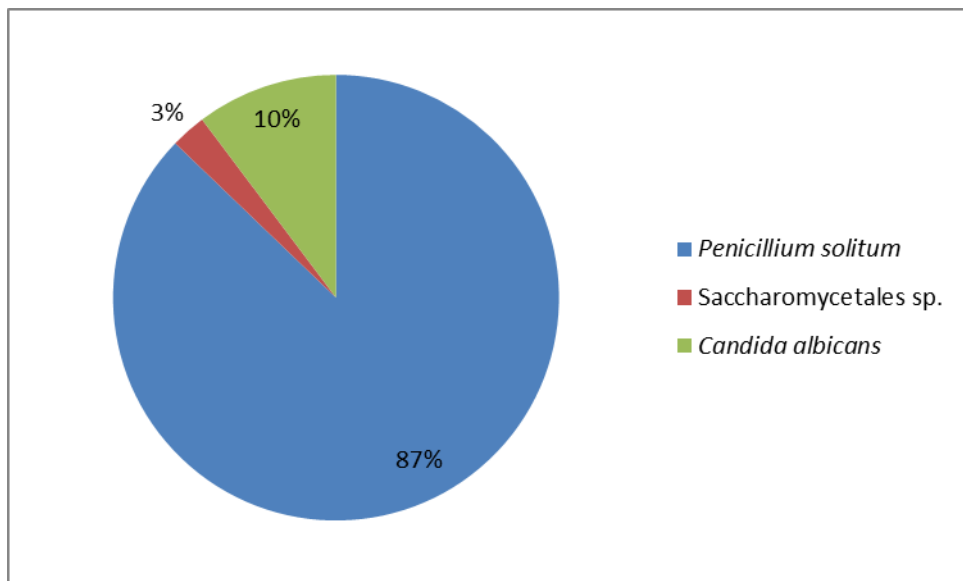


Figura 160. Abundancia de los filotipos encontrados en la estación 40.

## Discusión y conclusiones

En comparación con el muestreo realizado durante la expedición XIXIMI I, las especies del género *Candida* fueron menos abundantes y estuvieron presentes en menor proporción en las muestras de XIXIMI II. Esto es especialmente notable en las estaciones E3 y E19, que fueron repetidas durante este muestreo, y donde no se pudieron identificar patrones correspondientes a este género. En estas estaciones, las especies encontradas entre campañas son diferentes. Sin embargo, sí se encontraron diferentes especies de *Candida* en la estación E2. En el caso de la estación E3 se encontró la especie *Chytriumyces angularis*, la cual ha sido reportada en aguas profundas (Bass *et al.* 2007), y que no se había encontrado en las muestras del XIXIMI I. En la estación E19 se encontró una alta abundancia de la especie no descrita de hongo AB6, el cual fue encontrado en suelos de la península antártica (Arenz y Blanchette, datos no publicados). Sin embargo, el siguiente hongo que aparece cercano en el BLAST es el hongo *Aureobasidium pullulans* el cual es una levadura cosmopolita perteneciente a los ascomicetos que se ha reportado tanto en el suelo como en el océano (Bass *et al.* 2007). En el caso de la estación E36 se encontraron miembros de la clase Eurotiomicetes dentro de la cual se encuentran los hongos del género *Penicillium* y sus teleomorfos. Al igual que *Aureobasidium*, *Penicillium* es un hongo que se ha aislado de suelo y se encuentra en gran cantidad en ambientes terrestres. Esto concuerda con estudios anteriores que han encontrado que los hongos aislados de sedimentos marinos son hongos aislados comúnmente de suelos continentales (Bass *et al.* 2007).

Es importante recalcar que los valores de E obtenidos para la mayor parte de las muestras como lo es el caso de las muestras de la estación E3 son considerados bajos. Estos valores de E bajos se deben a que las secuencias obtenidas fueron secuencias cortas de ADN y no cubrían toda la región ITS de los organismos arrojados por el BLAST.

## Recomendaciones

El estudio prospectivo de las comunidades fúngicas en ambientes marinos es un área de estudio relativamente joven. El estudio de la diversidad fúngica de los fondos marinos puede llevar a encontrar especies de importancia biológica o económica. Aunado a esto, el encontrar especies degradadoras de hidrocarburos como lo es *Candida*, nos invita a hacer un análisis detallado de las características químicas de los puntos de muestreo donde se encontró este género para determinar la importancia de esta especie en relación a las concentraciones de hidrocarburos.

Por otra parte, el uso de genotecas como herramienta para la determinación de la biodiversidad fúngica acarrea sesgos desde su inicio, debido a que no existe método de clonación que asegure aislar todas y cada una de los filotipos presentes en una muestra. Una opción factible sería una caracterización metagenómica usando métodos de secuenciación masiva de nueva generación, que elimina los pasos de ligación y clonación proporcionando datos más certeros sobre las comunidades muestreadas.

## Referencias

- Bass D, Howe A, Brown N, Barton H, Demidova H, Michelle H, Li L, Sanders H, Watkinson SC, Willcock S y Richards TA 2007 Yeast forms dominate fungal diversity in the deep oceans. *Proceedings of the Royal Society*. 274: 3069-3077.
- Greene DR, Koenig G, Fisher MC y Taylor JW 2000 Soil Isolation and Molecular Identification of *Coccidioides immitis*. *Mycologia*. 92 (3): 406-410.
- Kaczorek E, Chrzanowski L, Pijanowska y Olszanowski A 2008 Yeast and bacteria cell hydrophobicity and hydrocarbon biodegradation in the presence of natural surfactants: rhamnolipides and saponins. *Bioresource Technology* 99(10): 4285-4291.
- Kohlmeyer J y Kohlmeyer E 1979 Marine mycology, the higher marine fungi. Academic press, New york.
- Martin KJ y Rygielwicz PT 2005 Fungal-specific PCR primers developed for analysis of the ITS region of environmental DNA extracts. *BMC Microbiology* 5(28). doi:10.1186/1471-2180-5-28.
- Nikolcheva LG y Bärlocher F 2004 Taxon-specific fungal primers reveal unexpectedly high diversity during leaf decomposition in a stream. *Mycological progress* 3(1): 41-49.
- Polman JK, Stoner DL y Delezene-Briggs KM 1994 Lignin and dimethoxybenzyl alcohol by *Penicillium citrinum*. *Journal of Industrial Microbiology* 13: 292-299.

Romero-Olivares AL, Baptista-Rosas RC, Escalante AE, Bullock SH, y Riquelme M 2012 Distribution patterns of Dikarya fungi in unexplored arid and semiarid areas of Baja California, Mexico. *Fungal Ecology* En prensa.

## **ESTRUCTURA DE LA BASE DE DATOS DE XIXIMI-2**

Responsable: M. en C. Vicente Ferreira

### **Base de datos: Excel**

Los datos entregados por los responsables de cada sección fueron compilados en tablas Excel (MS corp). Cada tabla incluye los metadatos y las variables primarias que se obtuvieron para cada estación y cada profundidad y representa un registro completo de variables que permite la comparación rápida entre ellas. Las variables están documentados con las características de unidades y niveles de calidad que corresponden (ver Parámetros de Calidad, abajo).

### **Metadatos**

Son las variables comunes para cada estación y reflejan la identidad no repetitiva de la medición. Son considerados metadatos el nombre de estación, la posición geográfica (longitud este y latitud norte en formato de grados y fracción de grado), la fecha y hora del muestreo (en formato yyyy.mm.dd Thh.mm) y la profundidad del fondo en metros.

### **Variables primarias**

Son las variables obtenidas instrumentalmente de forma básica para cada estación. Proviene esencialmente de los sensores del CTD, que generan series de datos que tienen una alta frecuencia de medición tanto en el tiempo como en profundidad. Las variables medidas con estos sensores son: temperatura, salinidad (a partir de la conductividad), oxígeno disuelto y fluorescencia.

Para obtener un valor puntual correspondiente a la profundidad de muestreo con la roseta, los valores de estas variables fueron leídos de las series a las profundidades correspondientes a los disparos de las botellas Niskin y GoFlo..

Para la profundidad indicada como 0 m, se incluyen los valores de temperatura y salinidad del termosalinómetro del barco. Este instrumento colecta

agua por debajo de la línea de flotación, así que la determinación es solo indicativa de los valores en superficie.

### **Variables determinadas por sección**

Los valores de cada una de las variables son exactamente los mismos que entregaron los investigadores responsables. En algunos casos, cuando hubo iteración entre tablas, corresponden al último valor aceptado. Cuando no se colectó una muestra o cuando esta no se analizó, se presenta como una celda vacía. Los valores reportados como 0, indican que sí hubo muestra y si se analizó, teniendo ese valor como resultado. Todos los casos reportados de la dupla estación-profundidad de cualquier tabla cumplen con las condiciones anteriores.

El archivo de Excel contiene secciones que corresponden a diferentes juegos de datos Tabla 34. Los datos primarios tienen exactamente los mismos valores en cada sección.

Tabla 34. Nombres de los archivos que conforman la base de datos correspondiente al crucero oceanográfico XIXIMI-2. Se incluyen archivos con datos correspondientes al crucero oceanográfico XIXIMI-1 solo para variables que fueron modificadas o complementadas.

NOMBRE DEL ARCHIVO	CONTENIDO	INVESTIGADOR RESPONSABLE
<b>COLUMNA DE AGUA</b>		
XIXIMI2-HIDROGRAFÍA	TEMPERATURA, SALINIDAD	Dr. Julio Sheibaum
XIXIMI2-CID-AT	OXÍGENO, FLUORESCENCIA	Dr. Martín Hernández-Ayón
XIXIMI2-ISÓTOPOS-CID	CARBÓN INORGÁNICO DISUELTO (CID); ALCALINIDAD TOTAL	Dr. Juan Carlos Herguera
XIXIMI2-ISÓTOPOS-MOP	ISÓTOPOS ESTABLES (13C) EN CARBÓN INORGÁNICO DISUELTO	Dr. Juan Carlos Herguera
XIXIMI2-ISÓTOPOS-ZOOPLANCTON	ISÓTOPOS ESTABLES (15N Y 13C) EN MATERIA ORGÁNICA PARTICULADA	Dra. Sharon Herzka
XIXIMI2-NUTRIENTES-COD	ISÓTOPOS ESTABLES (15N Y 13C) EN <i>Copepoda</i> y <i>Euphausida</i>	Dr. Victor Camacho
XIXIMI2-METALES-TRAZA-AGUA	NITRATO, NITRITO, FOSFATO, SILICATO Y CARBÓN ORGÁNICO DISUELTO	Dra. Lucila Lares
XIXIMI2-METALES-TRAZA-AGUA	Ni, Cu, Co, V EN COLUMNA DE AGUA	
<b>BIOVARIABLES</b>		
XIXIMI2-FITOPLANCTON	FITOPLANCTON EN COLUMNA DE AGUA	Dr. Rubén Lara
XIXIMI2-PIGMENTOS	PIGMENTOS FOTOSINTÉTICOS EN COLUMNA DE AGUA	Dr. Eduardo Millán
XIXIMI2-ZOOPLANCTON	ZOOPLANCTON, ICTIOPLANCTON	Dr. Jaime Farber
XIXIMI2-BACTERIAS	BACTERIAS EN COLUMNA DE AGUA	
<b>SEDIMENTO</b>		
XIXIMI2-HONGOS	HONGOS EN SEDIMENTOS	Dra. Merixtell Riquelme
XIXIMI2-ISÓTOPOS-SEDIMENTO	ISÓTOPOS ESTABLES (C YN ) EN SEDIMENTO; CALCITA, TERRÍGENOS, AGUA	Dr. Juan Carlos Herguera
XIXIMI2-MACROFAUNA	MACROFAUNA EN SEDIMENTOS (MAYOR 0.5 mm)	Dra. Victoria Díaz
XIXIMI2-MEIOFAUNA	MEIOFAUNA EN SEDIMENTOS (MENOR 0.5 mm)	Dr. Axayácatl Rocha
XIXIMI2-METALES-TRAZA-SEDIMENTO	Mn, Fe, Cu, Ni, Cd, Co, Pb EN SEDIMENTO	Dr. Miguel Ángel Huerta
<b>XIXIMI1 ACTUALIZADO/ AGREGADO</b>		
XIXIMI-ZOOPLANCTON-CORREGIDA-NOV2012	CORRECCIONES A DATOS DE XIXIMI1	Dr. Jaime Farber
XIXIMI1-ISÓTOPOS-ZOOPLANCTON	ISÓTOPOS ESTABLES (CYN) EN ZOOPLANCTON	Dra. Sharon Herzka

Tabla 27. (continuación)

**CONCENTRADOS**

**XIXIMI-2**

XIXIMI2-CONCENTRADO-AGUA	HIDROGRAFÍA, CID, AT, pH, NUTRIENTES, FITOPLANCTON	Varios
XIXIMI2-CONCENTRADO- SEDIMENTO	COMPOSICIÓN, ISÓTOPOS, MEIOFAUNA, MACROFAUNA, HONGOS	Varios

**COMPILACIONES**

**XIXIMI1-XIXIMI2**

X1-X2-CONCENTRADO- SEDIMENTO	COMPOSICIÓN, ISÓTOPOS, MEIOFAUNA, MACROFAUNA, HONGOS	Varios
X1-X2-ISÓTOPOS- ZOOPLANCTON	ISÓTOPOS ESTABLES (C Y N) EN ZOOPLANCTON	Varios
X1-X2-ZOOPLANKTON	ZOOPLANCTON-ICTIOPLANCTON	Varios

Las secciones presentadas en la tabla anterior, incluyen valores reportados para el crucero XIXIMI-1, relacionados con nuevos datos o a datos corregidos posteriores al reporte final de ese crucero. Asimismo, se incluyen secciones donde se agrupan los resultados para ambos cruceros.

**Base de datos: Ocean Data View (ODV)**

En cada carpeta de la base de datos correspondiente a las secciones de este reporte, está incluido el archivo ODV y su base asociada, que incluye los valores reportados así como las metavARIABLES generales del crucero y las variables físicas asociadas.

EL software utilizado fue Ocean Data View (ODV) que de manera libre se entrega a los solicitantes para su uso en investigación y enseñanza por el Alfred Wegener Institut (AWI). Ocean Data View (ODV) <http://odv.awi.de>. La versión utilizada es la 4.5.1. OceanDataView (ODV). ODV permite el acceso, análisis activo y visualización de datos en forma de perfil o de serie temporal o espacial.

Basada en la estructura de almacenamiento del programa ODV, se diseñó el formato de la base de datos. Esta estructura permite agrupar los resultados de los diferentes parámetros y determinaciones resultantes del proyecto tanto en Excel como ODV. El utilizar ODV plataforma permite el almacenamiento



organizado de los datos y la obtención rápida de figuras de distribuciones de parámetro vs. parámetro, de secciones verticales de valores de los parámetros y de la generación de iso-superficies de una manera bastante accesible. También permite la subselección de datos selectos. Muchas de las figuras que se presentan en este informe se generaron en ODV.

El formato general de la base es NetCDF, en la cual la estructura básica esta dividida en dimensiones, variables y atributos. La unidad fundamental es la estación.

Las colecciones de datos y los archivos parciales de las bases son independientes de la plataforma computacional y pueden ser utilizados en todos los sistemas (Windows, Mac OSX, Linux y UNIX) sin modificación.

La estructura interna de la base permite el almacenamiento de grandes conjuntos de datos de numerosas estaciones de una manera comprimida y accesible. Eso permite tener un ilimitado numero de variables, tipos de datos específicos y parámetros de calidad determinados por el usuario tanto para los datos como para los metadatos.

La estructura de los metadatos incluidos en la base de datos diseñada está basada en los Estándares Internacionales ISO 19115:2003 recomendados para colecciones de datos en forma discreta o de serie, y consiste en bases de datos de orden geográfico que incluyen características de las propiedades tanto de los valores como de la posición.

Los vocabularios utilizados (nombres de variables) siguen lo propuesto por Marine Data Interoperability: Vocabularies References. Lo mismo se aplica a las unidades de cada variable (<http://marinemetadata.org/>). Esto se puede ajustar en la organización final de la base de datos global; sin embargo se requiere que desde el inicio se especifiquen correctamente las unidades y los parámetros.

### **Parámetros de calidad**

Asociado a cada medición, se agregó un valor de calidad (QF) asignado de acuerdo a la siguiente clasificación propuesta, donde los posibles valores son 0, 1, 4, y 8.

Representando:

- 0 = buena calidad
- 1= calidad desconocida
- 4= calidad cuestionable (posiblemente corregible)
- 8= mala calidad

Los parámetros de calidad fueron designados por los investigadores responsables de cada juego de datos.

## **Referencias**

Marine Data Interoperability: Vocabularies References. <http://marinemetadata.org/>

Schlitzer R, Ocean Data View, 2011 <http://odv.awi.de>

## CONCLUSIONES

Los resultados de este informe complementan la información generada en el proyecto “ESTABLECIMIENTO DE LÍNEA DE BASE EN AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO EN RESPUESTA AL DERRAME PETROLERO ASOCIADO A LA PLATAFORMA DEEPWATER HORIZON”, dentro del cual se reportaron los resultados del crucero oceanográfico XIXIMI-2. Continuamos con la necesaria tarea de establecer la línea de base de las condiciones oceanográficas, biogeoquímicas y ecológicas del GM considerando el aún escaso conocimiento que existe sobre esta extensa y estratégica región de las aguas patrimoniales de México. Es muy importante considerar que este proyecto se ha llevado a cabo con el compromiso de que los datos serán entregados al INE-SEMARNAT para la consulta futura de diversas instancias del gobierno que provea de la información relevante y necesaria dentro de los contextos que se consideren convenientes.

En los análisis realizados hasta la fecha en la región de aguas profundas en la ZEE del GM no se aprecian indicios claros o unívocos del derrame de gran escala de hidrocarburos y gases asociados provenientes del pozo Macondo. Sin embargo, sí se presentan anomalías en algunos de los análisis que se han generado a lo largo de este proyecto que aún requieren de explicación. La evaluación integral de los impactos del derrame debe de considerar las características del plan de muestreo que se implementó con la finalidad de establecer la línea de base en una red de estaciones puntuales que abarcan una extensa región. Tampoco se evaluaron los posibles efectos del derrame sobre niveles tróficos superiores. Estos resultados resaltan la necesidad primordial de continuar con el esfuerzo de continuar con el establecimiento de la línea de base de las condiciones físicas, biogeoquímicas y ecológicas de una zona relativamente poco conocida en la ZEE de México.

## RECOMENDACIONES

Consideramos de suma importancia continuar con este esfuerzo para el establecimiento de línea de base en el Golfo de México. Considerando la variabilidad física, bioquímica y ecológica del gran sistema del Golfo de México, la tarea de hacer una caracterización integral adecuada solo se puede alcanzar realísticamente si se mantiene un programa de evaluación y monitoreo de esta área tan extensa y desconocida como es la región de aguas profundas del Golfo de México. Tarea imprescindible para poder distinguir entre los efectos de la variabilidad natural y los disturbios antropogénicos de gran escala, como fue el derrame petrolero del pozo Macondo.

## REFERENCIAS

Herguera JC, Herzka S, Ferreira V, Flores C, Siqueiros A, Pedraza A 2012 Reporte de la campaña XIXIMI-2 2 al 16 julio 2011 Golfo de México, buque oceanográfico Justo Sierra

Herzka S, Herguera JC, Licea A, Sheinbaum J y Ferreira V 2012 Establecimiento de la línea base en aguas profundas del Golfo de México en respuesta al derrame petrolero asociado a la plataforma DeepwaterHorizon. Informe final 294 pp.

## GLOSARIO DE TÉRMINOS

AATC: Agua del Atlántico Tropical Central

AIW: Antarctic Intermediate Water

CCAR: Colorado Center for Aerodynamics Research, Universidad de Colorado

CID: Carbono inorgánico disuelto

COD: Carbono orgánico disuelto

OD: Oxígeno disuelto

ODV: Ocean Data View, programa de exploración y visualización de datos oceanográficos (<http://odv.awi.de/>).

SUW: Subtropical Under-Water

TACW: Tropical Atlantic Central Water

WOCE: World Ocean Circulation Experiment

## CRÉDITOS

El proyecto “**FASE II ESTABLECIMIENTO DE LÍNEA DE BASE EN AGUAS PROFUNDAS DEL GOLFO DE MÉXICO EN RESPUESTA AL DERRAME PETROLERO ASOCIADO A LA PLATAFORMA DEEPWATER HORIZON**” fue coordinado por el INE y financiado por la Comisión Nacional para el Uso y Conservación de la Biodiversidad (CONABIO) y de manera complementaria por el Fondo Institucional (FOINS) del CONACYT.

Este proyecto no se hubiese realizado sin el esfuerzo comprometido de coordinación y gestión de financiamiento del Dr. Eduardo Peters Recagno, Director General de Investigación de Ordenamiento Ecológico y Conservación de los Ecosistemas, el Dr. Víctor Gutiérrez Avedoy, Director General del Centro Nacional de Investigación y Capacitación Ambiental, y la Dra. Margarita Caso Chávez, Directora de Conservación de los Ecosistemas del INE-SEMARNAT. De manera oportuna, reconocieron la importancia de establecer una línea de base de las condiciones oceanográficas del Golfo de México para contribuir al entendimiento de una de las zonas menos conocidas del país, evaluar los posibles impactos del derrame petrolero, y sentar las bases para tener la capacidad de evaluar otros impactos en el futuro. Les agradecemos sinceramente su confianza y apoyo.

Desde un inicio, el apoyo decidido y visionario del Dr. Federico Graef Ziehl, Director General del CICESE, fue fundamental. Respaldó un proyecto ambicioso que surgió de un momento a otro, que integraba el esfuerzo de varias instituciones, y cuyos resultados serán útiles para el país a largo plazo.

Un enorme equipo de personas apoyaron en diversos aspectos administrativos de este proyecto. Agradecemos a la Maestra Leonor Falcón, Directora Administrativa del CICESE, y su equipo de trabajo por sus gestiones y apoyo. Ruby Granados fue de gran apoyo en la elaboración y firma de los convenios. Julieta Castro, Delegada Administrativa de la División de Oceanología, y nuestra secretaria, Perla Soto, llevaron a cabo y le dieron seguimiento a cientos de solicitudes y en la elaboración de numerosos contratos. En particular, Julieta Castro supo orientarnos y ayudarnos incansablemente a lo largo de este proyecto. El personal del Departamento de Compras nos brindaron su cooperación y apoyo para conseguir e importar el material de trabajo.

La tripulación del *BO Justo Sierra* cooperaron incansable y cordialmente para conseguir los objetivos propuestos para la campaña. Agradecemos también a los técnicos electrónicos del CICESE, Ricardo Solís, Carlos Flores y Miguel Ojeda, sin cuyo trabajo, ayuda, tesón y motivación no habría sido posible la recolecta de

datos y muestras sin interrupciones de sol a sol a lo largo de toda la campaña. Así mismo, el Ocean. Arturo Siqueiros del IIO-UABC aportó su experiencia práctica y organizativa a los preparativos para el crucero y al crucero en sí, y trabajando infatigablemente para asegurarse que el trabajo de todos saliese adelante. Le agradecemos a todos los participantes de la campaña XIXIMI-2 por su gran esfuerzo, que contribuyó mucho a que podamos cumplir con nuestros objetivos (Figura 161). El M en C Joaquín García nos ayudó con los preparativos del equipo electrónico antes de zarpar y estuvo pendiente de nuestras actividades durante el crucero. Reconocemos su esfuerzo para lograr que los datos hidrográficos que se incluyen en este informe sean de la calidad adecuada.

La M. En C. Reyna Barradas apoyó durante y el desarrollo de la organización del crucero, la revisión de documentos, el seguimiento de compras, la preparación de muestras para diversos tipos de análisis, captura de datos, y la coordinación de reuniones de trabajo. También trabajó en la compilación minuciosa de este informe. Siempre ha mantenido una actitud positiva y le estamos muy agradecidos.

La extensa experiencia en cruceros oceanográficos del M. en C. Vicente Ferreira, particularmente en la toma de muestras de sedimentos, aportó sustancialmente al éxito de la campaña. También puso a nuestra disposición sus talentos computacionales. Integró y manejó la base de datos, exigiéndonos a todos cumplir con el esquema de organización y estándares de calidad que esto implica. Asistió en la generación de un número incontable de gráficas que los investigadores solicitaron para entender y presentar sus datos, y brindó comentarios constructivos y bien fundamentados en su conocimiento de la oceanografía en general.

Por último, los coordinadores de este proyecto, Sharon Herzka, Juan Carlos Herguera, Alexei Licea y Julio Sheinbaum, agradecemos a cada uno de los investigadores del CICESE y del IIO-UABC que participaron en este proyecto. Reconocemos su voluntad y disposición de abrir las puertas de sus laboratorios para cumplir con las metas comunes de un proyecto sumamente ambicioso que surgió de un momento a otro. Somos conscientes del compromiso y dedicación que este proyecto a implicado. Ha sido y sigue siendo un enorme reto para todos.



Figura 161. Tripulación científica participante en el crucero oceanográfico XIXIMI-2 (2-16 junio 2011). De izquierda a derecha: Lucía Salazar y Marco Antonio Tenorio (Instituto Mexicano del Petróleo), Artúro Siqueiros (UABC), Jairo Fuentes (CICESE), Angélica Pedraza (UABC), Reyna Barradas (CICESE), Erica Gutiérrez (CICESE/UABC), Vicente Ferreira (CICESE), Ricardo González (CICESE), Carlos Flores (CICESE), José Antonio Mata (CICESE), Eduardo Millán (CICESE), Guadalupe Cabrales (CICESE), Carlos Morales (CICESE), Gabriela Cervantes (UABC), Isabel Hernández (CICESE), Citlali Herguera (CICESE), José Miguel Ojeda (CICESE), Sharon Herzka (CICESE), Ricardo Solís (CICESE) y Juan Carlos Herguera (CICESE).

## ANEXOS

Anexo 1. Tabla de concentraciones de Vanadio para cada muestra.

Muestra			Muestra		
Estación	Profundidad (m)	[V] nM	Estación	Profundidad (m)	[V] nM
<b>XI-2-E15</b>	10	26.8	<b>XI-2-E8-</b>	10	25.1
	150	28.1		150	19.2
	Min O2 400	24.2		Min O2 500	28.2
	600	27.5		600	31.1
	1000	29.8		1000	33.6
	Fondo 2350	27.3			
<b>XI-2-E16</b>	10	23.6	<b>XI-2-E32-</b>	10	24.9
	150	27.7		150	33.6
	Min O2 500	31.7		Min O2 398	36.2
	600	29.0		600	27.8
	1000	30.2		800	35.8
	Fondo 3225	26.1		Fondo 1006	24.4
<b>XI-2-E17</b>	10	25.2	<b>XI-2-E31-</b>	10	21.8
	150	25.1		150	28.6
	Min O2 400	20.1		Min O2 500	28.2
	600	27.3		600	36.8
	1000	27.8		1000	38.3
	Fondo 3660	26.5		Fondo 3601	19.1
<b>XI-2-E18</b>	10	26.0	<b>XI-2-E30-</b>	10	22.2
	150	22.4		150	19.8
	Min O2 460	18.3		Min O2 400	31.9
	600	26.3		600	39.6
	1000	24.0		1000	33.0
	Fondo 3596	24.6		Fondo 2722	28.7
<b>XI-2-E19</b>	10	26.4	<b>XI-2-E27-</b>	10	29.1
	150	28.8		150	29.9
	Min O2 423	26.8		Min O2 500	31.1
	600	28.4		600	38.3
	1000	26.6		800	24.2
	Fondo 3484	27.6		Fondo 900	25.4
			<b>XI-2-E25</b>	10	



Continuación Anexo 1

<b>XI-2-E20</b>	10	19.1			150	20.9
	150	26.4			Min O2	23.8
	Min O2 401	26.7			1000	32.6
	600	28.8			Fondo	20.8
	1000	26.5		<b>XI-2-E2</b>	10	25.9
	Fondo 3507	28.2			150	27.3
<b>XI-2-E21</b>	10	23.2			Min O2 400	25.6
	150	27.6			600	21.0
	Min O2 500	24.5			800	27.3
	600	29.9			1000	11.0
	1000	26.2		<b>XI-2-E3B</b>	10	24.8
	Fondo 3500	27.7			150	21.2
<b>XI-2-E22</b>	10	20.5			Min O2 400	29.4
	150	23.0			600	30.7
	Min O2 400 m	22.2			1000	16.0
	1000	26.0			Fondo 3037	19.1
	Fondo 3422	22.4		<b>XI-2-E3</b>	10	21.3
<b>XI-2-E23</b>	150	23.9			150	20.9
	Min O2 700	25.2			Min O2 400	29.1
	600	28.4			600	34.6
	1000	30.1			1000	28.2
	Fondo 3387	28.2		Fondo 3722	14.7	
<b>XI-2-E24</b>	10	21.8		<b>XI-2-E44</b>	10	
	150	24.2			150	28.3
	Min O2 692	32.0			Min O2 400	25.9
	600	31.0			600	26.9
	1000	28.2			1000	31.4
	Fondo 3309	28.3			Fondo 3710	20.7
<b>XI-2-E12-</b>	10	23.0		<b>XI-2-E33</b>	10	26.6
	150	38.5			150	
	Min O2 400	34.4			Min O2 400	23.1
	600	33.8			600	29.0
	1000	32.2			1000	27.2
	Fondo 2250	30.0			Fondo 3682	

Continuación Anexo 1

<b>XI-2-E11-</b>	10	26.8		<b>XI-2-E47</b>	10	29.5
	150	34.0			150	26.2
	Min O2 500	35.2			Min O2 400	35.2
	600	24.6			600	31.5
	800	33.0			800	27.9
	1000	24.2			Fondo 1000	20.9
<b>XI-2-E10-</b>	10	27.9				
	150	31.3			máx	38.5
	Min O2 400	32.9			mín	18.3
	600	33.8			promedio	27.3
	1000	25.7			desv est	3.8
	Fondo 3723	29.9				

Anexo 2. Hidrocarburos y PAHs XIXIMI-2 Final. Por su tamaño se entrega en formato digital (Anexo2\_HidrocarburosPAHs).

Anexo 3. Diatomeas y Dinoflagelados identificados en muestras obtenidas en XIXIMI-2. Por su tamaño se entrega en formato digital (Anexo3\_Fitoplancton).

Anexo 4.- Distribución espacial en superficie de los principales géneros del nano-microfitoplancton (células L-1) recolectadas durante el crucero XIXIMI-2 en la zona de aguas profundas del Golfo de México. Los valores más altos indican la presencia de géneros raros. (Por su tamaño se entrega en formato digital (Anexo4\_Distribucion\_NanoMicroFitoplancton)).

Anexo 5. Distribución espacial a la profundidad de 50 m de los principales géneros del nano-microfitoplancton (células L<sup>-1</sup>) recolectadas durante el crucero XIXIMI-2 en la zona de aguas profundas del Golfo de México. Los valores más altos indican la presencia de géneros raros. Por su tamaño se entrega en formato digital (Anexo5\_Distribucion\_NanoMicroFitoplancton\_50m).

Anexo 6. Macrofauna, XIXIMI-2. Por sus dimensiones se entrega en formato digital (Anexo6\_Macrofauna).

Anexo 7. Carta Dr. Victor Camacho, justificación de retraso en determinación de Carbono Orgánico Disuelto. Se anexa formato electrónico (Anexo7\_carta\_Camacho\_COD.pdf).

Anexo 8. Carta Dra. Lucila Lares, justificación de retraso en análisis de metales traza en la columna de agua. Se entrega en formato digital (Anexo8\_carta\_Lares.pdf).

Anexo 9. Carta Dr. Vinicio Macías, justificación retraso en el análisis de hidrocarburos en la columna de agua. Se entrega en formato digital (Anexo9\_carta\_Macias.pdf).

Anexo 10. Carta Dr. Licea, justificación de retraso en entrega de resultados análisis de bacterias en la columna de agua. Se entrega en formato digital (Anexo10\_carta\_Licea.pdf).

Anexo 11. Carta Dr. Rubén Lara justificando retraso en análisis de citometría. Se entrega en formato digital (Anexo11\_carta\_Lara.pdf).

Anexo 12. Carta Dr. Miguel Angel Huerta, justificación de retraso en determinación de contenido de metales en sedimentos del fondo marino. Se entrega en formato digital (Anexo12\_Huerta\_seds.pdf).

Anexo 13. Carta Dr. Juan Carlos Herguera, justificación en retraso en informe sobre dataciones de radiocarbono 14 sobre el componente carbonatado de los sedimentos. Se entrega en formato digital (Anexo 13\_Herguera\_seds.pdf).